POLITECHNIKA KRAKOWSKA

im. Tadeusza Kościuszki

Wydział Inżynierii Lądowej

Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych

Rozprawa doktorska

WŁAŚCIWOŚCI GRUNTOBETONÓW ZE ZBROJENIEM ROZPROSZONYM

MGR INŻ. KRYSTIAN BRASSE

PROMOTOR: DR HAB. INŻ. TOMASZ TRACZ, PROF. PK

PROMOTOR POMOCNICZY: DR INŻ. TOMASZ ZDEB

KRAKÓW, PAŹDZIERNIK, 2022

SPIS TREŚCI

SPIS TREŚCI 2

1 WSTĘP 4

2 PRZEGLĄD LITERATURY 6

2.1 WZMACNIANIE GRUNTU 6

2.1.1 Formalna klasyfikacja metod wzmacniania gruntu 6

2.1.2 Wgłębne wzmacnianie gruntu 6

2.2 GRUNTOBETON 7

2.2.1 Technologie wgłębnego mieszania gruntu in-situ 7

2.2.2 Technologia wykonywania ścian gruntobetonowych 11

2.2.3 Zakres prowadzonych dotychczas Badań gruntobetonów 11

2.3 GRUNTOBETON ZE ZBROJENIEM ROZPROSZONYM 14

2.3.1 Zasadność wzmacniania gruntobetonu 14

2.3.2 Włókna do wzmacniania gruntobetonu 14

2.3.3 Charakterystyczne właściwości gruntobetonów ze zbrojeniem rozproszonym w świetle dotychczasowych badań 17

2.4 PODSUMOWANIE 31

3 CELE, TEZY ORAZ RAMOWY PROGRAM BADAŃ 33

3.1 CELE PRACY 33

3.2 TEZY PRACY 33

3.3 RAMOWY PROGRAM BADAŃ 34

4 PROJEKTOWANIE SKŁADÓW GRUNTOBETONÓW 35

4.1 STOSOWANE MATERIAŁY 35

4.2 PODSTAWOWE ZASADY KOMPONOWANIA SKŁADU GRUNTOBETONU 36

4.3 KONSYSTENCJA MIESZANEK GRUNTOBETONOWYCH 38

4.4 WILGOTNOŚĆ GRUNTOBETONÓW STWARDNIAŁYCH 41

4.5 PODSTAWOWE CECHY MECHANICZNE GRUNTOBETONÓW STWARDNIAŁYCH 41

4.6 SFORMUŁOWANIE OGÓLNYCH ZASAD PROJEKTOWANIA 46

5 PRZYCZEPNOŚĆ MATRYCY GRUNTOBETONOWEJ DO WŁÓKIEN 49

5.1 ZAKRES BADAŃ 49

5.2 METODYKA OCENY PRZYCZEPNOŚCI MATRYCY GRUNTOBETONOWEJ DO WŁÓKIEN 53

5.3 WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA 55

5.3.1 Naprężenia styczne 55

5.3.2 Długości krytyczne włókien 59

6 EFEKTYWNOŚĆ ZBROJENIA ROZPROSZONEGO FIBROGRUNTOBETONÓW 62

6.1 Zakres badań 62

6.2 Metodyka oceny efektywności zbrojenia rozproszonego fibrogruntobetonów 63

6.3 Wyniki badań i ich analiza 69

6.3.1 Wpływ włókien na wartości naprężeń LOP 69

6.3.1.1 Fibrogruntobeton z gruntu niespoistego 69

6.3.1.2 Fibrogruntobeton z gruntu spoistego 70

6.3.2 Wpływ włókien na wartości naprężeń MOR 71

6.3.2.1 Fibrogruntobeton z gruntu niespoistego 71

6.3.2.2 Fibrogruntobeton z gruntu spoistego 73

6.3.3 Wpływ włókien na wartości stosunku naprężeń MOR do naprężeń LOP 74

6.3.3.1 Fibrogruntobeton z gruntu niespoistego 75

6.3.3.2 Fibrogruntobeton z gruntu spoistego 76

6.3.4 Wpływ rodzaju włókien na wartość rozwarcia rysy, przy której rejestrowano wartości naprężeń MOR 77

7 BADANIA MODUŁU SPRĘŻYSTOŚCI FIBROGRUNTOBETONÓW 80

7.1 Zakres badań 80

7.2 Metodyka badania modułu sprężystości 81

7.3 Wyniki badań 84

8 BADANIA GRUNTOBETONÓW I FIBROGRUNTOBETONÓW W ISTNIEJĄCYCH OBIEKTACH 87

8.1 Zakres badań 87

8.2 Metodyka badań 87

8.3 Wyniki badań 89

9 WNIOSKI 96

9.1 Wnioski ogólne 96

9.2 Wnioski szczegółowe także o charakterze praktycznym 97

10 KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ 100

11 LITERATURA 101

12 ZAŁĄCZNIKI 107

12.1 Wyniki badań przyczepności matryc gruntobetonowych do włókien 108

12.2 Wyniki badań efektywności zbrojenia rozproszonego fibrogruntobetonów 115

1 WSTĘP

Tempo realizacji nowych inwestycji, wzrasta z dnia na dzień. Obecna gęstość zabudowy obszarów zurbanizowanych oraz ograniczona ilość dostępnego nośnego podłoża gruntowego coraz częściej zmuszają do budowania w trudnych warunkach gruntowych. Dotyczy to zarówno budownictwa kubaturowego, jak również budownictwa komunikacyjnego. Współczesna inżynieria geotechniczna staje więc często przed wyzwaniem wzmacniania podłoża, tak aby mogło ono stać się integralną częścią nowopowstałych obiektów inżynierskich. Wyzwanie to jest tym większe, że stale dąży się do tego, aby przyjęte rozwiązania charakteryzowały się prostotą wykonania, niskimi kosztami realizacji oraz były przyjazne dla środowiska. Dzięki temu jesteśmy świadkami stałego rozwoju wszystkich obszarów inżynierii geotechnicznej. Inżynieria maszyn stosowanych w pracach geotechnicznych, metody i techniki ulepszania podłoża oraz inżynieria stosowanych w geotechnice materiałów muszą stale poszukiwać nowych, coraz lepszych rozwiązań. Ważnym jest, aby postępy w rozwoju poszczególnych obszarów inżynierii geotechnicznej łączyły się ze sobą i wzajemnie się przenikały tak, aby razem tworzyły zamierzony efekt, który jest odpowiedzią na wyzwanie realizacji obiektów inżynierskich w niesprzyjających warunkach gruntowych.

Pośród wielu metod wzmacniania podłoża gruntowego uwagę zwraca technika wgłębnego mieszania gruntu ze spoiwem mineralnym metodami in-situ. Umożliwia ona bezpośrednią modyfikację właściwości gruntu bez konieczności jego wydobywania na powierzchnię. Technika ta jest odpowiedzią na wymagania stawiane przez współczesną inżynierię geotechniczną, gdyż pozwala na częściową eliminację negatywnych oddziaływań na środowisko, obniża koszty i pozwala na przyspieszenie tempa prowadzonych prac. Zabieg wprowadzenia do gruntu spoiwa mineralnego i ich wgłębnego wymieszania skutkuje powstaniem kompozytu zwanego gruntobetonem lub gruntocementem.

Dostępna dotychczas technologia wgłębnego mieszania gruntu nie pozwalała na uzyskanie jednorodnego, homogenicznego materiału. Obserwacje prowadzone w praktyce inżynierskiej wskazują, iż często względy technologiczne determinowały skład gruntobetonów, a tworzony materiał charakteryzował się dużą niejednorodnością właściwości mechanicznych. Tematyka projektowania składu gruntobetonów w celu osiągania pożądanych właściwości nie była dotychczas szerzej poruszana, co skutkowało ograniczoną efektywnością uzyskiwanego wzmocnienia. Dlatego realizacje w technologii wgłębnego mieszania gruntu in-situ wymagają nie tylko doświadczenia i praktyki, lecz również właściwego, inżynierskiego zaprojektowania. Bardzo szybko rozwijający się przemysł maszyn stosowanych do wgłębnego mieszania daje nam obecnie dużo szersze możliwości sterowania procesem homogenizacji komponentów gruntobetonów.

Postęp inżynierii maszyn stosowanych w pracach geotechnicznych pozwala na poszukiwanie nowych zastosowań gruntobetonów w konstrukcjach o różnym przeznaczeniu. Uzasadniona staje się więc próba opracowania kompleksowego rozwiązania materiałowo-technologicznego, które pozwoli na

zwiększenie funkcjonalności konstrukcji geoinżynierskich wykonanych z gruntobetonów. W tym celu wymagane jest więc dokładne rozpoznanie właściwości fizyko-mechanicznych gruntobetonów wytwarzanych z udziałem nowoczesnych spoiw mineralnych. Z tego też powodu zrealizowany został projekt *POIR.04.01.04-00-0057/15 – Technologia ścian fibrogruntobetonowych do realizacji szczelnych obudów wykopów*, którego byłem współwykonawcą. Głównym przedmiotem badań realizowanych w ramach tegoż projektu było wprowadzenie do mineralnej matrycy gruntobetonowej zbrojenia rozproszonego w postaci syntetycznych włókien. W trakcie trwania projektu dostrzeżono potrzebę rozwinięcia badań poświęconych gruntobetonom i fibrogruntobetonom, co uczyniono w ramach omawianej tu pracy doktorskiej.

2 PRZEGLĄD LITERATURY

2.1 WZMACNIANIE GRUNTU

2.1.1 FORMALNA KLASYFIKACJA METOD WZMACNIANIA GRUNTU

Wzmacnianie gruntu jest od dawna znanym zabiegiem w inżynierii geotechnicznej. Szybki rozwój tej techniki na przestrzeni lat spowodował, że obecnie istnieje wiele metod wzmacniania słabego podłoża. Równie szybko dostrzeżono potrzebę klasyfikacji tych metod. Na początku lat 80-tych Mitchell [1] sklasyfikował je formalnie w sześciu kategoriach: głębokie zagęszczenie gruntów niespoistych in-situ, wstępna kompresja z i bez pionowych odpływów, iniekcja i spoinowanie, stabilizacja domieszkami, stabilizacja termiczna oraz zbrojenie gruntu. W roku 2000 Terashi i Juran [2] uzupełnili tą klasyfikację o kolejną kategorię: wymianę gruntu. Komitet techniczny TC17 Ground Improvement, działający w ramach International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering w swoim raporcie z roku 2009 [3] przedstawia inną klasyfikację metod wzmacniania gruntu. Metody zostały tam sklasyfikowane w pięciu kategoriach w zależności od tego czy do gruntu wprowadzane są substancje obce czy też nie. Kolejnym czynnikiem decydującym o przydziale do danej kategorii jest rodzaj wzmacnianego gruntu: spoisty lub niespoisty. Tym sposobem wyróżniono: wzmacnianie podłoża bez domieszek w gruntach niespoistych lub materiałach wypełniających, wzmacnianie podłoża bez domieszek w gruntach spoistych, wzmacnianie podłoża domieszkami lub inkluzją, wzmacnianie podłoża domieszkami w formie iniekcji oraz zbrojenie gruntu. Obszerne opracowanie dotyczące wzmacniania gruntu zostało opublikowane przez Chu et al. [4] jako materiały pokonferencyjne z 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering w Aleksandrii z 2009 r. Dokument ten szczegółowo opisuje wszystkie metody wzmacniania gruntu sklasyfikowane przez komitet techniczny TC17. Dodatkowo, w raporcie [3] umieszczono zapis, iż choć występują nieznaczne różnice w opisywanych przez Chu et al. metodach, komitet techniczny TC17 proponuje przyjęcie klasyfikacji prezentowanej w [4].

2.1.2 WGŁĘBNE WZMACNIANIE GRUNTU

Technologię wgłębnego mieszania gruntu in-situ określa się skrótem DMM – ang. Deep Mixing Method. Jednak, jak pisze Topolnicki [5], zarówno w Polsce, jak i w wielu innych krajach (poza USA) synonimem wgłębnego mieszania stała się nazwa DSM – ang. Deep Soil Mixing. W rzeczywistości skrót ten oznacza jedną z najczęściej stosowanych metod wgłębnego mieszania gruntu – metodę wykonywania kolumn DSM.

Metody mieszania gruntu in-situ klasyfikuje się jako wzmacnianie gruntu przy użyciu dodatków wiążących. Polegają one na wgłębnym wymieszaniu gruntu ze stabilizatorem, którym jest najczęściej spoiwo mineralne jak cement lub wapno. Skutkiem takiego działania jest uzyskane na drodze zachodzących reakcji fizyko-chemicznych wzmocnienie gruntu. Dzięki stabilizatorowi powstaje nowy

materiał o pożądanych właściwościach mechanicznych. Zakres materiałów możliwych do zastosowania jest szeroki, począwszy od popiołów lotnych, poprzez żużle, bitumy, żywice czy bentonit. Do wzmacniania słabego podłoża wykorzystuje się również specjalnie opracowane mieszanki, złożone z kilku wyżej wymienionych materiałów [5, 6].

Początki mieszania gruntu in-situ datuje się na lata 50-te dwudziestego wieku. Na przestrzeni lat na całym świecie technologia ta była rozwijana, co przełożyło się na powstanie licznych, dostępnych obecnie metod. Dostrzegając trudność w ich porównywaniu Topolnicki wprowadził umowny system ich klasyfikacji [7]. Uczynił to w oparciu o trzy cechy klasyfikowanych metod: sposób podawania spoiwa (w postaci suchej lub mokrej), sposób mieszania gruntu (mechaniczne, strumieniowe, hybrydowe) oraz budowę mieszadła powodującego mieszanie gruntu, przez które podawany jest zaczyn (wprowadzenie zaczynu na części lub na całej długości żerdzi wiertniczej).

Wgłębne mieszanie gruntu in-situ metodami „na sucho" stosuje się do gruntów silnie nawodnionych lub organicznych [8, 9]. Grunt mieszany jest wówczas ze stabilizatorem w formie sproszkowanej, a do wiązania spoiwa wykorzystywana jest woda gruntowa. Łęcki i Dojcz [10] zwracają uwagę, iż z tego względu projektowanie i wykonywanie wzmocnienia metodą „na sucho" powinno być poprzedzone szczegółowymi badaniami chemicznymi środowiska gruntowo-wodnego. Mieszanie gruntu „na sucho" możliwe jest tylko poprzez mieszanie mechaniczne spoiwa z gruntem na końcu żerdzi wiertniczej.

W przypadku wgłębnego mieszania gruntu „na mokro" pogrążaniu mieszadła towarzyszą iniekcja i równoczesne mieszanie gruntu z zawiesiną w formie zaczynu. Obejmuje ono wszystkie sposoby mieszania gruntu i wszystkie rodzaje mieszadeł stymulujących mieszanie. Należy zaznaczyć, że mieszanie strumieniowe oraz hybrydowe możliwe są do realizacji tylko poprzez wprowadzenie zaczynu do gruntu na końcu żerdzi wiertniczej.

Wśród technologii, w których realizowana jest obecnie metoda wgłębnego mieszania gruntu in situ na mokro wyróżnić można kolumny DSM (Deep Soil Mixing), iniekcję strumieniową Jet Grouting czy zyskującą coraz większą popularność technologię CDMM (Continuous Deep Mixing Method).

2.2 GRUNTOBETON

2.2.1 TECHNOLOGIE WGŁĘBNEGO MIESZANIA GRUNTU IN-SITU

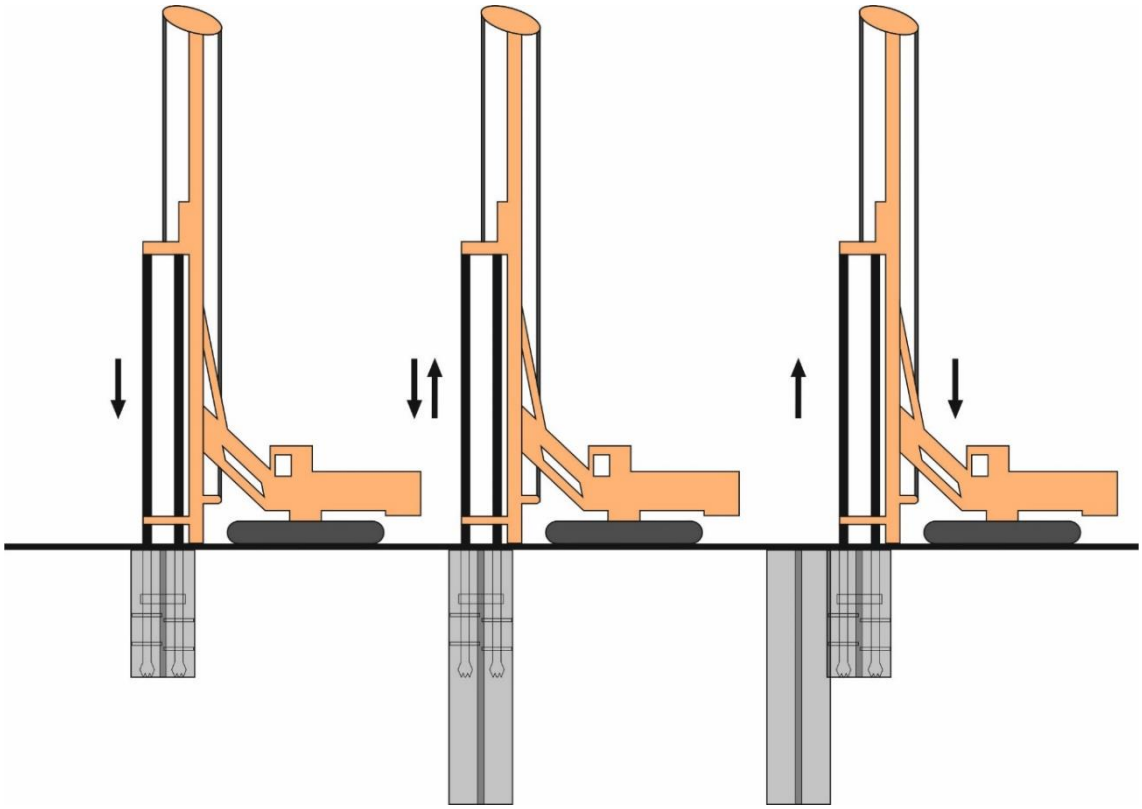
W dalszym ciągu przedstawiono w skrótowy sposób rożne, rozróżnione w literaturze metody wgłębnej homogenizacji i wzmacniania gruntu na miejscu budowy.

Kolumny DSM

Popularnym tematem w publikacjach technicznych i artykułach naukowych jest technologia kolumn DSM oraz przykłady jej zastosowania. Służy ona najczęściej do wzmacniania słabego podłoża nasypów komunikacyjnych lub fundamentów różnego rodzaju obiektów inżynierskich. Zakres zastosowania technologii obejmuje wg Rychlewskiego [11, 12, 13] wzmacnianie przede wszystkim słabych gruntów

spoistych, ale również gruntów niespoistych. Łęcki i Różański [9] opisują ten zakres począwszy od luźnych piasków, poprzez miękkoplastyczne i plastyczne gliny, aż po grunty organiczne (namuły) oraz grunty nasypowe o zróżnicowanej genezie i różnym uziarnieniu.

Technologia kolumn DSM polega na wprowadzeniu w podłoże mieszadła, które niszczy strukturę gruntu oraz miesza go z wprowadzanym materiałem wiążącym. Technologia ta obejmuje obydwa warianty mieszania: „na sucho" DSM-dry lub „na mokro" DSM-wet. Kanty et al. [14] podkreślają, iż technologia DSM-dry nie jest powszechnie stosowana w Polsce, głównie ze względu na jakościową różnicę otrzymanego produktu, w porównaniu do wzmocnienia metodą wgłębnego mieszania gruntu „na mokro". Dokładny opis metody DSM-wet przedstawiono w wielu publikacjach, m.in. [5, 11, 13, 15].



Rysunek 2.1 Schemat wzmacniania gruntu metodą kolumn DSM

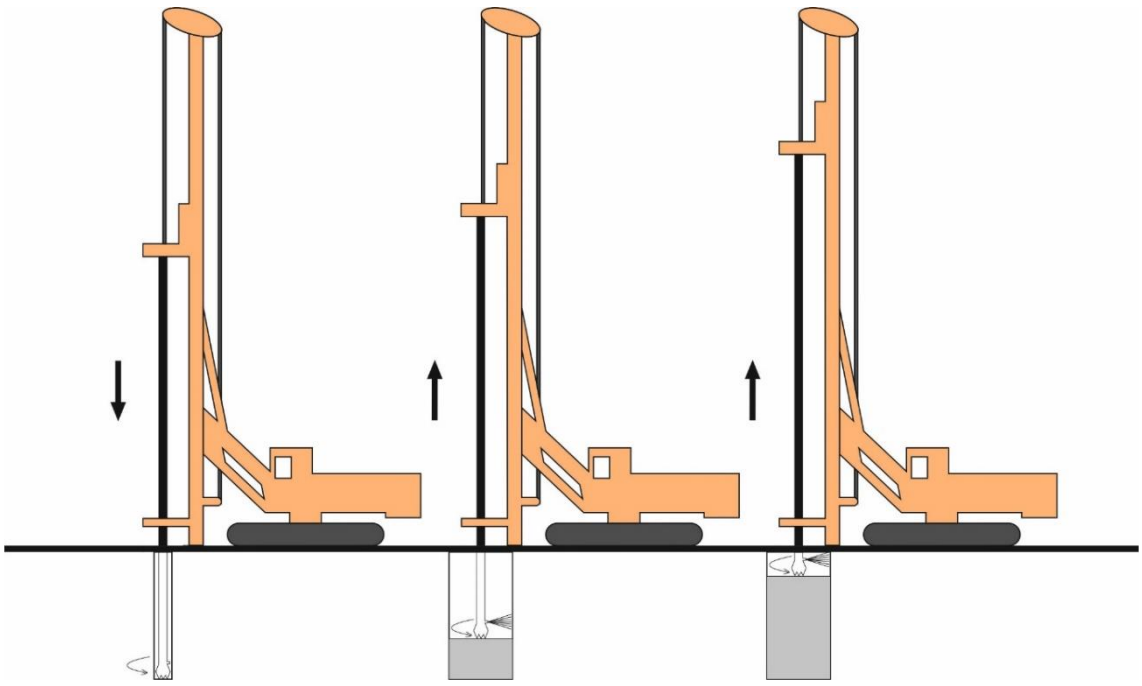
Należy zwrócić uwagę, iż na jakość wykonanej kolumny wpływ ma przede wszystkim grunt, w którym się ją wykonuje. Literatura podaje szerokie zakresy uzyskiwanych wytrzymałości. Wg Łęckiego i Różańskiego [9] jest to zakres od 1,0 MPa dla kolumn w gruntach organicznych do ponad 5,0 MPa dla kolumn w piaskach. Rychlewski [13] natomiast podaje dla tych samych gruntów zakres od 200 kPa aż do kilkunastu MPa.

Kanty [16] zwraca jednak uwagę, iż technologia DSM obarczona jest szeregiem czynników wpływających na często spotykaną dużą niejednorodność otrzymanego wzmocnienia. Wytworzony kompozyt charakteryzuje się dużą zmiennością parametrów wytrzymałościowych i różnym stopniem homogenizacji gruntobetonu na różnych wysokościach kolumny [13]. Wśród czynników wpływających

na efekt wzmocnienia Topolnicki [7] wyróżnia: fizyczne i chemiczne właściwości wzmacnianego gruntu, właściwości spoiwa, ilości i rodzaju dodatków, ilości wody, a także technikę i warunki mieszania oraz warunki i czas wiązania. Nowe realizacje wymagają więc nie tylko doświadczenia i praktyki, lecz również właściwego, inżynierskiego projektowania. Łęcki i Różański [9] podkreślają, iż projektowanie kolumny DSM musi uwzględniać sprawdzenie zarówno jej nośności wewnętrznej, jak również nośności gruntu wzdłuż kolumny i pod jej podstawą. W tym celu niezbędna jest znajomość lokalnych warunków gruntowych, założonych kryteriów wytrzymałościowych projektowanego wzmocnienia, jak również świadomość możliwości technicznych sprzętu oraz aspektów ekonomicznych [4]. W przypadku technologii DSM, w oparciu o praktykę i doświadczenie, podejmuje się próby udokumentowania zasad i aspektów projektowania kolumn DSM [15, 16, 17, 18, 19, 20].

Jet Grouting

Wśród iniekcji geotechnicznych wyróżnia się klasyczne iniekcje penetracyjne oraz zaawansowane technologie iniekcyjne m.in. iniekcje strumieniowe (Jet Grouting). W tej technologii mieszania gruntu ze stabilizatorem przy pomocy żerdzi proces wzmacniania podłoża gruntowego odbywa się pod wysokim ciśnieniem. Dzięki temu dochodzi do całkowitego zniszczenia naturalnej struktury gruntu wysokoenergetycznym strumieniem cieczy roboczej (najczęściej zaczynu cementowego, choć istnieje możliwość stosowania iniektów bitumicznych z dodatkiem bentonitu lub iniektów na bazie żywic syntetycznych) oraz do jego częściowej wymiany, gdyż nadmiar urobku wydobywany jest na powierzchnię. Skutkiem skrawania i mieszania gruntu przez strumień zaczynu cementowego jest ujednolicenie jego cech, a wytworzony w ten sposób kompozyt gruntobetonowy charakteryzuje się pożądaną wytrzymałością i małą przepuszczalnością [21, 22, 23].

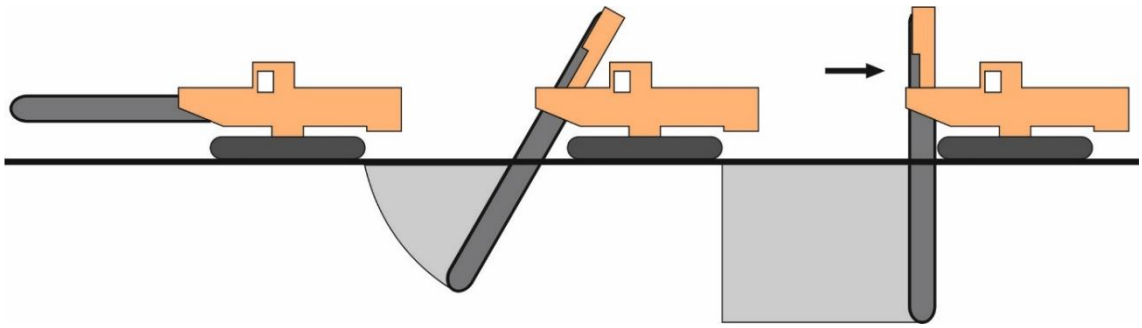


Rysunek 2.2 Schemat wzmacniania gruntu metodą iniekcji strumieniowej

Topolnicki [22] zwraca uwagę, iż niewątpliwą zaletą iniekcji strumieniowej jest możliwość stosowania w szerokim zakresie uziarnienia gruntu, od iłów, aż po żwiry. Warto zaznaczyć, iż strumień zaczynu w sposób satysfakcjonujący skrawa i miesza grunt, jednak nie umożliwia wymieszania materiału tworzonego elementu w kierunku pionowym. Dlatego też, w przypadku słabszych przewarstwień gruntu, uzyskany materiał w technologii Jet Grouting również będzie lokalnie słabszy. Dodatkowo, ze względu na duże zużycie zaczynu jest to technologia stosunkowo droga, o trudnym do zoptymalizowania dozowaniu zaczynu np. w porównaniu z technologią kolumn DSM.

Metoda CDMM

Z uwagi na istotę wgłębnego mieszania gruntu, a więc uzyskanie jednorodnej mieszaniny gruntu rodzimego z zaczynem cementowym, coraz większą popularność zyskuje obecnie technologia CDMM. Metoda ta polega na skrawaniu gruntu i mieszaniu go z zaczynem. Skrawanie gruntu jest możliwe dzięki zastosowaniu narzędzi różnego kształtu, zamocowanych do łańcucha stanowiącego zamkniętą pętlę, który porusza się na prowadnicy o długości od kilku do kilkunastu metrów. Tak więc, cechami charakterystycznymi tego narzędzia są jego budowa i zasada działania porównywalna do pracy popularnej piły łańcuchowej.



Rysunek 2.3 Schemat wzmacniania gruntu metodą CDMM

Pierwotnie, głównym przeznaczeniem tej metody było wykonywanie przesłon przeciwfiltracyjnych, jednak obecnie, dzięki rozwojowi inżynierii maszyn, znajduje coraz szersze zastosowanie. Technologia CDMM nie tylko zapewnia ciągłość utworzonej przegrody poprzez wyeliminowanie połączeń technologicznych, ale również ogranicza zużycie materiału stabilizującego (spoiwa mineralnego a dokładnie cementu), który wprowadzany jest do gruntu [24, 25, 26].

Realizacja technologii CDMM możliwa jest dzięki wykorzystaniu koparki łańcuchowej typu trencher, stąd też metoda ta określana jest jako „trenchmix" [24, 25, 27] lub „trench mixing" [26]. Niestety, początkowo charakteryzowała się ona niewielką prędkością pracy łańcucha roboczego, niewielką mocą (ok. 150 do 250 KM) mechaniczną układu przeniesienia napędu oraz ukośną pozycją pracy prowadnicy. Zmianę głębokości przesłony realizowano poprzez zmianę kąta nachylenia miecza, co skutkowało trudnościami w precyzyjnym utrzymywaniu trasy założeń projektowych. Ukośna pozycja robocza miecza powodowała również częściowe wydobywanie na powierzchnię większych fragmentów gruntu.

To wszystko przekładało się na niesatysfakcjonujący poziom wymieszania gruntu rodzimego z zaczynem cementowym lub cementowo-bentonitowym. Jednakże, obecnie na rynku funkcjonują nowoczesne maszyny do wykonywania robót w technologii CDMM – tzw. trenczmiksery. Charakteryzują się one pionową pozycją roboczą miecza i dużą prędkością przesuwu łańcucha roboczego (powyżej 120 m/min). Dzięki pionowej pozycji roboczej miecza grunt nie jest już wydobywany i odkładany na powierzchni, lecz skrawany i mieszany z dostarczaną do niego zawiesiną. Aktualnie wydajność maszyn znacznie wzrosła, gdyż obecnie stosuje się w nich hydrauliczny układ przeniesienia napędu, a moc silników spalinowych zwiększono do nawet 750 KM.

Tak usprawnione maszyny pozwalają na w pełni zadowalające zhomogenizowanie powstającego gruntobetonu. Dzięki temu parametry tego materiału są stałe na całej głębokości wykonanej konstrukcji.

2.2.2 TECHNOLOGIA WYKONYWANIA ŚCIAN GRUNTOBETONOWYCH

Obserwacje prowadzone w praktyce inżynierskiej wskazują, iż często względy technologiczne determinują skład gruntobetonów. Oznacza to, że ilość wtłaczanego zaczynu cementowego w trakcie mieszania gruntu oraz jego ciekłość wynika z potrzeby otrzymania homogenicznej mieszaniny, a jej konsystencja musi być dostosowana do efektywności urządzeń mieszających. Bardzo szybko rozwijający się przemysł maszyn stosowanych do wgłębnego mieszania, między innymi coraz powszechniej stosowana metoda CDMM, prowadzi do szerszych możliwości sterowania tym procesem. Możliwe jest więc zastosowanie tej technologii do wykonywania precyzyjnie projektowanych konstrukcji geotechnicznych i wzmocnień gruntu pod obiekty w każdym rodzaju budownictwa. Przykładem takich konstrukcji są gruntobetonowe ściany oporowe, zabezpieczające głębokie wykopy przed parciem gruntu oraz parciem hydrostatycznym wody. Projektowanie i wykonywanie takich obudów głębokich wykopów jest jednak trudnym i bardzo odpowiedzialnym zadaniem inżynierskim. Dodatkowym utrudnieniem jest niewielka liczba opracowań zawierających wytyczne na ten temat. Problem ten dostrzegli autorzy książki [28], tworząc obszerne opracowanie o ścianach wykonanych z gruntobetonu. Jednakże, nie poruszają oni kwestii wprowadzenia do tego typu konstrukcji zbrojenia rozproszonego w formie syntetycznych włókien.

2.2.3 ZAKRES PROWADZONYCH DOTYCHCZAS BADAŃ GRUNTOBETONÓW

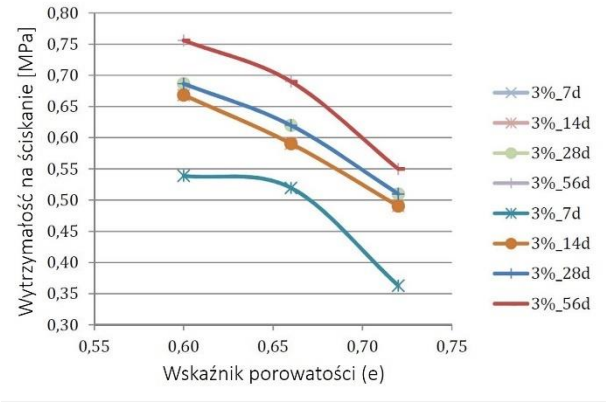
Dotychczas w naszym kraju powstały dwie rozprawy doktorskie dotyczące tematyki wgłębnego mieszania gruntu in-situ. Celem pracy Leśniewskiej z 2007 r. [29] było określenie wpływu serii czynników na wytrzymałość na ściskanie gruntobetonów formowanych in situ metodą wgłębnego mieszania na mokro oraz wymieszanych w warunkach laboratoryjnych. Wytrzymałość ta została uzależniona przede wszystkim od czynników związanych ze wzmacnianym gruntem: jego rodzajem, zawartością części organicznych, zanieczyszczeniem gruntu np. substancjami ropopochodnymi, zakwaszeniem gruntu oraz dojrzewaniem w środowisku agresywnym. Wśród pozostałych czynników wyróżniono: czas wiązania,

kształt i wymiary próbek, ilość i rodzaj spoiwa oraz stosunek w/c charakteryzujący wprowadzany zaczyn cementowy. W pracy tej dążono do ustalenia korelacji pomiędzy wynikami badań prowadzonych na próbkach formowanych w laboratorium i pobranych na budowie. Korelacje te miały umożliwić prognozowanie wytrzymałości gruntobetonów i stać się pomocnymi w projektowaniu składów tych kompozytów. Warto zaznaczyć, iż pobrany z budowy gruntobeton powstawał w technologii kolumn DSM.

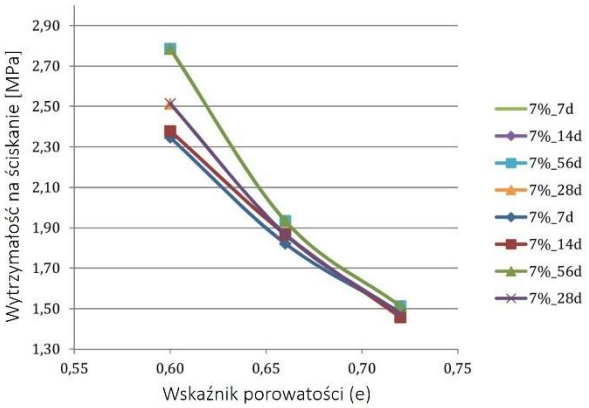
Drugą rozprawą doktorską na temat kompozytów gruntobetonowych jest praca Topolińskiego z 2014 r. [30]. Praca ta przedstawia wyniki badań wytrzymałości na ściskanie kompozytów grunt organiczny – spoiwo cementowe. Celem prowadzonych badań laboratoryjnych było określenie zmian wytrzymałości w zależności od ilości dodawanego spoiwa i zawartości substancji organicznej w wybranym do badań słabonośnym gruncie organicznym. W pracy dodatkowo przedstawiono ocenę mikrostruktury przedmiotowych kompozytów za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego oraz jakościową analizę próbek po badaniach z wykorzystaniem rentgenowskiego tomografu komputerowego.

Nehdi w pracy [31] przedstawia szeroki przegląd literatury prezentującej negatywny wpływ zawartości gliny w piasku i drobnym kruszywie na świeżą i stwardniałą mieszankę betonową. Autor zwraca uwagę, że obecność cząstek gliny działa niekorzystnie na urabialność świeżej mieszanki, efektywność działania domieszek chemicznych, cechy mechaniczne, stabilność wymiarów i wytrzymałość stwardniałego betonu. Cząsteczki gliny mogą być szkodliwe dla betonu z uwagi na ich zdolność do absorpcji wody i tendencję do pęcznienia. Skutkuje to wzrostem zapotrzebowania na wodę w świeżym betonie. Glina charakteryzuje się również łatwością w wymianie kationów, np. z domieszkami redukującymi ilość wody lub superplastyfikatorami. Zużywanie części domieszki chemicznej, skutkuje zwiększeniem jej ilości, w celu uzyskania pożądanej urabialności. Wpływa to na zwiększenie kosztów i może prowadzić do wydłużenia czas wiązania i opóźnienia w uzyskaniu wymaganej wytrzymałości.

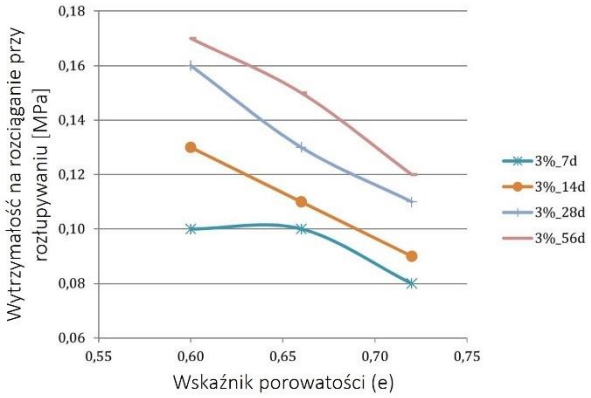
Wyniki badań wpływu składów gruntobetonów powstałych z gruntu niespoistego (piasku) na cechy mechaniczne prezentują Forcelini et al. [32]. Mieszanki zostały zróżnicowane pod względem ilości cementu (3% i 7% masy suchej mieszanki gruntu z cementem) oraz wskaźnika porowatości (0,60 , 0,66 i 0,72). Przyjęte wskaźniki porowatości mieszczą się w przewidywanym zakresie minimalnej i maksymalnej wartości wskaźnika porowatości wzmacnianego gruntu. Pożądaną porowatość uzyskiwano poprzez odpowiednie zagęszczanie próbki, co pozwalało na zmianę jej masy przy zachowaniu stałej wysokości. Próbki o kształcie walców, średnicy równej 50 mm i wysokości 100 mm poddano badaniu wytrzymałości na ściskanie osiowe i wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu po 7, 14, 28 i 56 dniach dojrzewania.



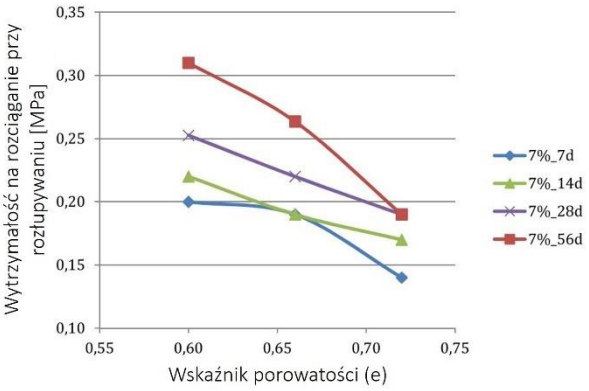
Rysunek 2.4 Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie od wskaźnika porowatości dla mieszanki z 3 % zawartością cementu [32]



Rysunek 2.5. Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie od wskaźnika porowatości dla mieszanki z 7 % zawartością cementu [32]



Rysunek 2.6 Wykres zależności wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu od wskaźnika porowatości dla mieszanki z 3 % zawartością cementu [32]



Rysunek 2.7 Wykres zależności wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu od wskaźnika porowatości dla mieszanki z 7 % zawartością cementu [32]

Przeprowadzone badania wykazały, że im mniejsza porowatość gruntobetonów, tym większe są ich wytrzymałości, co jest oczywiste. Otrzymane wyniki wskazują jednak na większą wrażliwość mieszanek z większą zawartością cementu na ich czas dojrzewania i porowatość. Dla zawartości cementu na poziomie 7% otrzymane wytrzymałości były ponad 3 krotnie większe niż dla 3%. Ponadto dla badanych materiałów wyznaczono początkowy moduł ścinania i moduł Younga. Ich wartości rosną wraz ze wzrostem zawartości cementu i obniżeniem wskaźnika porowatości materiału.

Wpływ wskaźnika wodno-cementowego na wytrzymałość na ściskanie gruntobetonów z piasku pylastego prezentują Ribeiro et al. [33]. Badania przeprowadzono na próbkach walcowych o wymiarach 70 mm na 140 mm po 3, 7, 14 i 28 dniach dojrzewania gruntobetonów. Składy badanych gruntobetonów różniły się między sobą zawartością cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R (10 i 13 % suchej masy gruntu, co przekłada się odpowiednio na 150 i 200 kg/m^3) oraz wartościami wskaźnika w/c, który mieścił się w zakresie od 0,6 do 2,0. W swoich badaniach autorzy skupiają swoją uwagę na strukturze gruntobetonów, jaka tworzy się dzięki produktom hydratacji cementu a inertnymi cząstkami

wzmacnianego gruntu, dzięki ich wymieszaniu z zaczynem cementowym. Wyniki ich badań wskazują, iż dla obu ilości cementu istnieje pośrednia, optymalna zawartość wody, która odpowiada uzyskaniu przez gruntobeton maksymalnej wytrzymałości na ściskanie. Ta zaś jest zapewniona przez odpowiednią, optymalną ilość i konfigurację wiązań między cząsteczkami gruntu. Tendencja ta jest tym bardziej widoczna, im dłuższy jest okres dojrzewania gruntobetonów.

2.3 GRUNTOBETON ZE ZBROJENIEM ROZPROSZONYM

2.3.1 ZASADNOŚĆ WZMACNIANIA GRUNTOBETONU

Gruntobeton jest obecnie materiałem o wielu zastosowaniach. Wśród nich wymienić można m.in. przegrody przeciwfiltracyjne np. przy wałach przeciwpowodziowych, zabezpieczenie gruntu przed upłynnieniem, stabilizację skarp, wzmacnianie nasypów, uszczelnianie gruntu czy nawet posadowienie obiektów inżynierskich. Coraz częstszym zastosowaniem tego materiału jest obecnie realizacja głębokich wykopów i wykonywanie konstrukcji oporowych. Jednakże tego typu konstrukcje są narażone przede wszystkim na obciążenie poziome np. w formie parcia gruntu czy parcia hydrostatycznego wody gruntowej, które generują momenty zginające. Gruntobeton jest natomiast materiałem, który wykazuje skłonność do kruchego zachowania, a więc jego odkształcenia plastyczne są stosunkowo niewielkie. Taka charakterystyka nie jest korzystna w przypadku, gdy stabilizowany grunt poddany jest bocznemu parciu, ponieważ na skutek zarysowania dochodzi do nagłej utraty stateczności konstrukcji. Stąd zachodzi potrzeba wzmocnienia, przede wszystkim z uwagi na działanie naprężeń rozciągających. Jak dotąd pożądane wzmocnienie uzyskiwano przy pomocy profili stalowych, które wciskano w świeżo wykonaną ścianę w stosunkowo niewielkim rozstawie. Takie rozwiązanie generowało dodatkową pracę i koszty. W ten sposób zaistniała potrzeba zwiększenia rozstawu takich profili lub nawet w przypadku mniejszych konstrukcji rezygnacji z tego typu wzmocnienia. Jedną z dostępnych obecnie metod zwiększenia wytrzymałości na rozciąganie gruntobetonu jest stosowanie rozproszonego zbrojenia w formie włókien. Wytworzony w ten sposób kompozyt nazywany jest fibrogruntobetonem. Wprowadzenie włókien do gruntobetonu ma na celu wzrost jego wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, jak również umożliwienie pracy konstrukcji gruntobetonowej po jej zarysowaniu w stanie pokrytycznym.

2.3.2 WŁÓKNA DO WZMACNIANIA GRUNTOBETONU

W ramach kategorii *zbrojenie gruntu* komitet techniczny TC17 [3] wyróżnia: geosyntetyki lub grunt stabilizowany mechaniczne i charakteryzuje ją jako wykorzystanie wytrzymałości na rozciąganie różnych materiałów w celu zwiększenia wytrzymałości na ścinanie gruntu oraz stabilności dróg, fundamentów, nasypów, skarp lub ścian oporowych. Metoda ta obejmuje szerokie spektrum materiałów, które Chu et al. [4] przypisują do miejsca aplikacji zbrojenia. Wśród rodzajów zbrojenia wymieniono m.in.: stalowe taśmy, siatki czy pręty, całą gamę materiałów polimerowych oraz mikro elementy, takie jak np. włókna naturalne, szklane czy z włókna węglowego. Podkreślono również, iż zbrojenie gruntu stało się bardzo

atrakcyjną alternatywą dla ścian oporowych czy wzmocnień stromych skarp ze względu na jego zalety w zakresie niezawodności, elastyczności, kosztów i estetyki.

Analizując literaturę można stwierdzić, iż tradycyjną, a równocześnie nowoczesną metodą zbrojenia gruntu jest zastosowanie ciągłych, płaskich geosyntetyków: geowłóknin, geosiatek, geotkanin, geomembran oraz geokompozytów. Ich szczegółową charakterystykę i szerokie zastosowanie w budowlach ziemnych można znaleźć w pozycji opracowanej przez zespół Instytutu Badawczego Dróg i Mostów [34]. Jednakże, w swojej rozprawie doktorskiej z 2005 r. Li [35] zwraca uwagę, iż tego typu zbrojenie zapewnia wzrost wytrzymałości gruntu w jednym, określonym kierunku, a na jego styku z gruntem powstaje płaszczyzna obniżonej wytrzymałości na ścinanie w porównaniu z gruntem niezbrojonym. Dodatkowo, zastosowanie geosyntetyków wymaga odpowiednio zaprojektowanego zakotwienia o wystarczającej długości w celu zapewnienia wystarczającej wytrzymałości na wyciąganie. Innym sposobem zbrojenia są krótkie, dyskretne i przypadkowo, lecz statystycznie jednorodnie zorientowane w gruncie włókna. Li podkreśla, iż równomiernie i jednorodnie zmieszane z gruntem włókna mogą zapewnić izotropowy wzrost wytrzymałości kompozytu bez wprowadzania płaszczyzn obniżonej wytrzymałości na ścinanie. Jego zdaniem, taki rodzaj zbrojenia nie wymaga również rozwiązywania problemów projektowych dotyczących zakotwienia. Madej [6] z kolei charakteryzuje pracę włókien w gruncie, porównując ich zachowanie do działania korzeni roślin. Dzięki ich obecności, powstające w gruncie naprężenia ścinające ulegają dystrybucji poprzez włóknistą inkluzję o stosunkowo wysokiej wytrzymałości na rozciąganie. Takie zachowanie zapewnia wzrost stateczności gruntu, jak również jego mechanicznych właściwości.

Szerokiego przeglądu literatury na temat badań właściwości, zastosowania i wpływu włókien na wzmacniane grunty dokonali Hejazi et al. [36]. Autorzy na wstępie podkreślają, iż wzmacnianie gruntu przy pomocy włókien wymaga precyzyjnej analizy w zakresie optymalizacji ich właściwości, średnicy, długości, tekstury powierzchni czy mechanizmu wzmacniania. Zbrojenie gruntu można sklasyfikować w dwóch kategoriach w zależności od jego modułu sprężystości, a co za tym idzie charakterystyki pracy w ośrodku gruntowym. Wyróżniamy zbrojenie o wysokim module sprężystości (sztywne) oraz o niskim module sprężystości (ciągliwe). Pierwsza grupa (np. stalowe paski, włókna szklane lub bazaltowe) ma za zadanie przede wszystkim wzmocnić grunt oraz ograniczyć jego wewnętrzne i graniczne deformacje. Drugą grupę stanowią m.in. włókna naturalne, syntetyczne oraz geosyntetyki, które wpływają na uzyskanie pewnego poziomu wzmocnienia gruntu, jednak co istotniejsze, zapewniają możliwość pracy w obszarze naprężeń pokrytycznych. Rozwój technologii produkcji tworzyw sztucznych sprawił, iż coraz większym zainteresowaniem w nowoczesnym przemyśle cieszą się wykonane z nich włókna. Wśród włókien syntetycznych wymienić można: polipropylenowe PP, poliestrowe, najczęściej PET, polietylenowe PE, szklane, nylonowe czy włókna z polialkoholu winylowego PVA.

W badaniach laboratoryjnych, a także w praktyce inżynierskiej do wzmacniania gruntu najczęściej stosuje się włókna polipropylenowe PP. Umożliwiają one zwiększenie właściwości wytrzymałościowych

np. gruntu ekspansywnego (gliny), redukują jego skurcz i pęcznienie, co wykazał Soğancı [37]. Grunty wzmacniane włóknami polipropylenowymi (m.in. piasek szlamowy) odznaczają się także większą spójnością przy niewielkim obniżeniu wartości kąta tarcia wewnętrznego. Zbrojenie włóknami PP może również zapewnić wyższą wytrzymałość resztkową. Włókna polipropylenowe są głównie stosowane do powierzchniowego wzmacniania gruntu. Badania polowe prezentowane przez Santoni i Webster [38] potwierdziły skuteczność ich zastosowania w zbrojeniu piaszczystego podłoża lotnisk oraz dróg. Jednakże koniecznym jest pokrywanie takich nawierzchni warstwą spoiwa, aby zapobiec wyciąganiu włókien pod wpływem ruchu. Consoli et al. [39] zbadali odpowiedź na równomiernie rozłożone obciążenie warstwy zagęszczonego gruntu piaszczystego, wzmocnionego i niewzmocnionego włóknami polipropylenowymi. Warstwa gruntu zbrojonego włóknami charakteryzowała się większą sztywnością wraz ze wzrostem stopnia komprymacji w porównaniu do warstwy niezbrojonej. Równocześnie oprócz badań polowych prowadzono laboratoryjne badania trójosiowego ściskania próbek z i bez dodatku włókien polipropylenowych. W przypadku próbek z włóknami zaobserwowano znaczące zachowanie wytrzymałości, aż do końca testów, gdy odkształcenia osiowe przekraczały 20%. Natomiast próbki niewzmocnione włóknami wykazywały prawie idealnie plastyczne zachowanie przy dużych odkształceniach. Uzyskane wyniki pozwalają poszukiwać potencjalnych zastosowań wzmocnienia włóknami polipropylenowymi w płytkich fundamentach, nasypach na miękkich gruntach i innych robotach ziemnych, narażonych nadmiernym odkształceniom. Włókna polipropylenowe są hydrofobowe oraz odporne na korozyjne działanie alkaliów, chlorków jak i degradację biologiczną. Ich kolejną zaletą jest stosunkowo niski koszt.

Podobnie, jak w przypadku włókien polipropylenowych, autorzy pracy [36] przeanalizowali podawane w literaturze korzystne efekty zastosowania włókien wykonanych z poliestru PET w roli zbrojenia rozproszonego dla wzmacnianych słabych gruntów. Consoli et al. [40] wykazali, iż w przypadku gruntu piaszczystego dodatek włókien PET wpływa na poprawę zarówno wytrzymałości na ściskanie, jak również wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Natomiast badanie trójosiowego ściskania wykazało, iż odpowiednia zawartość i długość włókien powodują wzrost wytrzymałości maksymalnej oraz resztkowej. Badania prowadzone przez Kumar et al. [41] na ściśliwych gruntach gliniastych wykazały, iż wzrost wytrzymałości na ściskanie uzależniony jest od procentowej zawartości włókien w matrycy oraz od ich długości. Generalnie im dłuższe są włókna i większa jest ich zawartość, tym wyższa wytrzymałość na ściskanie kompozytu. Jednak Maheshwari [42] w swoich badaniach gruntu zawierającego gliny o dużej ściśliwości, zbrojonego włóknami poliestrowymi o jednakowej długości 12 mm stwierdził, że wzrost jego nośności ma miejsce do zawartości włókien nieprzekraczającej 0,5% masy gruntu. Dalszy wzrost ilości zbrojenia rozproszonego powoduje, iż nośność kompozytu zaczyna maleć. Furumoto et al. [43] w swoich badaniach potwierdzili pozytywny wpływ dodatku włókien PET na grunt piaszczysty w odniesieniu do jego zastosowania do wykonywania wałów przeciwpowodziowych czy podłoża pod trasy rurociągów. Dodatek włókien sprawił, iż wzmacniany grunt charakteryzował się

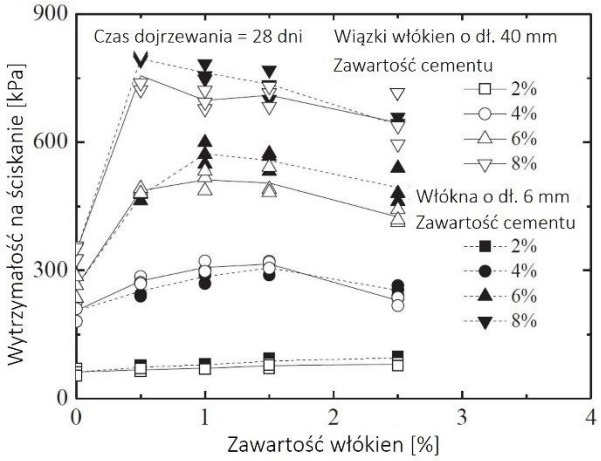
zwiększoną wytrzymałością oraz stabilnością. Włókna PET są również hydrofobowe, odporne na korozję biologiczną oraz na działanie alkaliów i chlorków. Poniższa tabela 2.1 przedstawia wybrane właściwości włókien polipropylenowych oraz poliestrowych PET stosowanych przy wzmacnianiu gruntów.

Tabela 2.1 Właściwości włókien poliestrowych PET [36]

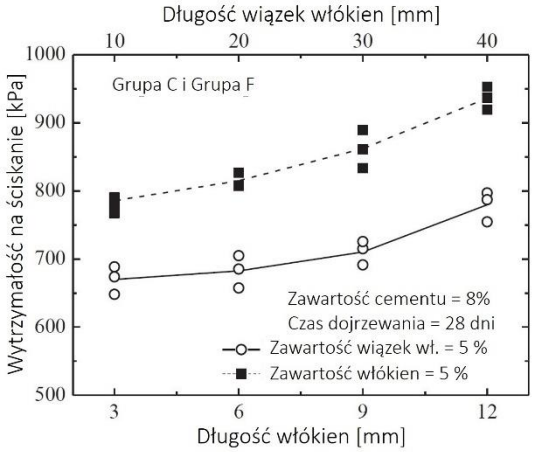
Rodzaj włókien	Średnica [µm]	Ciężar właściwy [g/cm^3]	Moduł sprężystości [GPa]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Zakres długości [mm]	Stosowany zakres ilości włókien [% masy]
Polipropylenowe	23 – 150	0,92	3 – 3,5	120 – 450	6 – 50	0 – 3
Poliestrowe PET	30 – 40	1,35	10 – 30	400 – 600	6 – 64	0 – 1

2.3.3 CHARAKTERYSTYCZNE WŁAŚCIWOŚCI GRUNTOBETONÓW ZE ZBROJENIEM ROZPROSZONYM W ŚWIETLE DOTYCHCZASOWYCH BADAŃ

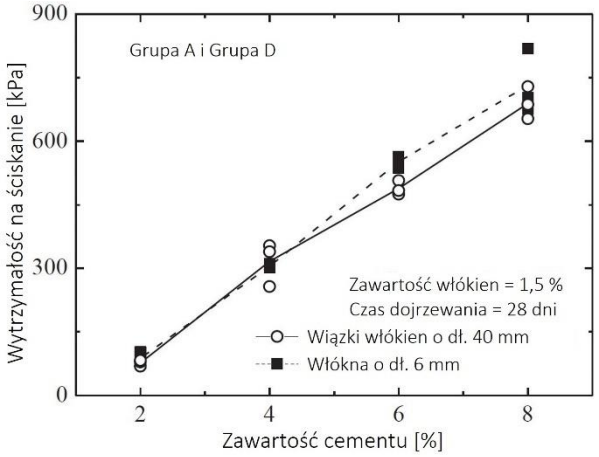
Obecnie podejmuje się poszukiwania nowych sposobów poprawy właściwości słabego podłoża gruntowego poprzez połączenie mechanicznych oraz chemicznych metod wzmacniania gruntu. Przykładem tego jest jednoczesne wprowadzenie do gruntu zaczynu cementowego oraz zbrojenia rozproszonego. Do takich badań z pewnością można zaliczyć laboratoryjną ocenę zachowania się gliny stabilizowanej cementem i wzmocnionej włóknami polipropylenowymi opisanej przez Chen et al. [44]. Wzmacnianym podłożem gruntowym były miękkie iły pylaste, natomiast do jego zbrojenia wykorzystano dwa rodzaje włókien polipropylenowych: pojedyncze włókna oraz wiązki włókien wydzielone z polimerowych worków tekstylnych. Aktywnym składnikiem kompozytu był cement portlandzki pełniący rolę stabilizatora. W trakcie testów określono wpływ zróżnicowania długości badanych włókien oraz ich udziału w matrycy gruntobetonowej na wytrzymałość na ściskanie. Długości pojedynczych włókien wynosiły 3, 6, 9 i 12 mm przy stałej średnicy 0,035 mm, natomiast wiązki włókien otrzymane z tkanych polimerowych worków miały długość 10, 20, 30 i 40 mm, grubość wynoszącą 0,035 mm oraz szerokość równą 3,5 mm. Procentowy udział masowy włókien zmieniał się od 0 do 2,5 % ze zmiennością 0,5 %. Dodatkowo poddano analizie wpływ zawartości cementu w gruncie, która wahała się od 2 do 8 % masy kompozytu ze zmiennością co 2 %.



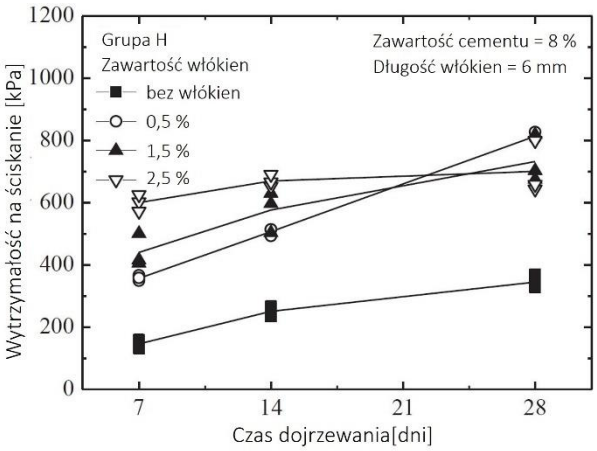
Rysunek 2.8 Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie od zawartości włókien dla różnych zawartości cementu [44]



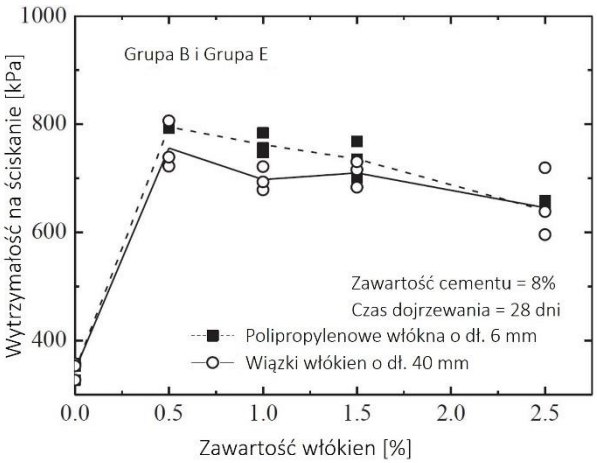
Rysunek 2.9 Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie od długości włókien [44]



Rysunek 2.10 Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie od zawartości cementu [44]



Rysunek 2.11 Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie od czasu dojrzewania dla różnych zawartości włókien [44]



Rysunek 2.12 Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie od zawartości włókien [44]

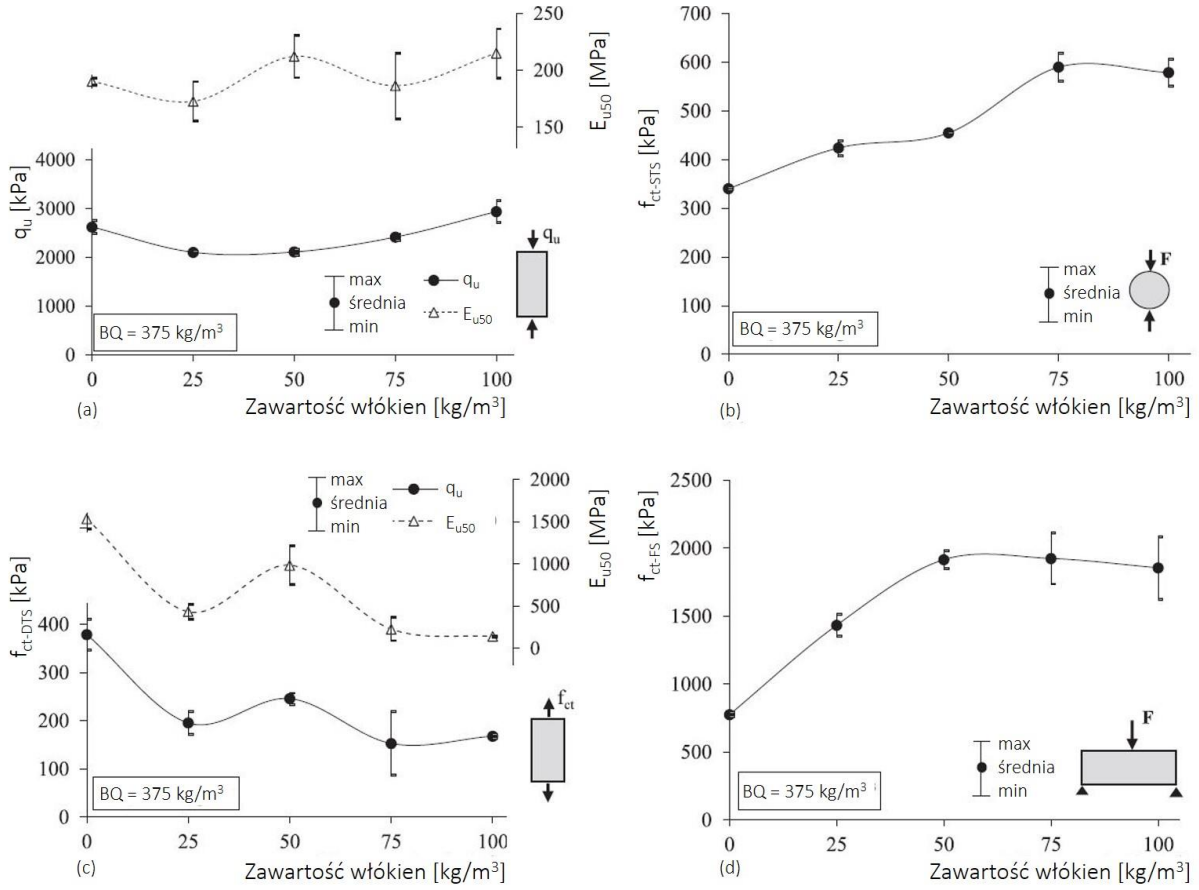
Otrzymane wyniki badań (rysunki 2.8 ÷ 2.12) potwierdzają, iż obecność w matrycy gruntobetonowej włókien polipropylenowych wpływa znacząco na jej poprawę wytrzymałości na ściskanie oraz

odkształcalność. Wpływ na wzrost wytrzymałości mają zarówno długość, udział włókien, jak również, co oczywiste wzrost dozowanej ilości cementu. Istotnym czynnikiem jest również typ włókna. W przypadku badanych rodzajów włókien polipropylenowych nieco lepsze wyniki uzyskiwano przy zbrojeniu matrycy pojedynczymi włóknami niż w przypadku zbrojenia wiązkami włókien. Powodem takiego stanu rzeczy jest bardziej równomierne rozmieszczenie pojedynczych włókien w matrycy. Należy również podkreślić, iż obydwa kompozyty osiągnęły maksymalną wytrzymałość na ściskanie przy 0,5 % udziale zbrojenia. Wraz z dalszym jego wzrostem, obserwowano konsekwentny spadek wartości tej cechy, co jest zapewne związane ze wzrostem porowatości materiału. Ponadto zaobserwowano, że optymalna zawartość zbrojenia rozproszonego ulega zmniejszeniu wraz ze wzrostem zawartości cementu.

Badania nad oceną wpływu zbrojenia rozproszonego w formie włókien polipropylenowych na wytrzymałość na ściskanie oraz sztywności gruntobetonu z gruntu spoistego podjęli również Cristelo et al. [45]. W tym celu próbki cylindryczne o średnicy 70 mm i wysokości 140 mm poddano ściskaniu osiowemu, co pozwoliło na wyznaczenie krzywych naprężenie-odkształcenie. Program badań obejmował badanie gruntobetonów niewzmocnionych oraz wzmocnionych włóknami o długości około 13 i 50 mm w trzech poziomach ich objętościowego udziału w matrycy (0.1 %, 0.15 % i 0.2 %). Uzyskane krzywe pozwoliły na wyznaczenie siecznych modułów sprężystości E_{25}, E_{50}, oraz E_{75pp}, wyznaczanych przy 25, 50, oraz 75 % naprężeń niszczących. Wartość 75 % naprężenia dotyczy obszaru krzywych naprężenie-odkształcenie po osiągnięciu wartości maksymalnej. Analiza przebiegu krzywych naprężenie-odkształcenie pozwala stwierdzić, iż wzrost dodatku włókien wpływa na wzrost wartości siecznego modułu sprężystości gruntobetonu E_{50}, przy równoczesnym wzroście zawartości cementu. Im bardziej kruchy jest gruntobeton, tym bardziej dostrzegalny jest wpływ dodatku włókien na jego odkształcalność. Wyższe naprężenia rozciągające w gruntobetonie o większej sztywności (zawartości cementu) skutkują większą mobilizacją włókien do pracy. Dodatek włókien poskutkował również możliwością uzyskania większych deformacji przy tym samym poziomie naprężenia w porównaniu z próbką bez zbrojenia rozproszonego. Obecność włókien pozwoliła na uzyskanie wzrostu wytrzymałości na ściskanie gruntobetonów, jak również większej plastyczności po jej przekroczeniu (włókna o długości 50 mm). Wynika to ze zdolności włókien do absorbowania naprężeń rozciągających powstających w matrycy.

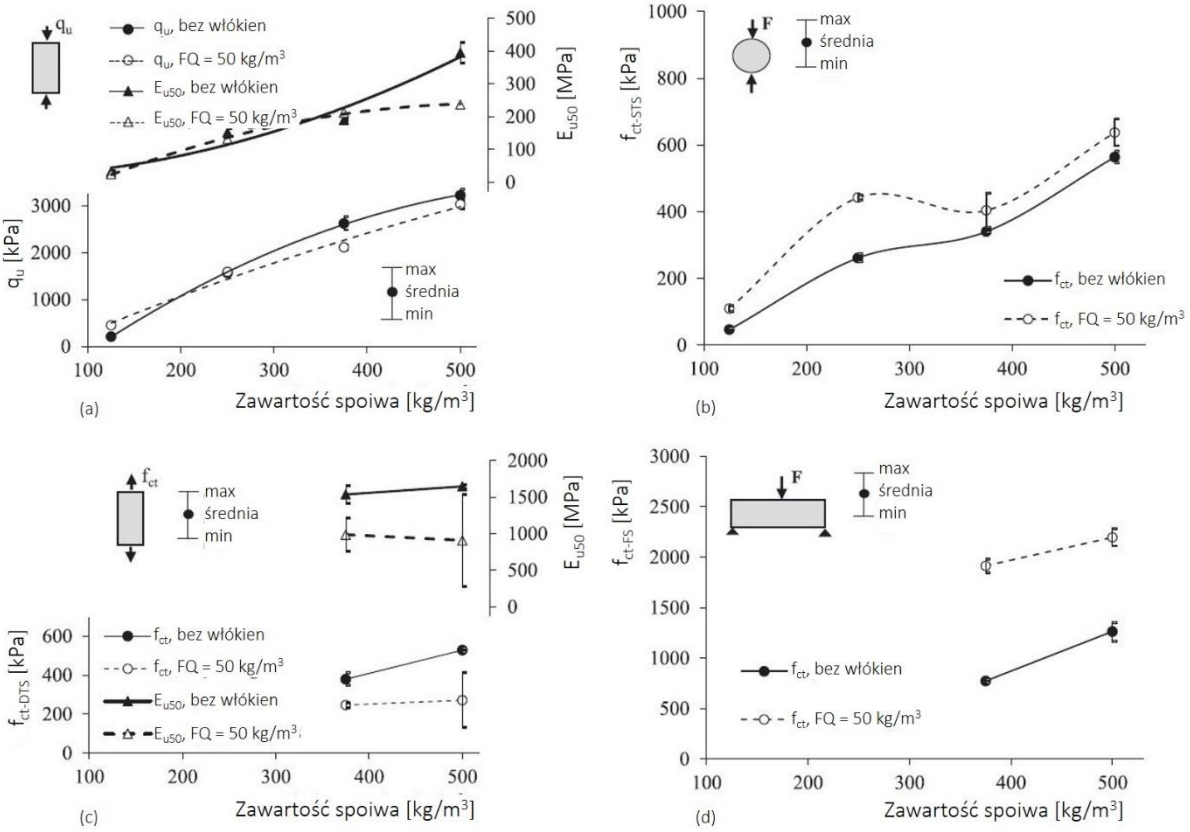
Wyniki obszernego programu badań znajdujemy także w opracowaniu autorstwa Correia et al. [46], w którym to ocenie poddano cechy mechaniczne wzmacnianego przy użyciu spoiwa (mieszanki cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R oraz granulowanego żużla wielkopiecowego) i włókien polipropylenowych spoistego gruntu rodzimego. Zakres przeprowadzonych badań stworzonego kompozytu obejmował nie tylko oznaczenie jego wytrzymałości na ściskanie, ale również wytrzymałości na rozciąganie osiowe, wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Określono w nich wpływ zmiennego dozowania ilości włókien (0, 25, 50, 75 i 100 kg/m^3) o stałej długości 12 mm przy stałej ilości spoiwa 375 kg/m^3 (rysunek 2.13) oraz wpływ ilości stosowanego spoiwa (125, 250, 375 i 500 kg/m^3) przy stałej ilości dozowanych włókien 50 kg/m^3 (rysunek 2.14) na badane cechy

mechaniczne. Badania wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie osiowe zostały przeprowadzone na próbkach cylindrycznych o średnicy 70 mm i wysokości 140 mm, wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu na próbkach cylindrycznych o średnicy 70 mm i wysokości 70 mm, natomiast wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu na próbkach prostopadłościennych o wymiarach 250 x 70 x 70 mm.



Rysunek 2.13 Wpływ zawartości włókien na: (a) wytrzymałość na ściskanie, (b) wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, (c) wytrzymałość na rozciąganie osiowe, (d) wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [46]

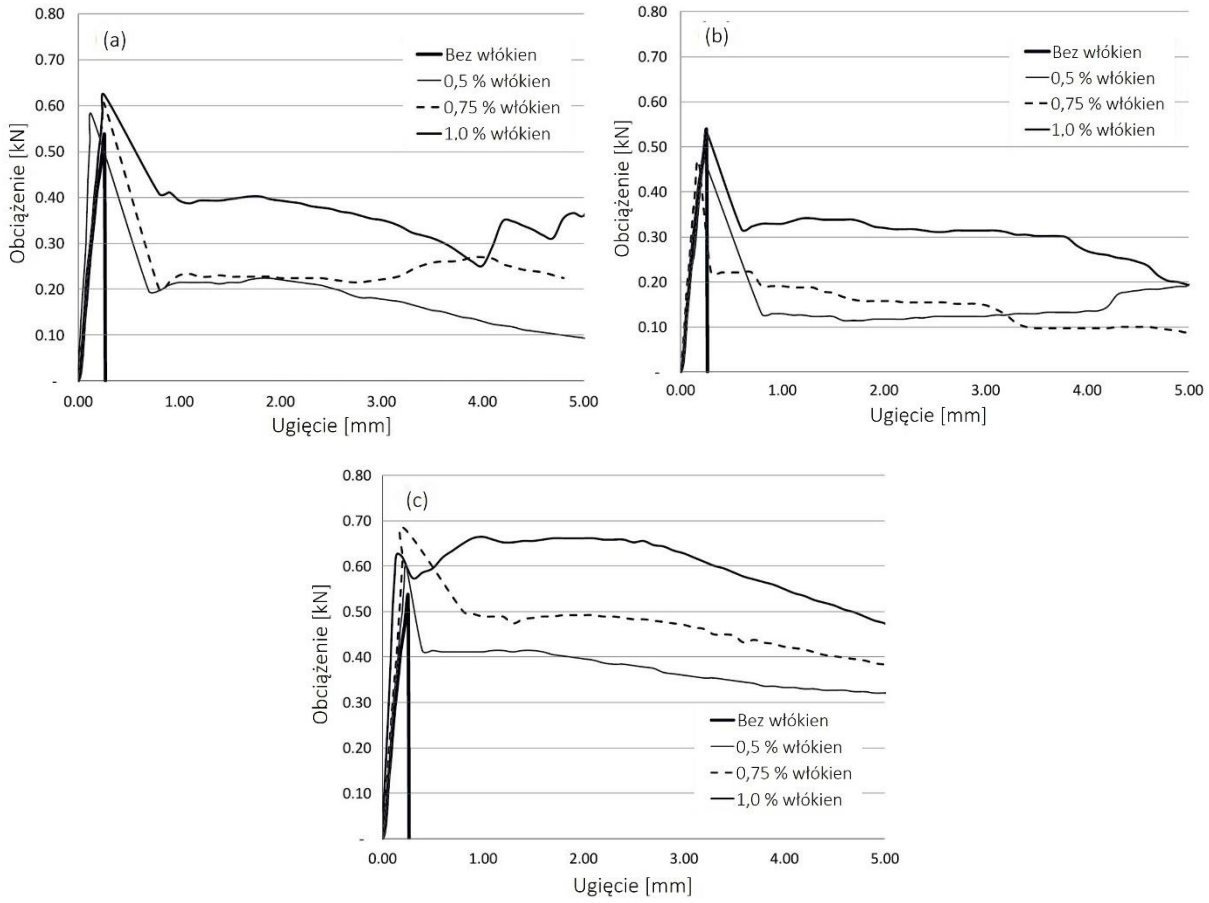
Generalnie, dodatek włókien, a więc materiału bardziej odkształcalnego od stabilizowanej matrycy, spowodował zmniejszenie sztywności kompozytu oraz przyczynił się do obniżenia jego wytrzymałości na ściskanie. Wpływ na taki efekt mają równocześnie obecność włókien, która uniemożliwia powstawaniu produktów hydratacji cementu pomiędzy cząsteczkami gruntu oraz duża zawartość stabilizatora powodująca powstawanie bardzo sztywnego materiału o niskich odkształceniach przy maksymalnym obciążeniu, które uniemożliwiają mobilizację wytrzymałości na rozciąganie włókien. Obecność włókien sprawia również, iż gruntobeton staje się mniej kruchy, a podczas niszczenia wykazuje pseudo-plastyczny charakter, bez widocznej utraty zdolności do przenoszenia dalszych obciążeń. Jest to konsekwencją mobilizacji wytrzymałości na rozciąganie włókien przy większych odkształceniach. Zróżnicowanie ilości stosowanych włókien pozwoliło wyznaczyć optymalny dla poprawy oznaczanych wytrzymałości zakres ich dozowania, który zawierał się od 50 do 75 kg/m^3.



Rysunek 2.14 Wpływ zawartości spoiwa i obecności włókien w gruntobetonie na:
(a) wytrzymałość na ściskanie, (b) wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu,
(c) wytrzymałość na rozciąganie osiowe, (d) wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [46]

W przypadku oceny wpływu ilości spoiwa na badane cechy mechaniczne stwierdzono, iż wraz z jej wzrostem poprawie ulegają wyznaczane parametry badanych gruntobetonów. Wśród nich jest moduł Young'a, wyznaczony przy 50 % naprężeń maksymalnych podczas ściskania i rozciągania (E_{u50}). Jednakże badania wykazały, iż dodatek 50 kg/m^3 włókien powodował obniżenie wartości wytrzymałości na ściskanie oraz rozciąganie osiowe przy równoczesnym wzroście ilości spoiwa.

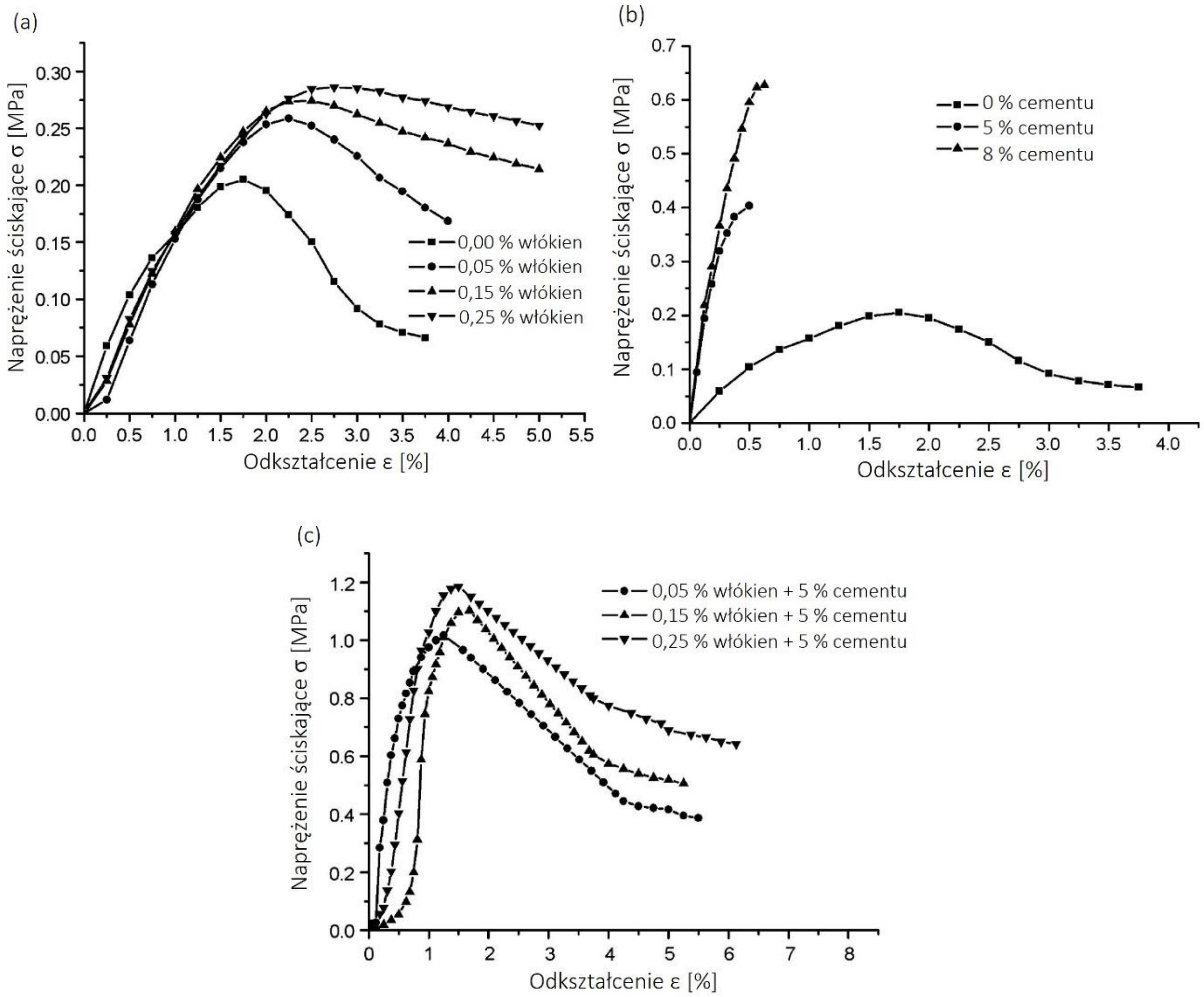
Sukontasukkul i Jamsawang [47] podejmują tematykę poprawy cech mechanicznych gruntobetonu w odniesieniu do jego praktycznego zastosowanie w formie kolumn DSM. Z uwagi na działające na nie momenty zginające, spowodowane poziomym obciążeniem ze strony gruntu, ocenie poddano wpływ dodatku włókien stalowych z haczykowatym zakończeniem (długości 35 i 60 mm) oraz karbowanych włókien polipropylenowych (długości 58 mm) na ich wytrzymałość na zginanie oraz naprężenia resztkowe przy ugięciach równych L/600 i L/150. Badaniom poddano próbki gruntobetonu z gruntu spoistego (miękkiej gliny) o stałej zawartości cementu na poziomie 20 % masy suchego gruntu, bez włókien i z ich dodatkiem w ilości zróżnicowanej objętościowo na poziomie 0,5, 0,75 i 1,0 %. Próbki o prostopadłościennym kształcie charakteryzowały się wymiarami 100 x 100 x 350 mm.



Rysunek 2.15 Wykresy zależności obciążenie-ugięcie gruntobetonów z włóknami: (a) stalowymi 35 mm, (b) stalowymi 60 mm, (c) polipropylenowymi 58 mm [47]

Dla próbek niewzmocnionych zbrojeniem rozproszonym wykres zależności obciążenie-ugięcie (rysunek 2.15) zmienia się liniowo od samego początku aż do momentu osiągnięcia maksymalnej wartości obciążenia. Następnie, po zarysowaniu matrycy gruntobetonowej, następuje gwałtowny spadek siły. Jest to charakterystyczny wykresu obciążenie-ugięcie dla kruchego materiału, jakim jest niezbrojony gruntobeton. W przypadku gruntobetonów wzmocnionych zbrojeniem rozproszonym, po osiągnięciu wartości obciążenia niszczącego matrycę włókna zaczynają przenosić dalsze obciążenie. Efektywność pracy włókien zależy od ich rodzaju i zawartości. Korzystniejsze rezultaty uzyskały włókna polipropylenowe w porównaniu z włóknami stalowymi. Autorzy wskazują, iż kształt włókien polipropylenowych jest głównym czynnikiem, który sprawia, że charakteryzują się one lepszą przyczepnością do stosunkowo słabej matrycy gruntobetonowej w porównaniu z włóknami stalowymi. Natomiast wśród włókien stalowych lepiej wypadają te krótkie w porównaniu z długimi. Przyczyną takiego stanu jest trudność w procesie mieszania długich włókien z mieszanką gruntobetonową, która przekłada się na mniejszą jednorodność otrzymanych próbek. Z tego powodu charakteryzują się one większą porowatością i niższą wytrzymałością. Równocześnie stwierdzono, że wzrost ilości dodatku włókien, niezależnie od ich rodzaju, przekłada się na wzrost wartości uzyskanych wytrzymałości.

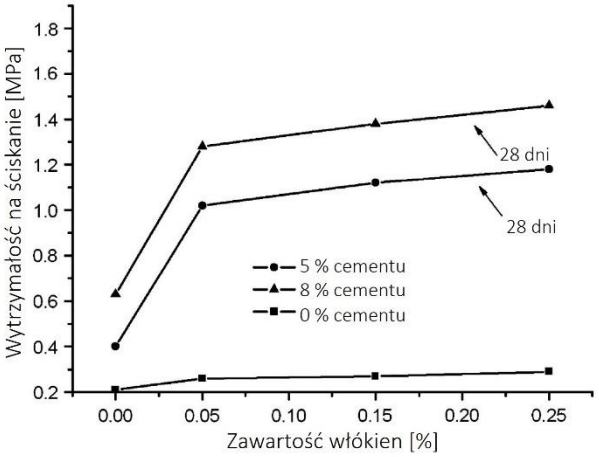
Tang et al. [48] dokonali oceny wpływu krótkich włókien polipropylenowych na właściwości mechaniczne wzmacnianego i niewzmacnianego spoiwem cementowym gruntu spoistego (grunt gliniasty). Badaniom poddano próbki charakteryzujące się różną zawartością włókien (0,05 %, 0,15 % i 0,25 % masy gruntu) o długości 12 mm oraz różną zawartością cementu (0 %, 5 % i 8 % masy gruntu). Po 7, 14 i 28 dniach dojrzewania próbki poddano badaniom cech mechanicznych: wytrzymałości na ściskanie i ścinanie. Wytrzymałość na ściskanie określono na próbkach o wysokości 80 mm i średnicy 39,1 mm, natomiast badanie bezpośredniego ścinania przeprowadzono na próbkach o wysokości 20 mm i średnicy 61,8 mm.



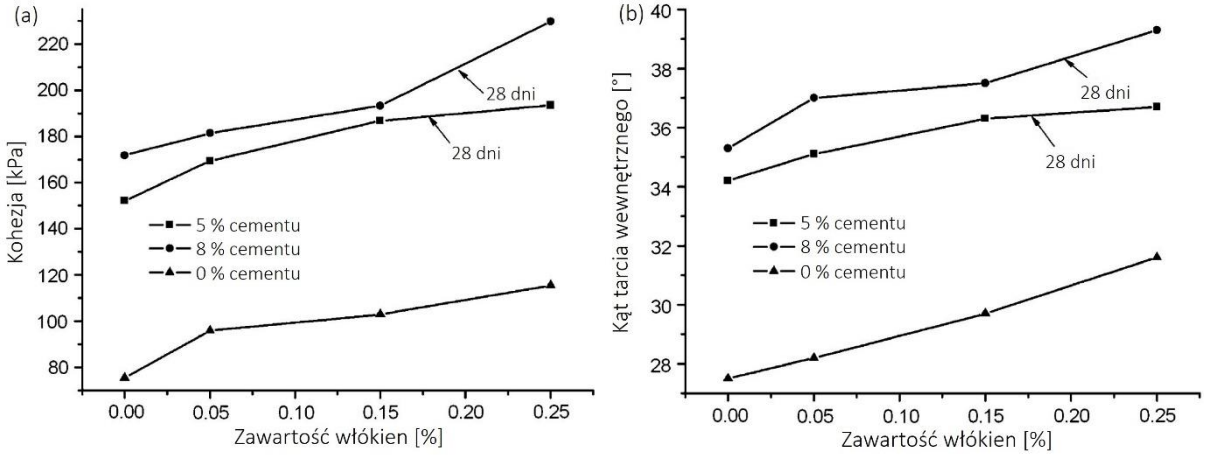
Rysunek 2.16 Wykresy zależności naprężenie ściskające-odkształcenie dla:
(a) gruntu niestabilizowanego z dodatkiem włókien, (b) gruntu stabilizowanego bez dodatku włókien,
(c) gruntu stabilizowanego z dodatkiem włókien [48]

Uzyskane w badaniach wytrzymałości na ściskanie krzywe zależności naprężenie-odkształcenie (rysunek 2.16) pozwalają stwierdzić, iż dodatek włókien zwiększył wytrzymałość gruntu niestabilizowanego spoiwem i poskutkował jego większą plastycznością i zdolnością do przenoszenia obciążeń. W przypadku próbek gruntu stabilizowanego cementem bez dodatku włókien wyraźnie widoczny jest wzrost wytrzymałości i sztywności wraz ze wzrostem zawartości cementu. Natomiast

analizując wykresy próbek o stałej zawartości cementu i zmiennej ilości dozowanych włókien (rysunek 2.17) można stwierdzić, iż wraz ze wzrostem dodatku zbrojenia rozproszonego rośnie wytrzymałość oraz spada sztywność kompozytów. Zwiększenie zawartości włókien w matrycy przełożyło się również na wyższe wartości wytrzymałości resztkowych.



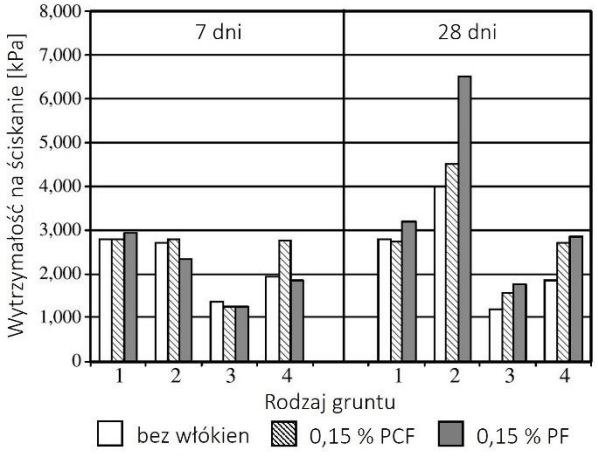
Rysunek 2.17 Zależność wytrzymałości na ściskanie od zawartości włókien [48]



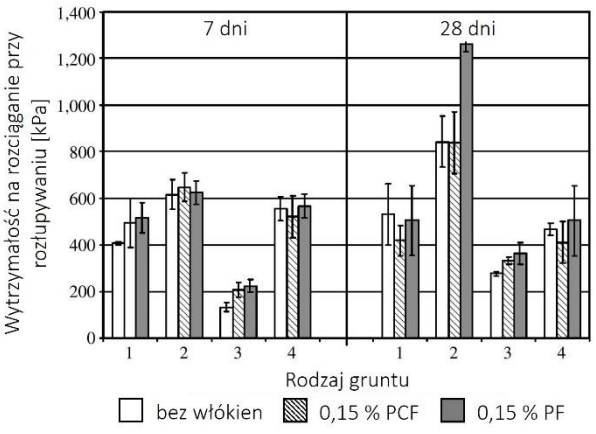
Rysunek 2.18 Zależność pomiędzy parametrami wytrzymałości na ścinanie a zawartością włókien: (a) kohezja (wytrzymałość na rozciąganie osiowe), (b) kąt tarcia wewnętrznego [48]

Prowadzone badania wykazały również, iż na efektywność pracy włókien wpływa stabilizacja gruntu spoiwem, a więc jego odpowiednia wytrzymałość. Wprowadzenie do gruntu spoiwa mineralnego oraz wzrost zawartości zbrojenia rozproszonego skutkują także poprawą parametrów wytrzymałości na ścinanie (rysunek 2.18). Dodatkowo przeprowadzono analizę strefy stykowej pomiędzy matrycą i inkluzją przy pomocy mikroskopii skaningowej (SEM). Stwierdzono, że o efektywności wzmocnienia, podobnie jak w przypadku betonu cementowego, decydują siły wiązania i tarcie pomiędzy włóknami a wzmacnianym gruntem i gruntobetonem. Wykazano również różnice w zachowaniu włókien wzmacniających grunt stabilizowany cementem oraz grunt bez dodatku cementu.

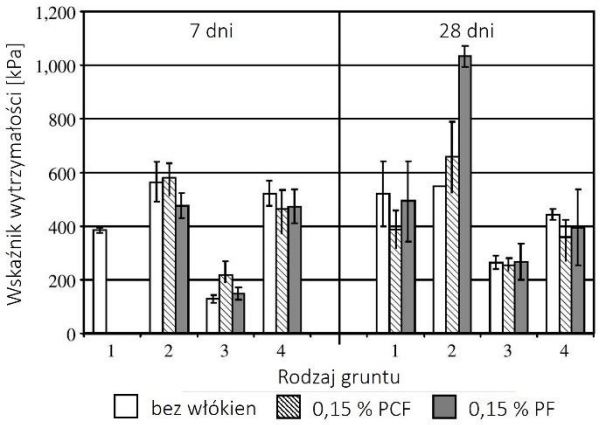
Khattak i Alrashidi [49] prezentują wyniki badań trwałościowych i wytrzymałościowych kompozytów gruntobetonowych ze zbrojeniem rozproszonym w formie przetworzonych włókien celulozowych (PCF) oraz włókien polipropylenowych (PF). Włókna te scharakteryzowano stosunkiem długości do średnicy, który wynosił odpowiednio 200 dla włókien celulozowych i 1500 dla włókien polipropylenowych. Do badań wybrano cztery rodzaje gruntów spoistych o różnej plastyczności i zmieszano je z cementem portlandzkim w ilości 10 % masy suchego gruntu. W przygotowywaniu próbek do badań wyróżniono trzy poziomy dozowania włókien: 0,15 %, 0,3 % i 0,5 % masy suchego gruntu. Badania trwałościowe przeprowadzono na próbkach walcowych (h = 63,5 mm, ø = 101,6 mm), które poddano dwunastu cyklom naprzemiennego moczenia w wodzie i suszenia. Po każdym cyklu próbki ważono i mierzono, tak aby określić ich zmiany wilgotności i objętości. Wśród badań cech mechanicznych przeprowadzono badania wytrzymałości na ściskanie (próbki walcowe h = 116 mm, ø = 101,6 mm) oraz na rozciąganie przy rozłupywaniu (próbki walcowe h = 63,5 mm, ø = 101,6 mm). Oprócz standardowego oznaczenia wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu (rysunek 2.20), badanie to przeprowadzono również pod cyklicznym obciążeniem w celu określenia wskaźnika poprzecznych odkształceń plastycznych HPD (rysunek 2.22) oraz modułu sprężystości (rysunek 2.23) gruntobetonów wzmocnionych i niewzmocnionych przy użyciu zbrojenia rozproszonego. Na koniec wykonano badanie Proctora, a uzyskane rezultaty maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego i gruntobetonowego oraz wilgotności maksymalnej odniesiono do wyznaczonych mechanicznych właściwości. Wszystkie badania prowadzono po 7 i 28 dniach dojrzewania.



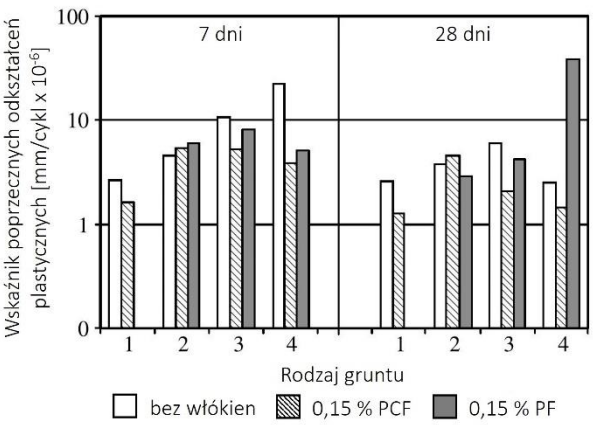
Rysunek 2.19 Zależność wytrzymałości na ściskanie od rodzaju gruntu, włókien i czasu dojrzewania [49]



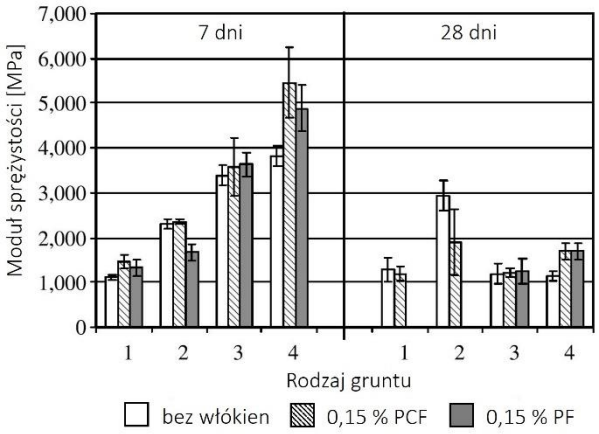
Rysunek 2.20 Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu od rodzaju gruntu, włókien i czasu dojrzewania [49]



Rysunek 2.21 Zależność wskaźnika wytrzymałości od rodzaju gruntu, włókien i czasu dojrzewania [49]



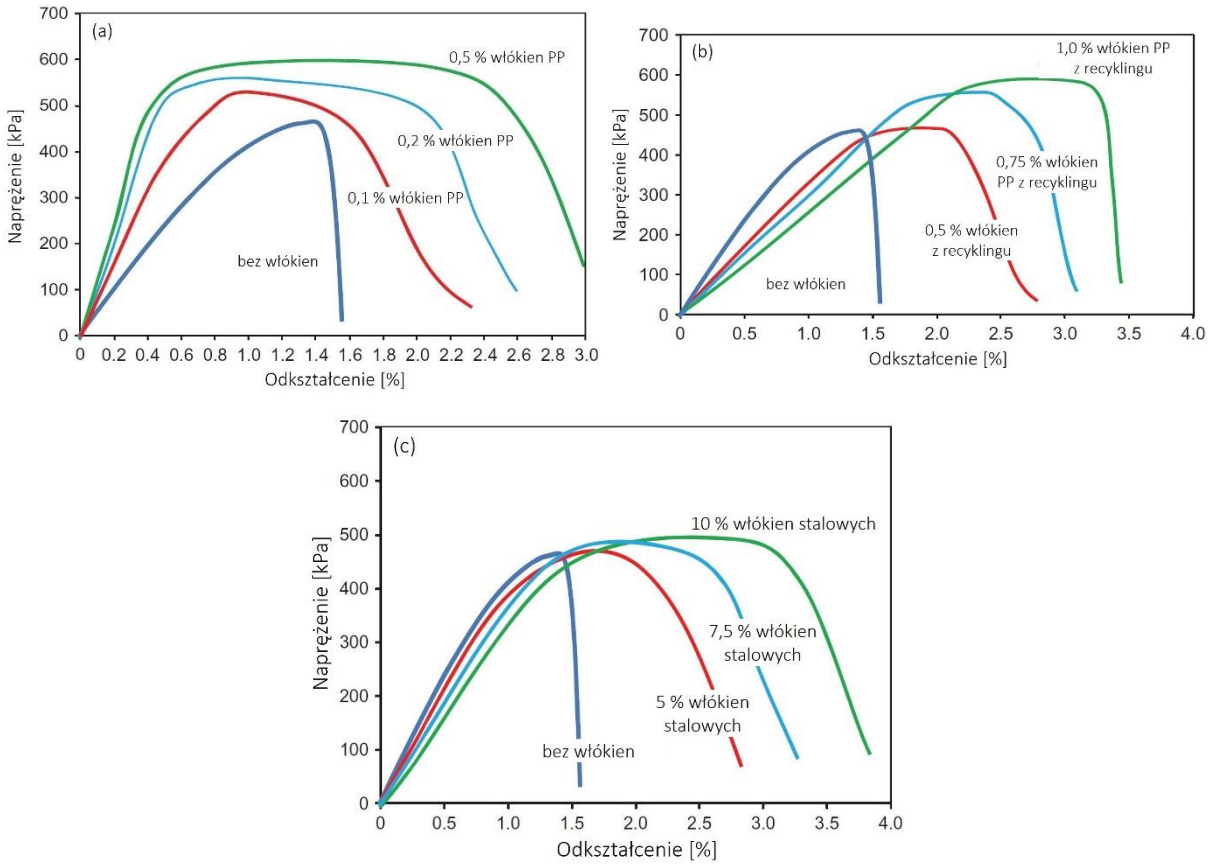
Rysunek 2.22 Zależność wskaźnika poprzecznych odkształceń plastycznych od rodzaju gruntu, włókien i czasu dojrzewania [49]



Rysunek 2.23 Zależność modułu sprężystości od rodzaju gruntu, włókien i czasu dojrzewania [49]

Wyniki badań testów trwałościowych pozwalają stwierdzić, iż dodatek włókien poskutkował poprawą badanych cech. Podobnie, badane cechy wytrzymałościowe dzięki obecności włókien albo uległy polepszeniu albo pozostały bez zmian. Wzrost wytrzymałości na ściskanie jest silnie uzależniony od rodzaju wzmacnianego gruntu i zastosowanych włókien, przy stałej zawartości cementu i włókien. Zdaniem autorów, wytrzymałość na ściskanie gruntobetonu rośnie wraz ze wzrostem gęstości w stanie suchym wzmacnianego gruntu i zmniejszeniem zawartości jego drobnych cząstek. Wzrost ten jest widoczny w przypadku próbek po 28 dniach dojrzewania. Na podstawie badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu stwierdzono, że dodatek włókien skutkuje wzrostem jej wartości. Wzrost ten jest zależny od rodzaju wzmacnianego gruntu oraz rodzaju i zawartości stosowanych włókien. Dodatkowo, zauważono, że istnieje optymalna zawartość włókien, zależna od rodzaju wzmacnianego gruntu, przy której następuje znaczny wzrost wytrzymałości. Dodatek włókien poskutkował także zwiększeniem lub zachowaniem wartości modułu sprężystości na tym samym poziomie. Analizując wartości wskaźnika poprzecznych odkształceń plastycznych można stwierdzić, iż jest on niższy w przypadku mieszanek z włóknami celulozowymi. Świadczy to o wyższej odporności na pękanie przy rozciąganiu takich kompozytów.

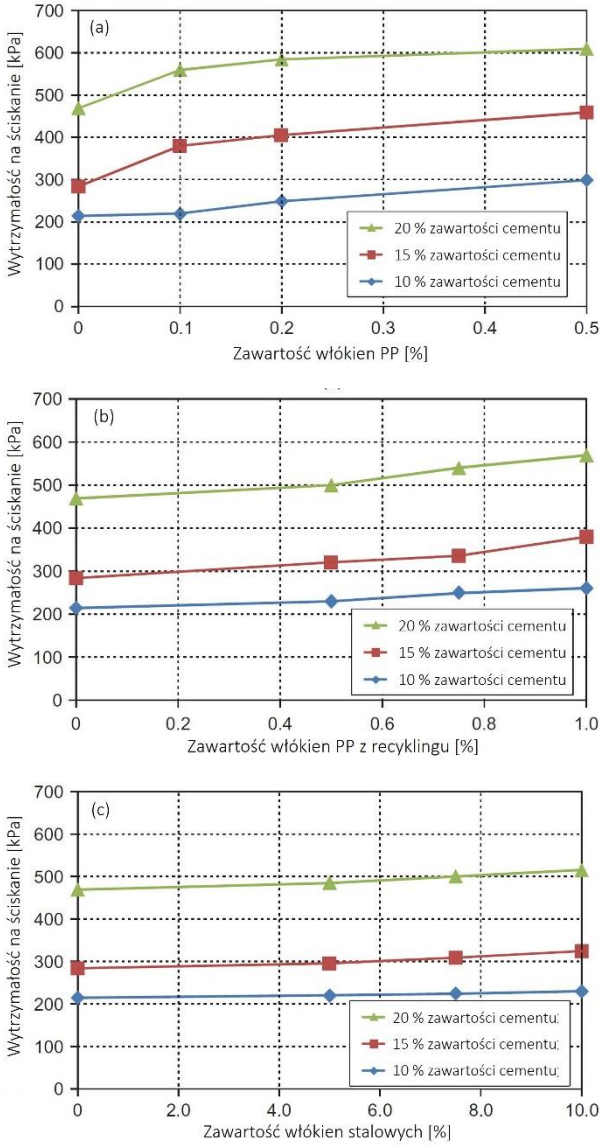
Ocenę wpływu trzech różnych rodzajów włókien na cechy mechaniczne gruntobetonów z gruntu spoistego (gliny) przeprowadzili Fatahi et al. [50]. Przedmiotem ich badań były 14-dniowe próbki walcowe (h = 200 m, ø = 101,6 mm) o różnej zawartości cementu portlandzkiego (10%, 15%, 20% masy suchego gruntu) i różnych poziomach dozowania włókien w zależności od ich rodzaju. Zastosowano monofilamentowe włókna polipropylenowe PP w ilości 0,1 %, 0,2 % i 0,5%, włókna polipropylenowe uzyskane z recyklingu dywanów w ilości 0,5 %, 0,75 % i 1 % oraz włókna stalowe w ilości 5 %, 7,5 % i 10 % masy suchego gruntu. Włókna polipropylenowe charakteryzowały się długością równą 18 mm, włókna polipropylenowe z recyklingu 10 mm, a włókna stalowe 18,4 mm. Próbki poddano badaniom wytrzymałości na ściskanie wraz z pomiarem odkształceń (rysunek 2.24) oraz wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu (rysunek 2.27).



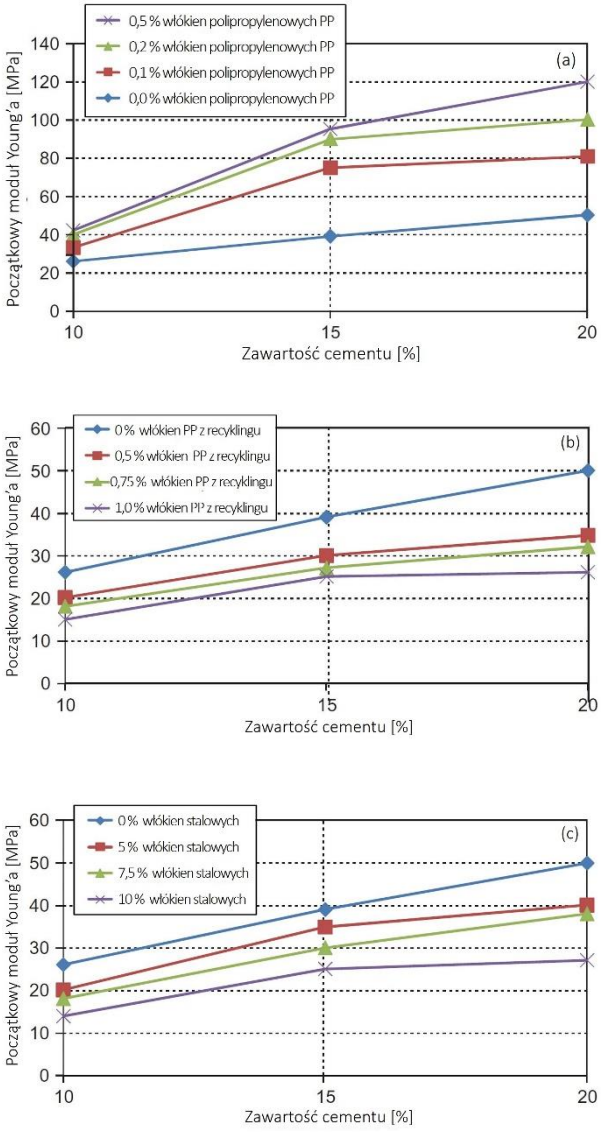
Rysunek 2.24 Wykresy zależności naprężenie-odkształcenie gruntobetonu stabilizowanego cementem w ilości 20% z dodatkiem włókien: (a) polipropylenowych, (b) polipropylenowych z recyklingu, (c) stalowych [50]

Prezentowane powyżej wykresy wskazują, że dodatek poszczególnych włókien zmienia w różnym stopniu wytrzymałość na ściskanie, sztywność oraz kruchość gruntobetonów. Wzrost zawartości włókien, przede wszystkim polipropylenowych, skutkuje zwiększeniem wartości wytrzymałości na ściskanie. Dodatek włókien przełożył się również na zwiększenie plastyczności będących pod obciążeniem gruntobetonów. Wprowadzenie do matrycy włókien polipropylenowych zwiększa wartość początkowego modułu Young'a badanych kompozytów (rysunek 2.26 (a)). Natomiast dodatek włókien

polipropylenowych z recyklingu oraz włókien stalowych skutkuje spadkiem sztywności kompozytów, a więc obniżeniem wartości początkowego modułu Young'a (rysunek 2.26 (b) oraz 2.26 (c)). Naturalnie wzrost zawartości cementu przekłada się na wyraźną poprawę wytrzymałości na ściskanie gruntobetonów (rysunek 2.25) oraz wzrost sztywności kompozytów niezależnie od rodzaju zbrojenia.

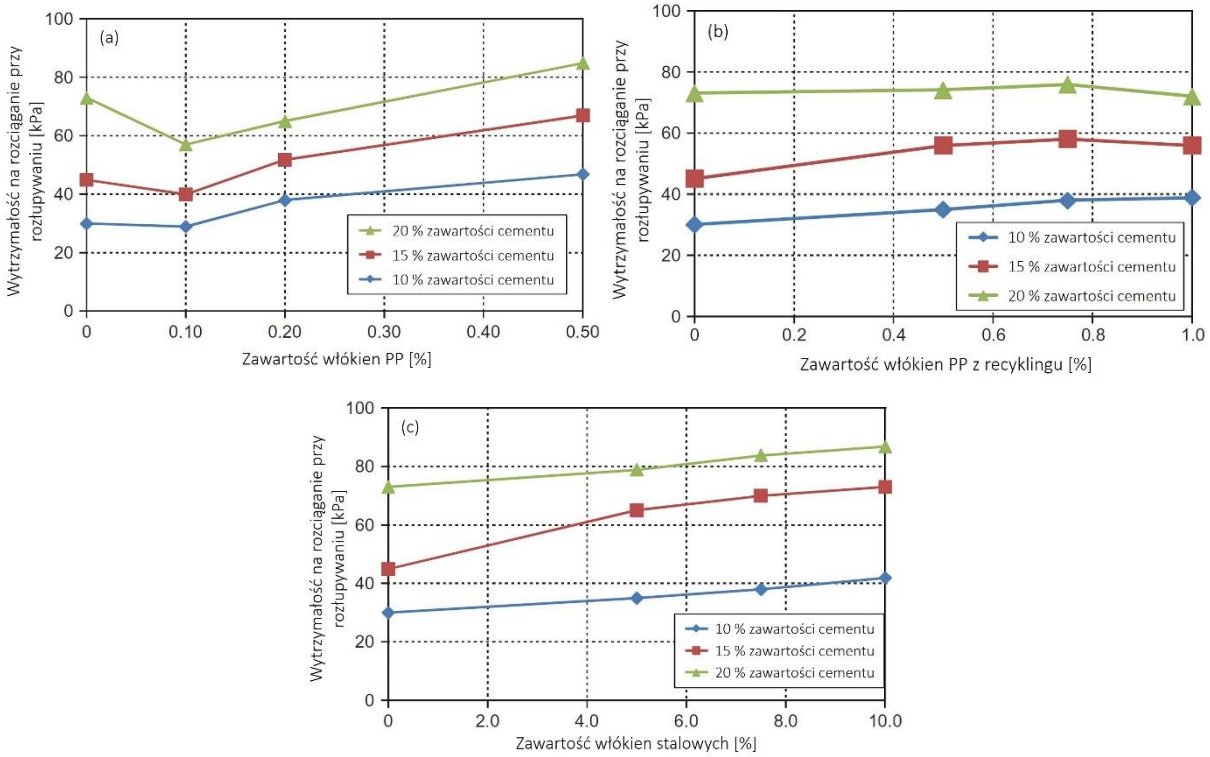


Rysunek 2.25 Zależność wytrzymałości na ściskanie od zawartości włókien: (a) polipropylenowych, (b) polipropylenowych z recyklingu, (c) stalowych [50]



Rysunek 2.26 Zależność początkowego modułu Young'a od zawartości cementu dla dodatku włókien: (a) polipropylenowych, (b) polipropylenowych z recyklingu, (c) stalowych [50]

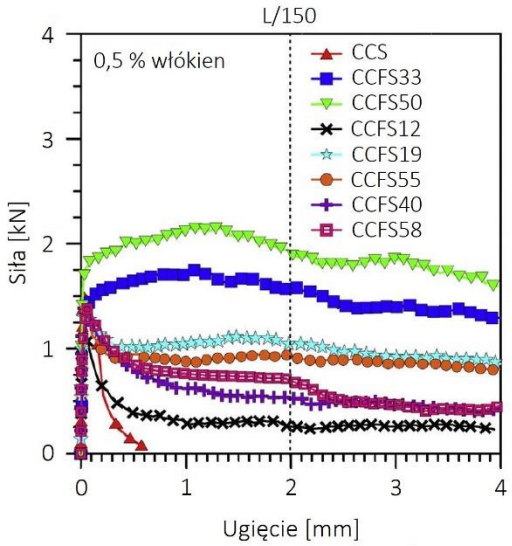
W przypadku wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu niewielkie ilości włókien polipropylenowych nie wpływały na jej wartości, a nawet początkowo delikatnie je obniżały. Wzrost wartości tej wytrzymałości następował przy zwiększeniu ilości dozowanych włókien. Obecność włókien polipropylenowych z recyklingu i stalowych w matrycy gruntobetonowej natomiast spowodowała wzrost wytrzymałości na rozciąganie. Jednakże decydującym czynnikiem wpływającym na poprawę wartości tego parametru była zwiększona zawartość cementu.



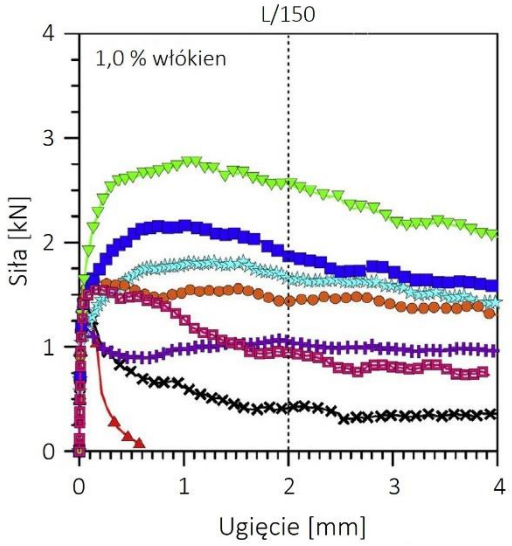
Rysunek 2.27 Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu od zawartości włókien: (a) polipropylenowych, (b) polipropylenowych z recyklingu, (c) stalowych [50]

Jamsawang et al. [51] zwracają uwagę, iż wielu badaczy oceniających wpływ dodatku włókien na właściwości mechaniczne gruntobetonów ogranicza się do wykonywania badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Oni sami natomiast ocenili wpływ siedmiu rodzajów włókien na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu kompozytów gruntobetonowych z gruntu niespoistego (piasku) po 28 dniach dojrzewania (rysunki 2.28 ÷ 2.31). Przeznaczeniem badanych kompozytów jest zastosowanie jako podbudowa pod chodniki dla pieszych. Do badań wybrano następujące włókna: polipropylenowe o długości 12, 19, 40 i 55 mm (CCFS12, CCFS19, CCFS40 i CCFS55), stalowe o długości 33 i 50 mm (CCFS33 i CCFS50) oraz włókna poliolefinowe o długości 58 mm (CCFS58). Zastosowano również cztery poziomy dozowania włókien: 0,5, 1,0, 1,5 oraz 2,0 % objętości gruntu. Przyjęto natomiast stałą zawartość cementu na poziomie 5 % masy suchego gruntu. W celu oceny badanych rodzajów włókien autorzy wprowadzają pojęcie całkowitej efektywności porównawczej, która pozwala na klasyfikacje testowanych rozwiązań. Tworzy ją szereg wyznaczonych podczas badań parametrów: wytrzymałość na zginanie, współczynnik wytrzymałości na zginanie, współczynnik wytrzymałości resztkowej, wskaźnik plastyczności, energia zniszczenia, współczynnik równoważnej wytrzymałości na zginanie oraz maksymalna szerokość pęknięcia. Autorzy definiują współczynnik wytrzymałości na zginanie jako iloraz maksymalnego naprężenia przenoszonego przez zbrojenie rozproszone i naprężenia niszczącego matrycę. Współczynnik wytrzymałości resztkowej oznacza natomiast iloraz wytrzymałości na zginanie wyznaczonej przy ugięciu równym L/150 i naprężenia niszczącego matrycę. Równocześnie te same badania wykonano dla próbek gruntobetonowych bez dodatku włókien (CCS).

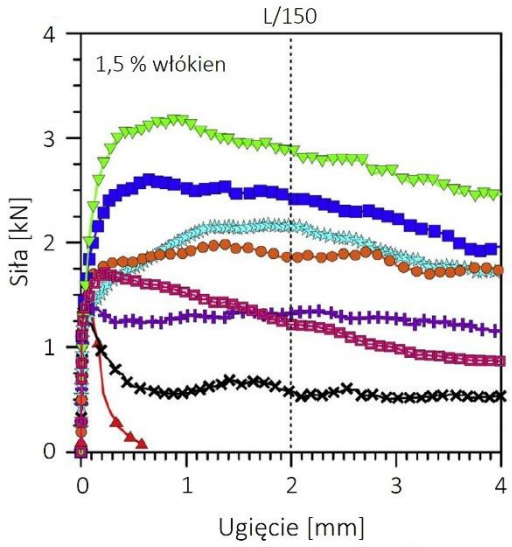
Badania przeprowadzono na próbkach prostopadłościennych o wymiarach 100 x 100 x 350 mm. Próby zginania prowadzono z prędkością ugięcia 0,05 mm/min do momentu osiągnięcia przez belkę całkowitego ugięcia w środku jej rozpiętości równego 4 mm. Obciążenie przykładano dwupunktowo w rozstawie 100 mm, natomiast rozstaw podpór wynosił 300 mm.



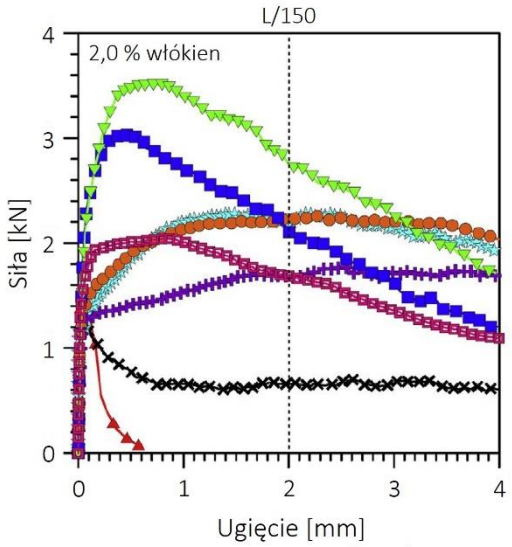
Rysunek 2.28 Zależność siły od ugięcia dla próbek z różnymi rodzajami włókien dla ich 0,5% zawartości [51]



Rysunek 2.29 Zależność siły od ugięcia dla próbek z różnymi rodzajami włókien dla ich 1,0% zawartości [51]



Rysunek 2.30 Zależność siły od ugięcia dla próbek z różnymi rodzajami włókien dla ich 1,5% zawartości [51]



Rysunek 2.31 Zależność siły od ugięcia dla próbek z różnymi rodzajami włókien dla ich 2,0% zawartości [51]

Badania próbek z gruntobetonu bez dodatku włókien (CCS) potwierdziły, iż jest to materiał kruchy, który w momencie zarysowania traci możliwość dalszego przenoszenia obciążenia. W przypadku badań gruntobetonów z dodatkiem włókien, otrzymane wyniki wskazują, iż rodzaj włókien przy ich stałej zawartości wpływa na charakter wykresu siła-ugięcie, a co za tym idzie wartości oznaczanych

parametrów. Wyniki pokazują, iż najlepszą efektywność przy zginaniu charakteryzuje się włókno stalowe 50 mm (CCFS50). Bardzo dobre i dobre rezultaty odnotowano kolejno dla włókien polipropylenowych 19 mm (CCFS19) i stalowych 33 mm (CCFS33). Najgorzej wypadły krótkie, 12 mm włókna polipropylenowe (CCFS12). Zastosowanie włókien stalowych zwiększa wytrzymałość, sztywność i redukuje podatność na zarysowanie. Natomiast włókna polipropylenowe redukują sztywność kompozytu i zwiększają jego wytrzymałość resztkową. Wpływ na efektywność wzmocnienia mają przede wszystkim budowa zewnętrzna (chropowatość) powierzchni włókna i jego długość. Biorąc pod uwagę ten sam rodzaj włókna, lepszą efektywność pracy zapewniają dłuższe włókna. Natomiast mówiąc o strefie stykowej pomiędzy matrycą i inkluzją, mechanizm współpracy włókien z gruntobetonem został zbadany za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM). Stwierdzono, iż dzięki hydrofilowej powierzchni i wysokiemu stopniowi zagęszczenia gruntobetonowej matrycy na styku z włóknem, włókno stalowe w pełni współpracuje z matrycą. Dodatkowo, produkty hydratacji w pełni pokrywają powierzchnię włókna stalowego, co przekłada się na jego mocne więzy z wzmacnianą matrycą. To zjawisko przyczynia się do tego, że włókna stalowe wykazują zdolność do wzmacniania matrycy przy mniejszej ich zawartości w porównaniu z włóknami syntetycznymi. Te ostatnie nie zapewniają pełnego kontaktu z matrycą, w związku z czym aby uzyskać pożądany stopień wzmocnienia, ich ilość musi być większa.

2.4 PODSUMOWANIE

Analiza literatury w tematyce gruntobetonów i fibrogruntobetonów skłania do refleksji, iż istnieje jeszcze wiele zagadnień wartych wyjaśnienia w badaniach dotyczących kształtowania właściwości tych materiałów. W przypadku gruntobetonów szczególnie widoczny jest brak zwartych wytycznych do projektowania składów tych kompozytów w celu osiągania wymaganych właściwości.

W dotychczas opublikowanych badaniach fibrogruntobetonów wyraźnie brak jest badań efektywności pracy włókien, zwłaszcza po zarysowaniu matrycy gruntobetonowej. Większość prezentowanych w literaturze badań gruntobetonów ze zbrojeniem rozproszonym skupia się w głównej mierze na oznaczaniu ich wpływu na wytrzymałość na ściskanie, odkształcalność i wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu. Badacze ograniczali się w wyborze zbrojenia do powszechnie stosowanych włókien sztucznych, naturalnych oraz stalowych. W zagadnieniu efektywności pracy włókien w gruntobetonach istotną kwestią jest również analiza zakotwienia zbrojenia w matrycy, której dostępna literatura nie porusza. Brakuje także informacji związanych z oceną przyczepności matrycy gruntobetonowej do włókien oraz problemem długości efektywnej zakotwienia. Dla uzyskania pożądanego wzmocnienia ważna jest również jednorodność rozmieszczenia włókien w całej objętości gruntobetonu, o czym literatura nie wspomina. Ponadto w dostępnej literaturze występuje duże zróżnicowanie wymiarów stosowanych próbek oraz metod badawczych. Skutkuje to brakiem możliwości porównania prezentowanych wyników badań, a także i ograniczoną uniwersalnością empirycznych

zależności (np. pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i modułem sprężystości) podawanych przez różnych badaczy. W związku z rosnącą popularnością stosowania gruntobetonów i fibrogruntobetonów w praktyce, wydaje się niezbędnym ustalenie choćby podstawowego zestawu standardów prowadzenia badań. Rodzaj wzoru mogą stanowić istniejące standardy dotyczące betonów cementowych.

3 CELE, TEZY ORAZ RAMOWY PROGRAM BADAŃ

3.1 CELE PRACY

Przeprowadzone badania miały na celu:

- w zakresie projektowania składów gruntobetonów i fibrogruntobetonów:
  - ocenę wpływu jakościowego i ilościowego zróżnicowania składu gruntobetonów na ich właściwości i w efekcie opracowanie ogólnych zasad ich projektowania,
- w zakresie metodyki badań właściwości kompozytów gruntobetonowych:
  - weryfikację czy możliwa jest adaptacja metody badania modułu sprężystości przy ściskaniu betonów cementowych do oceny modułu sprężystości gruntobetonów i fibrogruntobetonów,
  - opracowanie metody badania efektywności wzmocnienia kompozytów gruntobetonowych za pomocą zbrojenia rozproszonego,
- w zakresie właściwości kompozytów fibrogruntobetonowych:
  - ocenę przyczepności matrycy gruntobetonowej do analizowanych włókien,
  - ocenę wpływu dodatku włókien na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu fibrogruntobetonów oraz na charakter ich pracy w stanie pokrytycznym,
  - ocenę wpływu dodatku włókien na moduł sprężystości przy ściskaniu,
- w zakresie właściwości gruntobetonu w istniejących obiektach:
  - ocenę podstawowych właściwości fizycznych i mechanicznych gruntobetonów i fibrogruntobetonów.

3.2 TEZY PRACY

- Wyniki zaplanowanych badań pozwolą na określenie zależności pomiędzy składem mieszanki a właściwościami zarówno mieszanki jak i materiału stwardniałego niezbędnych do projektowania składów gruntobetonów i fibrogruntobetonów o założonych właściwościach.
- Zastosowanie zbrojenia rozproszonego w postaci włókien z tworzyw syntetycznych oprócz podwyższenia podstawowych właściwości wytrzymałościowych gruntobetonu spowoduje, podobnie jak w przypadku betonów cementowych, pseudo-plastyczny charakter zniszczenia oraz umożliwi pracę materiału w stanie pokrytycznym.
- Stosowane w praktyce mieszanie wgłębne metodą trench mixing zapewnia w objętości formowanego elementu uzyskanie jednorodnej mieszanki fibrogruntobetonowej, a w konsekwencji także jednorodności stwardniałego kompozytu wbudowanego w konstrukcję.
- Wobec braku szczegółowych zaleceń dotyczących metod badania właściwości gruntobetonów i fibrogruntobetonów możliwą jest adaptacja niektórych metod badań stosowanych wobec betonów cementowych.

3.3 RAMOWY PROGRAM BADAŃ

W celu doświadczalnego udowodnienia zasadności sformułowanych tez, a także w celu rozszerzenia wiedzy na temat nowoczesnych gruntobetonów i fibrogruntobetonów, w ramach niniejszej pracy przeprowadzone zostały badania o opisanym dalej zakresie. Na wstępie została dokonana ocena wpływu zróżnicowania składów gruntobetonów na właściwości mieszanek gruntobetonowych oraz stwardniałych kompozytów, która pozwoliła na opracowanie zasad projektowania składów gruntobetonów z dwóch rodzajów gruntów rodzimych: spoistego i niespoistego. Następnie dokonana została analiza współpracy włókien syntetycznych z wybranymi matrycami gruntobetonowymi podczas badania typu pull-out. Ocenie przyczepności poddano cztery rodzaje włókien syntetycznych, różniące się materiałem i geometrią. Przeprowadzenie tej analizy pozwoliło na wybór długości włókien, stosowanych w dalszych badaniach kompozytów fibrogruntobetonowych. Obszerna część pracy została poświęcona badaniom efektywności zbrojenia rozproszonego fibrogruntobetonów. W celu jej realizacji, na podstawie wytycznych zawartych w dokumentach poświęconych badaniom fibrobetonu, opracowano metodykę badania, dostosowaną do charakterystyki fibrogruntobetonów. Badania prowadzono na wybranych sześciu matrycach gruntobetonowych, z których trzy wykonane były z gruntu niespoistego, a trzy z gruntu spoistego. Przeprowadzone badania efektywności zbrojenia rozproszonego umożliwiły ocenę pracy wybranych rodzajów włókien syntetycznych oraz doprowadziły do określenia zakresu ich ilościowego poziomu dozowania. Kolejnym etapem pracy była ocena wpływu zbrojenia rozproszonego na moduł sprężystości przy ściskaniu kompozytów fibrogruntobetonowych. Ostatnia część pracy została poświęcona ocenie właściwości kompozytów gruntobetonowych i fibrogruntobetonowych wykonanych w technologii trench mixing.

4 PROJEKTOWANIE SKŁADÓW GRUNTOBETONÓW

4.1 STOSOWANE MATERIAŁY

Projektowanie składów gruntobetonów można podzielić na dwie części. Początkowo należy dokonać projektowania jakościowego, a więc wybrać składniki mające stanowić kompozyt. Do badań wytypowano więc dwa rodzaje gruntów (niespoisty i spoisty) reprezentujących większość gruntów występujących na terenie Polski i oznaczono ich podstawowe właściwości. Wyniki badań podstawowych właściwości tych gruntów przedstawiono w poniższej tabeli 4.1.

Tabela 4.1 Właściwości wytypowanych do badań gruntów

Właściwość	Grunt niespoisty	Grunt spoisty
Uziarnienie [% m.]		
- frakcje żwirowe 2/40 mm	5	-
- frakcje piaskowe 0,05/2 mm	95	40
- frakcje pylaste 0,002/0,05 mm	-	42
- frakcje iłowe < 0,002 mm	-	18
Rodzaj gruntu	piasek średni + poj. żwiry	glina (brązowa)
Gęstość objętościowa ρ [g/cm^3]	2,65	2,68
Wilgotność optymalna (Proctor) w_{opt} [%]	8,5	11,1
Granica plastyczności w_L [%]	-	15,32
Granica płynności $w_{n\,śr}$ [%]	-	25,8
Stopień plastyczności I_L	-	0,05
Przybliżona zaw. $CaCO_3$ [%] *wg PN-75/ B-04481*	< 1	1 do 3

Do wykonania serii niezbrojonych gruntobetonów wybrano cement powszechnego użytku CEM II/B-S 32,5 R. Powodem wyboru tego cementu była jego popularność w robotach realizowanych w Polsce, związanych z technologiami wzmacniania gruntów, jego odpowiednie do tego przeznaczenia cechy techniczne oraz relatywnie przyjazny charakter jego produkcji dla środowiska naturalnego. Należy podkreślić, że cement ten składa się w 21-35 % masy z granulowanego żużla wielkopiecowego. Klinkier portlandzki stanowi w nim około 65-79 % masy. Powoduje to, że ślad węglowy związany z produkcją tego cementu, a więc także i modyfikowanego nim gruntu, jest znacznie niższy niż w przypadku stosowania cementu portlandzkiego. W tabeli 4.2 podano skład chemiczny stosowanego w badaniach cementu CEM II/B-S 32,5 R, a w tabeli 4.3 skład mineralny klinkieru stosowanego do jego produkcji. Tabela 4.3 natomiast przedstawia podstawowe właściwości fizyczne wybranego cementu.

Tabela 4.2 Skład chemiczny (tlenkowy) cementu CEM II/B-S 32,5 R

Składnik	Zawartość [%] masy
SiO_2	24,29
Al_2O_3	5,66
Fe_2O_3	2,50
CaO	58,53
MgO	2,30
SO_3	2,80
K_2O	0,77
Na_2O	0,22

Tabela 4.3 Skład fazowy klinkieru stosowanego do produkcji cementu CEM II/B-S 32,5 R

Składnik	Zawartość [%] masy
C_3S	59,73
C_2S	20,38
C_3A	9,53
C_4AF	9,67

Tabela 4.4 Właściwości fizyczne cementu CEM II/B-S 32,5 R

Właściwość	Wartość
Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach [MPa]	18,0
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	49,0
Czas początku wiązania [min]	190
Woda do konsystencji normowej [%]	28
Powierzchnia właściwa [cm^2/g]	3570
Gęstość [g/cm^3]	3,10

4.2 PODSTAWOWE ZASADY KOMPONOWANIA SKŁADU GRUNTOBETONU

Druga część projektowania składu gruntobetonu jest zagadnieniem ilościowym. W literaturze brakuje jednak korelacji pomiędzy charakterystyką składu a właściwościami mieszanki jak i kompozytu stwardniałego. Wobec tego zaprezentowano poniżej tok postępowania, według którego obliczano składy przedmiotowych kompozytów na przyjętą jednostkę objętości, którą był 1 m^3.

Pierwszym krokiem postępowania było zebranie informacji o rodzaju, gęstości objętościowej w stanie suchym ρ_{Gs} i wilgotności naturalnej w_g wzmacnianego gruntu. Następnie przyjęto założenia dotyczące zawartości zaczynu cementowego V_z oraz wartości rzeczywistego wskaźnika

wodno-cementowego **w/c** dla wzmacnianego gruntu. Tworząc układ dwóch równań obliczono zawartość cementu **C** oraz ilość wody w zaczynie cementowym przez korektę **W**:

$$\frac{C}{\rho_C} + \frac{W}{\rho_W} = V_z \tag{1}$$

$$\frac{W}{C} = \cdots \text{(do założenia)} \tag{2}$$

$$\downarrow$$

$$C = \ldots$$

$$W = \ldots$$

Dzięki założonej objętości zaczynu cementowego V_z w prosty sposób wyznaczono brakującą objętość gruntu V_G w projektowaniu jednostce objętości oraz masę gruntu w stanie suchym G_s:

$$V_G = 1000 - V_z \tag{3}$$

$$G_s = V_G \cdot \rho_{Gs} \tag{4}$$

W ten sposób obliczono składy wszystkich analizowanych dalej serii gruntobetonów przedstawionych w tabelach 4.5 i 4.6, których wykonanie pozwoliło na opracowanie zależności umożliwiających projektowanie kompozytów gruntobetonowych o oczekiwanych właściwościach.

Tabela 4.5 Składy mieszanek gruntobetonowych dla **gruntu niespoistego** – **piasku średniego**

		w/c	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,6	0,4
			składniki [kg/m³]															
V_z [dm³/m³]	500	C	134	142	150	160	171	184	198	215	236	260	290	328	378	445	542	692
		W	457	454	451	448	445	441	436	431	424	416	406	394	378	356	325	277
		G_s	1325															
	450	C	121	128	135	144	154	165	178	194	212	234	261	296	340	401	488	623
		W	411	409	406	404	400	397	392	388	382	374	366	355	340	321	293	249
		G_s	1458															
	400	C	107	114	120	128	137	147	159	172	188	208	232	263	302	356	434	554
		W	365	363	361	359	356	353	349	344	339	333	325	315	302	285	260	221
		G_s	1590															
	350	C	94	99	105	112	120	129	139	151	165	182	203	230	265	312	379	484
		W	320	318	316	314	311	309	305	301	297	291	284	276	265	249	228	194
		G_s	1723															

Tabela 4.6 Składy mieszanek gruntobetonowych dla **gruntu spoistego** – **gliny**

		w/c	4,0	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0
			składniki [kg/m³]															
V_z [dm³/m³]	650	C	150	158	166	175	185	196	208	222	239	258	280	306	338	377	427	491
		W	601	599	597	594	590	587	583	578	573	567	560	551	541	528	512	491
		G_s	938															
	600	C	139	146	153	161	170	181	192	205	200	238	258	283	312	348	394	454
		W	555	553	551	548	545	542	538	534	529	523	517	509	499	488	473	454
		G_s	1072															
	550	C	127	133	140	148	156	166	176	188	202	218	237	259	286	319	361	416
		W	509	507	505	502	500	497	493	489	485	480	474	466	458	447	433	416
		G_s	1206															

Wzmacniany grunt rodzimy posiada naturalną wilgotność w_g, którą należy uwzględnić w obliczaniu składu gruntobetonu. W tym celu najpierw wyznaczano masy gruntu w stanie naturalnym G_n:

$$G_n = G_s \cdot (1 + w_g) \tag{5}$$

Następnie z poniższego wzoru obliczano skorygowaną ilość wody W_{sk}, jaką należy zastosować w projektowanym zaczynie cementowym:

$$W_{sk} = W - (G_n - G_s) \tag{6}$$

4.3 KONSYSTENCJA MIESZANEK GRUNTOBETONOWYCH

Dotychczasowe działania inżynierskie dotyczące realizacji konstrukcji wykonanych z gruntobetonu nie były poprzedzone badaniami laboratoryjnymi. Ilość zaczynu i wskaźnik w/c mieszanki gruntobetonowej warunkowane były uzyskaniem jej odpowiedniej konsystencji. Ze względu na specyfikę powstawania gruntobetonu w technologii wykonywania ścian obudów głębokich wykopów metodą trench mixing, kryterium poprawnej konsystencji mieszanki gruntobetonowej oparte zostało na wymaganiach częściowo podobnych do tych, jakie są stosowane wobec samozagęszczalnych mieszanek betonowych. Tak więc, od mieszanek wymagano, oprócz zdolności do samozagęszczania się, równoczesnego braku segregacji składników, aby nie następował z nich wyciek wody (bleeding).

Projektując skład gruntobetonu jako warunki brzegowe przyjęto więc odpowiednią konsystencję mieszanki. Stąd też dla wybranych rodzajów gruntów zastosowano różne ilości zaczynu, tak dobrane, aby otrzymać konsystencję umożliwiającą wbudowanie powstałego materiału na miejscu jego przeznaczenia. Badania konsystencji przeprowadzono na stoliku wstrząsowym stosowanym do badań zapraw zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1015-3 [52]. Miarą konsystencji była z jednej strony, średnica rozpływu, z drugiej zaś obserwacja jakościowa zachowania się mieszanki w czasie badania (jednorodność rozpływu, tendencja do oddzielania się wody itp.). Analizując wyniki przeprowadzonych

pomiarów można stwierdzić, iż w zależności od rodzaju stosowanego gruntu mieszanki charakteryzujące się odpowiednią konsystencją do wbudowania metodą trench mixing osiągały wartość rozpływu z przedziału od 150 do 240 mm dla piasku średniego oraz od 170 do 230 mm dla gliny. Poniższe zdjęcia obrazują trzy przedziały uzyskiwanej podczas badań konsystencji mieszanek gruntobetonowych dla mieszanek wykonanych z gruntu niespoistego (rysunki 4.1 ÷ 4.3) oraz gruntu spoistego (rysunki 4.4 ÷ 4.6).

Rysunek 4.1 Zbyt gęsta konsystencja mieszanki:
- średnica rozpływu = 125 mm;
- V_z = 400 dm^3/m^3;
- w/c = 0,6

Rysunek 4.2 Właściwa konsystencja mieszanki:
- średnica rozpływu = 210 mm;
- V_z = 450 dm^3/m^3;
- w/c = 1,2

Rysunek 4.3 Zbyt ciekła konsystencja mieszanki:
- średnica rozpływu = 250 mm;
- Vz = 450 dm^3/m^3;
- w/c = 2,0

Rysunek 4.4 Zbyt gęsta konsystencja mieszanki:
- średnica rozpływu = 155 mm;
- V_z = 550 dm^3/m^3;
- w/c = 2,2

Rysunek 4.5 Właściwa konsystencja mieszanki:
- średnica rozpływu = 200 mm;
- V_z = 600 dm^3/m^3;
- w/c = 2,4

Rysunek 4.6 Zbyt ciekła konsystencja mieszanki:
- średnica rozpływu = 270 mm;
- Vz = 650 dm^3/m^3;
- w/c = 2,6

W ten sposób podczas projektowania składu gruntobetonu opracowano mapy konsystencji wstępnie przewidzianych do badań mieszanek gruntobetonowych (tabele 4.7, 4.8), pokazujące w jaki sposób zależy ona od ilości wprowadzanego do gruntu zaczynu cementowego V_z oraz jego wskaźnika wodno-cementowego w/c. Sporządzone mapy wskazują dla jakich kombinacji V_z – w/c uzyskać można poprawną lub akceptowalną konsystencję mieszanki. Mapy te uzupełniono dodatkowo o informacje o granicznych wartościach w/c związanych z zużyciem cementu i wytrzymałością na ściskanie materiału stwardniałego. W założeniach projektowych składy analizowanych gruntobetonów zostały zróżnicowane w następujący sposób pod względem:

- ilości dozowanego zaczynu cementowego:
  - grunt niespoisty / piasek średni - V_z (od 350 do 500 dm^3/m^3 z gradacją co 50 dm^3/m^3),

- grunt spoisty / glina - V_z (od 550 do 650 dm^3/m^3 z gradacją co 50 dm^3/m^3),

- wskaźnika wodno-cementowego zaczynu w/c:
  - grunt niespoisty / piasek średni (od 3,2 do 0,6 z gradacją co 0,2),
  - grunt spoisty / glina (od 3,8 do 1,2 z gradacją co 0,2).

Z powyższego wynikają zawartości cementu, które mieściły się w następujących granicach:

- grunt niespoisty / piasek średni - C (od 99 do 542 kg/m^3),
- grunt spoisty / glina - C (od 133 do 427 kg/m^3).

Tabela 4.7 Mapa konsystencji mieszanek gruntobetonowych dla **gruntu niespoistego** – **piasku średniego**

	w/c	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,6	0,4
V_z [dm^3/m^3]	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	X
	450	X	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	X
	400	X	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
	350	X	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

-	konsystencja mieszanki – zbyt ciekła, duża sedymentacja składników, znaczny bleeding
-	konsystencja mieszanki – zbyt gęsta, brak zdolności do samozagęszczenia
+	konsystencja mieszanki – właściwa, brak sedymentacji, brak bleedingu
X	wytrzymałość za niska, w/c > 3,2
X	nieekonomiczne zużycie cementu, w/c ratio < 0,6, zawartość cementu > 542 kg/m^3

Tabela 4.8 Mapa konsystencji mieszanek gruntobetonowych dla **gruntu spoistego** - **gliny**

	w/c	4,0	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0
V_z [dm^3/m^3]	650	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	X
	600	X	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	X
	550	X	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

-	konsystencja mieszanki – zbyt ciekła, duża sedymentacja składników, znaczny bleeding
-	konsystencja mieszanki – zbyt gęsta, brak zdolności do samozagęszczenia
+	konsystencja mieszanki – właściwa, brak sedymentacji, brak bleedingu
X	wytrzymałość za niska, w/c > 3,8
X	nieekonomiczne zużycie cementu, w/c ratio < 1,2, zawartość cementu > 427 kg/m^3

Spośród przyjętych kombinacji składów gruntobetonów właściwą konsystencją charakteryzowały się 22 warianty z gruntu niespoistego oraz 25 wariantów z gruntu spoistego. Mieszanki gruntobetonowe wykonywano w warunkach laboratoryjnych. W przypadku gruntobetonów komponowanych z gruntu niespoistego składniki mieszano w mieszarce do betonu o objętości 50 dm^3. Natomiast w przypadku gruntobetonów z gruntu spoistego do homogenizacji składników wykorzystywano mieszarkę ręczną montowaną na statywie, wyposażoną w dwa przeciwbieżne mieszadła. Sposób mieszania oraz

wykorzystywane narzędzia dostosowano do rodzaju gruntu tak, aby każdorazowo otrzymywać jednorodną mieszaninę. Objętość jednorazowych zarobów danego wariantu składu gruntobetonu wynosiła około 30 dm^3. Bezpośrednio po wymieszaniu składników formowano próbki w postaci belek o wymiarach 100 x 100 x 500 mm. Dla każdego składu o właściwej konsystencji wykonano po trzy belki, co w rezultacie przełożyło się na otrzymanie 66 próbek do badań z gruntu niespoistego oraz 75 próbek z gruntu spoistego.

4.4 WILGOTNOŚĆ GRUNTOBETONÓW STWARDNIAŁYCH

Właściwości mechaniczne stwardniałych gruntobetonów są silnie zależne od ich wilgotności w chwili badania. Generalnie w gruntobetonie istnieje tendencja, iż wraz ze spadkiem wilgotności rośnie wytrzymałość materiału. Istotnym jest więc zapewnienie odpowiednich warunków, w których próbki gruntobetonowe są kondycjonowane. Dlatego próbki tuż po zaformowaniu były przykrywane geowłókniną nasyconą wodą i folią. Następnie po rozformowaniu każda próbka osobno była szczelnie owijana folią, tak aby uniemożliwić wymianę wilgoci z otoczeniem. Tak zabezpieczone przed utratą wilgoci próbki były przechowywane w warunkach laboratoryjnych w temperaturze +20±2°C aż do momentu badania. Badania prowadzono więc w naturalnej wilgotności gruntobetonów, wynikającej tylko i wyłącznie z ich składu, co pozwoliło na zbliżenie się do warunków dojrzewania gruntobetonu w realnych elementach.

4.5 PODSTAWOWE CECHY MECHANICZNE GRUNTOBETONÓW STWARDNIAŁYCH

Zakres dalszych badań gruntobetonów obejmował oznaczenie właściwości mechanicznych po 28 dniach dojrzewania wariantów składów, których konsystencja została uznana za właściwą do stosowania na skalę techniczną. Pierwszą z cech mechanicznych była wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu $f_{ct,fl}$, którą określano zgodnie z wytycznymi zawartymi w załączniku A normy PN-EN 12390-5 [53]. Badanie przeprowadzono na próbkach pryzmatycznych o wymiarach 100 x 100 x 500 mm. Próbki te obciążano w układzie jednopunktowym ze stałą prędkością przyrostu naprężenia w czasie o wartości 0,01 MPa/s. Jest to prędkość zredukowana w stosunku do normowych wytycznych (zakres od 0,04 do 0,06 MPa/s). Uznano, iż z uwagi na niższy poziom wytrzymałości gruntobetonu w porównaniu z betonem cementowym, zasadnym jest dostosowanie prędkości przyrostu naprężenia do poziomu przewidywanej wytrzymałości gruntobetonów. Obciążanie próbek gruntobetonowych ze zbyt dużą prędkością przyrostu naprężenia skutkowałoby zawyżeniem uzyskanych wytrzymałości. Natomiast zbyt niska prędkość obciążania powoduje, iż zarysowania powstałe w badanej próbce na skutek przyłożonego obciążania rozprzestrzeniają się w szybszym tempie. Takie tendencje opisywał w swojej pracy m.in. Ashton [54], a w badaniach wykazywali Kamiński z zespołem [55] czy Abdullah [56]. Drugą oznaczaną cechą mechaniczną była wytrzymałość na ściskanie f_c wyznaczana na kostkach 100 x 100 x 100 mm, które wycinano z połówek zniszczonych belek po badaniu wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu.

Badanie przeprowadzono wg normy PN-EN 12390-3 [57], z ponowną modyfikacją prędkości przyrostu naprężenia w czasie z zakresu 0,6 ± 0,2 MPa/s do wartości dostosowanej do poziomu wytrzymałości gruntobetonów. Dla gruntobetonów z gruntu niespoistego była to wartość 0,1 MPa/s, a dla kompozytów z gruntu spoistego 0,05 MPa/s. Tabele 4.9 ÷ 4.12 prezentują wyniki badań cech mechanicznych dla poszczególnych serii gruntobetonów. Wyniki te każdorazowo stanowią średnią wartość z trzech prób.

Tabela 4.9 Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu $f_{ct,fl}$ po 28 dniach dojrzewania gruntobetonów wykonanych z **gruntu niespoistego** – **piasku średniego** w [MPa]

	w/c	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,6	0,4
V_z [dm³/m³]	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,2	4,1	5,6	X
	450	X	-	-	-	-	-	-	-	1,2	1,6	1,8	2,3	3,1	3,8	4,4	X
	400	X	0,4	0,5	0,3	0,5	0,8	0,7	1,0	1,2	1,3	1,8	-	-	-	-	-
	350	X	0,3	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 4.10 Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie f_c po 28 dniach dojrzewania gruntobetonów wykonanych z **gruntu niespoistego** – **piasku średniego** w [MPa]

	w/c	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,6	0,4
V_z [dm³/m³]	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,0	14,2	27,4	X
	450	X	-	-	-	-	-	-	-	3,0	3,9	5,1	8,9	13,0	21,4	25,5	X
	400	X	0,7	0,9	0,7	1,1	2,0	1,9	2,6	3,1	3,6	5,9	-	-	-	-	-
	350	X	0,7	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

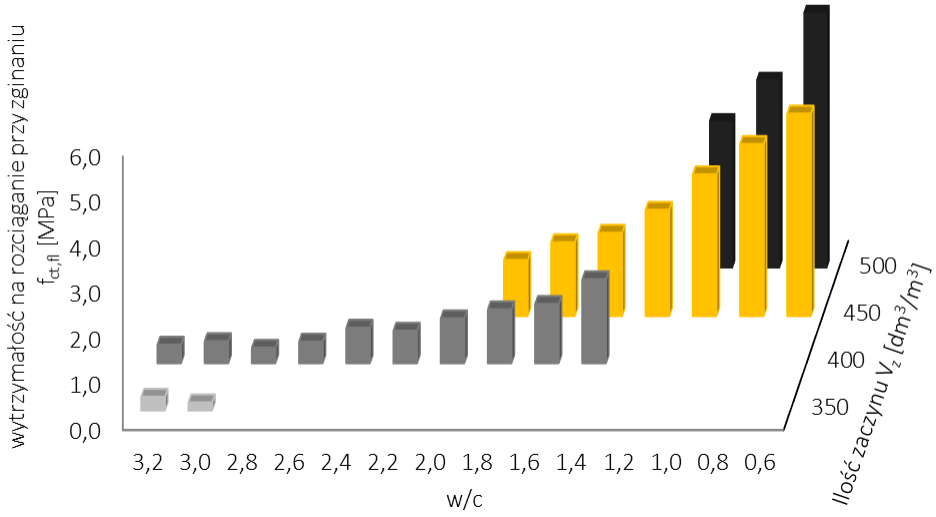
Tabela 4.11 Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu $f_{ct,fl}$ po 28 dniach dojrzewania gruntobetonów wykonanych z **gruntu spoistego** - **gliny** w [MPa]

	w/c	4,0	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0
V_z [dm³/m³]	650	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	X
	600	X	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,8	0,8	0,7	1,0	1,1	1,2	1,5	1,8	2,0	X
	550	X	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

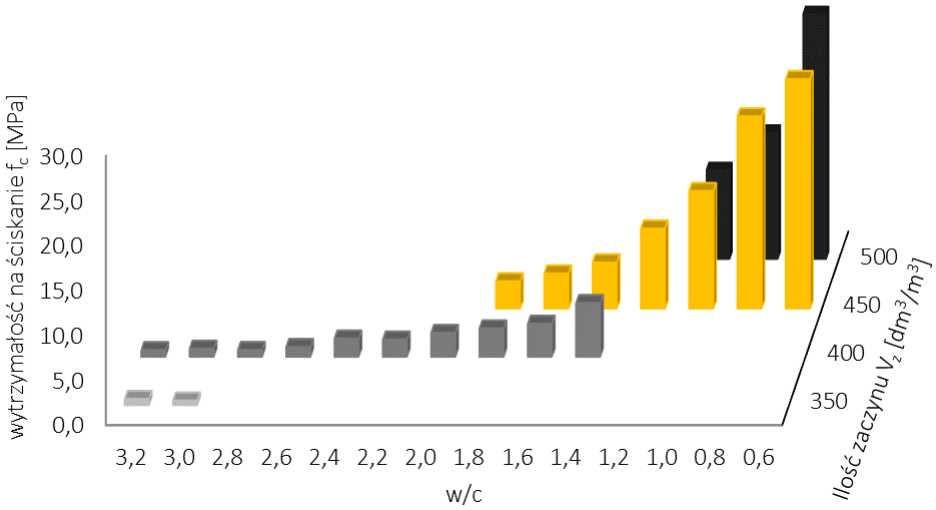
Tabela 4.12 Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie f_c po 28 dniach dojrzewania gruntobetonów wykonanych z **gruntu spoistego** - **gliny** w [MPa]

	w/c	4,0	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0
V_z [dm³/m³]	650	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,9	3,7	4,3	4,9	6,5	10,2	X
	600	X	1,2	1,4	1,5	1,5	1,7	2,8	2,6	3,2	3,6	4,6	5,0	6,5	6,1	10,8	X
	550	X	1,6	1,8	1,7	2,2	2,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

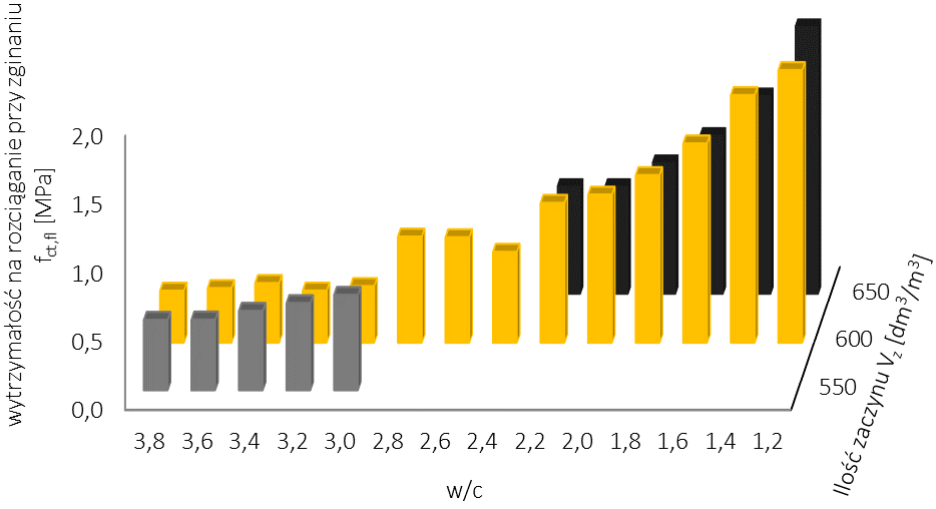
Na poniższych wykresach przedstawiono wpływ ilości zaczynu i wartości współczynnika w/c na oznaczane cechy mechaniczne gruntobetonów z gruntu niespoistego oraz gruntu spoistego.



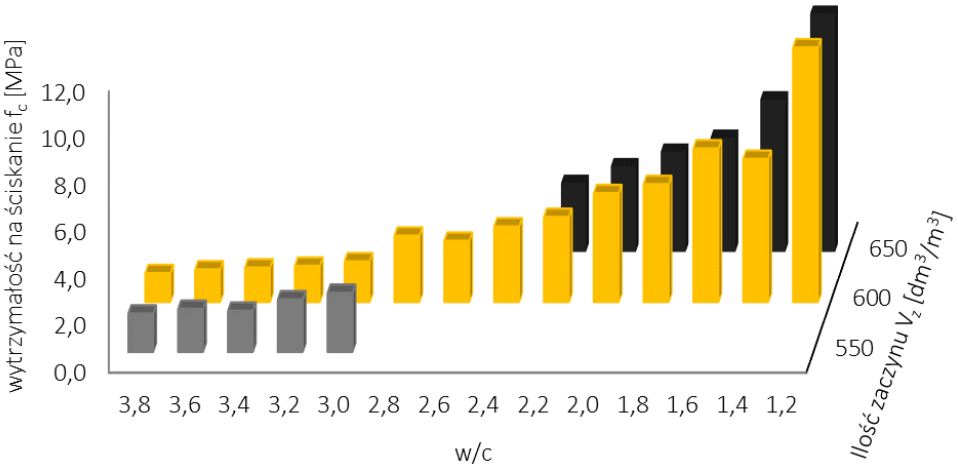
Rysunek 4.7 Wykres zależności wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu gruntobetonów z **gruntu niespoistego** (**piasku średniego**) od wskaźnika w/c i ilości zaczynu V_z po 28 dniach dojrzewania



Rysunek 4.8 Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie gruntobetonów z **gruntu niespoistego** (**piasku średniego**) od wskaźnika w/c i ilości zaczynu V_z po 28 dniach dojrzewania



Rysunek 4.9 Wykres zależności wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu gruntobetonów z **gruntu spoistego** (**gliny**) od wskaźnika w/c i ilości zaczynu V_z po 28 dniach dojrzewania

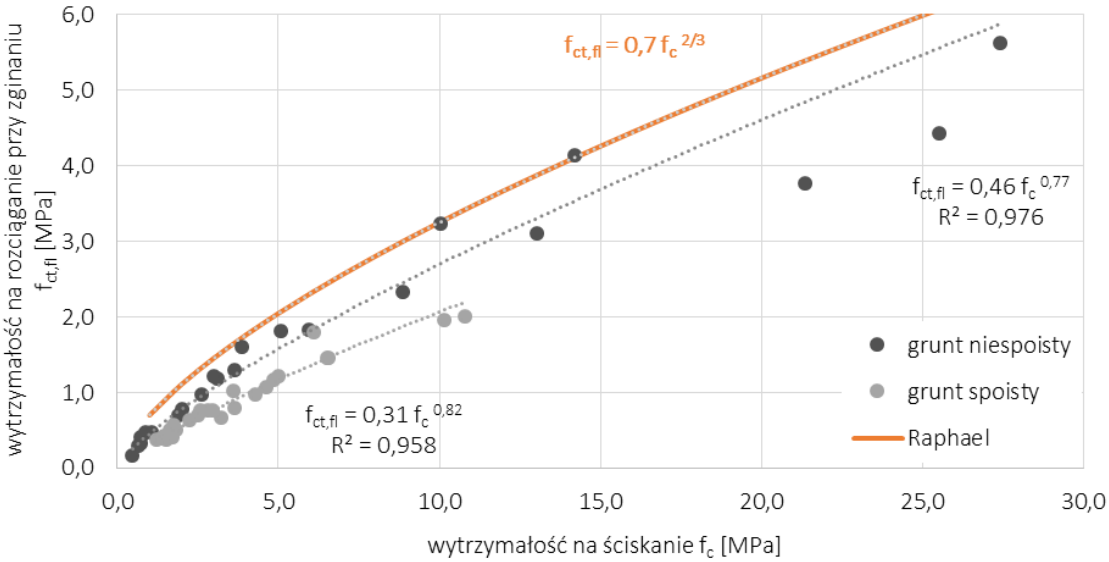


Rysunek 4.10 Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie gruntobetonów z **gruntu spoistego** (**gliny**) od wskaźnika w/c i ilości zaczynu V_z po 28 dniach dojrzewania

Przed przystąpieniem do analizy uzyskanych wyników zweryfikowano ich powtarzalność. W tym celu wybrano jeden skład z gruntu spoistego, oznaczony 600/2,0, dla którego zwiększono liczebność przebadanych próbek na wytrzymałość na ściskanie f_c do 20. Otrzymane wyniki wytrzymałości na ściskanie tworzą zakres od 4,1 MPa do 5,4 MPa, a współczynnik zmienności wyniósł poniżej 12 %.

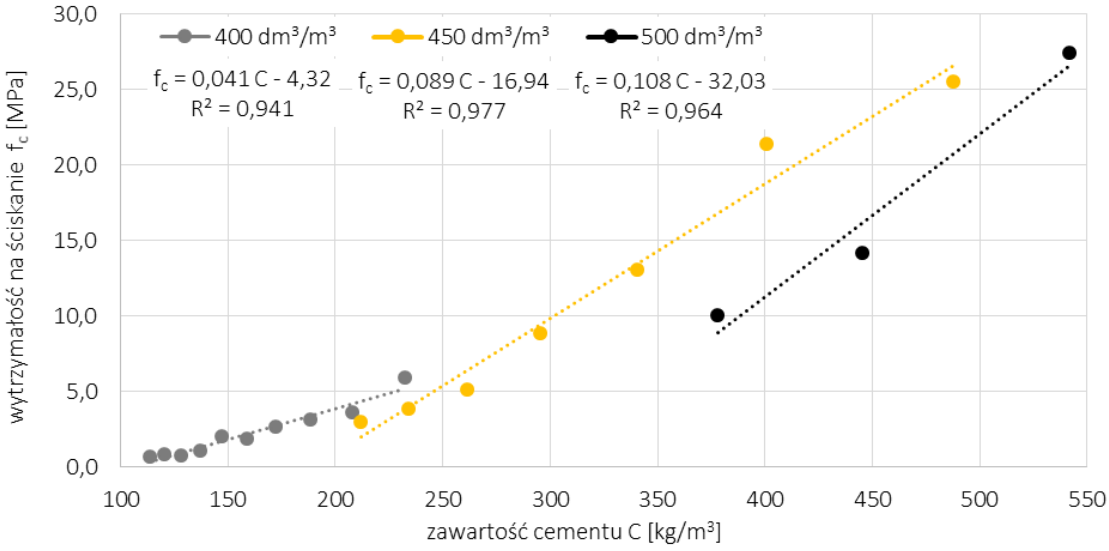
Analizując wpływ zmian zawartości zaczynu V_z oraz wskaźnika w/c na uzyskane rezultaty, można stwierdzić, iż zarówno zwiększenie zawartości zaczynu, jak i obniżenie wartości w/c wpływają na wzrost obu badanych wytrzymałości gruntobetonów wytworzonych z gruntu zarówno niespoistego jak i spoistego.

Ponadto dokonano także analizy relacji między wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu do wytrzymałości na ściskanie. Proporcja tych dwóch wielkości (wskaźnik kruchości) wynosi średnio około 0,26 dla gruntobetonów z gruntu niespoistego (piasek średni) oraz średnio około 0,24 dla gruntobetonów z gruntu spoistego (gliny). Warto dodać, iż są to wartości korzystniejsze, niż w przypadku wskaźnika obliczanego np. z równania zaproponowanego dla zwykłych betonów cementowych przez Raphael'a [58]. Dla gruntobetonów wykonanych z obu rodzajów gruntów wyznaczono więc z bardzo dobrym dopasowaniem analogiczne funkcje potęgowe, opisujące proporcje analizowanych wytrzymałości. Wyznaczone zależności przedstawiono na poniższym rysunku 4.11.

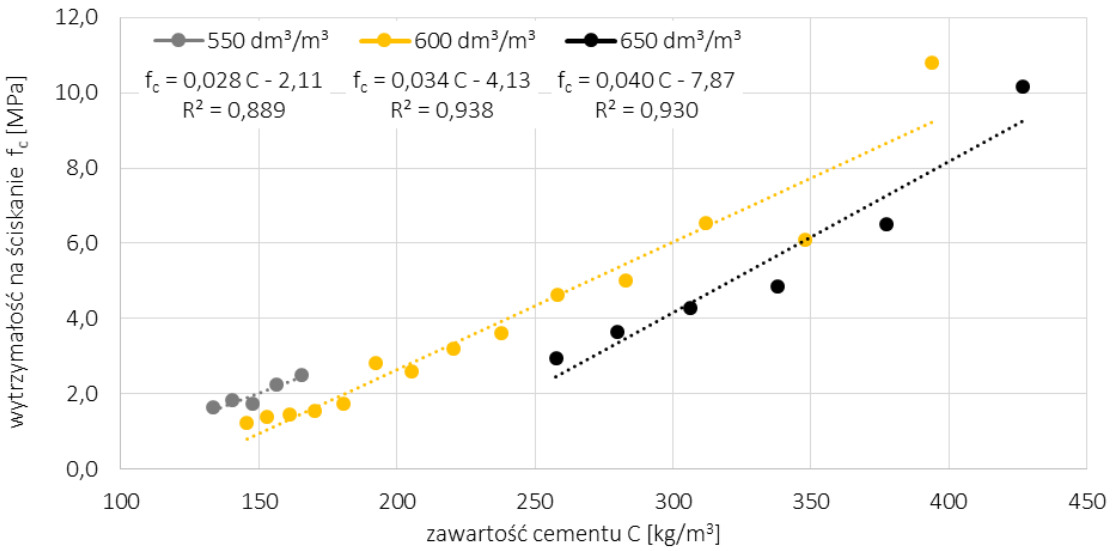


Rysunek 4.11 Porównanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu do wytrzymałości na ściskanie gruntobetonów z **gruntu niespoistego** (**piasek średni**) i **spoistego (glina)** po 28 dniach dojrzewania

Poszukując uproszczonego opisu, uzależniono wytrzymałość na ściskanie gruntobetonów od jednego parametru charakterystyki składu, a mianowicie od ilości dozowanego cementu. Na rysunkach 4.12 oraz 4.13 przedstawiono te zależności dla gruntobetonów wykonanych z obu stosowanych rodzajów gruntów dla każdej stosowanej ilości zaczynu cementowego. Jak widać, zależności te można opisać funkcjami liniowymi. Jest to zrozumiałe, gdyż ilość cementu wynika wprost z przyjętego stosunku w/c oraz ilości zaczynu. Wszystkie wyznaczone funkcje liniowe bardzo wiernie oddają otrzymane rezultaty badań, o czym świadczą bardzo wysokie wartości współczynników determinacji w zakresie od 0,941 do 0,977 dla gruntu niespoistego – piasku średniego oraz od 0,889 do 0,938 dla gruntu spoistego – gliny. Ilość cementu dozowanego do gruntobetonu można uznać w projektowaniu za najbardziej uniwersalny parametr składu tego kompozytu.



Rysunek 4.12 Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie gruntobetonów z **gruntu niespoistego** (**piasku średniego**) od zawartości cementu po 28 dniach dojrzewania



Rysunek 4.13 Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie gruntobetonów z **gruntu spoistego** (**gliny**) od zawartości cementu po 28 dniach dojrzewania

4.6 SFORMUŁOWANIE OGÓLNYCH ZASAD PROJEKTOWANIA

Aby przedstawione wyniki badań stały się przydatne do praktycznego projektowania gruntobetonów zarówno z gruntu niespoistego, jak i gruntu spoistego, w dalszym ciągu zaproponowano sposób postępowania przy doświadczalnym projektowaniu składu gruntobetonu:

- **Krok 1** – zebranie kompletu niezbędnych informacji o przedmiocie projektowania w zakresie rodzaju wzmacnianego gruntu (grunt spoisty czy grunt niespoisty, określenie gęstości w stanie suchym, określenie wilgotności gruntu) oraz w zakresie oczekiwanej wytrzymałości na ściskanie.
- **Krok 2** – obliczenie wartości wskaźnika wodno-cementowego na podstawie zależności wytrzymałości na ściskanie i stosunku w/c (poniższe rys. 4.14 lub rys. 4.15 w zależności od rodzaju gruntu).

  Wyznaczając korelacje pomiędzy wytrzymałością na ściskanie **f_c** a stosunkiem **w/c** zaobserwowano bardzo dobre dopasowanie funkcji potęgowej do opisywanych zmiennych. Podobnie, jak w przypadku zależności wytrzymałości od zawartości cementu, tutaj również z uwagi na wyraźny wpływ udziału objętościowego zaczynu cementowego na wytrzymałości gruntobetonów postanowiono wyznaczyć trzy funkcje dla każdego poziomu zawartości zaczynu **V_z** w obydwu przypadkach wzmacnianych gruntów.

  Grunt niespoisty – **piasek średni**:

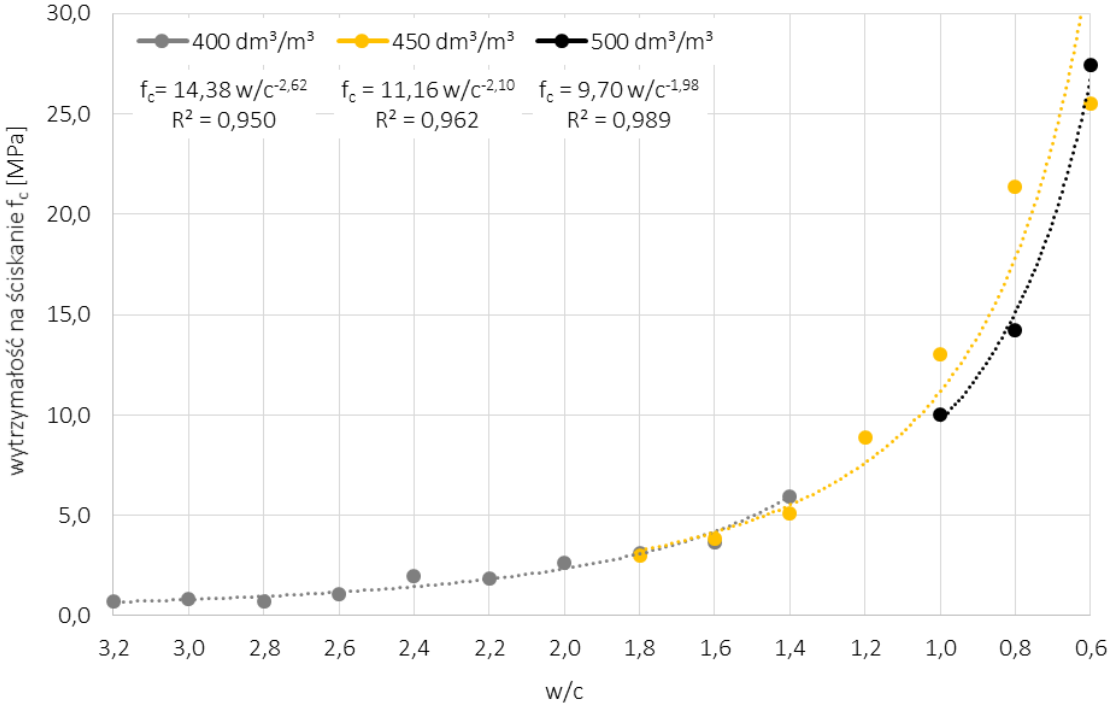
  - $f_c = 14{,}38\ w/c^{-2{,}62}$ może być stosowana w zakresie w/c (3,2 - 1,4) przy ilości zaczynu 400 dm^3/m^3,
  - $f_c = 11{,}16\ w/c^{-2{,}10}$ może być stosowana w zakresie w/c (1,8 - 0,6) przy ilości zaczynu 450 dm^3/m^3,
  - $f_c = 9{,}70\ w/c^{-1{,}98}$ może być stosowana w zakresie w/c (1,0 - 0,6) przy ilości zaczynu 500 dm^3/m^3.

  Grunt spoisty – **glina**:

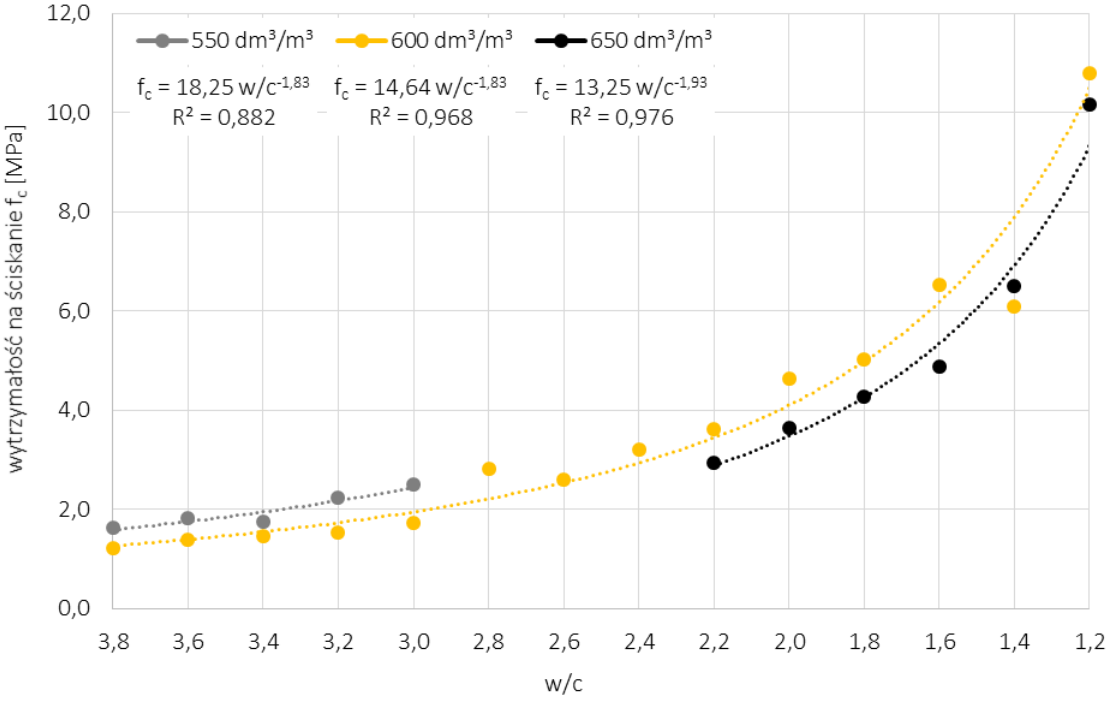
  - $f_c = 18{,}25\ w/c^{-1{,}83}$ może być stosowana w zakresie w/c (3,8 - 3,0) przy ilości zaczynu 550 dm^3/m^3,
  - $f_c = 14{,}64\ w/c^{-1{,}83}$ może być stosowana w zakresie w/c (3,8 - 1,2) przy ilości zaczynu 600 dm^3/m^3,

- $f_c = 13,25\ w/c^{-1,93}$ może być stosowana w zakresie w/c (2,2 - 1,2) przy ilości zaczynu 650 dm^3/m^3.

Wyznaczone funkcje potęgowe dokładnie oddają otrzymane wyniki badań, co potwierdzają bardzo wysokie wartości współczynników determinacji w zakresie od 0,950 do 0,989 dla gruntu niespoistego – piasku średniego oraz od 0,882 do 0,976 dla gruntu spoistego – gliny.



Rysunek 4.14 Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie gruntobetonów z **gruntu niespoistego** (**piasku średniego**) od wskaźnika w/c po 28 dniach dojrzewania



Rysunek 4.15 Wykres zależności wytrzymałości na ściskanie gruntobetonów z **gruntu spoistego** (**gliny**) od wskaźnika w/c po 28 dniach dojrzewania

Projektowany skład należy również zoptymalizować pod kątem zużycia cementu. Dlatego z dostępnych równań wytrzymałości należy wybrać funkcję dla objętości zaczynu, która zapewnia projektowaną wytrzymałość na ściskanie przy równoczesnym ograniczeniu zawartości cementu **C**. Wybór mniejszej ilości zaczynu V_z nie tylko ogranicza zużycie cementu **C**, ale również pozwala na uzyskanie wyższych wytrzymałości, co potwierdzają prezentowane w pkt. 4.4 rysunki 4.12 i 4.13. Po wyznaczeniu wartości wskaźnika **w/c** oraz udziału objętościowego zaczynu V_z, korzystając z równania (1) (patrz rozdz. 4.2) wyznaczyć można ilość cementu **C** [kg] oraz wody **W** [kg] odniesioną do 1m^3 składu gruntobetonu.

- **Krok 3** – obliczenie masy gruntu w stanie naturalnym G_n przy użyciu równań (3 ÷ 5) oraz skorygowanej ilości wody W_{sk} według równania (6).
- **Krok 4** – weryfikacja obliczonego składu (kombinacji V_z – **w/c**) pod kątem uzyskania akceptowalnej konsystencji mieszanki z opracowanymi dla badanych gruntów mapami konsystencji (tabele 4.5 i 4.6).
- **Krok 5** – wykonanie zarobu próbnego i ocena konsystencji według pkt. 4.3. W przypadku uzyskania konsystencji zbyt gęstej należy zwiększyć ilość zaczynu, co przy tej samej wartości stosunku **w/c** oznacza spadek uzyskanej wytrzymałości i zwiększenie zużycia cementu. Uzyskanie konsystencji zbyt ciekłej wymusza zmniejszenie zastosowanej ilości zaczynu oraz zmniejszenie wartości stosunku **w/c**, czego efektem jest zwiększona zawartość cementu, ale również wzrost wytrzymałości na ściskanie.
- **Krok 6** – wykonanie ciał próbnych i sprawdzenie czy gruntobeton posiada założoną wytrzymałość na ściskanie oraz inne wymagane cechy na założonym poziomie. Spełnienie wymagań założonego poziomu wzmocnienia gruntu oznacza koniec projektowania.

5 PRZYCZEPNOŚĆ MATRYCY GRUNTOBETONOWEJ DO WŁÓKIEN

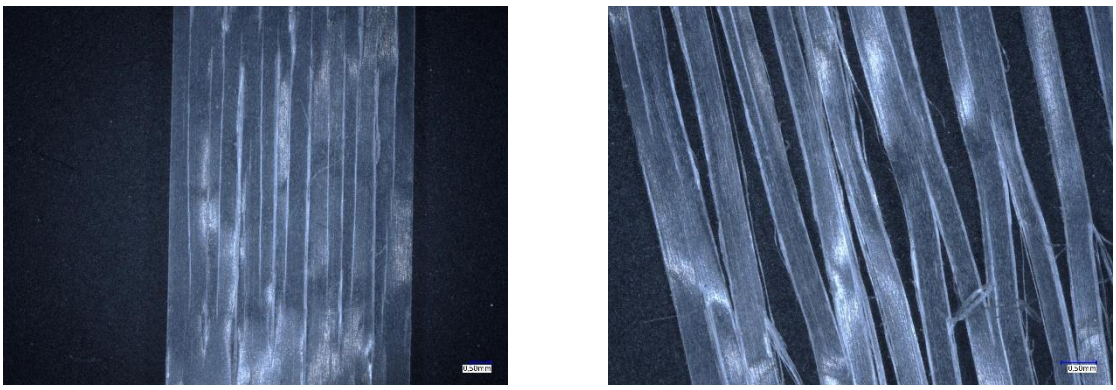
5.1 ZAKRES BADAŃ

Program badań obejmował wykonanie serii próbek, zróżnicowanych pod względem matrycy gruntobetonowej oraz rodzaju analizowanych włókien. Spośród przebadanych składów gruntobetonów do dalszych badań wytypowano sześć matryc, trzy z gruntu niespoistego i trzy z gruntu spoistego. Charakteryzowały się one różną objętością dozowanego zaczynu cementowego V_z oraz różnymi wartościami wskaźnika wodno-cementowego w/c. Jako podstawowe kryterium wyboru składów przyjęto zawartość cementu. Dla każdego gruntu wybrano więc składy o zawartości cementu na trzech różnych poziomach w zakresie od około 200 do około 400 kg/m^3. Wybrane składy oraz podstawowe cechy mechaniczne wybranych do badań matryc gruntobetonowych zostały przedstawione w tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Podstawowe właściwości wybranych do badań fibrogruntobetonów matryc gruntobetonowych

Oznaczenie składu (matryca)	Rodzaj gruntu	Ilość zaczynu [dm^3/m^3]	w/c	Zawartość cementu [kg/m^3]	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu po 28 dniach [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]
600/2,0	glina	600	2,0	258	0,7	4,6
600/1,4		600	1,4	348	1,2	6,1
650/1,2		650	1,2	427	1,3	10,2
400/1,6	piasek średni	400	1,6	208	0,9	3,6
450/1,2		450	1,2	296	1,5	8,9
450/0,8		450	0,8	401	2,4	21,4

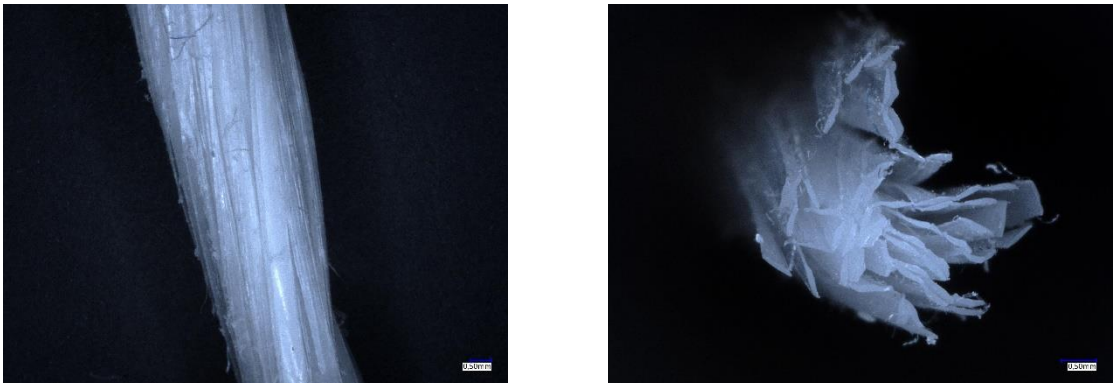
Analizie współpracy z wyżej opisanymi matrycami gruntobetonowymi zostały poddane cztery rodzaje włókien z tworzyw sztucznych: polipropylenowe pojedyncze taśmy fibrylizowane (PPTF), polipropylenowe wiązki zwiniętych pięciu taśm fibrylizowanych (PPF), karbowane włókna z odpadowego politereftalanu etylenu o przekroju okrągłym (PET) oraz karbowane włókna PET o przekroju poprzecznym w kształcie krzyża (PETX).



(a) (b)

Rysunek 5.1 (a) obraz włókna **PPTF** - powiększenie 30 x; (b) obraz włókna **PPTF** rozciągniętego poprzecznie – powiększenie 50 x

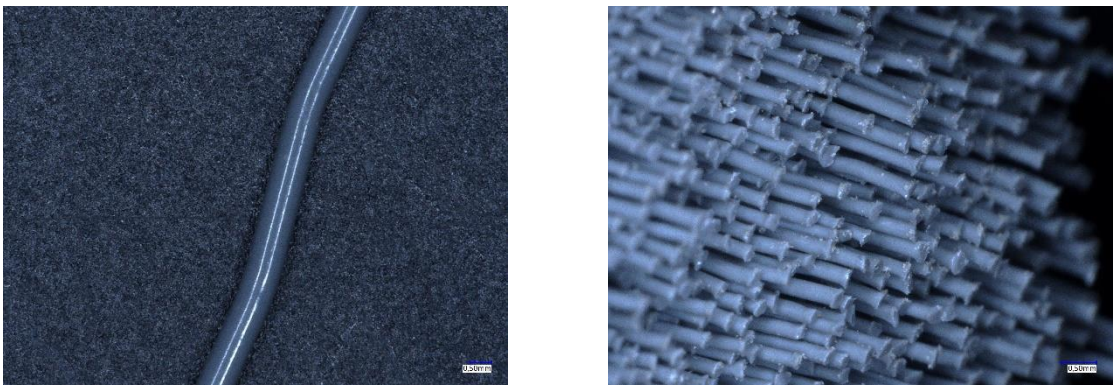
Włókno PPTF charakteryzuje się przekrojem poprzecznym o wymiarach 0,1 mm x 5,0 mm (bez rozciągnięcia). Cechą charakterystyczną włókna PPTF jest jego budowa. Po rozciągnięciu poprzecznym włókna PPTF uwidacznia się struktura przypominająca siatkę, którą pokazano na rysunku 5.1 (b).



(a) (b)

Rysunek 5.2 (a) obraz włókna **PPF** - powiększenie 30 x; (b) obraz przekroju poprzecznego włókna **PPF** – powiększenie 50 x

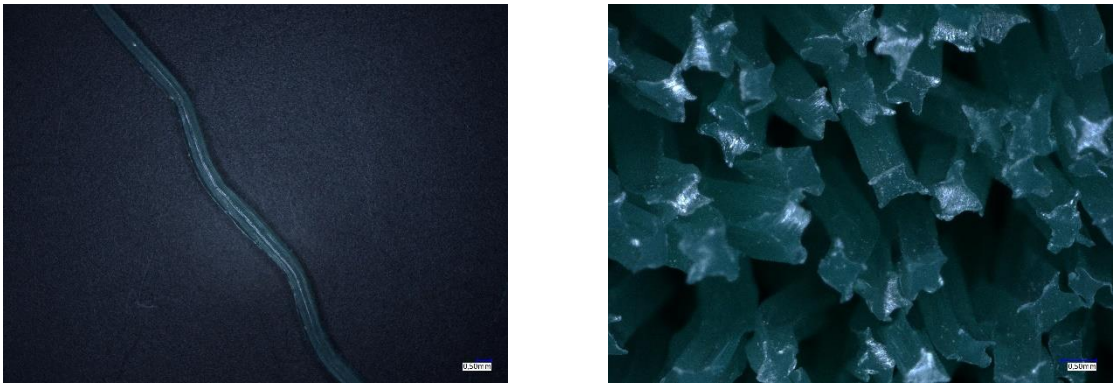
Kształt przekroju poprzecznego włókna PPF w uproszczeniu jest okrągły i ma średnicę równą około 1,8 mm. W badaniach przyczepności włókien polipropylenowych przyjęto założenie, iż analiza ich współpracy z matrycami gruntobetonowymi zostanie oceniona w pierwotnym ich kształcie. Tak więc włókna PPTF badano jako nierozciągnięte poprzecznie, a włókna PPF jako nierozplątane. Taka decyzja wynika z braku technicznej możliwości zapewnienia powtarzalności poprzecznego rozciągnięcia włókien PPTF oraz rozplątania włókien PPF, a także ponieważ w takiej postaci będą one dozowane.



(a) (b)

Rysunek 5.3 (a) obraz włókna **PET** - powiększenie 30 x; (b) obraz przekroju poprzecznego włókna **PET** – powiększenie 50 x

Włókno PET o przekroju okrągłym charakteryzuje się średnicą równą 0,25 mm i karbowaniem o długości fali równej 3,3 mm i wysokości fali 0,12 mm.

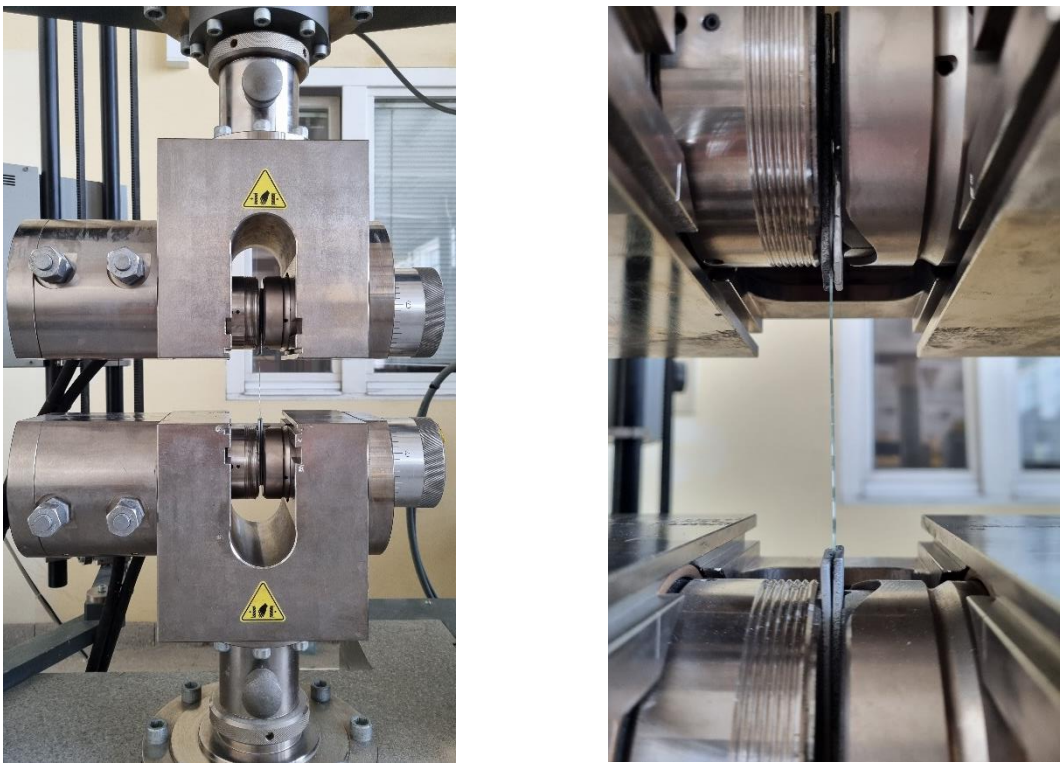


(a) (b)

Rysunek 5.4 (a) obraz włókna **PETX** - powiększenie 30 x; (b) obraz przekroju poprzecznego włókna **PETX** – powiększenie 50 x

Włókno PETX natomiast posiada przekrój poprzeczny w kształcie krzyża o maksymalnym wymiarze równym 1,0 mm i charakteryzuje się karbowaniem o długości fali równej 7,7 mm i wysokości fali równej 0,6 mm.

Przed przystąpieniem do badań przyczepności matrycy gruntobetonowej do włókien określono ich wytrzymałość na rozciąganie. Każde włókno na obu jego końcach sklejono pomiędzy dwie aluminiowe blaszki, umieszczono osiowo pomiędzy szczęki maszyny wytrzymałościowej i rozciągnięto z prędkością 5 mm/min, którą przyjęto zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1:2012 [59]. Rysunek 5.5 obrazuje sposób realizacji osiowego rozciągania włókien.



(a) (b)

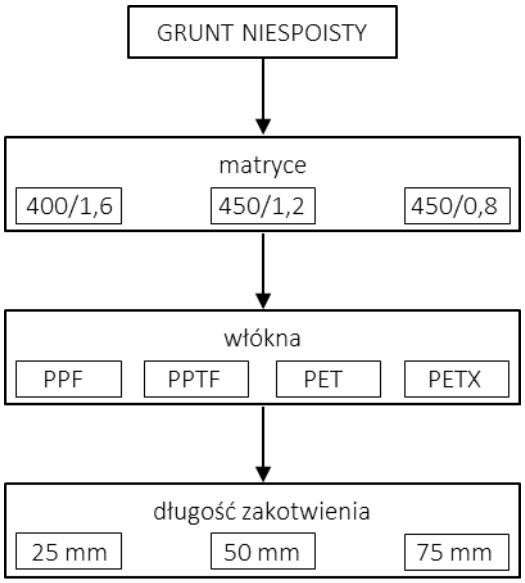
Rysunek 5.5 (a) stanowisko badawcze z badanym włóknem; (b) włókno PETX ściśnięte przez aluminiowe blaszki w szczękach maszyny wytrzymałościowej podczas badania

Poniższa tabela 5.2 prezentuje podstawowe cechy geometryczne i mechaniczne wybranych do badań włókien.

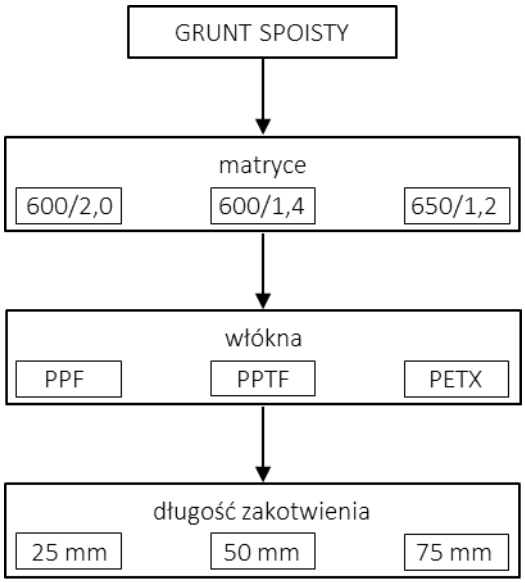
Tabela 5.2 Cechy geometryczne i mechaniczne włókien wybranych do badania przyczepności

Rodzaj włókna	Pole przekroju poprzecznego włókna P_P [mm^2]	Siła maksymalna F_{max} [N]	Wytrzymałość na rozciąganie włókna f_t [MPa]
PPTF	0,500	162,2	324,4
PPF	2,500	489,6	195,8
PET	0,049	14,3	292,2
PETX	0,302	58,9	194,9

Pokazane poniżej rysunki 5.6 i 5.7 przedstawiają schematy przyjmowanych w badaniach wariantów analizy współpracy włókien z matrycami gruntobetonowymi z gruntów niespoistego i spoistego.



Rysunek 5.6 Schemat tworzenia wariantów zakotwienia włókien w gruntobetonach z **gruntu niespoistego**



Rysunek 5.7 Schemat tworzenia wariantów zakotwienia włókien w gruntobetonach z **gruntu spoistego**

Dla każdej kombinacji matrycy, rodzaju włókna i długości zakotwienia przygotowano do badań po trzy próbki, w związku z czym wykonano łącznie 216 prób typu pull-out.

5.2 METODYKA OCENY PRZYCZEPNOŚCI MATRYCY GRUNTOBETONOWEJ DO WŁÓKIEN

Wszystkie włókna zostały poddane badaniu typu pull-out na trzech głębokościach zakotwienia: 25, 50 oraz 75 mm. W tym celu włókna zostały umieszczone osiowo w cylindrycznych formach o średnicy wewnętrznej równej 50 mm i wysokościach odpowiadających analizowanym głębokościom zakotwienia. Osiowość włókien w trakcie i po wypełnieniu form matrycą gruntobetonową została zapewniona przez wykonane w dnach i przykrywkach form otwory, które wykonano dokładnie w ich środku. Dodatkowo, w trakcie wykonywania próbek oba końce włókien zakotwiono przy użyciu kleju, tak aby włókna zachowały osiowe położenie. Po zaformowaniu wszystkie próbki kondycjonowano w warunkach laboratoryjnych. W czasie dojrzewania próbki pozostawały szczelnie zaformowane (pobocznica każdej formy została sklejona po obwodzie z dnem i przykrywką) pod przykryciem folią, tak aby uniemożliwić jakąkolwiek wymianę wilgoci z otoczeniem. Po 28 dniach dojrzewania gruntobetonu włókna zostały odcięte od dna formy, a formy i przykrywki usunięte. Następnie niezwłocznie próbki przygotowywano do badań, tak aby były one prowadzone w stanie ich naturalnej wilgotności. Najpierw do spodniej części matrycy gruntobetonowej przyklejano stempel umożliwiający przegubowe mocowanie próbek w maszynie wytrzymałościowej. Klej nakładano wzdłuż zewnętrznej krawędzi dna próbki, tak aby nie miał kontaktu z włóknem poddanym badaniu. Z drugiej strony, wystającą część włókna klejono pomiędzy dwie aluminiowe blaszki, eliminując możliwość wysuwania się badanego włókna z blaszek w trakcie badania. Poprzez blaszki badane włókno ściskano szczękami maszyny wytrzymałościowej w taki sposób, aby rejestrowane przemieszenie wynikało jedynie z odkształceń włókna wewnątrz próbki oraz

z wysunięcia włókna z matrycy gruntobetonowej. Podczas badania rejestrowano jednocześnie siły oraz przemieszczenia włókien. Tak jak w przypadku badania wytrzymałości na rozciąganie włókien prędkość badania przyjęto równą 5 mm/min. Na rysunku 5.8 pokazano sposób przeprowadzenia badań typu pull-out w maszynie wytrzymałościowej.

(a) (b)

Rysunek 5.8 (a) próbka na stanowisku badawczym; (b) włókno ściśnięte przez aluminiowe blaszki w szczękach maszyny wytrzymałościowej podczas wyciągania z matrycy gruntobetonowej

Przeprowadzone badania pozwoliły na zarejestrowanie przebiegów zależności siła-przemieszczenie. Na ich podstawie w pierwszej kolejności odczytano bezpośrednio z wykresu maksymalną siłę i zgodnie z poniższym wzorem obliczono dla każdego włókna maksymalne naprężenie styczne τ_{max}:

$$\tau_{max} = \frac{F_{max}}{S}\ [MPa], \tag{7}$$

gdzie:

F_{max} – siła maksymalna [N],

S – powierzchnia styku włókna z matrycą [mm^2].

Tabela 5.3 Obliczone powierzchnie styku badanych włókien dla 3 przyjętych głębokości zakotwienia

Rodzaj włókna	PPF			PPTF			PET			PETX		
Długość zakotwienia [mm]	25	50	75	25	50	75	25	50	75	25	50	75
Obwód włókna O_W [mm]	5,60			10,20			0,79			2,99		
Powierzchnia styku włókna z matrycą S [mm^2]	140	280	420	255	510	765	20	39	59	75	149	224

Następnie korzystając z zarejestrowanych zależności siła-przemieszczenie wyznaczono pracę wyciągania włókien $W_{pull\text{-}out}$ według wzoru:

$$W_{pull-out} = \int_0^{\delta_{max}} F \, d\delta \ [J], \tag{8}$$

gdzie:

F – siła [N],

δ_{max} – przemieszczenie maksymalne [m].

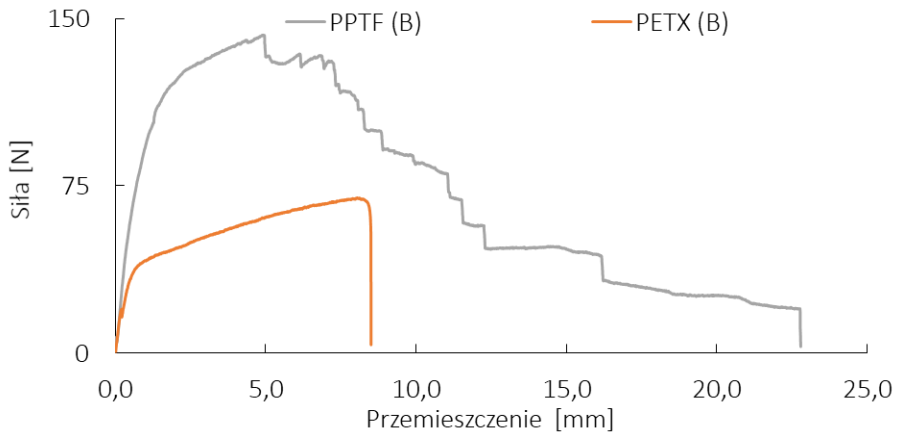
5.3 WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wszystkie wyznaczone parametry zostały zgromadzone w tabelach, znajdujących się w punkcie 12.1 rozdziału 12. Załączniki. Tabele 12.1 ÷ 12.3 przedstawiają wyniki uzyskane w matrycach z gruntu niespoistego, natomiast tabele 12.4 ÷ 12.6 w matrycach z gruntu spoistego. Prezentowane wyniki stanowią każdorazowo średnią z trzech wykonanych prób. Zależności siła-przemieszczenie, które pozwoliły na wyznaczenie opisanych w pkt. 5.2 parametrów dla wybranych matryc gruntobetonowych i przyjętych długości zakotwienia również zostały umieszczone w punkcie 12.1 rozdziału 12. Załączniki. Na rysunkach 12.1 ÷ 12.9 przedstawiono wykresy z badań prowadzonych w matrycach z gruntu niespoistego, a na rysunkach 12.10 ÷ 12.18 w matrycach z gruntu spoistego. Na prezentowanych wykresach symbolem „P" (z ang. pull out) oznaczono badanie zakończone wyciągnięciem włókna z matrycy, a symbolem „B" (z ang. break) badanie zakończone zerwaniem włókna. Analizowane serie charakteryzowały się akceptowalną dla badanych cech jednorodnością. Odchylenie pojedynczych wyników od wartości średniej wynosiło od kilku do kilkunastu procent. W niektórych seriach pojawiły się wyniki znacząco odstające od danej serii. W takim przypadku odrzucono taką próbę, a badanie powtarzano na dodatkowej próbce.

5.3.1 NAPRĘŻENIA STYCZNE

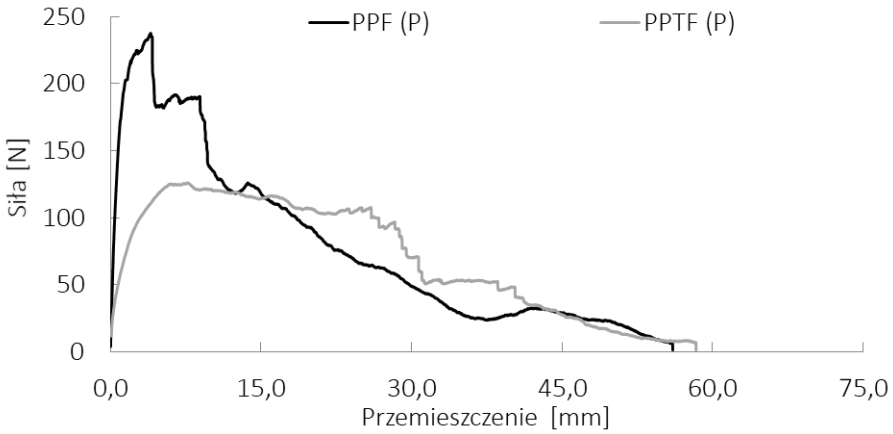
Analizując uzyskane wykresy zależności siła – przemieszczenie w matrycach z gruntu niespoistego można stwierdzić, iż niezależnie od wytrzymałości matrycy oraz analizowanej głębokości zakotwienia włókna PPF oraz PET każdorazowo ulegały wyciągnięciu. Wyjątek stanowi próba pull-out włókna PET przy zakotwieniu równym 75 mm w matrycy 450/1,2. Natomiast włókna PPTF oraz PETX w większości przypadków ulegały zerwaniu w trakcie badania. Jedynie przy najmniejszej głębokości zakotwienia w matrycach 400/1,6 i 450/1,2 włókna te zostały wyciągnięte. Jednakże charakter zerwania obu włókien był diametralnie inny. Obserwując przebieg wykresu siła – przemieszczenie dla zerwanego włókna polipropylenowego PPTF, można dostrzec charakterystyczne „schodki", które oznaczają zrywanie kolejnych fragmentów struktury przypominającej siatkę. Taki charakter pracy włókna PPTF w obszarze pokrytycznym jest korzystny biorąc pod uwagę jego zastosowanie w konstrukcjach

fibrogruntobetonowych. Natomiast w przypadku włókna PETX w trakcie zerwania następował gwałtowny spadek siły. Charakter zerwania obu rodzajów włókien obrazuje poniższy rysunek 5.9.



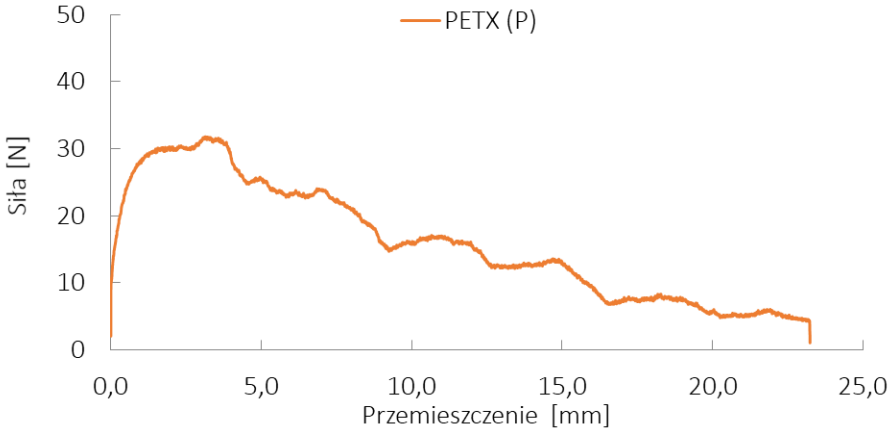
Rysunek 5.9 Wykresy zależności siła – przemieszczenie włókien PPTF i PETX dla 25 mm zakotwienia w matrycy 450/0,8 z **gruntu niespoistego** (rozdział 12. Załączniki, rysunek 12.7)

W przypadku badań prowadzonych w matrycach gruntobetonowych z gruntu spoistego nie udało się dokonać pomiarów dla włókien PET. Przyczepność słabszych matryc do tych włókien okazała się mniejsza niż ciężar własny próbek z przyklejonym stemplem. Analizując pracę pozostałych włókien ponownie można zaobserwować, iż każde badanie przyczepności włókna PPF zakończyło się jego wyciągnięciem z matrycy gruntobetonowej, niezależnie od jej wytrzymałości i od głębokości zakotwienia włókna. Tak samo zakończyły się badania włókien PPTF. Każda z prób pull-out poskutkowała ich wyciągnięciem z matrycy z gruntu spoistego, a więc odwrotnie jak to miało miejsce w matrycach z gruntu niespoistego. Uwidacznia się w ten sposób wpływ rodzaju gruntu na współpracę włókien z matrycami gruntobetonowymi. Pomimo podobnego poziomu wytrzymałości matryc z gruntu spoistego i niespoistego (wyjątkiem jest zdecydowanie mocniejsza matryca 450/0,8) charakterystyka obu gruntów wpływa istotnie na obraz współpracy dwóch faz kompozytu. Porównując pracę obu włókien polipropylenowych zauważalna jest mniejsza odkształcalność włókien PPF przed uzyskaniem maksymalnego naprężenie ścinającego, powodującego inicjację przemieszczenia włókna względem matrycy. Po osiągnięciu maksimum wartość siły w obszarze pokrytycznym gwałtowanie obniża się w trakcie wyciągania włókna PPF. Efekt ten można tłumaczyć swobodnym przemieszczaniem się taśm wewnątrz wiązki. Skutkuje to szybką utratą tarcia pomiędzy włóknem a matrycą. W przypadku wyciąganego włókna PPTF odkształcalność przed osiągnięciem siły maksymalnej była zdecydowanie większa, co obrazuje poniższy rysunek 5.10.



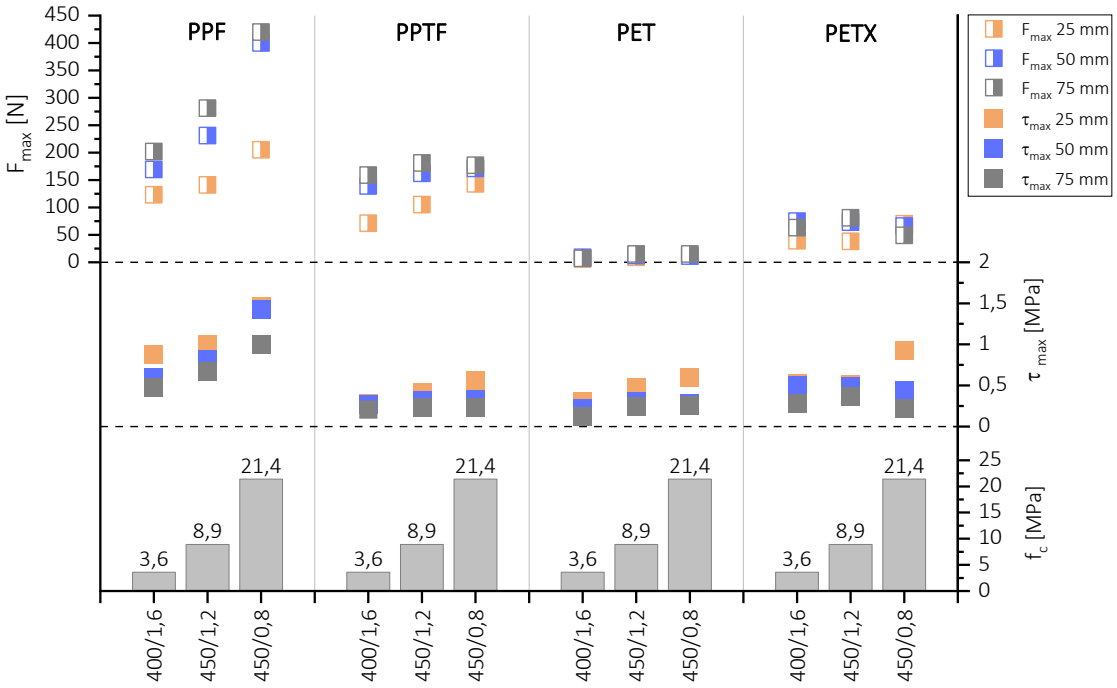
Rysunek 5.10 Wykresy zależności siła – przemieszczenie włókien PPF i PPTF dla 75 mm zakotwienia w matrycy 650/1,2 z **gruntu spoistego** (rozdział 12. Załączniki, rysunek 12.18)

Włókna PETX ulegały zarówno wyciąganiu, jak również zrywaniu w wyniku prowadzonych badań typu pull-out. Wszystkie próby przy zakotwienie równym 25 mm oraz w najsłabszej matrycy 600/2,0 przy zakotwieniu równym 50 mm zakończyły się wyciągnięciem włókna. Na skutek wzrostu wytrzymałości matrycy oraz wzrostu głębokości zakotwienia w pozostałych próbach włókna PETX ulegały gwałtownemu zerwaniu. Podczas wyciągania włókien PETX można dostrzec cykliczność w naprzemiennym spadku i wzroście rejestrowanej siły, która odzwierciedla efekt prostowania kolejno wyciąganych karbów. Zjawisko to prezentuje poniższy rysunek 5.11.

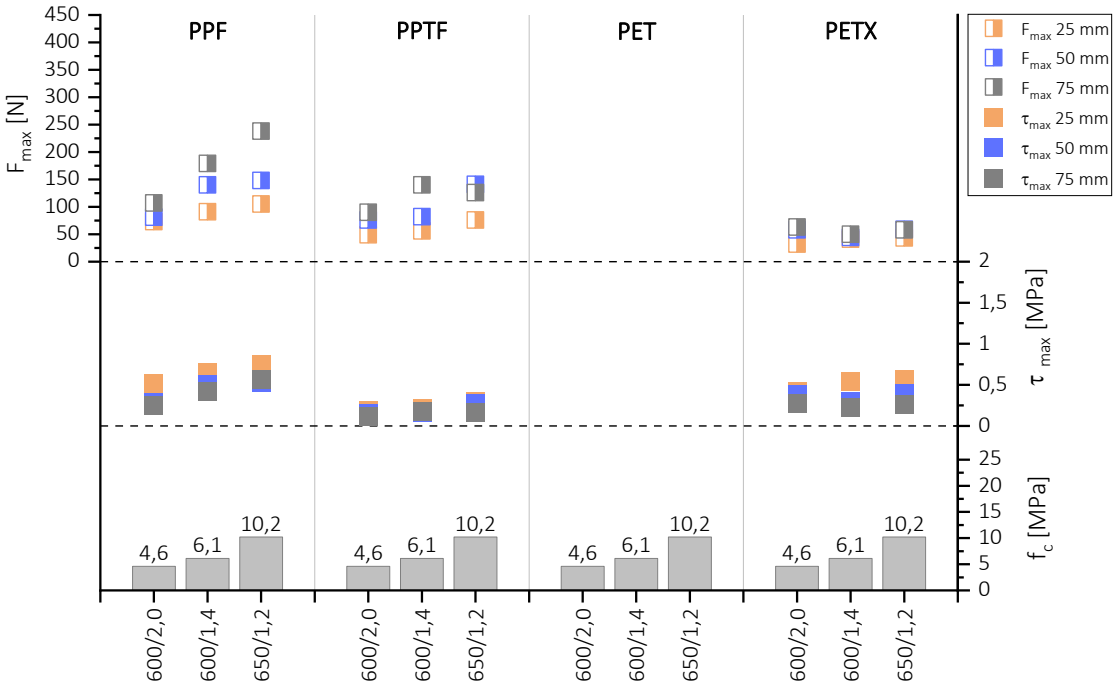


Rysunek 5.11 Wykres zależności siła – przemieszczenie włókna PETX dla 25 mm zakotwienia w matrycy 600/2,0 z **gruntu spoistego** (rozdział 12 Załączniki, rysunek 12.10)

Odczytane bezpośrednio z zarejestrowanych przebiegów zależności siła – przemieszczenie wartości sił maksymalnych F_{max} (górna część wykresu) oraz obliczone na ich podstawie maksymalne naprężenia styczne τ_{max} (środkowa część wykresu) zostały zgromadzone osobno dla matryc z gruntu niespoistego oraz dla matryc z gruntu spoistego na dwóch poniższych rysunkach 5.12 i 5.13. Prezentowane wartości obliczono dla trzech przyjętych głębokości zakotwienia: 25, 50 i 75 mm. Dodatkowo w dolnej części wykresów umieszczono wytrzymałości matryc, w których badane włókna były kotwione.



Rysunek 5.12 Wykresy parametrów **F_{max}** oraz **τ_{max}** badanych włókien zakotwionych na głębokościach: 25, 50 i 75 mm w matrycach z **gruntu niespoistego** (rozdział 12 Załączniki, tabele 12.1 ÷ 12.3)



Rysunek 5.13 Wykresy parametrów **F_{max}** oraz **τ_{max}** badanych włókien zakotwionych na głębokościach: 25, 50 i 75 mm w matrycach z **gruntu spoistego** (rozdział 12 Załączniki, tabele 12.4 ÷ 12.6)

Analizując powyższe wykresy można zaobserwować tendencję, w której wraz ze wzrostem głębokości zakotwienia rośnie wartość siły maksymalnej podczas badania typu pull-out wybranych włókien zarówno w matrycach z gruntu niespoistego, jak i gruntu spoistego. Podobny wpływ na wzrost wartości sił F_{max} ma wzrost wytrzymałości matryc, w której zakotwione są badane włókna. Im wyższa wytrzymałość matrycy gruntobetonowej, tym większa wartość siły F_{max}. Natomiast z uwagi na geometrię

analizowanych włókien największe wartości naprężeń stycznych τ_{max} wyznaczono dla 25 mm głębokości zakotwienia. Nie mniej jednak, również wraz ze wzrostem wytrzymałości matryc gruntobetonowych wartości naprężeń stycznych rosną.

Porównując współpracę tych samych włókien z matrycami z różnych gruntów, w przypadku włókien polipropylenowych PPF i PPTF większe wartości sił maksymalnych rejestrowano w matrycach z gruntu niespoistego. Tak wyraźnego wzrostu wartości sił F_{max} nie zaobserwowano dla włókien PETX. Natomiast uwagę zwraca wpływ modyfikacji geometrii włókien poliestrowych na poprawę ich współpracy z matrycami gruntobetonowymi wytworzonymi z gruntu niespoistego. W matrycach z tego gruntu jest to kilkukrotny wzrost rejestrowanych wartości sił maksymalnych pomiędzy włóknami PET a PETX. Zdecydowanemu zwiększeniu uległy również wyznaczone dla obu włókien poliestrowych wartości naprężeń stycznych w przyjętych głębokościach zakotwienia w każdej z trzech matryc. Zmiana przekroju poprzecznego oraz charakterystyki karbowania tych włókien pozwoliła nie tylko na zwiększenie powierzchni styku włókien PETX z matrycą, ale również na zdecydowaną poprawę sztywności tych włókien w porównaniu z włóknami PET o okrągłym przekroju poprzecznym.

5.3.2 Długości krytyczne włókien

Analiza uzyskanych wyników wykazała tendencję, iż niezależnie od rodzaju włókien i rodzaju matrycy wraz ze wzrostem długości zakotwienia badanych włókien generalnie zmniejszała się wartość stycznych naprężeń ścinających. Postanowiono więc do obliczeń długości krytycznej wszystkich włókien wybrać maksymalne wartości naprężeń stycznych tj. obliczone przy zakotwieniu wynoszącym 25 mm. W najkrótszym zakotwieniu wpływ przewężenia, prostowania karbowanych włókien PET i PETX, poślizgu względem taśm fibrylizowanych w wiązce PPF i innych zaburzających odczyt efektów był najmniejszy. Długość krytyczną l_c wyznaczono na podstawie zależności:

$$l_c = \frac{2 \cdot f_t \cdot P_P}{\tau_{max} \cdot O_W} \ [mm], \tag{9}$$

gdzie:

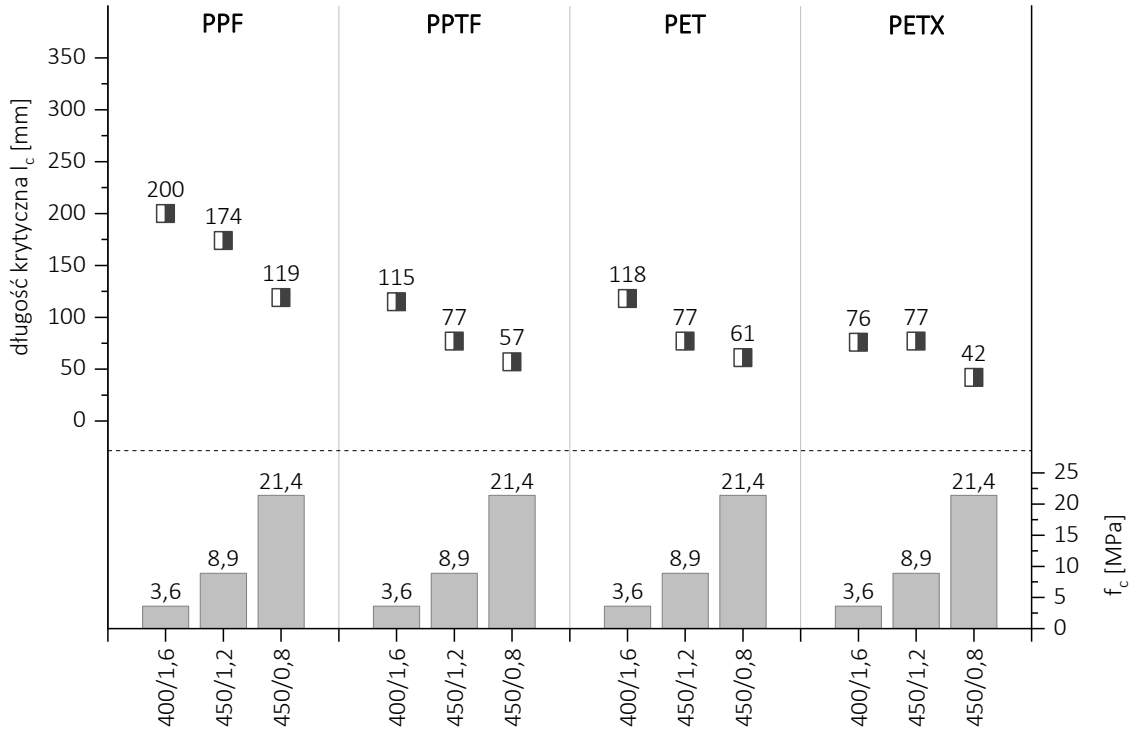
f_t – wytrzymałość na rozciąganie włókna [MPa],

τ_{max} – maksymalne naprężenie styczne [MPa],

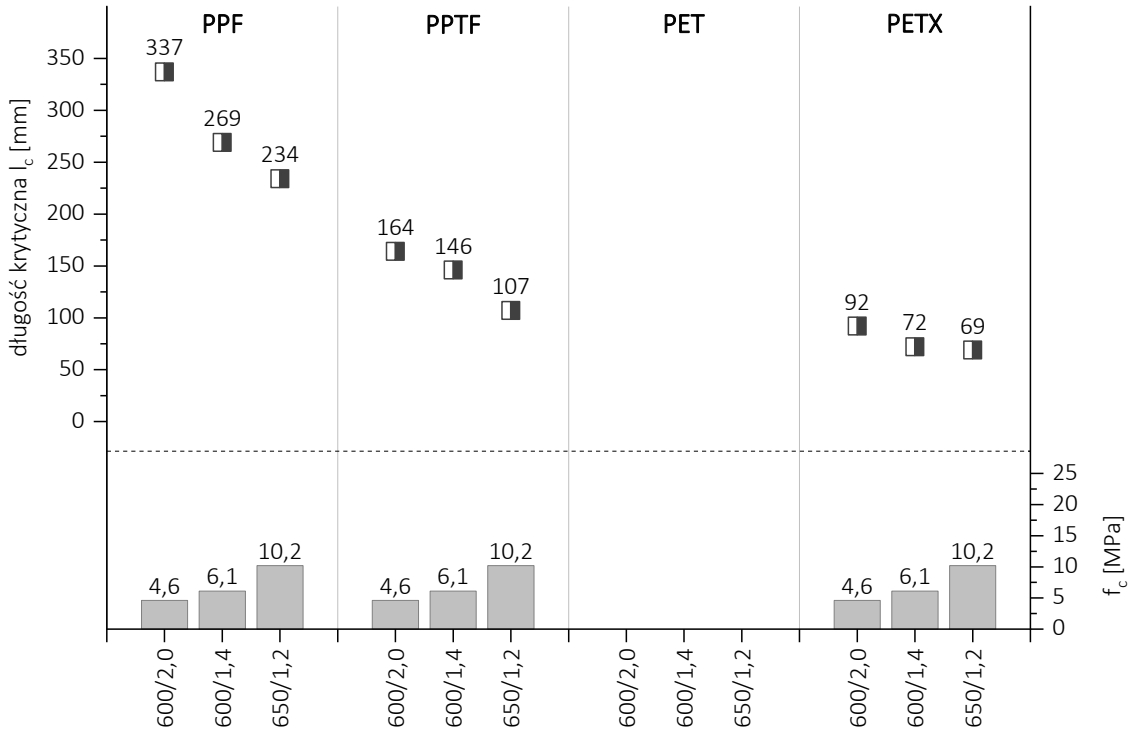
P_P – pole przekroju włókna [mm^2],

O_W – obwód włókna [mm].

Obliczone wartości długości krytycznych dla badanych włókien zostały zaprezentowane na dwóch poniższych rysunkach 5.14 i 5.15 osobno w matrycach z gruntu niespoistego i gruntu spoistego.



Rysunek 5.14 Wykresy długości krytycznej l_c badanych włókien, zakotwionych na głębokości 25 mm w matrycach z gruntu niespoistego



Rysunek 5.15 Wykresy długości krytycznej l_c badanych włókien, zakotwionych na głębokości 25 mm w matrycach z gruntu spoistego

Analizując wyznaczone wartości długości krytycznych można stwierdzić, iż ich wartości maleją w obrębie danego włókna wraz ze wzrostem wytrzymałości matrycy gruntobetonowej. Dzieje się tak zarówno w matrycach z gruntu niespoistego, jak również spoistego. Porównując oba wykresy ze sobą

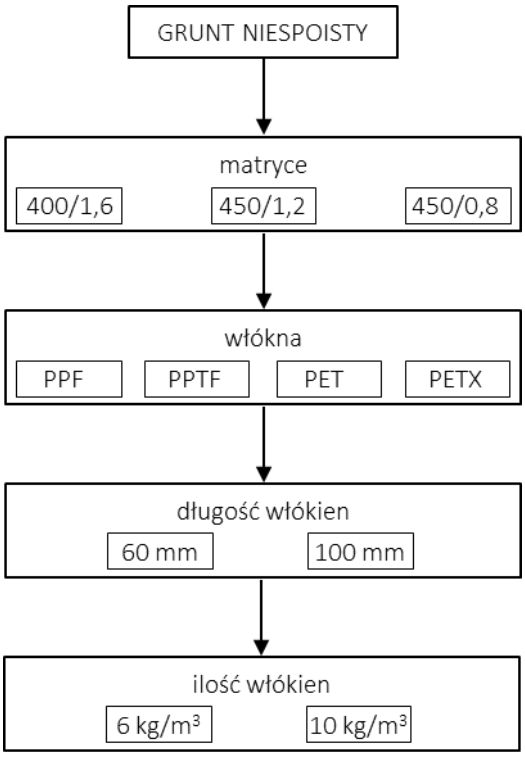
widoczny jest wpływ rodzaju gruntu, z którego wykonane są matryce na osiągane wartości długości krytycznej. Zdecydowanie mniejszej długości zakotwienia wymagają włókna znajdujące się w mocniejszych matrycach z gruntu niespoistego. Z kolei porównując długości krytyczne poszczególnych włókien można zaobserwować, iż najkorzystniejszymi okazują się być włókna PETX, które charakteryzują się najmniejszymi wartościami długości krytycznej. Jednakże należy przypomnieć, że badania przyczepności włókien polipropylenowych postanowiono realizować w pierwotnym ich kształcie. Tak więc, włókna PPTF badano jako nierozciągnięte poprzecznie, a włókna PPF jako wiązki nierozplątanych taśm. Z tego powodu można przyjąć, iż wyznaczone wartości długości krytycznej są zawyżone, a efekt współpracy tych włókien z matrycami gruntobetonowymi jest niedoszacowany. Inaczej mówiąc, wyznaczone wartości można traktować jako najbezpieczniejsze z punktu widzenia pracy tych włókien w matrycy gruntobetonowej. W rzeczywistości, w przypadku włókien PPTF, ich mieszanie z matrycą gruntobetonową powoduje ich poprzeczne rozciągnięcie, ujawniając tym samym strukturę przypominającą siatkę. Siatka ta zostaje wypełniona mieszanką gruntobetonową, co zwiększa powierzchnię styku pomiędzy włóknami i matrycą, a więc zwiększa przyczepność matrycy gruntobetonowej do tych włókien. Natomiast na skutek mieszania włókna PPF ulegają rozplątaniu, dzięki czemu pomiędzy poszczególnymi taśmami powstają wolne przestrzenie, które zostają wypełnione mieszanką gruntobetonową. Dodatkowo tutaj również uwidacznia się fibrylizacja pojedynczych taśm. Wszystkie wymienione zjawiska pozwalają na zwiększenie przyczepności matrycy do włókien, a więc zmniejszenie ich długości krytycznych.

Badania współpracy włókien z matrycami oraz wyznaczone w rezultacie długości krytyczne prowadzą do przyjęcia zakresu długości włókien stosowanych w badaniach efektywności zbrojenia rozproszonego. Z jednej strony analiza uzyskanych wyników pozwala stwierdzić, iż stosowanie włókien krótszych niż 60 mm nie zapewni odpowiedniej przyczepności. Z drugiej strony wyznaczone długości krytyczne, zwłaszcza w przypadku włókien polipropylenowych PPF i PPTF sugerują, iż należy stosować włókna o długości powyżej 100 mm. Jednakże praktyka w skali zarówno technicznej, jak również laboratoryjnej wykazała, iż wprowadzanie do matrycy gruntobetonowej włókien dłuższych niż 100 mm jest nieefektywne. Takie włókna w trakcie mieszanie ulegają skręceniu i zwinięciu, co skraca ich efektywną długość. Dodatkowo zastosowanie zbyt długich włókien powoduje powstawanie ich skupisk, uniemożliwiając ich równomierne rozmieszczenie w kompozycie. Podsumowując, jako efektywny zakres długości włókien z tworzyw sztucznych stosowanych do wzmacniania gruntobetonów przyjęto przedział od 60 do 100 mm.

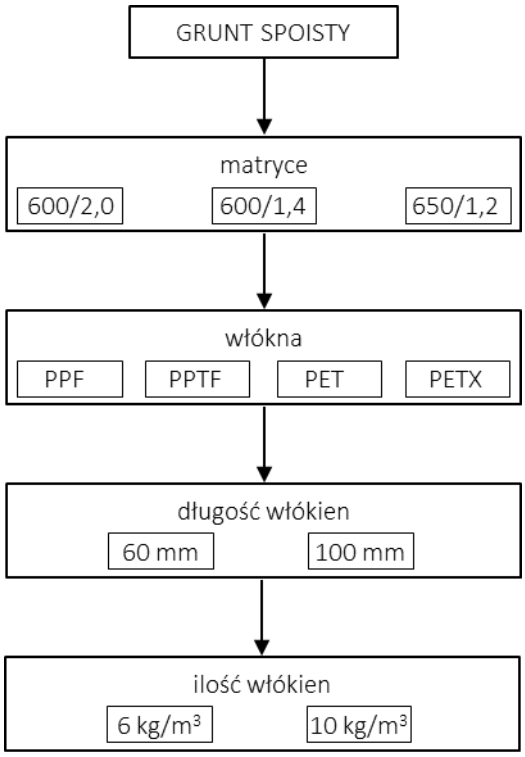
6 EFEKTYWNOŚĆ ZBROJENIA ROZPROSZONEGO FIBROGRUNTOBETONÓW

6.1 ZAKRES BADAŃ

Program badań obejmował wykonanie serii fibrogruntobetonów, zróżnicowanych pod względem składu matrycy gruntobetonowej oraz rodzaju, długości i ilości dodawanych włókien. Do realizacji badań wykorzystano więc te same składy mieszanek gruntobetonowych (patrz tabela 5.1) oraz te same rodzaje włókien (scharakteryzowane w punkcie 5.1), które wybrano do badań przyczepności matryc gruntobetonowych do włókien. Na podstawie wyników badań przyczepności do badań efektywności zbrojenia rozproszonego przyjęto dwie długości włókien: 60 i 100 mm. Jedynie włókna PETX nie zostały zróżnicowane pod kątem stosowanej długości, a do badań wybrano włókna tylko o długości 100 mm. Na skutek wstępnych badań przyjęto dwa poziomy dozowania włókien: 6 i 10 kg/m^3. Badania te wykazały bowiem, iż stosowanie dodatku włókien w ilości poniżej 6 kg/m^3 nie przynosi niemal żadnego efektu wzmocnienia matrycy gruntobetonowej. Natomiast stosowanie większych ilość włókien niż 10 kg/m^3 prowokowało istotne problemy związane z homogenizacją mieszanek. Poniższe schematy prezentują warianty składów fibrogruntobetonów przyjętych do badań efektywności zbrojenia rozproszonego.



Rysunek 6.1 Schemat tworzenia wariantów fibrogruntobetonów z **gruntu niespoistego**



Rysunek 6.2 Schemat tworzenia wariantów fibrogruntobetonów z **gruntu spoistego**

Składy wszystkich kompozytów fibrogruntobetonowych obliczano zgodnie z wytycznymi dotyczącymi projektowania składów gruntobetonów (patrz opis w pkt. 4.1), jednak z tą różnicą, że w przyjętej jednostce objętości kompozytu uwzględniano udział włókien. Konsystencja mieszanek

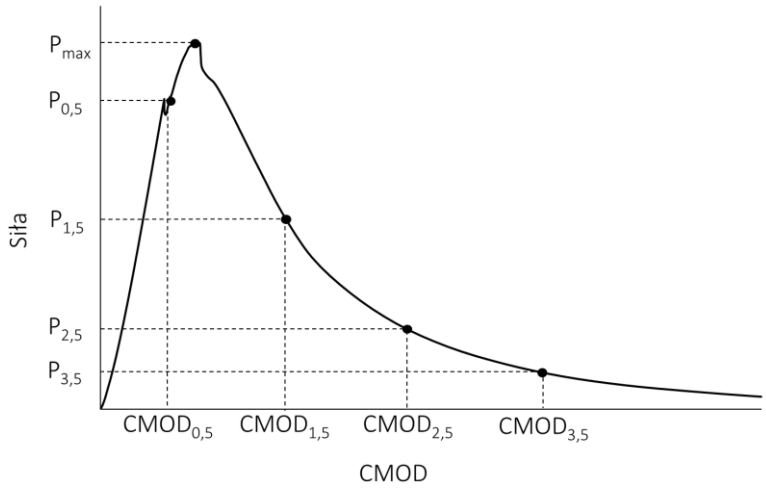
fibrogruntobetonowych badana była tak samo, jak to miało miejsce w przypadku mieszanek gruntobetonowych (patrz opis w pkt. 4.3).

Wprowadzenie włókien o przyjętych długościach i wybranych poziomach dozowania do matrycy gruntobetonowej i ich wspólne wymieszanie spowodowało nieznaczne obniżenie ciekłości mieszanek, jednak uzyskana konsystencja nadal pozwalała na wbudowanie mieszanki metodami stosowanymi w skali technicznej. Zarówno w mieszankach fibrogruntobetonowych z gruntu niespoistego, jak również z gruntu spoistego wartość rozpływu na stoliku do badania konsystencji spadła średnio o 7% w porównaniu do mieszanek gruntobetonowych. W celu zachowania naturalnej wilgotności fibrogruntobetonów, która wynika z kompozycji ich składu, do czasu badania próbki kondycjonowano w taki sam sposób, jak to miało miejsce w przypadku próbek gruntobetonowych (patrz opis w pkt. 4.4). Dla każdego przyjętego wariantu fibrogruntobetonu wykonano do badań po trzy próbki, co w rezultacie dało po 126 próbek dla każdego z wybranych rodzajów gruntów.

6.2 METODYKA OCENY EFEKTYWNOŚCI ZBROJENIA ROZPROSZONEGO FIBROGRUNTOBETONÓW

Metodyka badania efektywności zbrojenia rozproszonego w kompozytach fibrogruntobetonowych nie została dotychczas jednoznacznie opracowana. Jamsawang et al. [47, 51] do badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu gruntobetonów ze zbrojeniem rozproszonym wykorzystali wytyczne zawarte w normie ASTM C1609 [60] dotyczącej klasycznego fibrobetonu cementowego. Jednym z dokumentów, który jest dedykowany badaniu wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu betonu jest norma PN-EN 14651:2007 [61]. Podana w niej metodyka jest często wykorzystywana do badania kompozytów betonowych wzmocnionych przy użyciu różnego rodzaju zbrojenia rozproszonego. Wśród nich można wymienić: beton zbrojony włóknami stalowymi (SFRC) [62, 63, 64], beton samozagęszczalny (SCC) zbrojony włóknami sztucznymi [65, 66] lub beton z mieszanym spoiwem geopolimerowo-cementowym zbrojony włóknami stalowymi [67]. Jednakże badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu betonu można przeprowadzić również zgodnie z wytycznymi raportu Komitetu Technicznego RILEM TC-187 SOC [68]. Enfedaque et al. [69] wykorzystali metodykę zawartą w tym dokumencie do przeprowadzenia badań cech mechanicznych betonu samozagęszczalnego zbrojonego włóknami poliolefinowymi. Podobnie uczynili Sadrmomtazi et al. [70] w przypadku badań betonu ciężkiego (HWC). W badaniach własnych postanowiono więc wykorzystać wytyczne zawarte w normie [61] oraz w raporcie Komitetu Technicznego RILEM [68] i opracować metodykę badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu kompozytów fibrogruntobetonowych.

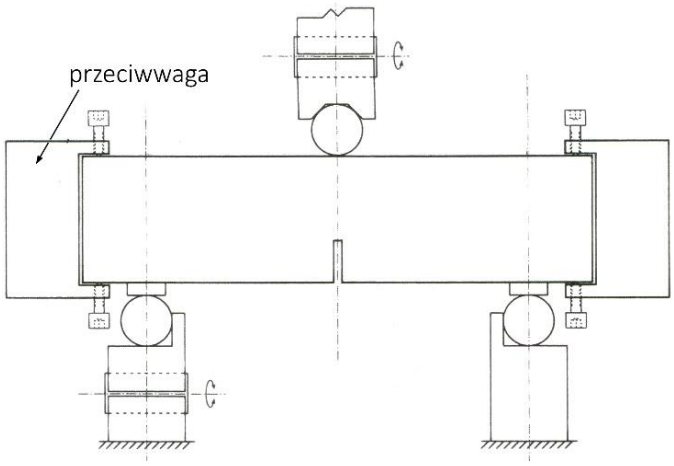
Norma PN-EN 14651:2007 [61] pozwala na wyznaczenie takich parametrów jak: wytrzymałość na zginanie, granica proporcjonalności (σ_{LOP} - wartość naprężenia, przy której następuje zarysowanie matrycy) oraz wartości naprężeń pokrytycznych σ_{CMOD} przy odpowiedniej wielkości rozwarcia powstającej rysy CMOD (0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm, 3,5 mm).



Rysunek 6.3 Wykres zależności siła-rozwarcie rysy CMOD z normy PN-EN 14651:2007 [61]

Norma ta wymaga realizacji badań na próbkach o wymiarach przekroju poprzecznego 150 x 150 mm i długości z zakresu 550-700 mm w celu uzyskania odpowiedniej reprezentatywności związanej z obecnością kruszywa grubego w kompozytach oraz włókien najczęściej stalowych. Ponadto koniecznym jest wykonanie w połowie rozpiętości próbki karbu inicjującego powstanie rysy. Zalecana wysokości nacięcia w próbce wynosi 25 mm. W badaniach wymagany jest rozstaw podpór równy 500 mm, a prędkość przyrostu obciążenia sterowana jest rozwarciem rysy. Początkowo prędkość ta wynosi 0,05 mm/min, a po osiągnięciu wartości rozwarcia rysy CMOD 0,1 mm, zostaje zwiększona do wartości 0,2 mm/min. Zaleca się również prowadzenie badania do maksymalnego rozwarcia rysy CMOD równego 4,0 mm.

Raport Komitetu Technicznego RILEM poświęcony jest badaniom energii pękania i efektywności zbrojenia rozproszonego. Skorzystanie z wytycznych zawartych w tym raporcie jest istotne z uwagi na fakt, iż gruntobeton charakteryzuje się relatywnie niskim poziomem wytrzymałości, zwłaszcza przy zginaniu. Dokument ten poświęcony jest badaniom betonu zarówno z, jak i bez włókien. W przypadku badań bez włókien zaleca się stosowane przeciwwag, które mają za zadanie kompensować dodatkową siłę zginającą, wynikającą z masy własnej próbek. Przyjęto zatem, że stosowanie przeciwwag w badaniach kompozytów fibrogruntobetonowych będzie wymagało weryfikacji.

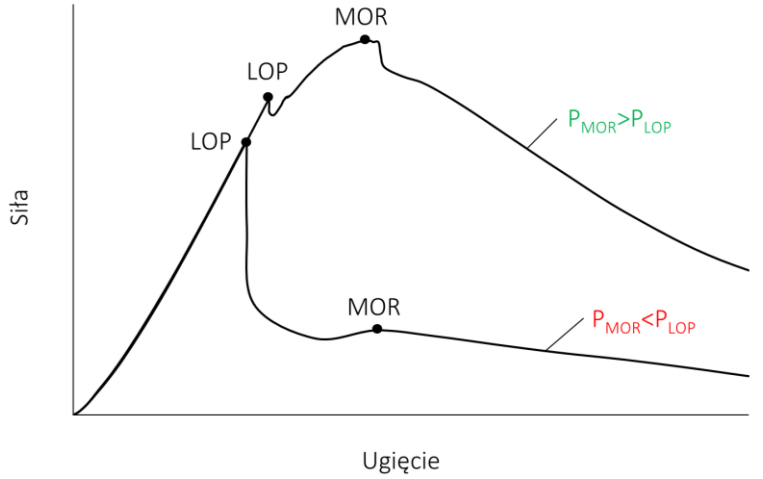


Rysunek 6.4 Schemat badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu z zastosowanymi przeciwwagami według raportu Komitetu Technicznego RILEM [68]

Wytyczne RILEM zalecają stosowanie próbek pryzmatycznych o wysokości pięciokrotnie większej od wielkości maksymalnego ziarna kruszywa w składzie betonu. Rozstaw podpór powinien być trzykrotnie większy od wysokości próbek. Podobnie jak zaleca norma PN-EN 14651 [61] próbka powinna posiadać nacięcie w środku jej rozpiętości o wysokości w zakresie od ½ do ⅓ wysokości próbki. Zalecana prędkość przyrostu przemieszczenia wynosi 0,01 mm/min, natomiast badanie należy realizować do wartości rozwarcia rysy CMOD wynoszącej 4/300 wysokości próbki.

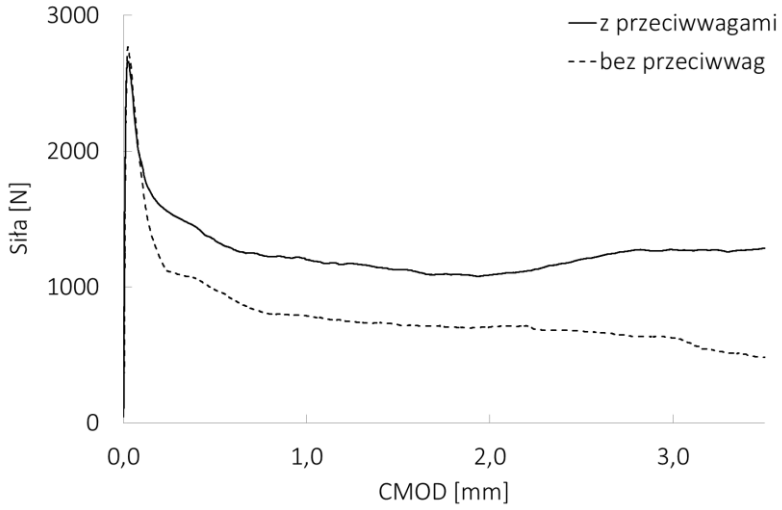
Mając na celu zaadaptowanie metody i przystosowanie jej oceny efektywności wzmocnienia gruntobetonów włóknistym zbrojeniem rozproszonym wykonano szereg doświadczeń potwierdzających sens wykorzystania zaleceń zawartych w obu opisywanych powyżej dokumentach. Ponadto, analiza literatury badań związanych z oceną efektywności zbrojenia rozproszonego [71, 72, 73, 74, 75] potwierdza przydatność jej opisu za pomocą parametru σ_{MOR} (z ang. modulus of rupture) zdefiniowanego jako maksymalne naprężenie przenoszone przez zbrojenie rozproszone po zarysowaniu matrycy, czemu odpowiada naprężenie σ_{LOP}.

Na rysunku 6.5 widoczne są dwa przykładowe wykresy. Dolny wykres przedstawia przypadek nieefektywnej pracy włókien w kompozycie, ponieważ wartość naprężenia σ_{LOP} jest większa od wartości naprężenia σ_{MOR}. Natomiast górny wykres obrazuje przypadek właściwego wykorzystania zbrojenia rozproszonego, które wzmacnia matrycę, w efekcie czego wartość naprężenia σ_{MOR} jest większa od wartości naprężenia towarzyszącego zarysowaniu matrycy σ_{LOP}.



Rysunek 6.5 Wykresy zależności siła – ugięcie charakteryzujące efektywną i nieefektywną pracę zbrojenia rozproszonego

W związku ze wspomnianym problemem niskiej wytrzymałości gruntobetonów w opracowywanej metodyce badań zweryfikowano konieczność stosowania przeciwwag, kompensujących dodatkową siłę zginającą, wynikająca z masy własnej próbek. W tym celu wykonano badanie wpływu masy własnej próbki na wyznaczane parametry mechaniczne, którego wyniki przedstawia rysunek nr 6.6. Znajdują się na nim dwa wykresy uzyskane podczas badania próbek fibrogruntobetonowych z gruntu spoistego z polipropylenowym zbrojeniem rozproszonym o długości 30 mm w ilości 4 kg/m^3.



Rysunek 6.6 Wykres zależności siła-rozwarcie rysy CMOD dla próbki z przeciwwagami oraz bez przeciwwag

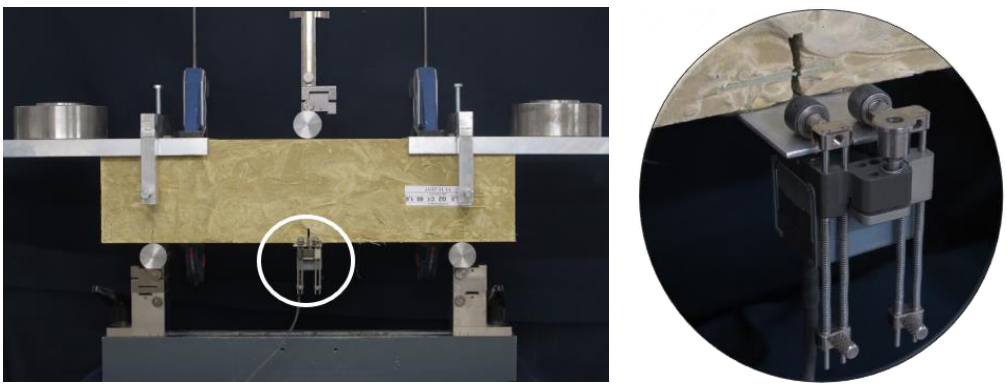
Wyznaczone dla obydwu próbek parametry zostały zestawione w tabeli nr 6.1. Dodatkowo w ostatniej kolumnie podano również procentowy wzrost wartości poszczególnych parametrów dla próbki z przeciwwagami w porównaniu z próbką bez przeciwwag.

Tabela 6.1 Parametry mechaniczne fibrogruntobetonu z gruntu spoistego z dodatkiem 4 kg/m^3 włókien PPF z przeciwwagami oraz bez przeciwwag

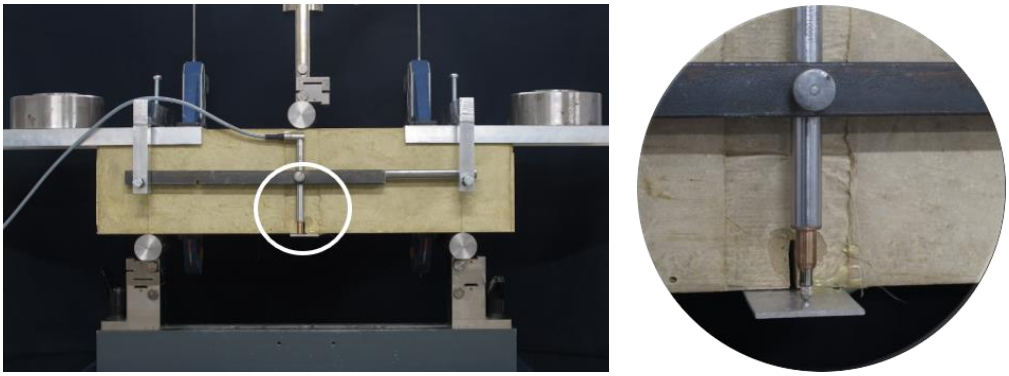
Właściwość	bez przeciwwag	z przeciwwagami	Δ [%]
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu $f_{ct,fl}$ [MPa]	0,80	0,77	-4
Naprężenie $\sigma_{CMOD_0,5}$ [MPa]	0,28	0,39	37
Naprężenie $\sigma_{CMOD_1,5}$ [MPa]	0,21	0,33	56
Naprężenie $\sigma_{CMOD_2,5}$ [MPa]	0,19	0,35	78
Naprężenie $\sigma_{CMOD_3,5}$ [MPa]	0,14	0,37	167
Całkowita energia pękania G_{tot} [kJ/m^2]	0,162	0,273	69

Zamieszczone w powyższej tabeli wyniki pokazują duże zróżnicowanie ocenianych parametrów w zależności od warunków badania, szczególnie w zakresie naprężeń pokrytycznych. Zróżnicowanie to rośnie wraz ze zwiększającym się rozwarciem rysy CMOD. Naprężenia pokrytyczne $\sigma_{CMOD_3,5}$ w próbce bez przeciwwag są zaniżone ponad dwukrotnie w stosunku do badania próbki z przeciwwagami. Obecność przeciwwag także nie pozostaje bez znaczenia w odniesieniu do całkowitej energii pękania G_{tot}. Zróżnicowanie to sięga około 70%.

Podsumowując, badania efektywności zbrojenia rozproszonego postanowiono przeprowadzić na próbkach pryzmatycznych o wymiarach 150 x 150 x 600 mm. Rozstaw podpór l przyjęto jako trzykrotną wysokość przekroju poprzecznego h (l = 3h = 450 mm). W opracowanej metodyce badań dla oddania pełnej istoty zachowania się fibrogruntobetonów przyjęto zasadność oznaczania następujących parametrów: wytrzymałość na rozciąganie przy trzypunktowym zginaniu $f_{ct,fl}$, wartości naprężeń pokrytycznych σ_{CMOD}, granicę proporcjonalności σ_{LOP}, wartość naprężenia σ_{MOR}, a także całkowitą energią zniszczenia materiału G_{tot}. Podczas stałego rozwarcia rysy CMOD w czasie badania powinny być rejestrowane jednocześnie wartość działającej siły P, rozwarcie rysy CMOD (rysunek 6.7) oraz ugięcie belki d (rysunek 6.8).

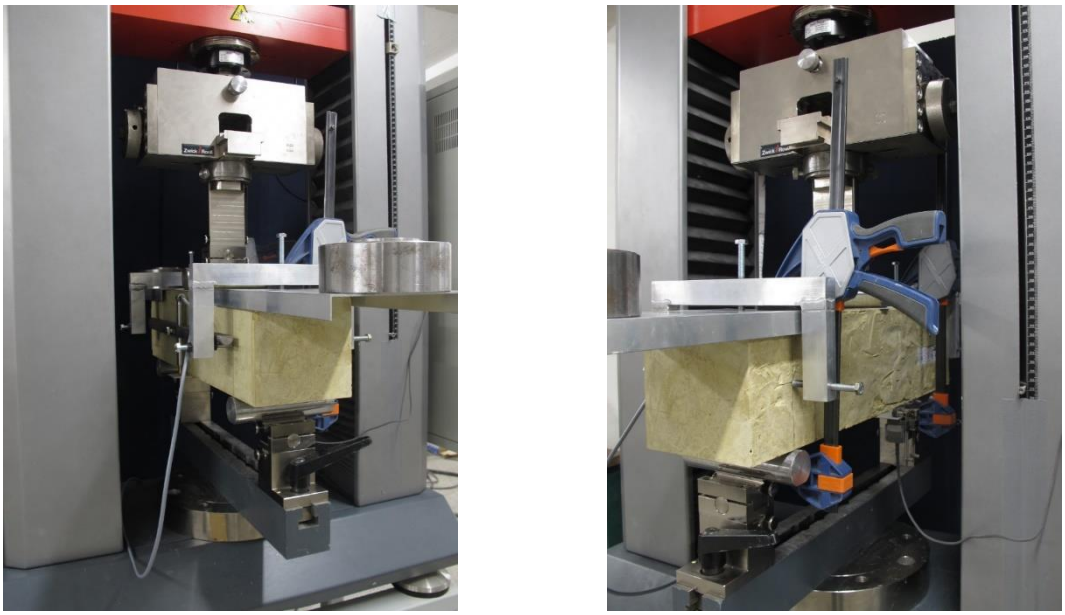


Rysunek 6.7 Pomiar rozwarcia rysy CMOD przy użyciu ekstensometru typu Clip-on



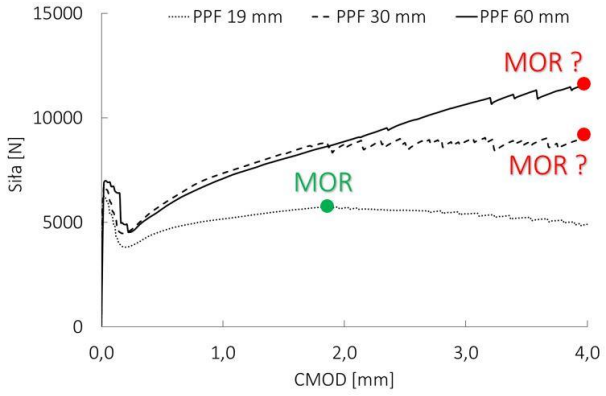
Rysunek 6.8 Pomiar ugięcia d przy użyciu indukcyjnego przetwornika drogi

W celu kompensacji dodatkowej siły zginającej, wynikającej z masy własnej próbki do badań wykonano ramę, na której umieszczano w odpowiedniej odległości od osi próbki przeciwwagi. Równocześnie rama ta umożliwiała montaż czujnika rejestrującego ugięcie belki z pominięciem odkształceń próbki na podporach (wgniatanie wałków podpór w próbkę oraz ewentualne przemieszczenia podpór w trakcie badania). Widok stanowiska badawczego prezentuje rysunek 6.9.

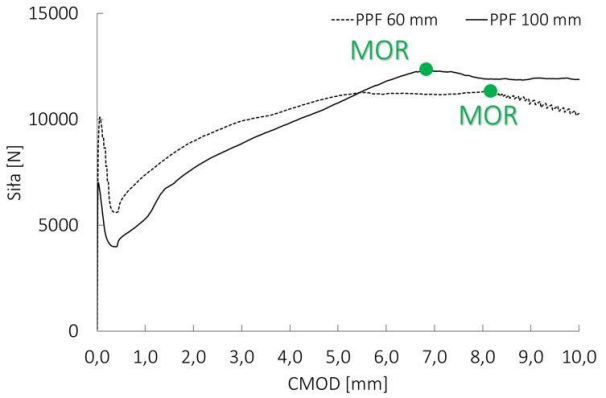


Rysunek 6.9 Próbka w maszynie wytrzymałościowej z ramą, przeciwwagami i czujnikami

Pierwsze wykonane badania pozwoliły na weryfikację parametrów normowych. Przeprowadzono je dla fibrogruntobetonów z gruntu niespoistego z włóknami PP różnej długości w ilości 6 kg/m^3. Norma [61], w przypadku badania fibrobetonów, sugeruje zakończenie pomiarów przy rozwarciu rysy CMOD = 4 mm. Jednak ze względu na rejestrowany dalszy przyrost naprężeń pokrytycznych w przypadku fibrogruntobetonów, badania kontynuowano do CMOD = 10 mm. Dopiero wówczas obserwowano spadek naprężeń pokrytycznych i umożliwiło to wyznaczenie parametru σ_{MOR}. Sugerowane przez normę [61] naprężenia pokrytyczne w zakresie od $\sigma_{CMOD_0,5}$ do $\sigma_{CMOD_3,5}$ zmodyfikowano w stosunku do oryginalnych zaleceń i rejestrowano je przy CMOD = 0,5; 2,5; 5,0; 7,5 i 10,0 mm.



Rysunek 6.10 Wykres zależności naprężenie – rozwarcie rysy dla CMOD = 4 mm



Rysunek 6.11 Wykres zależności naprężenie – rozwarcie rysy dla CMOD = 10 mm

Z uwagi na wydłużenie pomiaru rozwarcia rysy postanowiono zmodyfikować również prędkość przyrostu przemieszczeń podczas badania. W przyjętej metodyce do wartości CMOD = 0,3 mm próbki obciążano z prędkością 0,2 mm/min, natomiast powyżej tej wartości rozwarcia rysy prędkość zwiększano do wartości 3,0 mm/min. Modyfikacja ta nie wpłynęła na wartości rejestrowanych parametrów, a spowodowała znaczne skrócenie czasu badania pojedynczej próbki.

6.3 Wyniki badań i ich analiza

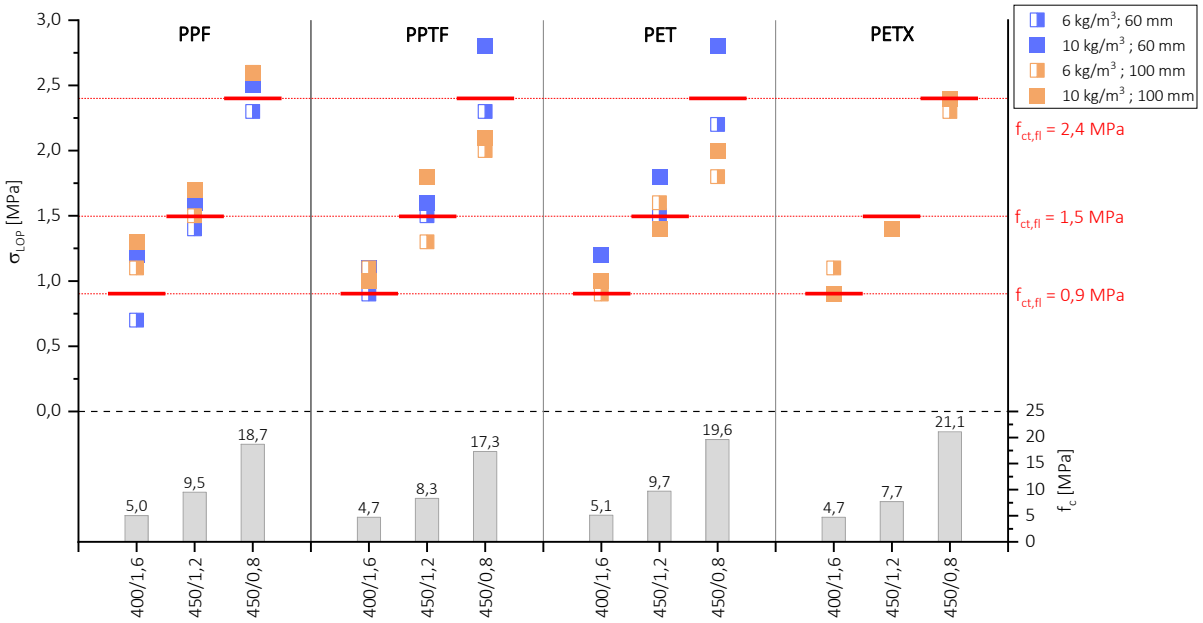
Wszystkie wyznaczone parametry mechaniczne zostały zgromadzone w tabelach, znajdujących się w punkcie 12.2 rozdziału 12. Załączniki. W tabelach 12.7 ÷ 12.14 umieszczono wyniki fibrogruntobetonów z gruntu niespoistego, natomiast w tabelach 12.15 ÷ 12.22 fibrogruntobetonów z gruntu spoistego. Z uwagi na liczebność wykonanych prób pominięto przedstawianie wyników cząstkowych, a prezentowane wyniki ograniczono do średnich wartości z trzech pomiarów. Uzyskaną efektywność zbrojenia rozproszonego w kompozytach fibrogruntobetonowych obrazują wykresy zależności siła – rozwarcie rysy CMOD, przedstawione również w punkcie 12.2 rozdziału 12 Załączniki. Na rysunkach 12.19 ÷ 12.30 umieszczono wykresy dla fibrogruntobetonów z gruntu niespoistego, a na rysunkach 12.31 ÷ 12.42 z gruntu spoistego. Analizę wyników podzielono na ocenę wpływu włókien na wartości naprężeń σ_{LOP}, następnie na wartości naprężeń σ_{MOR} oraz na wartości stosunku naprężeń $\sigma_{MOR}/\sigma_{LOP}$. W dalszej części przeanalizowano również wpływ rodzaju włókien na wartości rozwarcia rysy, przy których rejestrowano wartości naprężeń σ_{MOR}.

6.3.1 Wpływ włókien na wartości naprężeń LOP

6.3.1.1 Fibrogruntobeton z gruntu niespoistego

Na poniższym wykresie zestawiono wyznaczone wartości naprężeń σ_{LOP} badanych wariantów fibrogruntobetonów z gruntu niespoistego. Kolorem czerwonym zaznaczono referencyjne wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu gruntobetonów bez dodatku włókien z gruntu niespoistego.

W dolnej części wykresu umieszczono wytrzymałości na ściskanie stworzonych kompozytów fibrogruntobetonowych.

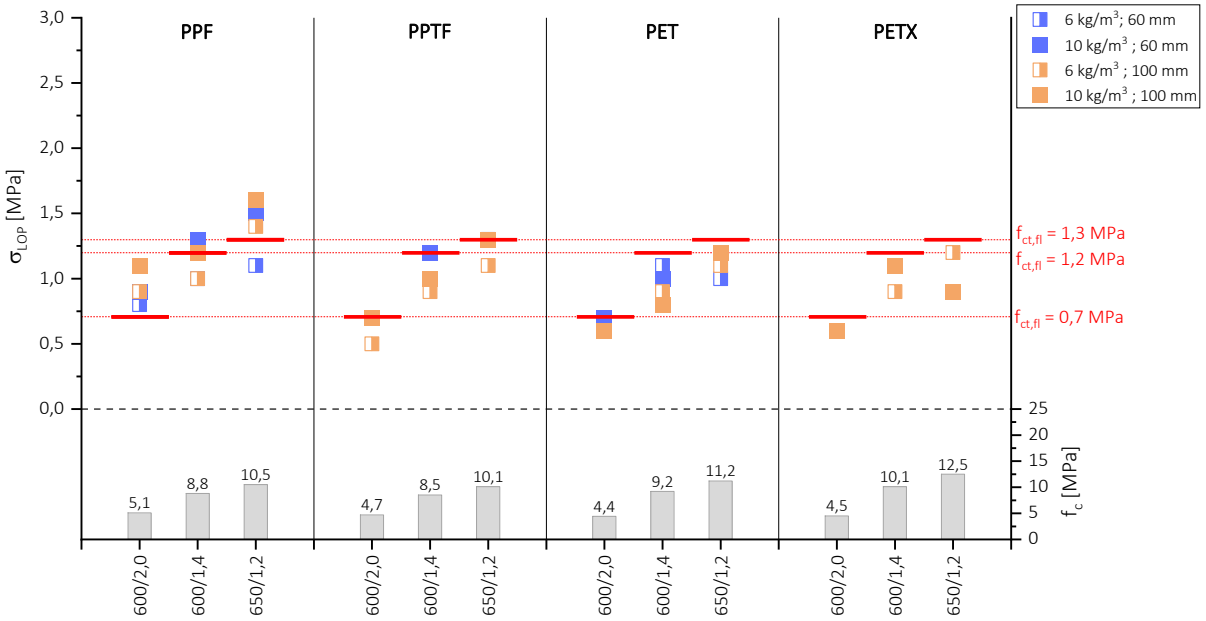


Rysunek 6.12 Wykres prezentujący zestawienie wartości naprężeń **σ_{LOP}** dla badanych rodzajów, ilości i długości włókien w fibrogruntobetonach z **gruntu niespoistego** (rozdział 12 Załączniki, tabele 12.7, 12.9, 12.11 i 12.13)

Analizując wpływ obecności zbrojenia na wartości naprężeń σ_{LOP} w porównaniu do wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu gruntobetonów bez zbrojenia, można zaobserwować w wielu przypadkach niewielkie zróżnicowanie lub wręcz brak widocznego wpływu inkluzji włóknistej. Wyjątek stanowią fibrogruntobetony z dodatkiem 10 kg/m^3 włókien o długości 60 mm, gdzie w każdej z kombinacji składów zaobserwowano, iż wartości naprężeń σ_{LOP} są wyższe od referencyjnej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu gruntobetonów średnio o 18 %. Nie jest również widoczna żadna zależność dla wpływu rodzaju włókien na wartości naprężeń σ_{LOP}.

6.3.1.2 FIBROGRUNTOBETON Z GRUNTU SPOISTEGO

Na kolejnym rysunku 6.13 zestawiono wyznaczone wartości naprężeń σ_{LOP} badanych wariantów fibrogruntobetonów z gruntu spoistego. W analogiczny sposób na wykresie zaznaczono referencyjne wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu gruntobetonów bez dodatku włókien z analizowanego rodzaju gruntu oraz wytrzymałości na ściskanie fibrogruntobetonów.



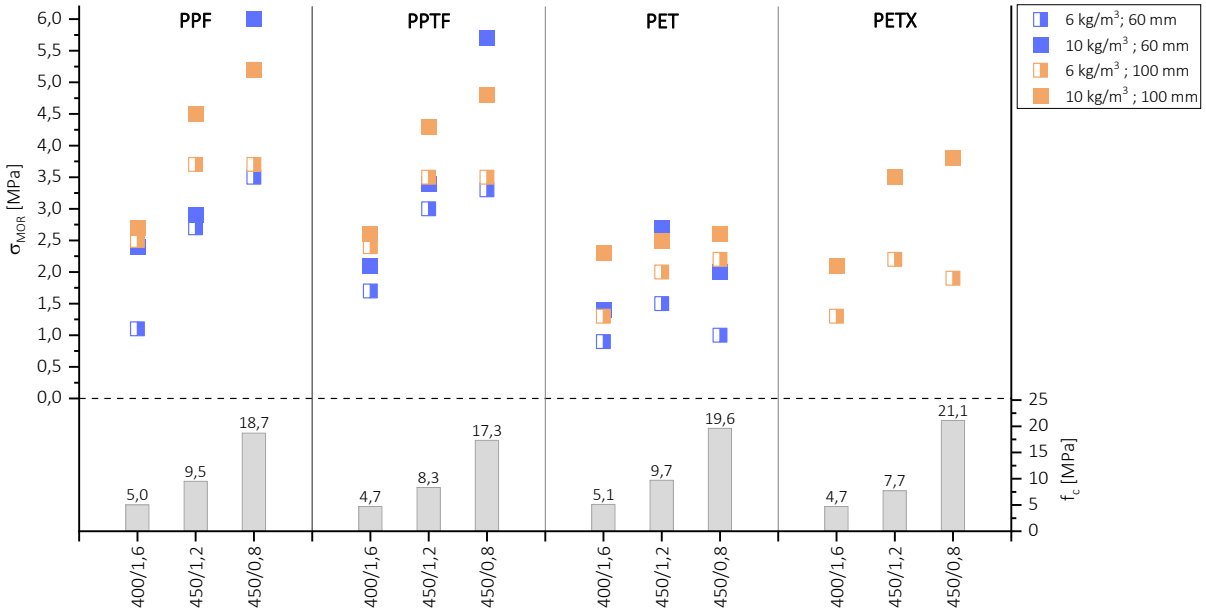
Rysunek 6.13 Wykres prezentujący zestawienie wartości naprężeń **σ_{LOP}** dla badanych rodzajów, ilości i długości włókien w fibrogruntobetonach z **gruntu spoistego** (rozdział 12 Załączniki, tabele 12.15, 12.17, 12.19 i 12.21)

W przypadku kompozytów fibrogruntobetonowych z gruntu spoistego wpływ dodatku włókien na wartości naprężeń σ_{LOP} jest bardziej widoczny niż w przypadku fibrogruntobetonów z gruntu niespoistego. W większości przypadków wartości naprężeń σ_{LOP} są mniejsze od wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu gruntobetonów bez zbrojenia. Ponownie wyjątek stanowią kompozyty z dodatkiem 10 kg/m^3 włókien o długości 60 mm, gdzie zanotowano niewielki wzrost. Również znalezienie wyraźnej tendencji wpływu rodzaju włókien na wartości naprężeń σ_{LOP} jest trudne.

6.3.2 Wpływ włókien na wartości naprężeń MOR

6.3.2.1 Fibrogruntobeton z gruntu niespoistego

Poniższy rysunek 6.14 ilustruje wpływ rodzaju, ilości i długości włókien na wartości naprężeń σ_{MOR} w kompozytach fibrogruntobetonowych z gruntu niespoistego.



Rysunek 6.14 Wykres prezentujący zestawienie wartości naprężeń σ_{MOR} dla badanych rodzajów, ilości i długości włókien w fibrogruntobetonach z **gruntu niespoistego** (rozdział 12 Załączniki, tabele 12.7, 12.9, 12.11 i 12.13)

We wszystkich trzech analizowanych matrycach zmianie poziomu dozowania włókien z 6 kg/m^3 na 10 kg/m^3 towarzyszył wzrost wartości naprężeń σ_{MOR}. Poziom tego wzrostu zależał od rodzaju matrycy oraz rodzaju i długości włókien. Najbardziej widoczny efekt uzyskano w kompozytach z matrycą 450/0,8 i dodatkiem włókien PPF oraz PPTF o długości 60 mm, gdzie wzrost wartości naprężeń σ_{MOR} wyniósł ponad 70 %. Biorąc pod uwagę wpływ długości włókien na otrzymane wartości naprężeń σ_{MOR} niemal w każdym przypadku zwiększenie długości z 60 mm do 100 mm spowodowało wzrost wartości naprężenia σ_{MOR}. Wyjątek stanowią fibrogruntobetony z matrycą 450/0,8 i dodatkiem włókien PPF oraz PPTF w ilości 10 kg/m^3. Zastosowanie krótszych włókien o długości 60 mm przełożyło się na uzyskanie wyższej wartości naprężenia σ_{MOR} w porównaniu do kompozytów z dodatkiem włókien o długości 100 mm. Wynika to z faktu, iż przy tym samym poziomie dozowania włókien, krótszych włókien w badanym przekroju jest więcej. Należy zwrócić uwagę, iż efektywniejszą pracę krótszych włókien umożliwiła matryca o największej wytrzymałości. W takim przypadku można sądzić, że zarówno włókna o długości 60 jak i 100 mm miały wystarczającą długość zakotwienia w mocnej matrycy, a dominującym parametrem determinującym wartość naprężenia σ_{MOR} była ilość włókien w składzie kompozytu, a tym samym liczba włókien aktywnych w zarysowanym przekroju próbki. Porównując pracę obu rodzajów włókien polipropylenowych można zauważyć, iż wyższe wartości wytrzymałości na zginanie generalnie osiągają kompozyty z włóknami PPF. Jest to skutek zdecydowanie większej powierzchni styku wiązki pięciu fibrylizowanych taśm z matrycą gruntobetonową w porównaniu z pojedynczą taśmą. Ta powierzchnia styku włókien polipropylenowych uwidacznia się i rośnie dopiero na skutek mieszania z mieszanką gruntobetonową, co umożliwia w pełni efektywną współpracę włókien z matrycą.

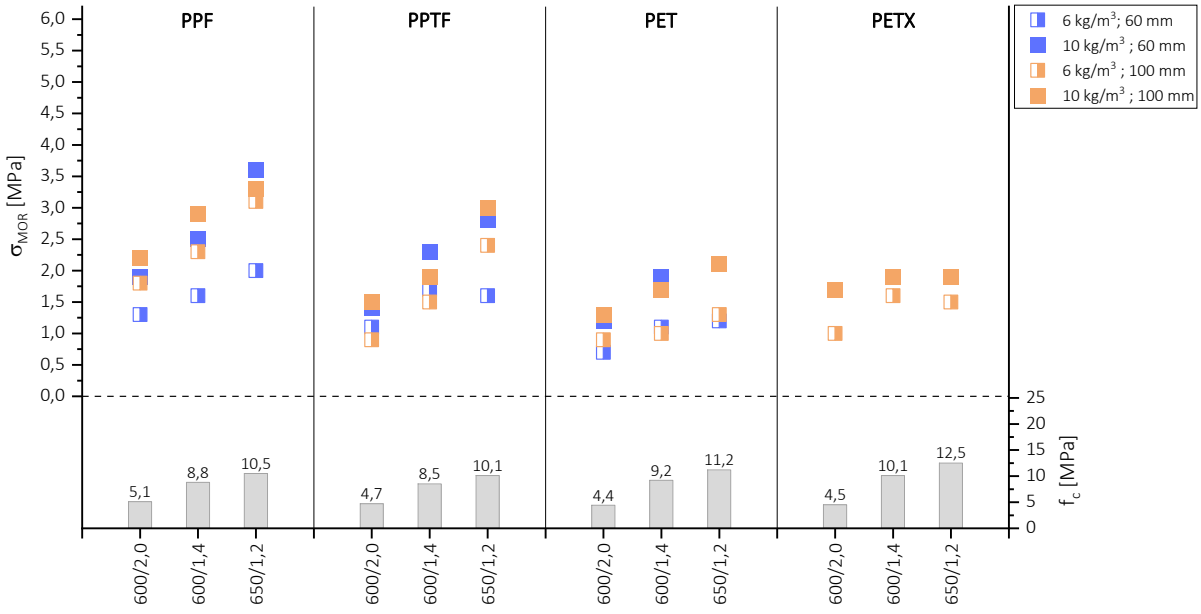
Analizując wartości naprężeń σ_{MOR} kompozytów wzmocnionych włóknami PET, można ponownie zaobserwować, iż zwiększenie ilości dodatku włókien z 6 kg/m^3 do 10 kg/m^3 oraz zmiana długości

włókien z 60 mm do 100 mm pozwala na zwiększenie wartości naprężeń σ_{MOR}. Jednakże, w fibrogruntobetonach z matrycą 450/1,2 i dodatkiem włókien na poziomie 10 kg/m^3 wyższą wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu osiągnęły kompozyty z włóknami krótszymi. Jest to podobny efekt, jaki uzyskano w badaniach kompozytów wzmacnianych włóknami polipropylenowymi. Tutaj jednak wystąpił on w przypadku słabszej matrycy.

Zwiększenie udziału włókien poliestrowych w składach fibrogruntobetonów przełożyło się każdorazowo na wzrost wartości naprężeń σ_{MOR}. Zarówno w kompozytach z dodatkiem włókien PET, jak również włókien PETX najkorzystniejszy efekt uzyskano w najmocniejszej matrycy 450/0,8, gdzie zmiana poziomu dozowania włókien z 6 kg/m^3 do 10 kg/m^3 dwukrotnie zwiększyła wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu badanych kompozytów. Porównując pracę włókien poliestrowych można zaobserwować, iż przy poziomie dozowania równym 6 kg/m^3, osiągane przez kompozyty z włóknami PET oraz PETX wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu są na takim samym poziomie. Modyfikacje geometrii włókien poliestrowych, a więc zmiana przekroju poprzecznego i charakteru karbowania poskutkowały poprawą pracy tych włókien dopiero przy ich 10 kilogramowym dodatku na m^3 w dwóch mocniejszych matrycach 450/1,2 i 480/0,8.

6.3.2.2 FIBROGRUNTOBETON Z GRUNTU SPOISTEGO

Według podobnego schematu prezentowane są na rysunku 6.15 zależności wartości naprężeń σ_{MOR} od rodzaju, ilości i długości włókien w badaniach kompozytów z matrycami z gruntu spoistego.



Rysunek 6.15 Wykres prezentujący zestawienie wartości naprężeń **σ_{MOR}** dla badanych rodzajów, ilości i długości włókien w fibrogruntobetonach z **gruntu spoistego** (rozdział 12 Załączniki, tabele 12.15, 12.17, 12.19 i 12.21)

Analizując wyniki uzyskane w badaniach kompozytów fibrogruntobetonowych z matrycami z gruntu spoistego w przypadku dodatku włókien polipropylenowych można stwierdzić, iż dla ich danej długości

zwiększenie poziomu dozowania włókien z 6 kg/m^3 na 10 kg/m^3 przekłada się na uzyskanie wyższych wartości naprężeń σ_{MOR}. Największą poprawę zaobserwowano w fibrogruntobetonach z matrycą 450/0,8 i dodatkiem włókien PPF oraz PPTF o długości 60 mm. Dla włókien PPF wzrost wartości naprężenia σ_{MOR} był równy 80 %, a dla włókien PPTF 75 %. Porównując wyniki uzyskane przez kompozyty o składach z tą samą matrycą i ilością włókien można stwierdzić, że w przypadku włókien PPF wraz ze zwiększeniem ich długości z 60 mm do 100 mm niemal zawsze wartości naprężeń σ_{MOR} rosną. Wyjątkiem jest skład z matrycą 650/1,2, w której dodatek 10 kg/m^3 włókien o długości 60 mm pozwolił na uzyskanie korzystniejszych rezultatów od kompozytu z tą samą matrycą i dłuższymi włóknami. W przypadku włókien PPTF korzystny wpływ zwiększenia długości włókien jest głównie widoczny w najmocniejszej matrycy 650/1,2. W dwóch słabszych matrycach wystąpił odwrotny trend, w którym generalnie kompozyty z dłuższymi włóknami osiągały niższe wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Ponownie porównując wartości naprężeń σ_{MOR} osiągane przez fibrogruntobetony z włóknami PPF oraz PPTF widać, iż lepsze rezultaty osiągają kompozyty z włóknami PPF. Uzasadnić ten efekt można analogicznie, jak w przypadku wyników fibrogruntobetonów z gruntu niespoistego, poprzez zdecydowanie większą powierzchnię styku włókien PPF i charakter ich pracy w matrycy gruntobetonowej.

W analizie pracy włókien PET w matrycach z gruntu spoistego widoczna jest poprawa wartości naprężeń $\sigma_{MOR,}$, uzyskana dzięki zwiększeniu poziomu dozowania z 6 kg/m^3 do 10 kg/m^3. Szczególnie widoczny jest wzrost wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu kompozytów z matrycami o większej wytrzymałości 600/1,4 i 650/1,2, który średnio wyniósł 70%. Natomiast nie jest widoczna jednoznaczna tendencja ukazująca wpływ zmiany długości włókien PET w obrębie tego samego poziomu dozowania włókien na wartości naprężeń σ_{MOR}. W najsłabszej matrycy 600/2,0 zwiększenie długości włókien pozwoliło na wzrost wartości naprężeń σ_{MOR}, natomiast w matrycy 600/1,4 skutek był odwrotny. Generalnie w obrębie analizowanych matryc zmiany wartości naprężeń σ_{MOR} na skutek zwiększenia długości włókien są niewielkie, wynoszące od kilku do kilkunastu procent.

Analizując wpływ zmiany ilości włókien PETX o długości 100 mm na osiągane przez kompozyty fibrogruntobetonowe wartości naprężeń σ_{MOR} można stwierdzić, iż w każdej z matryc zanotowano wzrost. Najbardziej widoczna poprawa wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, wynosząca 70 %, została zarejestrowana w fibrogruntobetonach z najsłabszą matrycą 600/2,0. Porównując efekt wzmocnienia kompozytów z dodatkiem włókien PET i PETX ponownie uwidacznia się wpływ modyfikacji geometrii włókien poliestrowych, ponieważ wyższe wartości naprężeń σ_{MOR} osiągały fibrogruntobetony z dodatkiem włókien PETX.

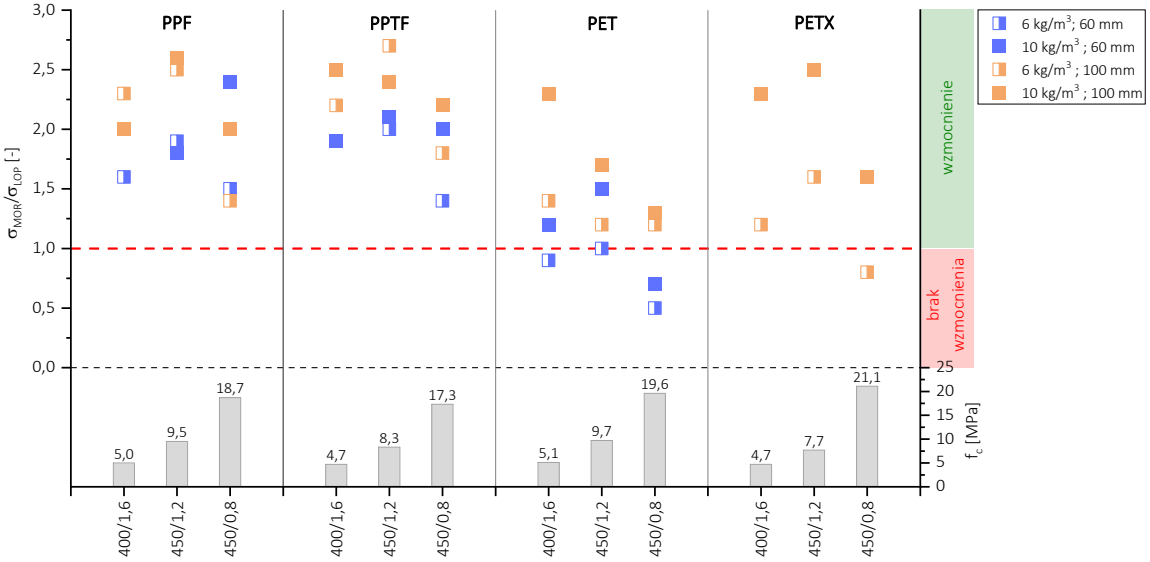
6.3.3 Wpływ włókien na wartości stosunku naprężeń MOR do naprężeń LOP

Miarą wzmocnienia gruntobetonów zbrojeniem rozproszonym jest stosunek σ_{MOR} / σ_{LOP}. Należy przypomnieć, że efekt wzmocnienia jest pozytywny wówczas, gdy σ_{MOR} / σ_{LOP} jest większy od 1,0.

Natomiast wartość stosunku σ_{MOR} / σ_{LOP} poniżej 1,0 oznacza, iż wprowadzenie włókien do matrycy gruntobetonowej nie spowodowało wzmocnienia kompozytu.

6.3.3.1 FIBROGRUNTOBETON Z GRUNTU NIESPOISTEGO

Na poniższym rysunku 6.16 zestawiono wszystkie wyznaczone wartości stosunków σ_{MOR} / σ_{LOP} dla fibrogruntobetonów z matrycami z gruntu niespoistego. Zgodnie z przyjętym schematem prezentowania wyników, rozróżniono na nim przyjęte do badań kombinacje długości i ilości analizowanych włókien.



Rysunek 6.16 Wykres prezentujący zestawienie wartości stosunku naprężeń **σ_{MOR} / σ_{LOP}** dla badanych rodzajów, ilości i długości włókien w fibrogruntobetonach z **gruntu niespoistego** (rozdział 12 Załączniki, tabele 12.7, 12.9, 12.11 oraz 12.13)

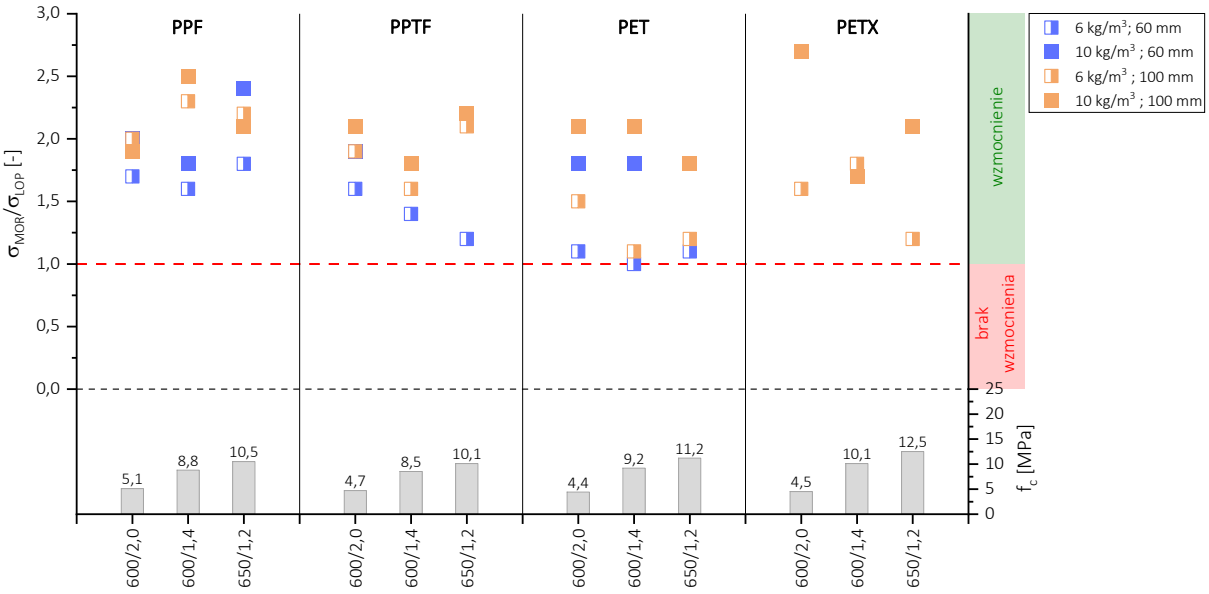
W pierwszej kolejności należy stwierdzić, iż dla kompozytów z dodatkiem włókien polipropylenowych PPF i PPTF wartości naprężeń σ_{MOR} były każdorazowo wyższe od wartości naprężeń σ_{LOP} we wszystkich analizowanych składach. Zatem w każdej kombinacji składu zastosowanie włókien polipropylenowych skutkowało wzmocnieniem badanych kompozytów. Widoczna jest zależność, iż efektywniej pracują włókna o długości 100 mm od włókien o długości 60 mm. Wpływ poziomu dozowania włókien na uzyskany efekt wzmocnienia uwidacznia się przede wszystkim w przypadku skojarzenia włókien z najmocniejszą matrycą 450/0,8. Można tu zaobserwować zdecydowany wzrost wartości proporcji naprężeń σ_{MOR} / σ_{LOP} przy zmianie z 6 kg/m^3 na 10 kg/m^3.

Zastosowanie włókien PET oraz PETX nie przyniosło podobnego, korzystnego efektu w każdej kombinacji składu. W przypadku włókien PET, w trzech przypadkach wartość stosunku naprężeń σ_{MOR} / σ_{LOP} była mniejsza od 1,0. Dotyczy to włókien o długości 60 mm, w tym dwukrotnie w obu poziomach ich dozowania w matrycy o największej wytrzymałości 450/0,8. Generalnie dla włókien PET widoczny jest trend, iż na wzmocnienie matrycy gruntobetonowej korzystniej wpływa zastosowanie włókien o długości 100 mm w porównaniu z długością równą 60 mm oraz w ilości równej 10 kg/m^3

zamiast 6 kg/m^3. Natomiast dla włókien PETX jedyny przypadek, w którym wartość stosunku naprężeń σ_{MOR} / σ_{LOP} była mniejsza od 1,0 wystąpił również w najmocniejszej matrycy 450/0,8. Nie mniej jednak zwiększenie poziomu dozowania włókien z 6 kg/m^3 do 10 kg/m^3 pozwala na osiąganie lepszego efektu wzmocnienia.

6.3.3.2 FIBROGRUNTOBETON Z GRUNTU SPOISTEGO

Analogicznie na rysunku 6.17 zestawiono dla fibrogruntobetonów z matrycami z gruntu spoistego wyznaczone wartości stosunków σ_{MOR} / σ_{LOP}.



Rysunek 6.17 Wykres prezentujący zestawienie wartości stosunku naprężeń **σ_{MOR} / σ_{LOP}** dla badanych rodzajów, ilości i długości włókien w fibrogruntobetonach z **gruntu spoistego** (rozdział 12 Załączniki, tabele 12.15, 12.17, 12.19 oraz 12.21)

Zastosowanie zbrojenia rozproszonego niemal w każdej badanej konfiguracji pozwoliło na uzyskanie wartości stosunku naprężeń σ_{MOR} / σ_{LOP} większego od 1,0. Jedynym wyjątkiem, w którym wartość tego stosunku była równa 1,0, był kompozyt z matryca 600/1,4 i dodatkiem 6 kg/m^3 włókien PET o długości 60 mm. Analizując rezultaty osiągnięte przez kompozyty z dodatkiem włókien polipropylenowych można stwierdzić, iż dla wartości proporcji naprężeń σ_{MOR} / σ_{LOP} korzystniej jest stosować włókna o długości 100 mm niż 60 mm. Podobnie w większości badanych kombinacji składów z włóknami polipropylenowymi większa efektywność wzmocnienia uzyskiwana była przy 10 kilogramowym poziomie dozowania włókien. W przypadku włókien PET widoczne są trendy, iż na wartość stosunku naprężeń σ_{MOR} / σ_{LOP} korzystnie wpływa zmiana długości z 60 mm na 100 mm oraz poziomu dozowania z 6 kg/m^3 na 10 kg/m^3. Podobnie zwiększona ilość włókien PETX przełożyła się na zdecydowaną poprawę wartości σ_{MOR} / σ_{LOP}, z wyjątkiem fibrogruntobetonu z matrycą 600/1,4.

6.3.4 Wpływ rodzaju włókien na wartość rozwarcia rysy, przy której rejestrowano wartości naprężeń MOR

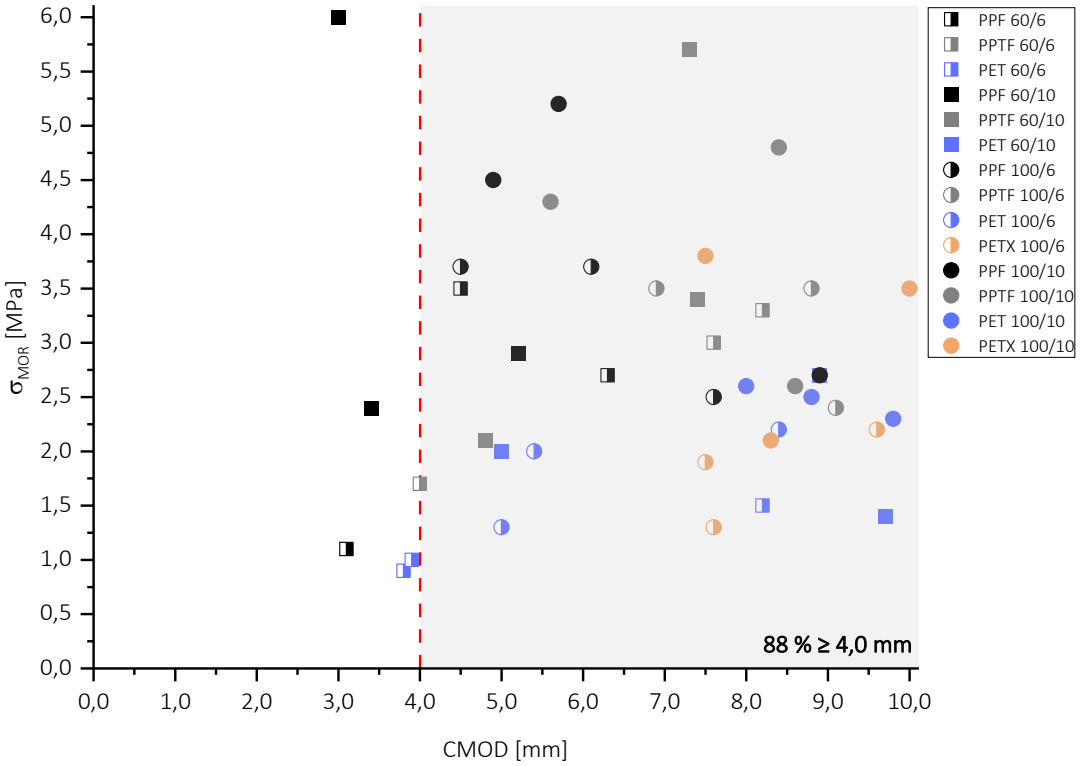
Ponieważ wartości naprężeń σ_{MOR} rejestrowano przy różnych wielkościach rozwarcia rysy CMOD, poniżej przedstawiono tabele 6.2 i 6.3 oraz wykresy (rysunki 6.18 i 6.19) obrazujące wpływ rodzaju zbrojenia rozproszonego na wartości rozwarcia rysy, przy której osiągnięto maksymalną wartość naprężenia pokrytycznego. Analiza wartości rozwarcia rysy CMOD pozwala na weryfikację założonego w opracowanej metodyce badania efektywności zbrojenia rozproszonego zakresu CMOD dla pomiaru naprężeń w stanie pokrytycznym. Wydłużenie zakresu pomiaru rozwarcia rysy CMOD jest istotne z uwagi na ocenę możliwości dalszej pracy konstrukcji wykonanej z fibrogruntobetonu po jej zarysowaniu w stanie pokrytycznym.

Tabela 6.2 Zestawienie wartości naprężeń σ_{MOR} i odpowiadających im wartości rozwarcia rysy CMOD w matrycach z gruntu niespoistego

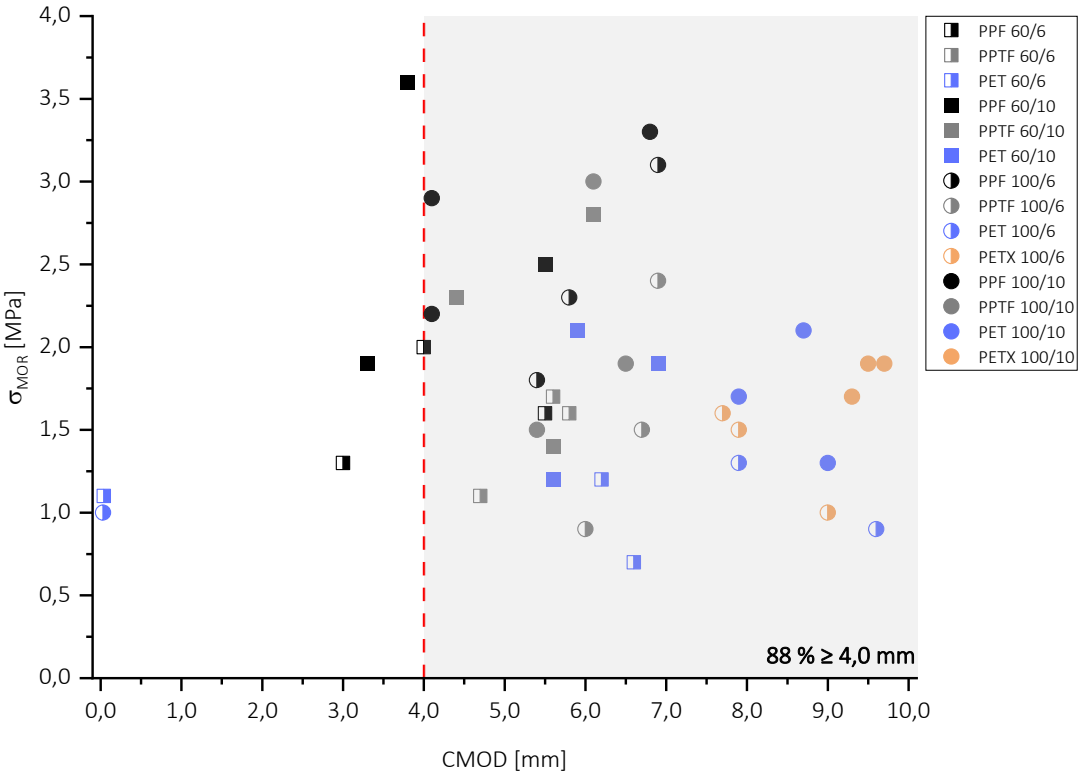
Rodzaj matrycy		400/1,6		450/1,2		450/0,8	
Rodzaj włókna	Zawartość włókien [kg/m^3]	σ_{MOR} [MPa]	CMOD [mm]	σ_{MOR} [MPa]	CMOD [mm]	σ_{MOR} [MPa]	CMOD [mm]
PPF 60	6	1,1	3,1	2,7	6,3	3,5	4,5
PPF 100		2,5	7,6	3,7	6,1	3,7	4,5
PPF 60	10	2,4	3,4	2,9	5,2	6,0	3,0
PPF 100		2,7	8,9	4,5	4,9	5,2	5,7
PPTF 60	6	1,7	4,0	3,0	7,6	3,3	8,2
PPTF 100		2,4	9,1	3,5	8,8	3,5	6,9
PPTF 60	10	2,1	4,8	3,4	7,4	5,7	7,3
PPTF 100		2,6	8,6	4,3	5,6	4,8	8,4
PET 60	6	0,9	3,8	1,5	8,2	1,0	3,9
PET 100		1,3	5,0	2,0	5,4	2,2	8,4
PET 60	10	1,4	9,7	2,7	8,9	2,0	5,0
PET 100		2,3	9,8	2,5	8,8	2,6	8,0
PETX 100	6	1,3	7,6	2,2	9,6	1,9	7,5
	10	2,1	8,3	3,5	10,0	3,8	7,5

Tabela 6.3 Zestawienie wartości naprężeń σ_{MOR} i odpowiadających im wartości rozwarcia rysy **CMOD** w matrycach z **gruntu spoistego**

Rodzaj matrycy		600/2,0		600/1,4		650/1,2	
Rodzaj włókna	Zawartość włókien [kg/m³]	σ_{MOR} [MPa]	CMOD [mm]	σ_{MOR} [MPa]	CMOD [mm]	σ_{MOR} [MPa]	CMOD [mm]
PPF 60	6	1,3	3,0	1,6	5,5	2,0	4,0
PPF 100		1,8	5,4	2,3	5,8	3,1	6,9
PPF 60	10	1,9	3,3	2,5	5,5	3,6	3,8
PPF 100		2,2	4,1	2,9	4,1	3,3	6,8
PPTF 60	6	1,1	4,7	1,7	5,6	1,6	5,8
PPTF 100		0,9	6,0	1,5	6,7	2,4	6,9
PPTF 60	10	1,4	5,6	2,3	4,4	2,8	6,1
PPTF 100		1,5	5,4	1,9	6,5	3,0	6,1
PET 60	6	0,7	6,6	1,1	0,04	1,2	6,2
PET 100		0,9	9,6	1,0	0,03	1,3	7,9
PET 60	10	1,2	5,6	1,9	6,9	2,1	5,9
PET 100		1,3	9,0	1,7	7,9	2,1	8,7
PETX 100	6	1,0	9,0	1,6	7,7	1,5	7,9
	10	1,7	9,3	1,9	9,5	1,9	9,7



Rysunek 6.18 Wykres prezentujący wartości rozwarcia rysy **CMOD** odpowiadające rejestrowanym wartościom naprężeń σ_{MOR} dla badanych rodzajów, ilości i długości włókien w fibrogruntobetonach z **gruntu niespoistego**



Rysunek 6.19 Wykres prezentujący wartości rozwarcia rysy **CMOD** odpowiadające rejestrowanym wartościom naprężeń **σ_{MOR}** dla badanych rodzajów, ilości i długości włókien w fibrogruntobetonach z **gruntu spoistego**

Analiza wartości rozwarcia rysy przy osiągnięciu wartości naprężenia σ_{MOR} wskazuje, iż dla badanych kompozytów w zdecydowanej większości przypadków były one rejestrowane przy CMOD przekraczającym 4 mm, co potwierdza odpowiednio przyjęty w metodyce badania zwiększony zakres CMOD względem normy PN-EN 14651:2007. Analizując powyższe wykresy można stwierdzić, iż niezależnie od rodzaju gruntu, z którego wykonana jest matryca badanych kompozytów zaobserwowano wzrost wartości rozwarcia rysy CMOD badanych fibrogruntobetonów, przy której rejestrowano naprężenie σ_{MOR} wraz ze wzrostem długości i ilości stosowanych włókien. Dla fibrogruntobetonów z gruntu niespoistego wzrost wartości CMOD przy naprężeniu σ_{MOR} wyniósł 10 % wraz ze zmianą poziomu dozowania z 6 do 10 kg/m^3 oraz 30% na skutek wydłużenia włókien z 60 do 100 mm. Analogicznie w fibrogruntobetonach z gruntu spoistego zwiększenie dodatku włókien z 6 do 10 kg/m^3 przełożyło się na wzrost wartości CMOD przy naprężeniu σ_{MOR} o 11%, a zmiana długości włókien z 60 na 100 mm zwiększyła tę wartość o 43%.

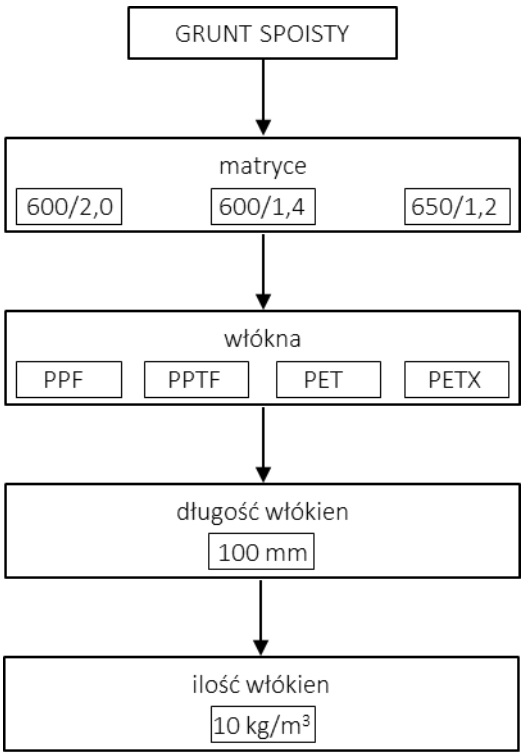
7 BADANIA MODUŁU SPRĘŻYSTOŚCI FIBROGRUNTOBETONÓW

7.1 ZAKRES BADAŃ

W projektowaniu konstrukcji z gruntobetonu podstawowym parametrem jest jego wytrzymałość na ściskanie. Łatwość wyznaczania tej cechy, wysoka jednorodność i powtarzalność otrzymywanych rezultatów oraz możliwość korelacji tych wartości z innymi cechami powodują, iż wytrzymałość na ściskanie jest uniwersalnym parametrem materiału. Istotną konstrukcyjną cechą, silnie skorelowaną z wytrzymałością na ściskanie gruntobetonu jest jego moduł sprężystości.

Odkształcalność gruntobetonów jest silnie zależna od rodzaju zastosowanego gruntu. Potwierdzają to wyniki badań, prezentowanych w publikacji [76], gdzie zdecydowanie niższe wartości uzyskały kompozyty z gruntów spoistych w porównaniu z gruntobetonami z gruntu niespoistego. Analiza wyznaczonych na podstawie uzyskanych wyników proporcji $E_{c,s}$ / f_c dla gruntobetonów z gruntów spoistych pozwala stwierdzić, iż wszystkie cząstkowe wartości tych współczynników mieszczą się w zakresie od 100 do 1000, który w literaturze przywołuje Topolnicki [17, 19, 27]. Natomiast dla gruntu niespoistego wszystkie wartości $E_{c,s}$ / f_c zdecydowanie wykraczały poza górną granicę tego zakresu. W związku z tym wpływ dodatku włókien na poprawę modułu sprężystości gruntobetonów z gruntu niespoistego wydaje się być potencjalnie znikomy. Jednakże w gruntobetonach z gruntu spoistego zastosowanie inkluzji włóknistej może przynieść pozytywne efekty.

Do badań fibrogruntobetonów wybrano więc te same trzy matryce z gruntu spoistego - gliny, które badano we wcześniejszych etapach pracy. Ocenie wpływu dodatku włókien na moduł sprężystości kompozytów fibrogruntobetonowych poddano wybrane do badań przyczepności i efektywności zbrojenia rozproszonego cztery rodzaje włókien z tworzyw sztucznych: dwa rodzaje włókien polipropylenowych PPTF i PPF oraz dwa rodzaje włókien poliestrowych PET i PETX. Do przeprowadzenia badań wybrano włókna o długości 100 mm, a poziom ich dozowania przyjęto równy 10 kg/m^3.



Rysunek 7.1 Schemat tworzenia wariantów fibrogruntobetonów z **gruntu spoistego** w badaniu modułu sprężystości przy ściskaniu

7.2 METODYKA BADANIA MODUŁU SPRĘŻYSTOŚCI

W literaturze brakuje sprecyzowanej metodyki badania odkształcalności kompozytów gruntobetonowych. Występuje jedynie bardzo duże zróżnicowanie empirycznych zależności pomiędzy modułem sprężystości a wytrzymałością na ściskanie gruntobetonów. W projektowaniu wzmocnienia gruntu w technologii Deep Soil Mixing według Topolnickiego [7, 19] najczęściej wykorzystuje się sieczny moduł sprężystości gruntobetonu E_{50}, wyznaczany przy 50 % naprężeń niszczących. Oczekiwaną wartością dla gruntobetonu jest współczynnik korelacji pomiędzy siecznym modułem sprężystości a wytrzymałością na ściskanie E_{50} / f_c, który w zależności od wartości f_c mieści się w różnych zakresach. W pozycji [7] dla f_c < 2,0 MPa zakres ten wynosi 50-300 × f_c, a dla f_c > 2,0 MPa 300-1000 × f_c. Podobny zakres stosunku E_{50} / q_u (q_u = f_c) od 75 do 1000 prezentują Bruce et al. [77]. Do celów projektowych sugeruje się natomiast oszacowanie wartości E_{50} jako 300 q_u. Inne zależności można znaleźć u Topolnickiego w publikacji [20], gdzie E_{50} = 120 f_c dla f_c < 1,0 MPa oraz E_{50} = 380 f_c dla f_c > 1,0 MPa. Topolnicki [19] prezentuje również wyniki badań, w których przebadano kilkadziesiąt próbek gruntobetonów powstałych z gruntu spoistego – gliny i zróżnicowanych pod względem zawartości cementu. Na podstawie tych badań stwierdzono, iż współczynnik korelacji E_{50} / f_c zależy od rodzaju gruntu, zawartości cementu i stopnia jednorodności gruntobetonu. Topolnicki zwraca jednak uwagę na fakt, iż w laboratoryjnych badaniach podczas jednoosiowego ściskania próbki gruntobetonu pracują w innych warunkach niż konstrukcje geotechniczne w podłożu. Takie badania nie uwzględniają obecności naprężeń bocznych, które mają korzystny wpływ na właściwości mechaniczne gruntobetonu.

W obecności naprężeń bocznych gruntobeton staje się bardziej sprężysto-plastyczny, a mniej kruchy. Dodatkowo, w warunkach laboratoryjnych uzyskuje się korzystniejszy stopień wymieszania wszystkich składników kompozytów gruntobetonowych. Stąd też sieczne moduły sprężystości gruntobetonów formowanych in situ mają mniejsze wartości, które według Topolnickiego [19] można przyjmować w odniesieniu do projektowanej średniej wytrzymałości na ściskanie f_{cm} jako E_{50} = 300-500 f_{cm}. Ten sam autor w pozycji [17] zawęża ten zakres do wartości E_{50} = 300-400 f_{cm}.

Propozycję korelacji pomiędzy modułem sprężystości i wytrzymałością na ściskanie przedstawili także Denies i Huybrechts [28] na podstawie badań modułu sprężystości próbek gruntobetonów w formie rdzeni pobranych z konstrukcji. Zakres zastosowanego obciążenia wynosił od 10 do 30 % szacowanej wytrzymałości na ściskanie. Badane próbki były zróżnicowane pod kątem wzmacnianego gruntu (piasek, glina oraz ił), a także pod kątem czasu dojrzewania (od 30 do 200 dni). W rezultacie tych badań określono empiryczną zależność E = 1482 $f_c^{0.8}$ (E i f_c w MPa) z współczynnikiem determinacji bliskim 0,8. Zakres korelacji względem wytrzymałości na ściskanie wyniósł od 1,5 do 35 MPa.

Szeroki przegląd literatury dotyczącej poszukiwań korelacji modułu sprężystości i wytrzymałości na ściskanie gruntobetonów przedstawiają Fan et al. [78]. W swoim artykule autorzy stwierdzają, iż do obliczenia modułu sprężystości odpowiednim jest przedział pomiędzy równaniami $E_{soil\text{-}cement}$ = 12900 $f_c^{0.41}$ z pozycji Briaud et al. [79] oraz $E_{soil\text{-}cement}$ = 30000 $f_c^{0.5}$ z pozycji Wang et al. [80].

W prowadzonych badaniach zdecydowano się wykorzystać wytyczne zawarte w normie PN-EN 12390-13 [81], dedykowanej badaniom betonu cementowego i dostosować zawartą w niej metodykę badania modułu sprężystości do badań prowadzonych na gruntobetonach i fibrogruntobetonach. Zgodnie z powyższą normą badanie przeprowadza się w trzech cyklach obciążania i odciążania próbki. Odkształcenia mierzone są wzdłuż osi ściskania w dwóch poziomach obciążenia. Dwa pierwsze cykle są cyklami stabilizującymi odkształcenia badanej próbki. Sieczny moduł sprężystości $E_{c,s}$ oblicza się przy użyciu poniższego wzoru, w którym wykorzystuje się średnie odkształcenia przy naprężeniu początkowym i naprężeniu górnym z trzeciego cyklu obciążenia:

$$E_{c,s} = \frac{\sigma_{a,3} - \sigma_{p,3}}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,3}}, \tag{10}$$

gdzie:

$E_{c,s}$ – sieczny moduł sprężystości przy ściskaniu [MPa],

$\sigma_{a,3}$ – górny poziom naprężenia [MPa],

$\sigma_{p,3}$ – początkowy poziom naprężenia [MPa],

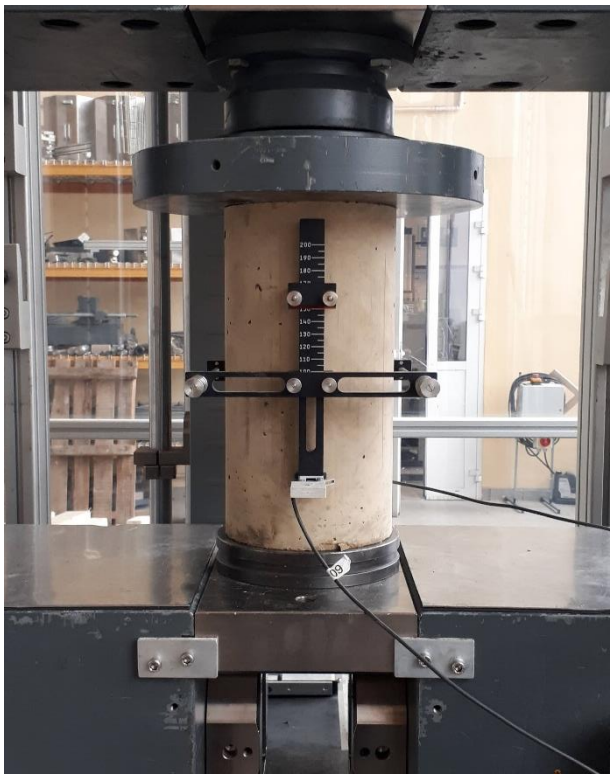
$\varepsilon_{a,3}$ – średnie odkształcenie odpowiadające górnemu poziomowi naprężenia,

$\varepsilon_{p,3}$ – średnie odkształcenie odpowiadające początkowemu poziomowi naprężenia.

Pomiar odkształceń dokonywany jest każdorazowo po 20 sekundach postoju na każdym poziomie obciążania. Podobnie, jak w przypadku badań wytrzymałości kompozytów gruntobetonowych

parametry badania zostały zmodyfikowane. Poziom naprężeń początkowych został obniżony 10-krotnie z 0,5 MPa do 0,05 MPa. Zredukowano również prędkość zmiany poziomu naprężeń z normowej wartości 0,6 ± 0,2 MPa/s do wartości 0,05 MPa/s, przyjętej podczas badań wytrzymałości na ściskanie kompozytów gruntobetonowych. Wartości naprężeń górnych σ_a były równe 1/3 wytrzymałości na ściskanie f_{cm} badanych fibrogruntobetonów.

Zgodnie z zaleceniami normy w badaniach zastosowano próbki walcowe o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm, których przeciwległe płaszczyzny zostały przed badaniem wyszlifowane. Do pomiaru odkształceń podłużnych wykorzystano ekstensometry o maksymalnej drodze pomiarowej ± 2,5 mm i dokładności pomiaru równej 0,1 µm. Czujniki te w trakcie badania zainstalowano na pobocznicy próbek w odpowiedniej ramce o długości bazy pomiarowej równej 150 mm. Stanowisko badawcze przedstawiono na poniższym rysunku 7.2.



Rysunek 7.2 Pomiar odkształceń podłużnych (**ε**) przy użyciu dwóch ekstensometrów

Jednakże, przed przystąpieniem do zasadniczych badań odkształcalności wszystkich analizowanych próbek, przeprowadzono weryfikację niezbędnej liczby cykli stosowanej w ocenie modułu sprężystości. W tym celu wytypowano jedną serię próbek gruntobetonu z gruntu spoistego i przeprowadzono łącznie dwadzieścia cykli obciążania i odciążania, każdorazowo dokonując pomiaru odkształceń przy poszczególnych poziomach naprężeń. Stwierdzono, iż różnica odkształceń Δε w cyklach od trzeciego do dwudziestego utrzymuje się na zbliżonym poziomie. Dostrzeżone niewielkie zróżnicowanie wartości Δε wynika z naturalnych błędów pomiaru odkształceń w kolejnych cyklach. Następnie obliczono wartości modułów sprężystości w poszczególnych cyklach pomiarowych i co bardzo istotne, nie zaobserwowano,

tendencji do wzrostu lub spadku modułu sprężystości wraz ze wzrostem liczby cykli. Uznano zatem, że przyjęta w normie [81] liczba trzech cykli jest wystarczająca do miarodajnej oceny modułu sprężystości gruntobetonów i fibrogruntobetonów.

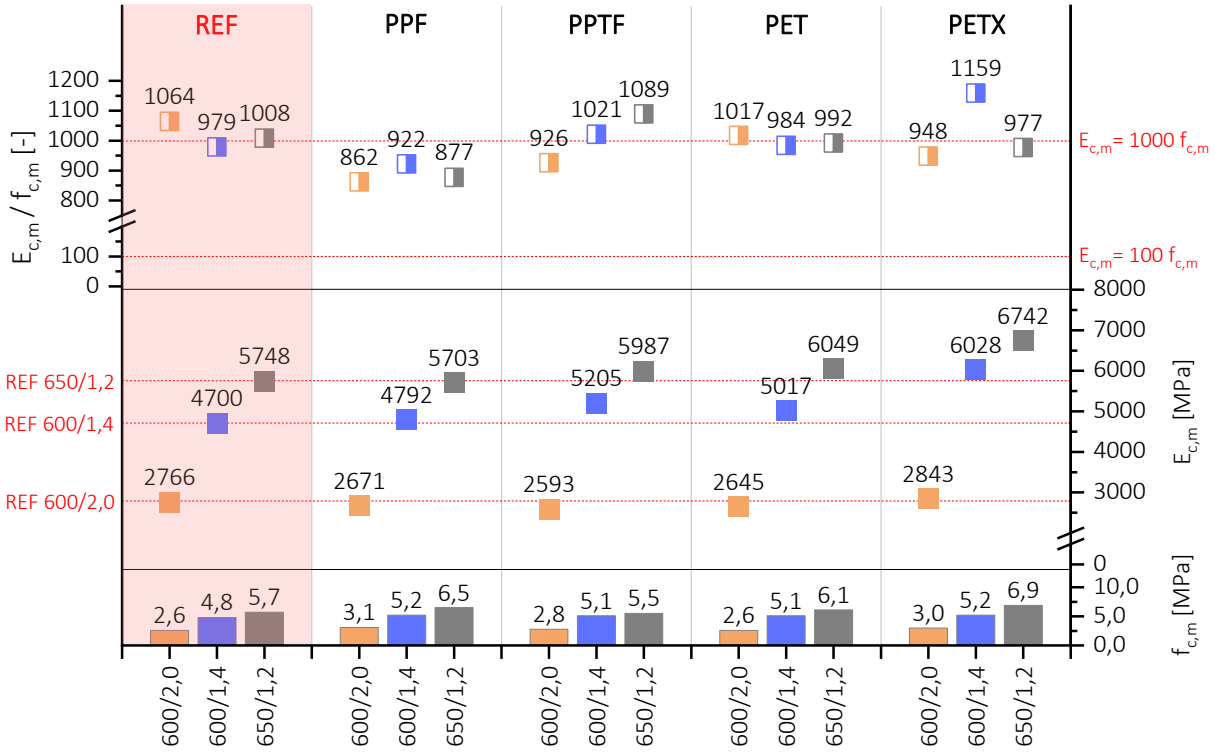
7.3 WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki badania siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu zostały zgromadzone w tabeli 8.1. Dodatkowo w tabeli zamieszczono wartości wytrzymałości na ściskanie $f_{c,m}$, wartości stosunku modułu sprężystości $E_{c,m}$ do wytrzymałości na ściskanie $f_{c,m}$ oraz gęstości ρ badanych kompozytów. Wszystkie prezentowane wartości stanowią każdorazowo średnią z trzech próbek.

Tabela 7.1 Wyniki badania siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu $E_{c,m}$ po 28 dniach dojrzewania [MPa]

Matryca	Rodzaj włókna	Gęstość ρ [kg/m^3]	Wytrzymałość na ściskanie $f_{c,m}$ [MPa]	Moduł sprężystości $E_{c,m}$ [MPa]	$E_{c,m}$ / $f_{c,m}$
600/2,0	-	1790	2,6	2766	1064
	PPF 100	1780	3,1	2671	862
	PPTF 100	1770	2,8	2593	926
	PET 100	1790	2,6	2645	1017
	PETX 100	1790	3,0	2843	948
600/1,4	-	1860	4,8	4700	979
	PPF 100	1830	5,2	4792	922
	PPTF 100	1810	5,1	5205	1021
	PET 100	1840	5,1	5017	984
	PETX 100	1850	5,2	6028	1159
650/1,2	-	1840	5,7	5748	1008
	PPF 100	1810	6,5	5703	877
	PPTF 100	1800	5,5	5987	1089
	PET 100	1830	6,1	6049	992
	PETX 100	1830	6,9	6742	977

Na rysunku 7.3 zestawiono w sposób graficzny wyznaczone podczas badania modułu sprężystości wartości oznaczanych cech. W dolnej części wykresu znajdują się wyniki wytrzymałości na ściskanie badanych kompozytów, a ponad nimi wyznaczone wartości modułów sprężystości. W górnej części umieszczono wartości stosunków modułu sprężystości $E_{c,m}$ do wytrzymałości na ściskanie $f_{c,m}$.



Rysunek 7.3 Wykres prezentujący wyznaczone wartości modułu sprężystości przy ściskaniu $E_{c,m}$ po 28 dniach dojrzewania gruntobetonów i fibrogruntobetonów

Analizując uzyskane w badaniach wyniki można w pierwszej kolejności stwierdzić iż dodatek włókien generalnie spowodował wzrost wytrzymałości na ściskanie badanych kompozytów. Wyjątek stanowi fibrogruntobeton z matrycą 650/1,2 i dodatkiem włókien PPTF, gdzie zanotowano nieznaczny spadek wartości $f_{c,m}$. Następnie porównując wyznaczone wartości siecznego modułu sprężystości fibrogruntobetonów z wartościami referencyjnymi gruntobetonów w najsłabszej matrycy 600/2,0 jedynie dodatek włókien PETX pozwolił na ich poprawę. Natomiast w matrycach o wyższym poziomie wytrzymałości uwidacznia się pozytywny wpływ dodatku włókien na wartość $E_{c,m}$. Wyjątek stanowi fibrogruntobeton z matrycą 650/1,2 i dodatkiem włókien PPF, gdzie odnotowano minimalny spadek wartości omawianej cechy. W matrycach o wyższym poziomie wytrzymałości uwidacznia się także zróżnicowanie współpracy poszczególnych rodzajów włókien z gruntobetonem. Najbardziej widoczny jest wzrost modułu sprężystości fibrogruntobetonów wzmocnionych przy użyciu włókien PETX w porównaniu do modułu sprężystości gruntobetonów i fibrogruntobetonów zbrojonych pozostałymi rodzajami włókien. Wytłumaczyć to można faktem, iż włókna PETX charakteryzują się zdecydowanie większą sztywnością od pozostałych badanych rodzajów włókien. W odniesieniu do włókien PET o przekroju okrągłym wynika to z charakterystyki ich przekroju poprzecznego w kształcie krzyża i ze zmodyfikowanego charakteru karbowania. W porównaniu do włókien polipropylenowych, zgodnie z literaturą [36] włókna wykonane z odpadowego politereftalanu etylenu charakteryzują się zdecydowanie wyższym modułem sprężystości, co przełożyło się na wyniki modułu sprężystości porównywanych fibrogruntobetonów. Wyznaczone na podstawie uzyskanych wyników proporcje

$E_{c,m}$ / $f_{c,m}$ osiągają wartości w pobliżu górnej granicy zakresu od 100 do 1000, o którym wspomina literatura. W pozycji poświęconej badaniom modułu sprężystości gruntobetonów z różnych rodzajów gruntów [76] stwierdzono, iż zakres ten jest zasadny jedynie dla gruntów spoistych. W przypadku gruntobetonów wykonanych z gruntów niespoistych wartości proporcji $E_{c,m}$ / $f_{c,m}$ znacznie przekraczają górną granicę zakresu. Matryce analizowanych fibrogruntobetonów były wykonane z gruntu spoistego, który jednak charakteryzował się dość dużą zawartością frakcji piaszczystych na poziomie 40 %. Tłumaczyć to może dlaczego wyznaczonym wartościom stosunków $E_{c,m}$ / $f_{c,m}$ bliżej do wartości osiąganych przez gruntobetony z gruntów niespoistych. Analizując wartości proporcji $E_{c,m}$ / $f_{c,m}$ fibrogruntobetonów nie dostrzega się ich zwiększenia na skutek dodatku włókien. Nie widać również wyraźnych trendów w odniesieniu do zmian matryc i rodzajów włókien.

Gruntobetony generalnie zawierają w swym składzie zaczyn cementowy o stosunkowo wysokim w/c w porównaniu do zaczynów w betonach zwykłych. Wiąże się to ze zróżnicowaniem uziarnienia kruszywa w betonie i uziarnienia gruntu w gruntobetonie. Mieszanki gruntobetonowe charakteryzują się zdecydowani większym zapotrzebowaniem na zaczyn cementowy o wysokiej ciekłości. Analizując wyniki siecznego modułu sprężystości gruntobetonów o takiej samej ilości zaczynu można stwierdzić, iż w przypadku 600 dm^3/m^3 wzrost w/c z 1,4 do 2,0 skutkuje obniżeniem wartości $E_{c,m}$ o 41 % dla referencyjnego gruntobetonu bez włókien oraz o 49 % dla fibrogruntobetonów. Dla analizy wpływu składu kompozytów fibrogruntobetonowych na ich odkształcalności cennym jest określenie wpływu ilości cementu na wartości siecznego modułu sprężystości. Ilość cementu jest uniwersalnym parametrem składu, bowiem wynika z przyjętego stosunku w/c oraz ilości zaczynu. Wzrost zawartości cementu w analizowanych składach z 258 do 427 kg/m^3 pozwolił na uzyskanie średniej wartości $E_{c,m}$ większej o 128 %. Wynika to z większej zawartości zaczynu w składzie fibrogruntobetonów i w związku z tym większego wpływu ilości spoiwa na właściwości całego kompozytu.

Podsumowując, przeprowadzone badania wykazały, iż zastosowanie metodyki zawartej w normie PN-EN 12390-13 jest uzasadnione do oznaczania siecznego modułu sprężystości gruntobetonów i fibrogruntobetonów o właściwościach charakteryzujących kompozyty będące w zakresie niniejszej pracy. Niemniej jednak, wartą dalszych rozważań jest kwestia kolejnych jej modyfikacji pod kątem badania gruntobetonów i fibrogruntobetonów z gruntu spoistego. Modyfikacje te miałyby dotyczyć czasu postoju na obu poziomach naprężeń oraz wartości górnego poziomu naprężeń. Obserwacje poczynione w trakcie badań poddają w wątpliwość czas 20 sekund, jako wystarczający do ustabilizowania się odkształceń w próbce. Podobnie weryfikacji należałoby poddać wartość 1/3 wytrzymałości na ściskanie jako przyjmowany górny poziom naprężeń, która w odniesieniu do kompozytów z gruntu spoistego może wykraczać poza ich zakres sprężystości. Kontynuacja pracy nad metodyką badania modułu sprężystości gruntobetonu i fibrogruntobetonu jest jak najbardziej potrzebna, gdyż szacowanie wartości $E_{c,s}$ jedynie na podstawie znajomości wytrzymałości na ściskanie [7, 17, 19, 20, 28, 77, 79, 80] wydaje się być obarczone dużą niedokładnością.

8 BADANIA GRUNTOBETONÓW I FIBROGRUNTOBETONÓW W ISTNIEJĄCYCH OBIEKTACH

8.1 ZAKRES BADAŃ

Do realizacji badań gruntobetonów i fibrogruntobetonów w istniejących obiektach wybrano konstrukcję inżynierską będącą ścianą szczelinową wykonaną w technologii trench mixing. Ścianę wykonano w Cholerzynie nieopodal Krakowa w trzech częściach o głębokości około 7,5 m. Pierwsza część to gruntobeton bez zbrojenia rozproszonego, druga część to fibrogruntobeton zbrojony włóknami PET o długości 60 mm, a trzecia to również fibrogruntobeton, lecz z dodatkiem włókien polipropylenowymi PPF o długości równej 60 mm. Poziom dozowania obu rodzajów włókien wynosił 6 kg/m^3. Ściana została wykonana z gruntu niespoistego, piaszczystego, lecz o drobniejszym uziarnieniu w stosunku do gruntu, który stosowano w zasadniczych badaniach realizowanych w ramach niniejszej pracy doktorskiej. Składy kompozytów charakteryzowała ilość zaczynu na poziomie 400 dm^3/m^3 i wskaźnik w/c równy 1,4, co przekładało się na zawartość cementu na poziomie około 230 kg/m^3. Poniżej pokazano zdjęcie ściany szczelinowej będącej przedmiotem badań, po jednostronnym odkopaniu jej górnej części.

Rysunek 8.1 Ściana szczelinowa, z której pobrano próbki do badań

8.2 METODYKA BADAŃ

Próbki do badań pobierano w formie odwiertów rdzeniowych ze wszystkich trzech części ściany szczelinowej. Odwierty wykonywano pionowo na całej głębokości ściany, po jednym z każdej części. Następnie z odwiertów przygotowywano próbki o kształcie walca, których średnica była równa wysokości i wynosiła około 100 mm. Z każdego odwiertu wycięto po piętnaście próbek. Po cięciu „na mokro” były one przechowywane przez kilka dni w warunkach powietrzno-suchych w celu przeschnięcia

po dwóch procesach mechanicznych (wiercenie oraz cięcie), skutkujących zwiększeniem ich wilgotności. Następnie próbki zawijano w folię, analogicznie jak w przypadku próbek laboratoryjnych, i przechowywano je przez okres 7 dni. Taki zabieg miał na celu ujednolicenie rozkładu wilgotności w całej masie próbki. Na skutek takiego przebiegu kondycjonowania uzyskiwano stan wilgotności, który był zbliżony do wilgotności gruntobetonu w konstrukcji w czasie pobierania z niej odwiertów rdzeniowych. Po zakończonym okresie kondycjonowania oznaczono następujące właściwości: gęstość objętościową i wytrzymałość na ściskanie. Badanie gęstości objętościowej przeprowadzano zgodnie z wytycznymi normy poświęconej badaniu gęstości betonu PN-EN 12390-7:2019-08 [82]. Objętości próbek wyznaczano metodą bezpośrednią przez oznaczenie wymiarów rzeczywistych. Wymiary te wykorzystywano również do określenia powierzchni obciążanych w badaniu wytrzymałości na ściskanie, które tak, jak w poprzednich badaniach gruntobetonów formowanych w laboratorium oznaczano zgodnie wytycznymi normy [57] z przyjętą modyfikacją prędkości wzrostu naprężenia w czasie badania wynoszącą 0,05 MPa/s.

8.3 WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Uzyskane rezultaty zestawione zostały w trzech tabelach 8.1 ÷ 8.3, osobno dla każdej części badanej konstrukcji. Tabele te oprócz wyników badań wybranych właściwości zawierają również pomiar głębokości odwiertu, z której wycięta jest badana próbka oraz zdjęcie z podziałem odwiertu na próbki.

Tabela 8.1 Wyniki badań właściwości **gruntobetonów** pobranych z pierwszej części ściany szczelinowej

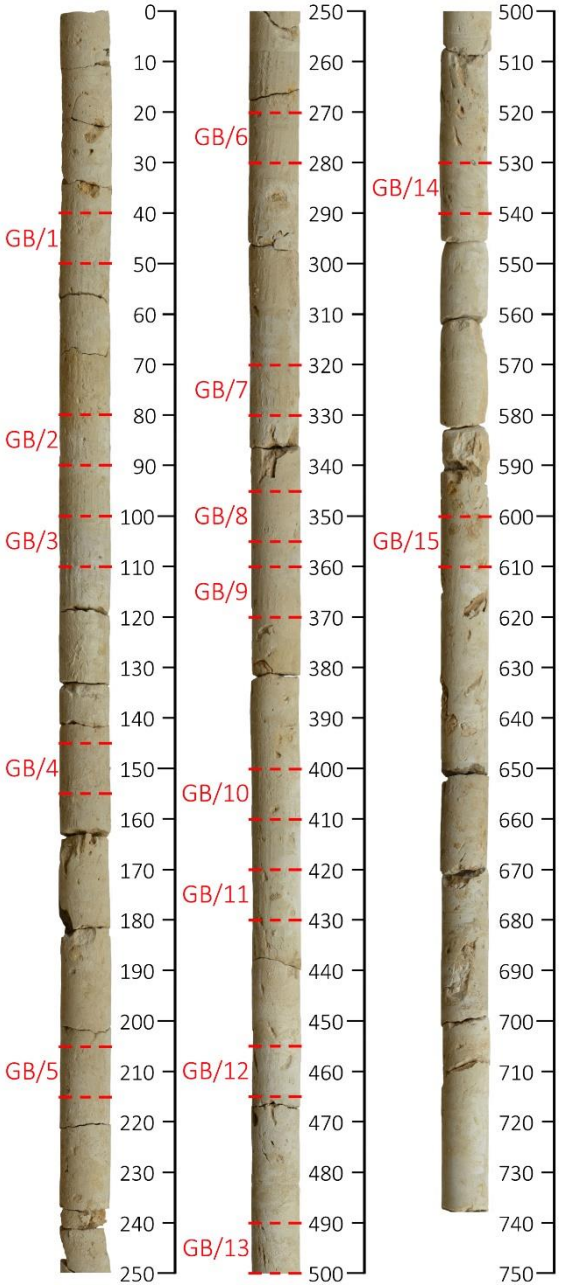
Oznaczenie próbki	Głębokość odwiertu h [cm]	Gęstość ρ [kg/m^3]	Wytrzymałość na ściskanie f_c [MPa]	Zdjęcie odwiertu wraz z miejscami wycięcia próbek [wymiary w cm]
S1 / GB / 1	40-50	1701	3,9	
S1 / GB / 2	80-90	1746	4,3	
S1 / GB / 3	100-110	1815	4,9	
S1 / GB / 4	145-155	1751	4,6	
S1 / GB / 5	205-215	1839	5,0	
S1 / GB / 6	270-280	1798	5,1	
S1 / GB / 7	320-330	1853	5,9	
S1 / GB / 8	345-355	1806	5,2	
S1 / GB / 9	360-370	1809	6,3	
S1 / GB / 10	400-410	1904	6,6	
S1 / GB / 11	420-430	1819	5,0	
S1 / GB / 12	455-465	1762	4,5	
S1 / GB / 13	490-500	1866	6,5	
S1 / GB / 14	530-540	1874	6,8	
S1 / GB / 15	600-610	1902	6,9	

Tabela 8.2 Wyniki badań właściwości **fibrogruntobetonów** z dodatkiem włókien **PET** pobranych z drugiej części ściany szczelinowej

Oznaczenie próbki	Głębokość odwiertu h [cm]	Gęstość ρ [kg/m^3]	Wytrzymałość na ściskanie f_c [MPa]	Zdjęcie odwiertu wraz z miejscami wycięcia próbek [wymiary w cm]
S2 / FGB / PET / 1	20-30	1717	4,2	
S2 / FGB / PET / 2	55-66	1793	4,6	
S2 / FGB / PET / 3	70-80	1772	5,0	
S2 / FGB / PET / 4	110-120	1799	5,9	
S2 / FGB / PET / 5	130-140	1803	5,4	
S2 / FGB / PET / 6	155-165	1847	6,0	
S2 / FGB / PET / 7	195-205	1746	5,3	
S2 / FGB / PET / 8	230-240	1815	5,5	
S2 / FGB / PET / 9	270-280	1829	5,8	
S2 / FGB / PET / 10	300-310	1874	6,2	
S2 / FGB / PET / 11	355-365	1823	5,2	
S2 / FGB / PET / 12	395-405	1862	5,3	
S2 / FGB / PET / 13	440-450	1880	6,0	
S2 / FGB / PET / 14	475-485	1933	6,9	
S2 / FGB / PET / 15	530-540	1912	7,0	

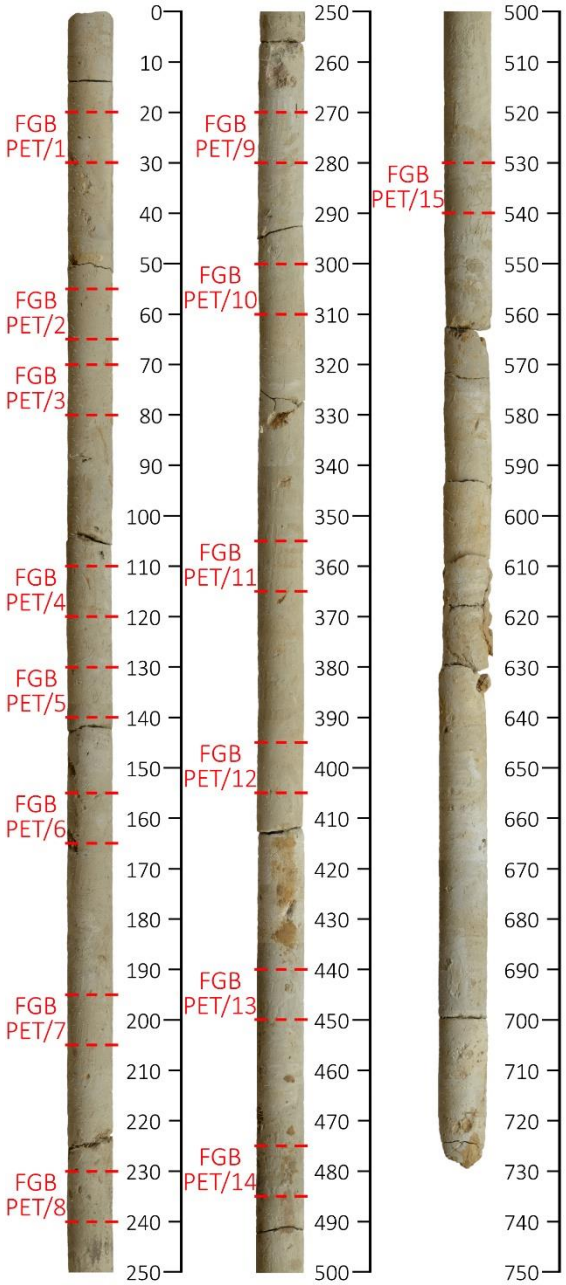
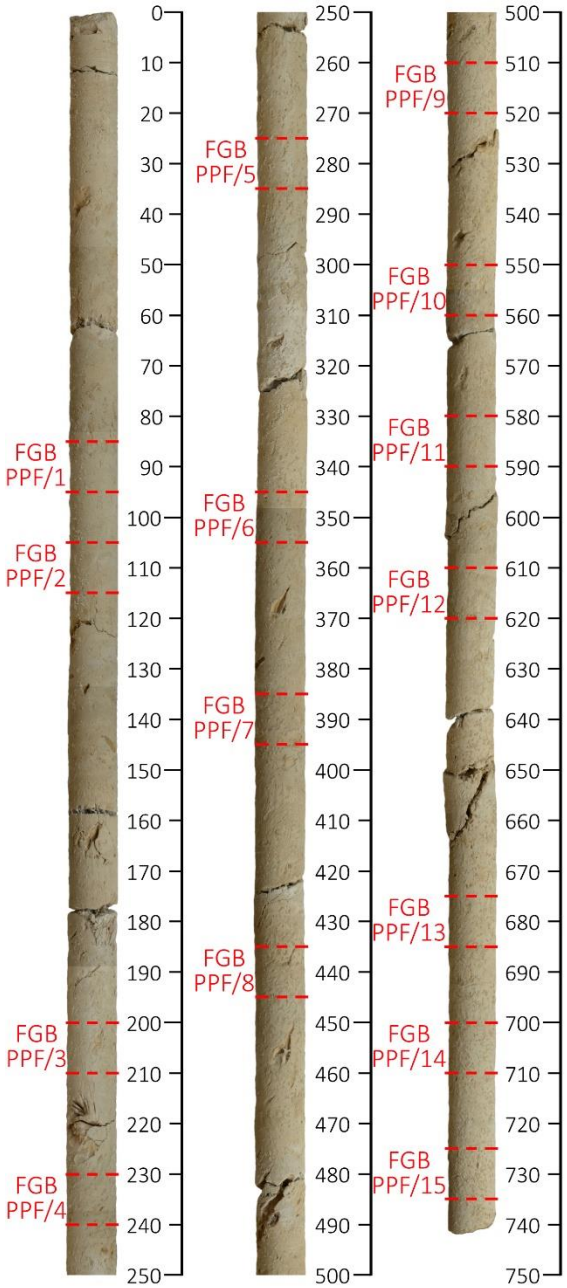
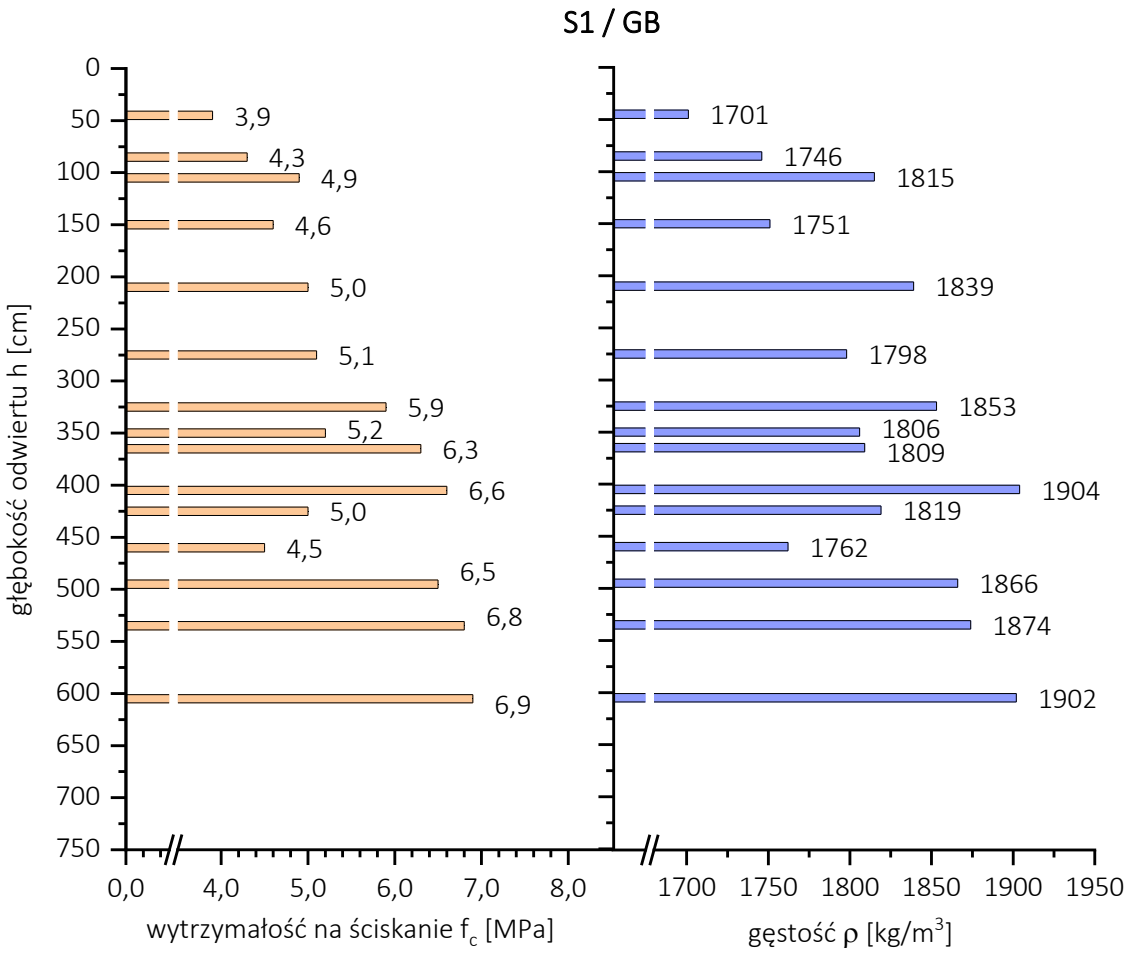


Tabela 8.3 Wyniki badań właściwości **fibrogruntobetonów** z dodatkiem włókien **PPF** pobranych z trzeciej części ściany szczelinowej

Oznaczenie próbki	Głębokość odwiertu h [cm]	Gęstość ρ [kg/m^3]	Wytrzymałość na ściskanie f_c [MPa]	Zdjęcie odwiertu wraz z miejscami wycięcia próbek [wymiary w cm]
S3 / FGB / PPF / 1	85-95	1704	4,3	
S3 / FGB / PPF / 2	105-115	1711	4,2	
S3 / FGB / PPF / 3	200-210	1722	4,8	
S3 / FGB / PPF / 4	230-240	1706	4,6	
S3 / FGB / PPF / 5	275-285	1768	6,4	
S3 / FGB / PPF / 6	345-355	1752	5,4	
S3 / FGB / PPF / 7	385-395	1774	4,7	
S3 / FGB / PPF / 8	435-445	1792	5,9	
S3 / FGB / PPF / 9	510-520	1853	6,4	
S3 / FGB / PPF / 10	550-560	1779	5,6	
S3 / FGB / PPF / 11	580-590	1871	6,8	
S3 / FGB / PPF / 12	610-620	1830	5,9	
S3 / FGB / PPF / 13	675-685	1856	6,4	
S3 / FGB / PPF / 14	700-710	1878	6,7	
S3 / FGB / PPF / 15	725-735	1869	6,6	

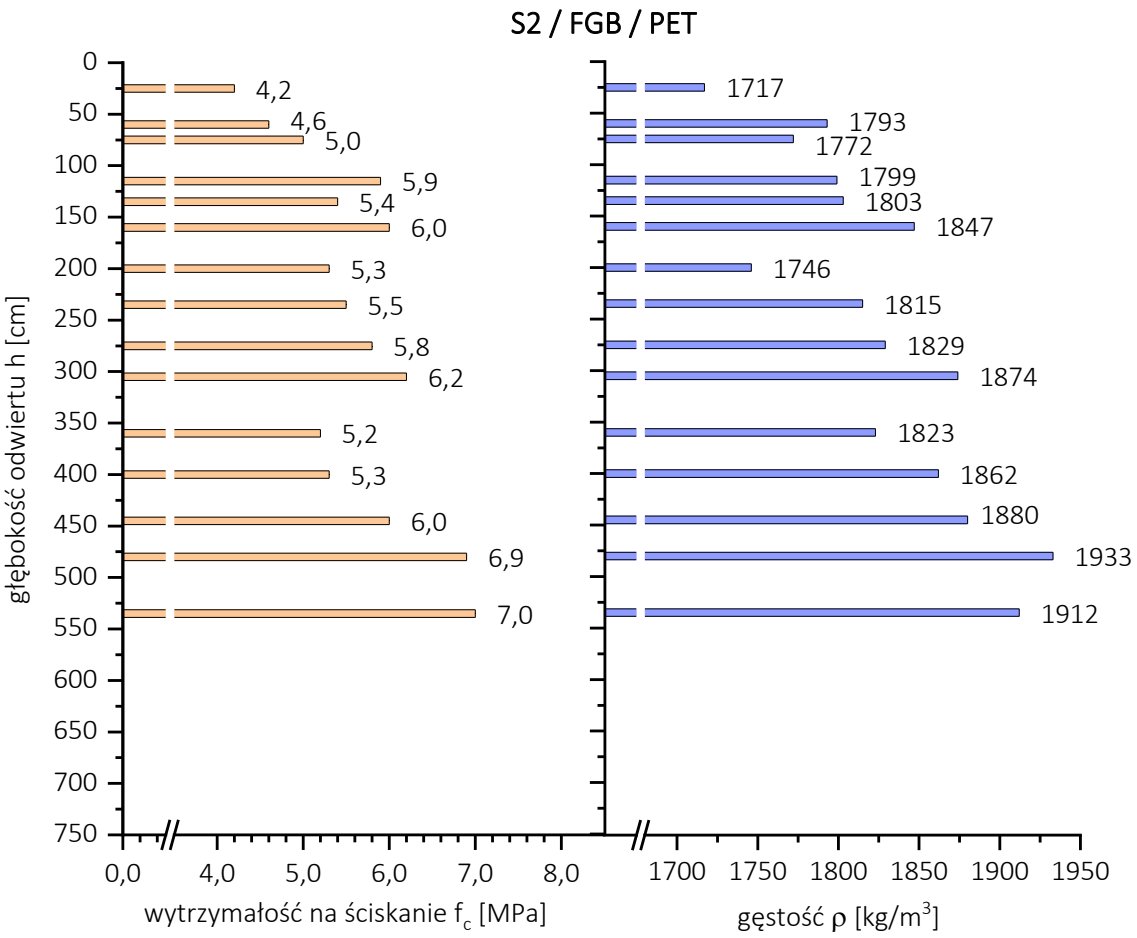


Na poniższych rysunkach 8.2 ÷ 8.4 przedstawiono w formie wykresów wyniki wytrzymałości na ściskanie oraz gęstości próbek przygotowanych z pobranych odwiertów.



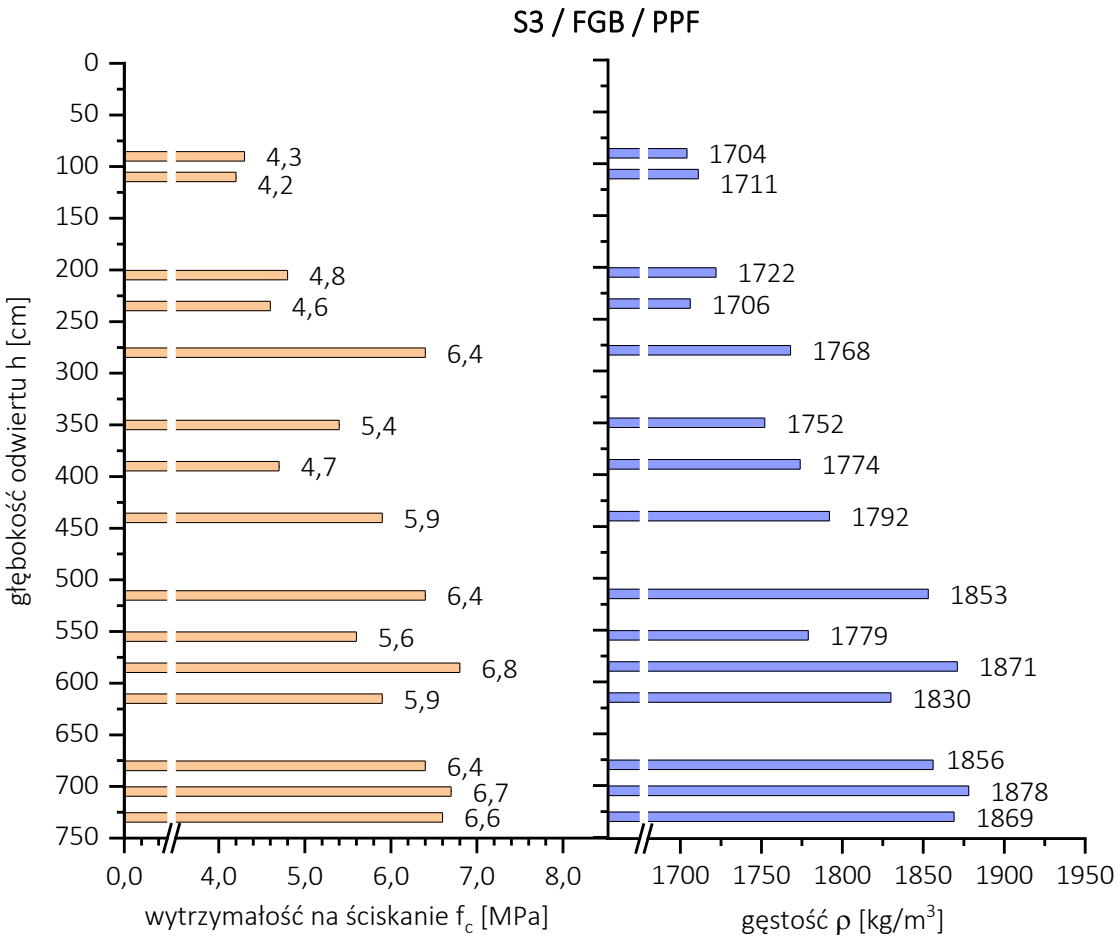
Rysunek 8.2 Wykresy prezentujące oznaczone właściwości próbek pobranych z odwiertu **S1 / GB** w zależności od jego głębokości

Analizując rezultaty uzyskane w badaniach odwiertu z pierwszej części ściany szczelinowej można stwierdzić, iż oznaczone wytrzymałości f_c zawierają się w zakresie od 3,9 MPa do 6,9 MPa, a różnica pomiędzy wartością minimalną i maksymalną jest równa 3,0 MPa. Gęstości badanych próbek mieszczą się w zakresie od 1701 do 1904 kg/m^3, a ich wartości rosną na każdym metrze głębokości o 36,2 kg/m^3.



Rysunek 8.3 Wykresy prezentujące oznaczone właściwości próbek pobranych z odwiertu **S2 / FGB /PET** w zależności od jego głębokości

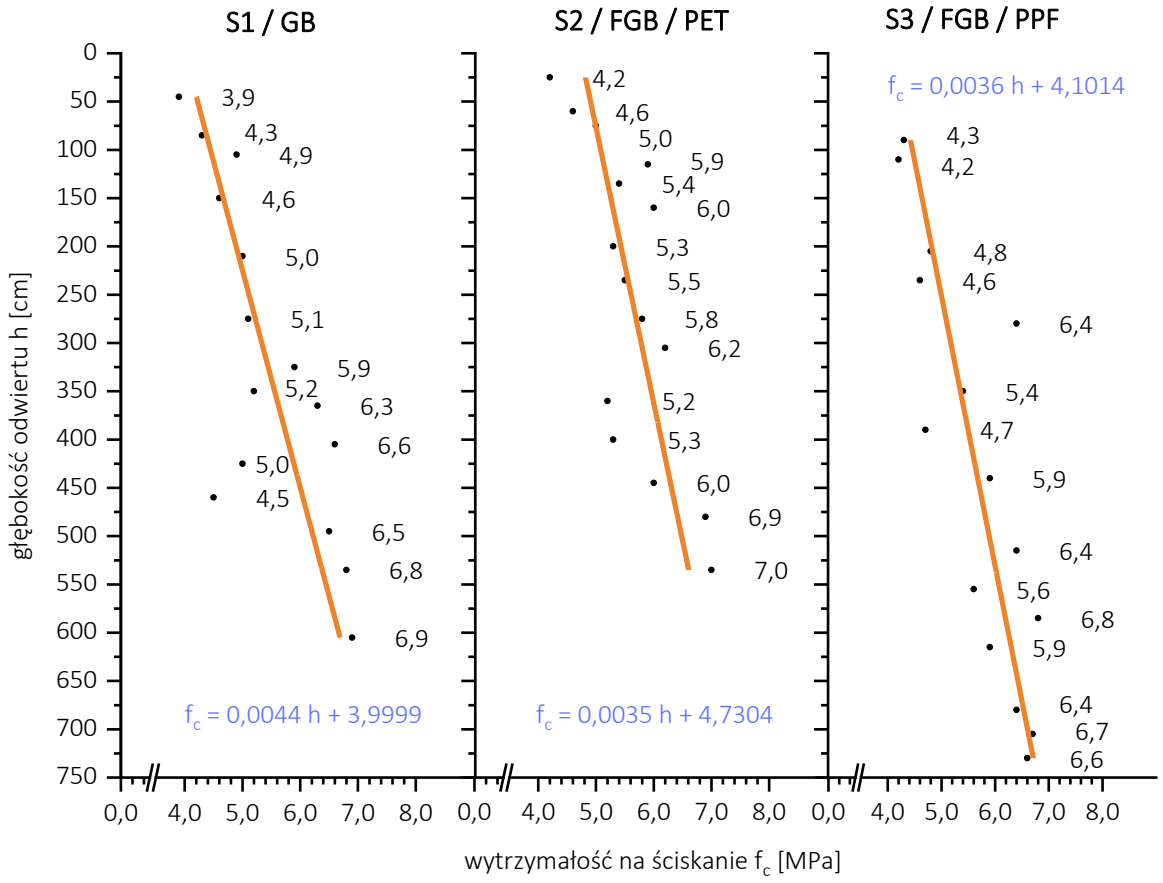
W przypadku próbek pobranych z odwiertu S2 / FGB / PET uzyskane wytrzymałości na ściskanie tworzą przedział od 4,2 MPa do 7,0 MPa. Różnica pomiędzy wartością minimalną i maksymalną wytrzymałości f_c fibrogruntobetonu z dodatkiem włókien PET jest równa 2,8 MPa. Wyznaczone gęstości mieszczą się w zakresie od 1717 do 1933 kg/m^3. Wartość gęstości rośnie średnio na każdym metrze o 42,4 kg/m^3.



Rysunek 8.4 Wykresy prezentujące oznaczone właściwości próbek pobranych z odwiertu **S3 / FGB /PPF** w zależności od jego głębokości

Wyniki wytrzymałości na ściskanie oznaczonych na próbkach z odwiertu S3 / FGB / PPF tworzą zakres od 4,2 MPa do 6,8 MPa. Różnica pomiędzy wartością minimalną i maksymalną jest równa 2,6 MPa. Przedział obliczonych gęstości zawiera się pomiędzy wartościami 1704 kg/m^3 oraz 1878 kg/m^3. Wartość gęstości w analizowanym odwiercie rośnie więc o 27,2 kg/m^3 na każdy metr.

Na podstawie powyższych wyników badań wytrzymałości na ściskanie oraz gęstości trzech odwiertów zaobserwowano oczywistą zależność, iż generalnie wraz ze wzrostem gęstości rośnie wartość wytrzymałości na ściskanie badanych próbek gruntobetonowych i fibrogruntobetonowych. Ponadto na rysunkach 8.2 ÷ 8.4 można dostrzec tendencję wzrostu gęstości i wytrzymałości f_c wraz ze wzrostem głębokości usytuowania próbki. Zjawisko to wydaje się być naturalne z uwagi na wzrost ciśnienia hydrostatycznego na głębokości ściany, oddziaływującego na mieszaninę o dużej ciekłości. W przypadku badanej konstrukcji o głębokości przekraczającej 7 m wzrost ciśnienia hydrostatycznego pomiędzy jej górną i dolną częścią jest kilkunastokrotny. Dodatkowo tendencja wzrostu wartości wytrzymałości na ściskanie oraz gęstości wynika również z sedymentacji składników mieszaniny, która w rezultacie skutkuje zróżnicowaniem porowatości materiału stwardniałego na głębokości konstrukcji. Na poniższym rysunku przedstawiono więc porównanie zbiorów wyników wytrzymałości na ściskanie we wszystkich trzech częściach ściany.



Rysunek 8.5 Wykresy prezentujące oznaczone wytrzymałości na ściskanie próbek pobranych ze wszystkich trzech części badanej ściany szczelinowej

Na rysunku 8.5 dla uzyskanych wartości f_c w każdym badanym odwiercie dokonano aproksymacji liniowej. Zaobserwowano, iż linia trendu dla wyników z odwiertu gruntobetonowego jest nachylona do osi pionowej pod większym kątem w porównaniu z liniami wyznaczonymi dla wyników uzyskanych w odwiertach fibrogruntobetonowych. Efekt ten potwierdzają wartości współczynników kierunkowych wyznaczonych funkcji liniowych. Dla funkcji wyznaczonej w odwiercie S1 / GB jest to wartość równa 0,0044, natomiast w odwiertach S2 / FGB / PET oraz S3 / FGB / PPF współczynniki kierunkowe mają zbliżone wartości, równe odpowiednio 0,0035 oraz 0,0036. Zmniejszenie kątów nachylenia linii trendu w fibrogruntobetonowych częściach ściany świadczy o tym, iż dodatek włókien częściowo ogranicza efekt wzrostu wytrzymałości na ściskanie na głębokości badanej konstrukcji. Dodatkowo rozstęp pomiędzy wartościami minimum i maksimum ulega niewielkiemu zmniejszeniu w odwiertach fibrogruntobetonowych. Chociaż uzyskana jednorodność wytrzymałości na ściskanie w badanej ścianie szczelinowej jest zdecydowanie mniejsza od jednorodności uzyskiwanej w takich konstrukcjach z betonu cementowego, to jednak dotychczasowe doświadczenia z praktyki inżynierskiej pozwalają akceptować uzyskany w skali technicznej poziom zróżnicowania oznaczanych właściwości gruntobetonów i fibrogruntobetonów.

9 WNIOSKI

Przeprowadzone w ramach niniejszej pracy badania, ich wyniki oraz dokonane analizy pozwoliły na realizację wyznaczonych celów oraz potwierdziły słuszność postawionych tez. Uzyskane w wyniku przeprowadzonych badań wnioski podzielono na ogólne oraz szczegółowe.

9.1 WNIOSKI OGÓLNE

- Przeprowadzone badania i uzyskane rezultaty pozwoliły na sformułowane zależności pomiędzy składem mieszanki a właściwościami stwardniałego kompozytu gruntobetonowego. W efekcie zaproponowano algorytm postępowania podczas doświadczalnego projektowania składu oraz wyznaczono korelacje pomiędzy wskaźnikiem wodno-cementowym a wytrzymałością na ściskanie stwardniałych gruntobetonów stanowiące podstawę projektowania ilościowego. Ponadto wyznaczono zakres udziału objętościowego zaczynu cementowego względem najczęściej występujących w Polsce gruntów, który pozwala na uzyskanie właściwej konsystencji mieszanki, umożliwiającej jej zabudowanie w skali technicznej.
- Zaproponowane modyfikacje istniejących metod badawczych, dedykowanych badaniom betonów cementowych, są zasadne oraz niezbędne w celu poprawnego wyznaczania właściwości kompozytów gruntobetonowych i fibrogruntobetonowych. Przyjęta metodyka badania efektywności wzmocnienia kompozytów gruntobetonowych zbrojeniem rozproszonym pozwala na pełną ocenę wpływu dodatku włókien na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu fibrogruntobetonów oraz na charakter ich pracy w stanie pokrytycznym.
- Zastosowanie zbrojenia rozproszonego w formie włókien syntetycznych zwiększa wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu fibrogruntobetonów w porównaniu z niewzmocnionymi matrycami gruntobetonowymi oraz powoduje pseudo-plastyczny charakter ich zniszczenia, dzięki czemu możliwa jest praca materiału w stanie pokrytycznym. Wpływ na uzyskany poziom wzmocnienia ma charakterystyka zarówno zbrojenia rozproszonego, jak również matrycy gruntobetonowej.
- Opracowane w laboratorium składy gruntobetonów oraz fibrogruntobetonów zostały zweryfikowane w skali technicznej przy zastosowaniu mieszania wgłębnego metodą trench mixing. Poziom osiągniętych wytrzymałości na ściskanie stwardniałych kompozytów był bardzo zbliżony do poziomów, jakie otrzymywano w doświadczeniach realizowanych w skali laboratoryjnej. Oceniona jednorodność właściwości gruntobetonów oraz fibrogruntobetonów jest, czego można się było spodziewać, mniejsza od jednorodności charakteryzującej beton konstrukcyjny. Niemniej jednak, poziom homogenizacji mieszaniny w trakcie wgłębnego mieszania należy uznać za zadowalający.
- Uzyskane poziomy wytrzymałości w gruntobetonach oraz w fibrogruntobetonach potwierdzają, iż zastosowanie cementu CEM II/B-S 32,5 R jest uzasadnioną alternatywą dla powszechnie

wybieranego cementu portlandzkiego CEM I. Wniosek ten jest ważny w kompozytach powstałych zarówno z gruntu niespoistego, jak również spoistego.

9.2 WNIOSKI SZCZEGÓŁOWE TAKŻE O CHARAKTERZE PRAKTYCZNYM

- Podstawowym czynnikiem decydującym zarówno o konsystencji mieszanek gruntobetonowych oraz fibrogruntobetonowych, jak również o wytrzymałości stwardniałego materiału jest rodzaj gruntu. To on determinuje niezbędną ilość zaczynu cementowego i charakteryzujący go wskaźnik wodno-cementowy. Nie bez znaczenia jest także rodzaj użytego spoiwa cementowego. Dla stosowanych w badaniach gruntów wzmacnianych cementem CEM II/B-S 32,5 R wyznaczono następujące zakresy dotyczące składu:
  - ilości dozowanego zaczynu cementowego:
    - grunt niespoisty / piasek średni - V_z (od 350 do 500 dm^3/m^3),
    - grunt spoisty / glina - V_z (od 550 do 650 dm^3/m^3),
  - wskaźnika wodno-cementowego zaczynu w/c:
    - grunt niespoisty / piasek średni (od 3,2 do 0,6),
    - grunt spoisty / glina (od 3,8 do 1,2),
  - zawartości cementu:
    - grunt niespoisty / piasek średni - C (od 99 do 542 kg/m^3),
    - grunt spoisty / glina - C (od 133 do 427 kg/m^3),

  oraz zakresy dotyczące uzyskiwanych właściwości w stanie stwardniałym:
  - wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu gruntobetonów:
    - grunt niespoisty / piasek średni - $f_{ct,fl}$ (od 0,2 do 5,6 MPa),
    - grunt spoisty / glina - $f_{ct,fl}$ (od 0,4 do 2,0 MPa),
  - wytrzymałości na ściskanie gruntobetonów:
    - grunt niespoisty / piasek średni - f_c (od 0,5 do 27,4 MPa),
    - grunt spoisty / glina - f_c (od 1,2 do 10,8 MPa).
- Wyznaczone średnie wartości proporcji wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu do wytrzymałości na ściskanie wyniosły 0,26 dla gruntobetonów z gruntu niespoistego oraz 0,24 dla kompozytów z gruntu spoistego. Są to wartości korzystniejsze niż w przypadku wskaźnika kruchości charakteryzującego betony cementowe.
- Modyfikacja metod badawczych stosowanych w badaniach betonu cementowego w głównej mierze polega na zmianie sposobu kondycjonowania próbek przed badaniem oraz na redukcji prędkości zmiany naprężenia w czasie badania. Z uwagi na silną zależność wytrzymałości kompozytów gruntobetonowych od ich stanu wilgotności, w trakcie kondycjonowania wymagane jest ich zabezpieczenie przed utratą wilgoci, tak aby w chwili badania charakteryzowały się one wilgotnością naturalną, wynikającą z ich składu. Natomiast obniżenie

prędkości zmiany naprężenia obciążającego w czasie jest niezbędne z uwagi na niższy poziom wytrzymałości kompozytów gruntobetonowych w porównaniu z betonem cementowym.

- Zweryfikowane w skali laboratoryjnej i technicznej efektywny zakres długości oraz efektywny zakres poziomów dozowania wybranych do badań włókien z tworzyw sztucznych wynoszą odpowiednio 60 – 100 mm oraz 6 kg/m^3 – 10 kg/m^3. Wniosek ten obowiązuje w fibrogruntobetonach z gruntu niespoistego oraz spoistego.
- Niezależnie od rodzaju włókien, zmiana ich długości z 60 mm do 100 mm oraz zmiana poziomu ich dozowania z 6 kg/m^3 do 10 kg/m^3 skutkują wzrostem wartości naprężeń σ_{MOR} osiąganych przez fibrogruntobetony. Dla stosowanych w przedmiotowych kompozytach włókien wyznaczono następujące zakresy oraz średnie wartości naprężeń σ_{MOR} w zależności od kombinacji ich długości i ilości:
  - dodatek włókien o długości 60 mm w ilości 6 kg/m^3:
    - grunt niespoisty / piasek średni - σ_{MOR} (od 0,9 do 3,5 MPa; średnio 2,1 MPa),
    - grunt spoisty / glina - σ_{MOR} (od 0,7 do 2,0 MPa; średnio 1,4 MPa),
  - dodatek włókien o długości 60 mm w ilości 10 kg/m^3:
    - grunt niespoisty / piasek średni - σ_{MOR} (od 1,4 do 6,0 MPa; średnio 3,2 MPa),
    - grunt spoisty / glina - σ_{MOR} (od 1,2 do 3,6 MPa; średnio 2,2 MPa),
  - dodatek włókien o długości 100 mm w ilości 6 kg/m^3:
    - grunt niespoisty / piasek średni - σ_{MOR} (od 1,3 do 3,7 MPa; średnio 2,5 MPa),
    - grunt spoisty / glina - σ_{MOR} (od 0,9 do 3,1 MPa; średnio 1,6 MPa),
  - dodatek włókien o długości 100 mm w ilości 10 kg/m^3:
    - grunt niespoisty / piasek średni - σ_{MOR} (od 2,1 do 5,2 MPa; średnio 3,4 MPa),
    - grunt spoisty / glina - σ_{MOR} (od 1,3 do 3,3 MPa; średnio 2,1 MPa).
- Zastosowanie włókien polipropylenowych PPF oraz PPTF zapewnia uzyskanie pozytywnego efektu wzmocnienia gruntobetonów zbrojeniem rozproszonym. W badanych fibrogruntobetonach uzyskano następujące zakresy oraz średnie wartości stosunku naprężeń σ_{MOR} / σ_{LOP}:
  - dla dodatku włókien PPF:
    - grunt niespoisty / piasek średni - σ_{MOR} / σ_{LOP} (od 1,4 do 2,6 ; średnio 2,0),
    - grunt spoisty / glina - σ_{MOR} / σ_{LOP} (od 1,6 do 2,5 ; średnio 2,0),
  - dla dodatku włókien PPTF:
    - grunt niespoisty / piasek średni - σ_{MOR} / σ_{LOP} (od 1,4 do 2,7 ; średnio 2,1),
    - grunt spoisty / glina - σ_{MOR} / σ_{LOP} (od 1,2 do 2,2 ; średnio 1,8).
- Kluczowa dla efektywnej pracy włókien polipropylenowych w kompozytach fibrogruntobetonowych jest ich fibrylizacja, która uwidacznia się podczas mieszania z mieszanką gruntobetonową. To ona gwarantuje dobre zakotwienie włókna w kompozycie.

- W przypadku włókien poliestrowych czynnikiem decydującym o współpracy z matrycą gruntobetonową jest ich geometria. Zaproponowane producentowi zmiany geometrii przekroju włókien typu PETX pozwoliły na zwiększenie powierzchni ich styku z matrycą gruntobetonową oraz na uzyskanie zdecydowanie większej sztywności w porównaniu do włókien PET o przekroju okrągłym.
- Znaczący wpływ na współpracę włókien z matrycą gruntobetonową ma rodzaj gruntu, z którego wykonany jest kompozyt. Gruntobetony z gruntu niespoistego oraz spoistego o zbliżonym poziomie wytrzymałości osiągają znacząco różne wartości parametrów charakteryzujących współpracę obu faz kompozytów.
- Wzrost wartości modułu sprężystości przy ściskaniu gruntobetonu na skutek zastosowania włókien poliestrowych PETX jest możliwy dzięki ich wysokiemu modułowi sprężystości oraz geometrii zapewniającej odpowiednią sztywność. Równocześnie wzrost wartości $E_{c,m}$ dzięki obecności włókien PETX jest możliwy jedynie w matrycach o odpowiednio wysokim poziomie wytrzymałości.
- Tendencja wzrostu wartości wytrzymałości na ściskanie oraz gęstości gruntobetonów i fibrogruntobetonów na głębokości ściany wynika ze wzrostu ciśnienia hydrostatycznego ciekłych mieszanek. Dodatek włókien nie ma istotnego wpływu na gęstość, wytrzymałość na ściskanie oraz jednorodność wyników badań uzyskanych w realnej konstrukcji.

10 KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

W efekcie przeprowadzonych badań i analiz oraz prowadzonych dyskusji, także i tych związanych z realizacją projektu, w ramach którego częściowo powstała ta praca, dostrzeżono możliwość nowych kierunków zastosowania tych nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych. Stwierdzono, że istnieje potrzeba kontynuowania dalszych badań w co najmniej kilku obszarach, wśród których jako najistotniejsze jawi się poszukiwanie wysoce efektywnych, niskoemisyjnych i nieenergetycznych spoiw do wzmacniania gruntów.

Z innych zagadnień należy wymienić badania dotyczące:

- odkształcalności gruntobetonu i fibrogruntobetonu pod wpływem zmiany wilgotności i temperatury,
- wpływu czynników środowiskowych na cechy mechaniczne gruntobetonów i fibrogruntobetonów,
- wpływu parametrów składu gruntobetonu i fibrogruntobetonu oraz obecności ewentualnych dodatków na przepuszczalność wobec wody (współczynnik filtracji),
- oceny odkształceń reologicznych gruntobetonu i fibrogruntobetonu pod wpływem działania naprężeń ściskających w dłuższych okresach eksploatacji konstrukcji (moduł sprężystości, pełzanie),
- szczegółowej oceny jednorodności składu materiału w całej konstrukcji (zawartość cementu, zawartość włókien) i dążenie do minimalizacji ich zróżnicowania na głębokości,
- wpływu czynników środowiskowych na właściwości ochronne gruntobetonu względem stali zbrojeniowej oraz problemu przyczepności gruntobetonu do zbrojenia konstrukcyjnego,
- elementów wielkogabarytowych ze zbrojeniem konstrukcyjnym wykonanych z gruntobetonu i fibrogruntobetonu.

11 LITERATURA

[1] Mitchel J.K.: Soil Improvement – State of the art, Proc. of the 10th ICDMFE, Stockholm, Szwecja, 1981

[2] Terashi M., Juran I.: Ground improvement – state of the art, Proc. of the Int. GeoEng2000, Melbourne, Australia, 2000

[3] Veraksin S., Maertens J., Huybrechts N.: Administrative report for ICSMGE Alexandria 2009, ISSMGE – TC 17 Ground Improvement, 5-9 October, 2009

[4] Chu J., Veraksin S., Menge P.: Construction process. State of the art report, Proc. Of the 17th CSMGE Alexandria, Egipt, 2009

[5] Topolnicki M.: Wzmacnianie i uszczelnianie gruntu metodą mieszania in-situ (Soil Mixing), Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 6/2003, s. 385-398, 2003

[6] Madej J.: Ulepszanie podłoża, Materiały pomocnicze do wykładów z zakresu geotechniki, Politechnika Koszalińska, 2015

[7] Topolnicki M.: In situ Soil Mixing, rozdział w Ground Improvement, edytorzy Moseley M., Kirsch K., Spon Press, s. 331-428, 2004

[8] Menard Polska Sp. z o.o.,: Kolumny DSM, http://www.menard.pl/wzmacnianie-gruntu/technologie/kolumny-dsm/, link aktywny 27.06.2022 r.

[9] Łęcki P., Różański M.: Wzmacnianie podłoża gruntowego budowli drogowych, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, Marzec-Kwiecień 2015, s. 47-54, 2015

[10] Łęcki P., Dojcz P.: Problematyka oraz sposoby stabilizacji i wzmacniania gruntów budowlanych, Instytut Techniki Budowlanej, 2008

[11] Rychlewski P.: Kolumny DSM, Inżynier budownictwa,2, s. 92-95, 2013

[12] Rychlewski P.: Metody wzmacniania podłoża gruntowego w budownictwie komunikacyjnym, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, 2014

[13] Rychlewski P.: Zagadnienia realizacyjne w technologii wgłębnego mieszania gruntu – deep soil mixing (DSM), Inżynier budownictwa, 5, s.98-102, 2015

[14] Kanty P., Rybak J., Stefaniuk D.: O zagrożeniach związanych z projektowaniem kolumn DSM w gruntach organicznych, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, Marzec-Kwiecień 2017, s.70-75, 2017

[15] Topolnicki M.: Wzmacnianie i uszczelnianie gruntu metodą wgłębnego mieszania na mokro (DSM), XXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, 17-20 marca 2009, s. 265-280, 2009

[16] Kanty P.: Aspekty projektowania kolumn DSM pod obiektami mostowymi, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, Styczeń-Luty 2017, s. 68-73, 2017

[17] Topolnicki M.: Dobra praktyka stosowania i projektowania wgłębnego mieszania gruntu na mokro (DSM), XXXII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, 7-10 marca 2017, s. 1-29, 2017

[18] Topolnicki M., Posłajko M., Krążelewski J., Żółtowski K., Topolewicz K.: Posadowienie obiektów mostowych na podłożu wzmocnionym metodą wgłębnego mieszania gruntu na mokro (DSM), Mosty nr 5/2017, s. 28-35, 2017

[19] Topolnicki M.: Zasady stosowania i projektowania wzmocnienia gruntu metodą wgłębnego mieszania na mokro (DSM), Inżynieria i Budownictwo nr1/2018, s. 3-16, 2018

[20] Topolnicki M.: Design and Execution Practice of Wet Soil Mixing in Poland, International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization, Okinawa, 19-21 maja 2009, , s. 195-202, 2009

[21] Gajewska B., Kłosiński B.: Wzmacnianie słabego podłoża kolumnami w budownictwie drogowym, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, Lipiec-Sierpień 2012, s. 56-62, 2012

[22] Topolnicki M.: Podchwytywanie i podnoszenie obiektów budowlanych za pomocą kontrolowanych iniekcji geotechnicznych, XXV Konferencja Naukowo-Techniczna, Międzyzdroje, 24-27 maja, Awarie Budowlane 2011, s. 175-200, 2011

[23] Brzeski T., Rippel R.:Jet grouting, Inżynier budownictwa, 2009

[24] Głowacki P., Hoffmann M.: Wykonywanie przegród przeciwfiltracyjnych metodą wgłębnego mieszania gruntu na mokro Trenchmix ® oraz wykopu szczelinowego stabilizowanego zawiesiną twardniejącą przez firmę Soletanche Polska, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, Listopad-Grudzień 2015, s. 82-84, 2015

[25] Głowacki P.: Trenchmix® - możliwości zastosowania w budownictwie infrastrukturalnym, kubaturowym i hydrotechnicznym, Seminarium IBDiM i PZWFS, Warszawa, 2 marca 2017, Wzmacnianie podłoża i fundamentów 2017

[26] Madetko N.: Trench mixing – wgłębne mieszanie na mokro, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne Lipiec-Sierpień 2013, s. 72-73, 2013

[27] Topolnicki M.: General overview and advances in Deep Soil Mixing, XXIV Geotechnical Conference of Torino Design, Construction and Controls of Soil Improvement Systems, Torino, 25-26.02.2016

[28] Denies N., Huybrechts N.: Handbook Soil mix walls. Design and execution, Joshua Tourrich, 2018

[29] Leśniewska A.: Wytrzymałościowe i technologiczne aspekty wzmacniania gruntu metodą wgłębnego mieszania na mokro, Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, lipiec 2007

[30] Topoliński S. Badanie wytrzymałości kompozytów grunt organiczny-spoiwo cementowe formowanych metodą mieszania, Rozprawa doktorska, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, 2014

[31] Nehdi M.L.: Clay in cement-based materials: Critical overview of state-of-the-art, Construction and Building Materials, 51, s. 372-382, 2014

[32] Forcelini M., Garbin G.R., Faro V.P., Consoli N.C.: Mechanical Behavior of Soil Cement Blends with Osorio Sand, Procedia Engineering, 143, s. 75-81, 2016

[33] Ribeiro D., Néri R., Cardoso R.: Influence of Water Content in the UCS of Soil-Cement Mixtures for Different Cement Dosages, Procedia Engineering, 143, s. 59-66, 2016

[34] Gajewska B., Kłosiński B., Rychlewski P., Grzegorzewicz K.: Metody stosowania geosyntetyków do budowy i wzmocnienia nawierzchni i ziemnych budowli drogowych. Zastosowanie geosyntetyków w budowlach ziemnych. Studium poznawczo-techniczne, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2003

[35] Li C.: Mechanical response of fiber-reinforced soil, Rozprawa doktorska, The University of Texas at Austin, 2005

[36] Hejazi S.M., Sheikhzadeh M., Abtahi S.M., Zadhoush A.: A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers, Construction and Building Materials, 30, s. 100-116, 2012

[37] Soğancı A. S.: The Effect of Polypropylene Fiber in the Stabilization of Expansive Soils, International Journal of Geological and Environmental Engineering, 9, s. 956-959, 2015

[38] Santoni R., Webster S.: Airfields and road construction using fiber stabilization of sands, Journal of Transportation Engineering, 127, s. 96-104, 2001

[39] Consoli N.C., Casagrande M.D.T., Prietto P.D.M., Thome A.: Plate Load Test on Fiber-Reinforced Soil, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129, s. 951-955, 2003

[40] Consoli N.C., Montardo J.P., Prietto P.D.M., Pasa G.S.: Engineering Behavior of a Sand Reinforced with Plastic Waste, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128, s. 462-472, 2002

[41] Kumar A., Walia B.S., Mohan J.: Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay, Construction and Building Materials, 20, s. 1063-1068, 2006

[42] Maheshwari K.V., Desai A.K., Solanki C.H.: Performance of fiber reinforced clayey soil, Electronic Journal of Geotechnical Engineering., 16, s. 1067–1082, 2011

[43] Furumoto K., Miki H., Tsuneoka N., Obata T.: Model test on the piping resistance of short fiber reinforced soil and its application to river levee, Geosynthetics, s. 1241-1244, 2002

[44] Chen M., Shen S.L., Arulrajah A., Wu H.N., Hou D.W., Xu Y.S.: Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength of fiber-reinforced and cement-stabilized Shanghai soft clay, Geotextiles and Geomembranes, 43, s. 515-523, 2015

[45] Cristelo N., Cunha V. M.C.F., Dias M., Gomes A. T., Miranda T., Araujo N, Influence of discrete fibre reinforcement on the uniaxial compression response and seismic wave velocity of a cement-stabilised sandy-clay, Geotextiles and Geomembranes, 43, s. 1-13, 2015

[46] Correia A.A.S., Venda Oliveira P.J., Custódio D.G.: Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders," Geotextiles and Geomembranes, 43, s. 97-106, 2015

[47] Sukontasukkul P., Jamsawang P.: Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil-cement column, Construction and Building Materials, 29, s. 201-205, 2012

[48] Tang C., Shi B., Gao W., Chen F., Cai Y.: Strength and mechanical behaviour of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil, Geotextiles and Geomembranes, 25, s. 194-202, 2007

[49] Khattak M. J., Alrashidi M.: Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil-cement mixtures," The International Journal of Pavement Engineering, 7, s. 53-62, 2006

[50] Fatahi B., Khabbaz H., Fatahi B.: Technical Note Mechanical characteristics of soft clay treated with fibre and cement, s. 252–262, 2012.

[51] Jamsawang P., Suansomjeen T., Sukontasukkul P., Jongpradist P., Bergado D.T.: Comparative flexural performance of compacted cement-fiber-sand, Geotextiles and Geomembranes, 46, s. 414-425, 2018

[52] PN-EN 1015-3: 2000 Metody badań zapraw do murów - Część 3: Określenie konsystencji świeżej zaprawy (za pomocą stolika rozpływu)

[53] PN-EN 12390-5: 2019-08 Badania betonu - Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań.

[54] Ashton G.D.: Effect of high rates of loading on the strength properties of plain concrete, Praca magisterska, The University of Arizona, 1963

[55] Kamiński K., Dolny P., Swat M.: Wpływ szybkości obciążania na umowną wytrzymałość betonu na ściskanie, Inżynieria i Budownictwo, 11, s. 602-604, 2012

[56] Abdullah A.I.: Effects of loading rates on concrete compressive strength, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol.1144, 2021

[57] PN-EN 12390-3: 2019-07 Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.

[58] Raphael J.M.: Tensile strength of concrete, ACI Journal, 81, s. 158-165, 1984

[59] PN-EN ISO 527-1:2020-01 Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Część 1: Zasady ogólne.

[60] ASTM C1609/C1609M, 2010. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiberreinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading). ASTM Standards, United States

[61] PN-EN 14651+A1:2007 Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym - Pomiary wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP)

[62] Trindade Y.T., Bitencourt Jr. L.A.G., Monte R., de Figueiredo A.D., Manzoli O.L.: Design of SFRC members aided by a multiscale model: Part I – Predicting the post-cracking parameters, Composite Structures , 241, 2020

[63] Lee S.J., Hong Y., Eom A.H., Won J.P.: Effect of steel fibres on fracture parameters of cementitious composites, Composite Structures, 204, s. 658-663, 2018

[64] Domski J.: A blurred border between ordinary concrete and SFRC, Construction and Building Materials, 112, s. 247-252, 2016

[65] Garcez E.O., Kabir M.I., MacLeod A., Subhani M., Ghabraie K.: Self-compacting concrete reinforced with twisted-bundle macro-synthetic fiber, Applied Sciences, 9, 2019

[66] Alberti M.G., Enfedaque A., Gálvez J.C.: Improving the reinforcement of polyolefin fiber reinforced concrete for infrastructure applications, Fibers, 3, s. 504-522, 2015

[67] Gomes R. F., Dias D. P., de Andrade Silva F.: Determination of the fracture parameters of steel fiber-reinforced geopolymer concrete, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 107, 2020

[68] Final Report of RILEM Technical Committee TC 187-SOC - Experimental determination of the stress-crack opening curve for concrete in tension

[69] Enfedaque A., Alberti M.G., Paredes J.A., Gálvez J.C.: Interface properties of polyolefin fibres embedded in self-compacting concrete with a bond improver admixture, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 90, s. 287-293, 2017

[70] Sadrmomtazi A., Lotfi-Omran O., Nikbin I.M.: On the fracture parameters of heavy-weight magnetite concrete with different water-cement ratios through three methods, Engineering Fracture Mechanics., 219, 2019

[71] Song P.S., Hwang S.: Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete, Construction and Building Materials, 18, s. 669-673, 2004

[72] Hsie M., Tu C., Song P.S.: Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete, Materials Science and Engineering A, 494, s. 153-157, 2008

[73] Kim D.J., Park S.H., Ryu G.S., Koh K.T.: Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers, Construction and Building Materials, 25, s. 4144-4155, 2011

[74] Elsaid A., Dawood M., Seracino R., Bobko C.: Mechanical properties of kenaf fiber reinforced concrete, Construction and Building Materials, 25, s. 1991-2001, 2011

[75] Rashiddadash P., Ramezanianpour A.A., Mahdikhani M.: Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice Construction and Building Materials, 51, s. 313-320, 2014

[76] Tracz T., Brasse K., Zdeb T., Bielecka J.: Influence of soil-cement composition on its deformability, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol.583, 2019

[77] Bruce M.E.C., Berg R.R., Collin J.G., Filz G.M., Terashi M., Yang D.S.: Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support, Raport nr HWA-HRT-13-046, październik 2013.

[78] Fan J., Wang D., Qian D.: Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 10, s.791-797, 2018

[79] Briaud J.L., Nicholson P., Lee J.: Behavior of full-scale VERT wall in sand, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126, 2000

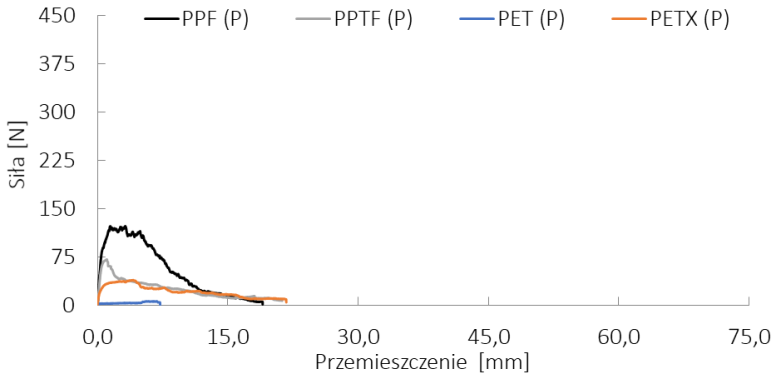
[80] Wang D., Olowokere D., Zhang L.: Interpretation of Soil–Cement Properties and Application in Numerical Studies of Ground Settlement Due to Tunneling Under Existing Metro Line, Geotechnical and Geological Engineering, 32, s.1275-1289, 2014

[81] PN-EN 12390-13:2014-02 Badania betonu - Część 13: Wyznaczenie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu

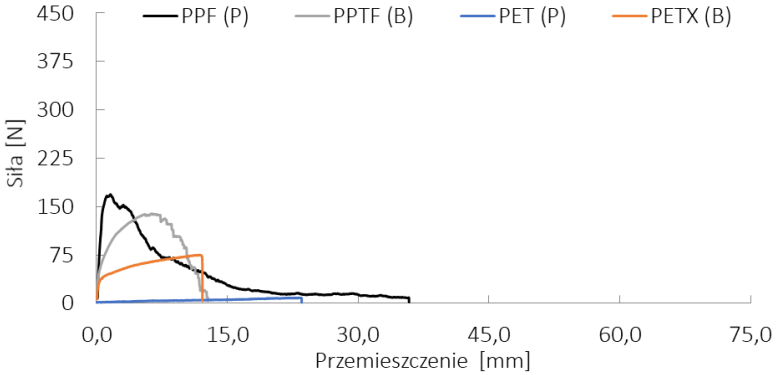
[82] PN-EN 12390-7:2019-08 Badania betonu – Część 7: Gęstość betonu.

12 Załączniki

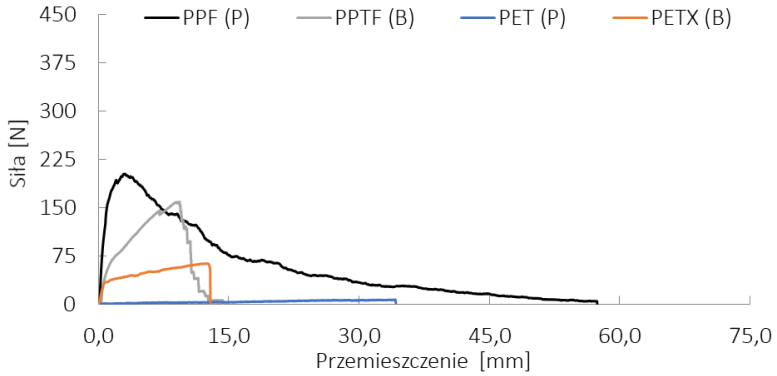
12.1 WYNIKI BADAŃ PRZYCZEPNOŚCI MATRYC GRUNTOBETONOWYCH DO WŁÓKIEN



Rysunek 12.1 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **25 mm** zakotwienia włókien w matrycy 400/1,6



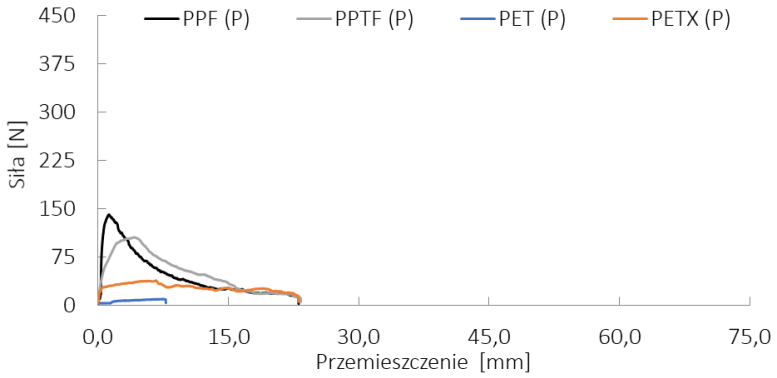
Rysunek 12.2 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **50 mm** zakotwienia włókien w matrycy 400/1,6



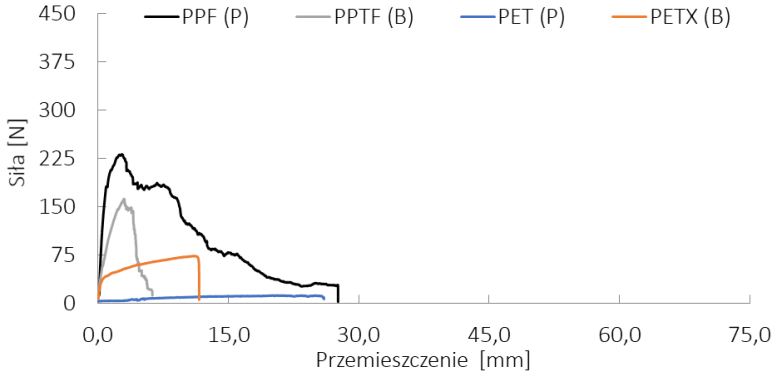
Rysunek 12.3 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **75 mm** zakotwienia włókien w matrycy 400/1,6

Tabela 12.1 Wyznaczone parametry mechaniczne włókien wyciąganych z matrycy **400/1,6**

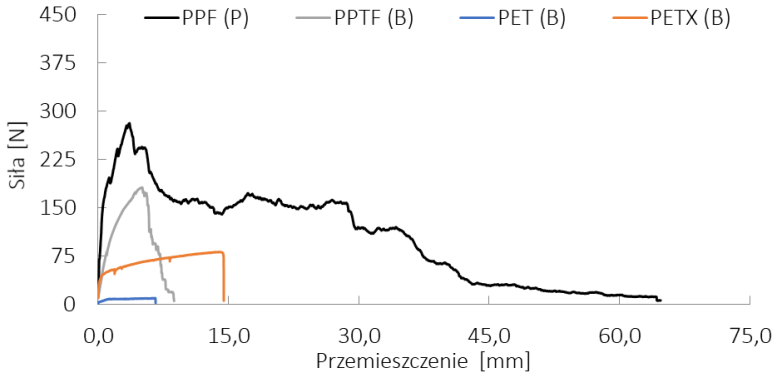
Rodzaj włókna	Długość zakotwienia [mm]	Siła maksymalna F_{max} [N]	Naprężenie styczne τ_{max} [MPa]	Przemieszczenie δ_{max} [mm]	Praca wyciągania włókna $W_{pull-out}$ [mJ]
PPF	25	123	0,875	19,3	1041
	50	169	0,603	36,1	1609
	75	202	0,481	57,6	3324
PPTF	25	71	0,277	21,2	470
	50	139	0,273	13,0	1262
	75	159	0,208	14,3	1366
PET	25	6	0,308	7,2	26
	50	9	0,221	23,5	120
	75	7	0,118	34,2	128
PETX	25	39	0,520	21,7	458
	50	75	0,502	12,1	738
	75	63	0,282	12,9	631



Rysunek 12.4 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **25 mm** zakotwienia włókien w matrycy 450/1,2



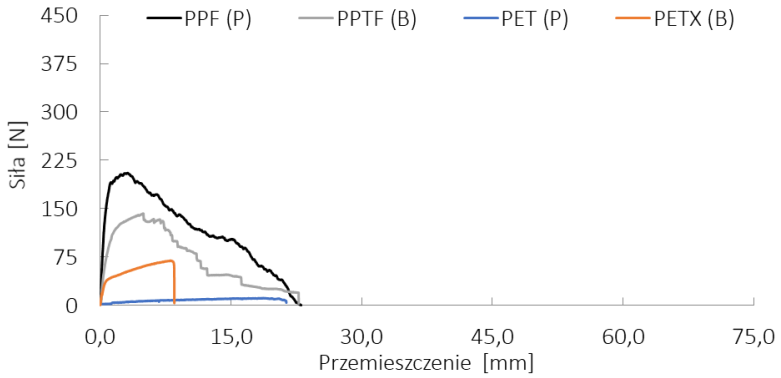
Rysunek 12.5 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **50 mm** zakotwienia włókien w matrycy 450/1,2



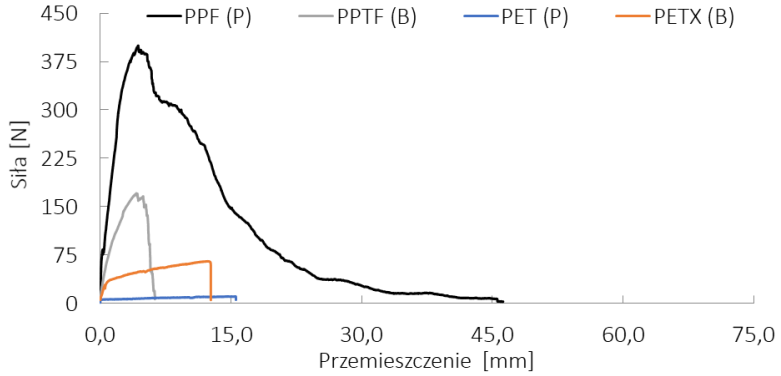
Rysunek 12.6 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **75 mm** zakotwienia włókien w matrycy 450/1,2

Tabela 12.2 Wyznaczone parametry mechaniczne włókien wyciąganych z matrycy **450/1,2**

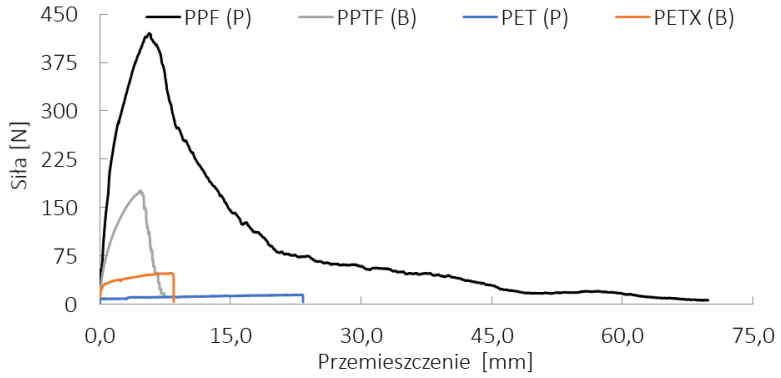
Rodzaj włókna	Długość zakotwienia [mm]	Siła maksymalna F_{max} [N]	Naprężenie styczne τ_{max} [MPa]	Przemieszczenie δ_{max} [mm]	Praca wyciągania włókna $W_{pull-out}$ [mJ]
PPF	25	141	1,004	23,1	1221
	50	231	0,824	27,6	2821
	75	281	0,669	64,9	6410
PPTF	25	105	0,413	23,3	1170
	50	162	0,317	6,3	583
	75	181	0,237	9,1	932
PET	25	9	0,477	7,8	53
	50	12	0,307	26,0	231
	75	15	0,250	34,9	57
PETX	25	38	0,511	23,1	629
	50	73	0,490	11,6	692
	75	81	0,362	14,5	977



Rysunek 12.7 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **25 mm** zakotwienia włókien w matrycy 450/0,8



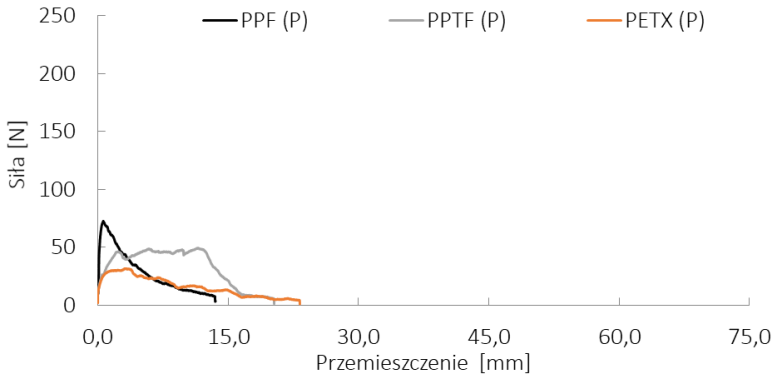
Rysunek 12.8 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **50 mm** zakotwienia włókien w matrycy 450/0,8



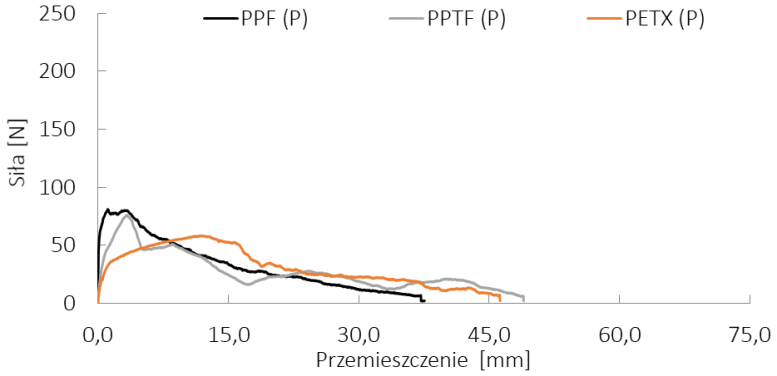
Rysunek 12.9 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **75 mm** zakotwienia włókien w matrycy 450/0,8

Tabela 12.3 Wyznaczone parametry mechaniczne włókien wyciąganych z matrycy **450/0,8**

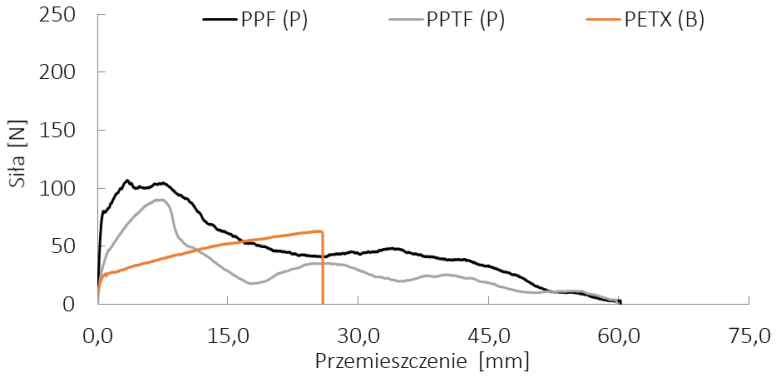
Rodzaj włókna	Długość zakotwienia [mm]	Siła maksymalna F_{max} [N]	Naprężenie styczne τ_{max} [MPa]	Przemieszczenie δ_{max} [mm]	Praca wyciągania włókna $W_{pull-out}$ [mJ]
PPF	25	205	1,466	23,1	2680
	50	400	1,426	46,2	5479
	75	420	1,000	70,3	6150
PPTF	25	143	0,559	23,0	1660
	50	171	0,335	6,4	745
	75	177	0,231	7,4	810
PET	25	12	0,594	21,4	180
	50	11	0,286	15,6	137
	75	15	0,261	23,3	290
PETX	25	70	0,933	8,5	467
	50	66	0,440	12,7	653
	75	49	0,217	8,5	352



Rysunek 12.10 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **25 mm** zakotwienia włókien w matrycy 600/2,0



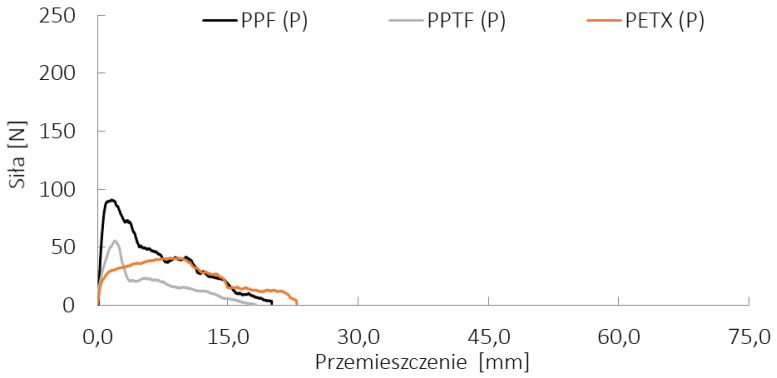
Rysunek 12.11 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **50 mm** zakotwienia włókien w matrycy 600/2,0



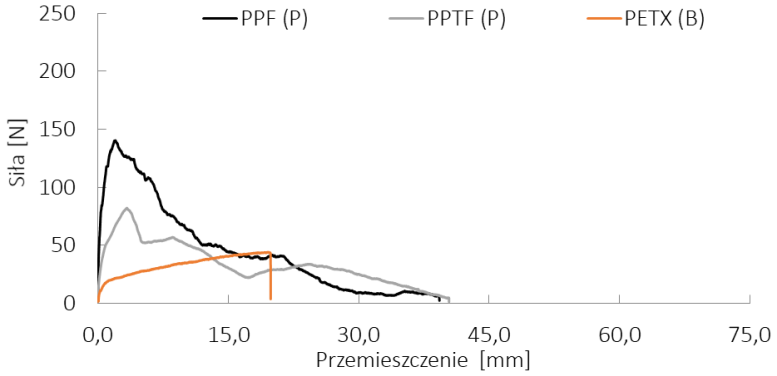
Rysunek 12.12 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **75 mm** zakotwienia włókien w matrycy 600/2,0

Tabela 12.4 Wyznaczone parametry mechaniczne włókien wyciąganych z matrycy **600/2,0**

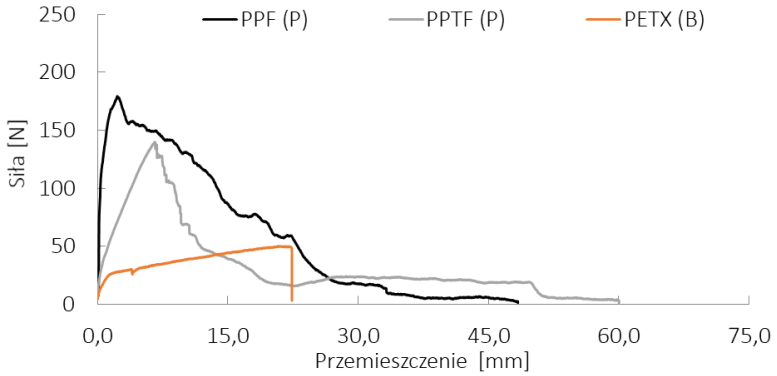
Rodzaj włókna	Długość zakotwienia [mm]	Siła maksymalna F_{max} [N]	Naprężenie styczne τ_{max} [MPa]	Przemieszczenie δ_{max} [mm]	Praca wyciągania włókna $W_{pull-out}$ [mJ]
PPF	25	73	0,519	13,5	380
	50	81	0,289	37,6	1242
	75	107	0,254	60,2	2774
PPTF	25	49	0,194	20,3	671
	50	76	0,149	46,5	1306
	75	90	0,118	59,8	1715
PETX	25	32	0,426	23,2	383
	50	58	0,390	46,3	1485
	75	63	0,281	25,9	1211



Rysunek 12.13 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **25 mm** zakotwienia włókien w matrycy 600/1,4



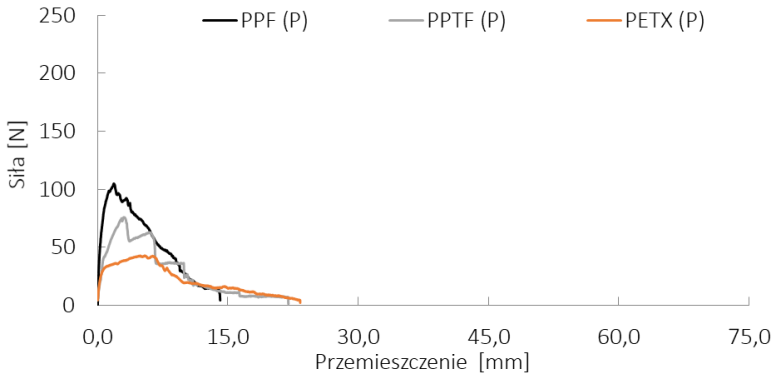
Rysunek 12.14 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **50 mm** zakotwienia włókien w matrycy 600/1,4



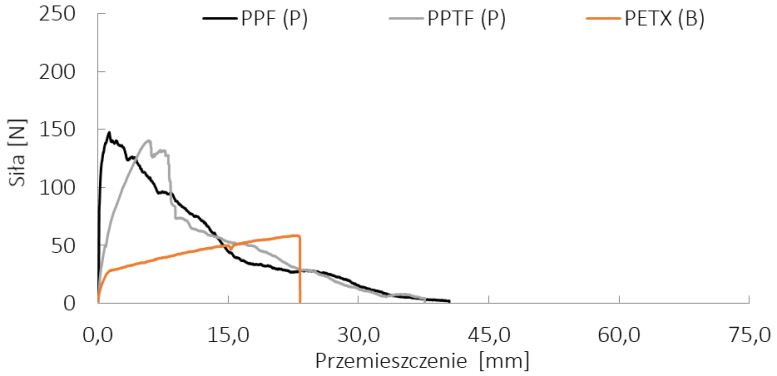
Rysunek 12.15 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **75 mm** zakotwienia włókien w matrycy 600/1,4

Tabela 12.5 Wyznaczone parametry mechaniczne włókien wyciąganych z matrycy **600/1,4**

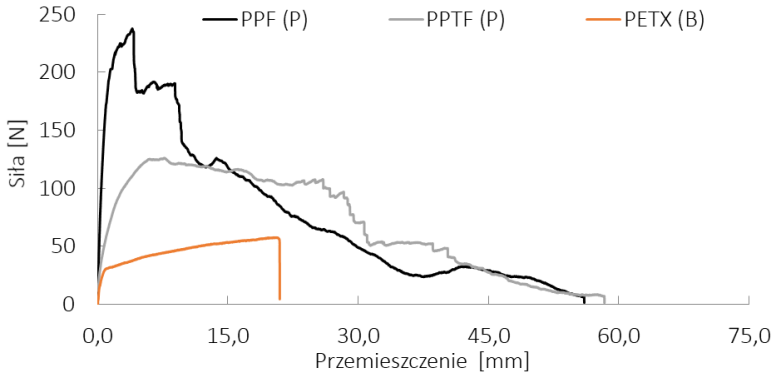
Rodzaj włókna	Długość zakotwienia [mm]	Siła maksymalna F_{max} [N]	Naprężenie styczne τ_{max} [MPa]	Przemieszczenie δ_{max} [mm]	Praca wyciągania włókna $W_{pull-out}$ [mJ]
PPF	25	91	0,649	20,1	761
	50	140	0,501	39,3	1799
	75	179	0,427	48,4	2908
PPTF	25	56	0,218	18,2	327
	50	82	0,161	40,4	1369
	75	140	0,183	60,0	1944
PETX	25	41	0,546	22,9	584
	50	44	0,295	19,9	655
	75	50	0,224	22,4	857



Rysunek 12.16 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **25 mm** zakotwienia włókien w matrycy 650/1,2



Rysunek 12.17 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **50 mm** zakotwienia włókien w matrycy 650/1,2

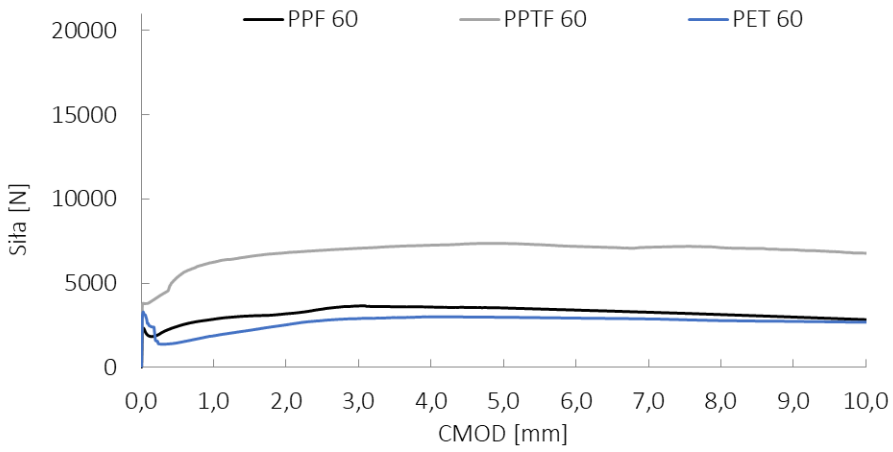


Rysunek 12.18 Wykresy zależności siła – przemieszczenie dla **75 mm** zakotwienia włókien w matrycy 650/1,2

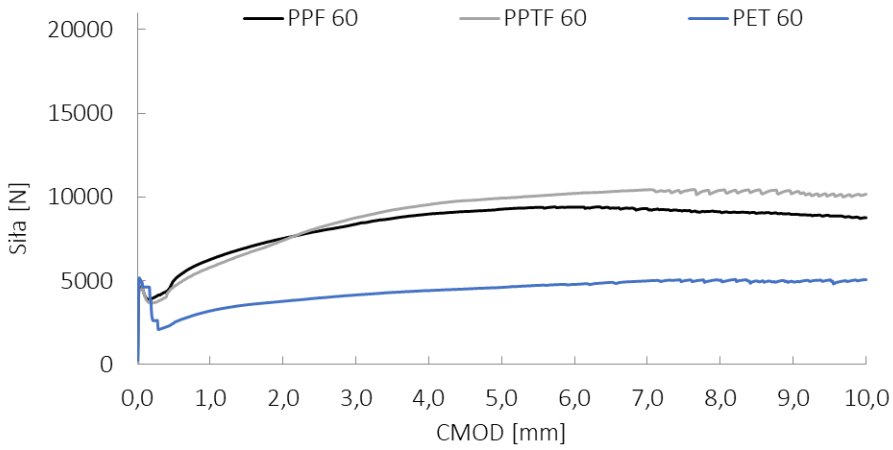
Tabela 12.6 Wyznaczone parametry mechaniczne włókien wyciąganych z matrycy **650/1,2**

Rodzaj włókna	Długość zakotwienia [mm]	Siła maksymalna F_{max} [N]	Naprężenie styczne τ_{max} [MPa]	Przemieszczenie δ_{max} [mm]	Praca wyciągania włókna $W_{pull-out}$ [mJ]
PPF	25	105	0,748	14,1	770
	50	148	0,527	40,5	1955
	75	238	0,566	56,0	4286
PPTF	25	76	0,297	22,0	581
	50	141	0,276	37,6	1864
	75	126	0,165	58,3	3983
PETX	25	43	0,572	23,3	529
	50	59	0,393	23,3	1025
	75	58	0,257	21,0	966

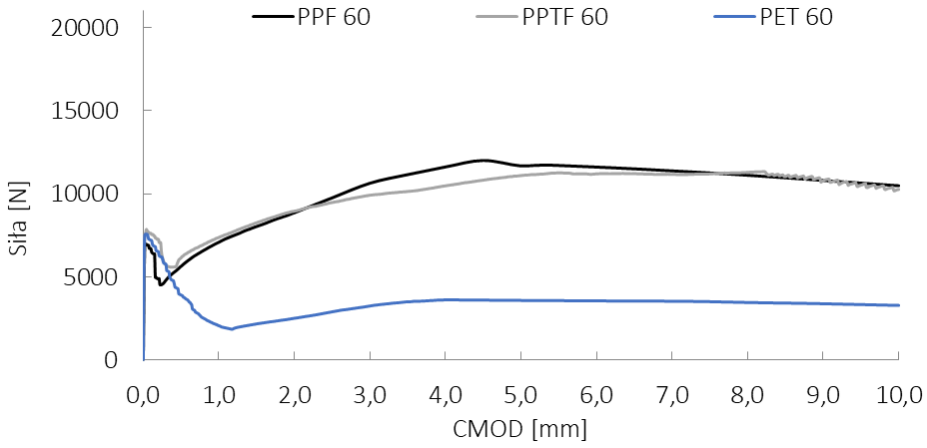
12.2 WYNIKI BADAŃ EFEKTYWNOŚCI ZBROJENIA ROZPROSZONEGO FIBROGRUNTOBETONÓW



Rysunek 12.19 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **60 mm** w ilości **6 kg/m³** w matrycy **400/1,6**



Rysunek 12.20 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **60 mm** w ilości **6 kg/m³** w matrycy **450/1,2**



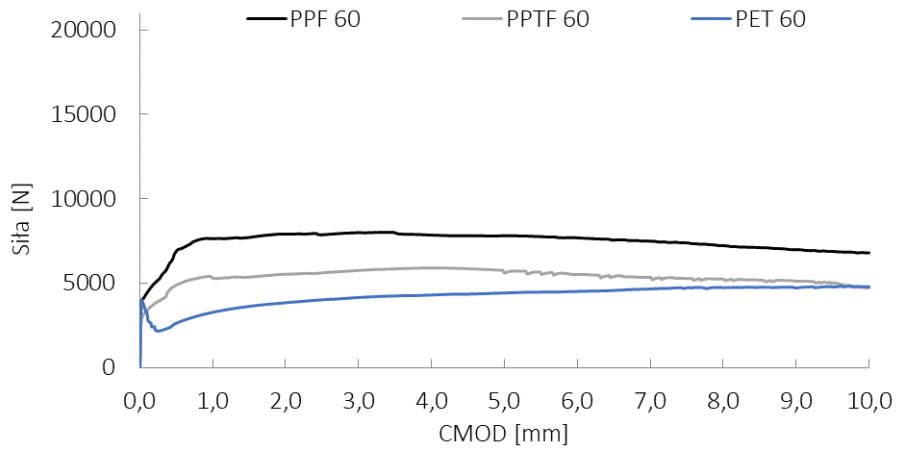
Rysunek 12.21 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **60 mm** w ilości **6 kg/m³** w matrycy **450/0,8**

Tabela 12.7 Właściwości mechaniczne fibrogruntobetonów z **gruntu niespoistego** z dodatkiem **6 kg/m³** włókien o długości **60 mm**.

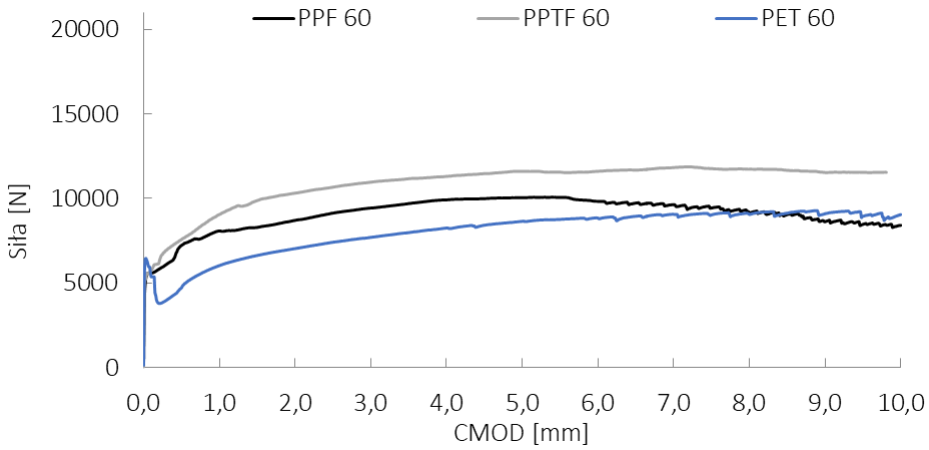
Matryca	Rodzaj włókna	Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]	σ_{LOP} [MPa]	σ_{MOR} [MPa]	$\sigma_{MOR} / \sigma_{LOP}$	G_{tot} [kJ/m²]
400/1,6	PPF 60	3,2	0,7	1,1	1,6	1,70
	PPTF 60	4,7	0,9	1,7	1,9	2,74
	PET 60	5,0	1,0	0,9	0,9	0,78
450/1,2	PPF 60	7,9	1,4	2,7	1,9	4,46
	PPTF 60	7,3	1,5	3,0	2,0	4,91
	PET 60	8,9	1,5	1,5	1,0	2,31
450/0,8	PPF 60	18,9	2,3	3,5	1,5	6,23
	PPTF 60	19,5	2,3	3,3	1,4	5,24
	PET 60	20,9	2,2	1,0	0,5	0,94

Tabela 12.8 Wartości naprężeń pokrytycznych rejestrowanych przy rozwarciu rysy CMOD = 0,5 , 2,5 , 5,0 , 7,5 , 10,0 mm fibrogruntobetonów z **gruntu niespoistego** z dodatkiem **6 kg/m³** włókien o długości **60 mm**.

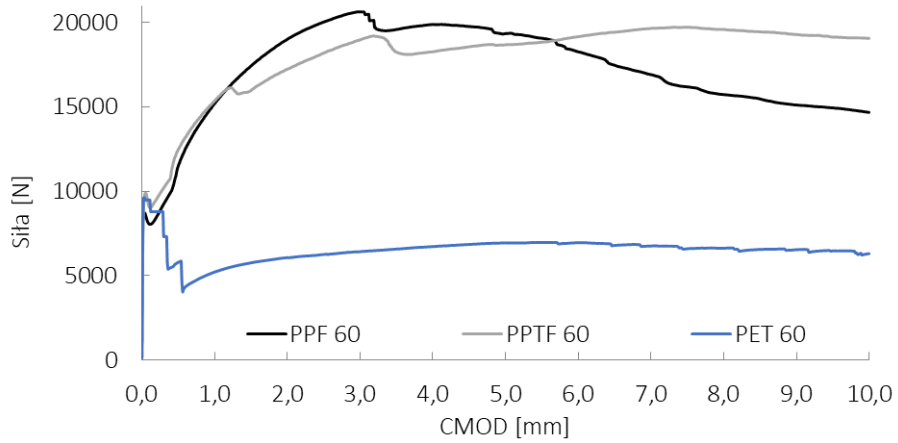
Matryca	Rodzaj włókna	$\sigma_{CMOD\ 0,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 2,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 5,0}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 7,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 10,0}$ [MPa]
400/1,6	PPF 60	0,7	1,0	1,0	0,9	0,8
	PPTF 60	1,4	1,6	1,6	1,5	1,4
	PET 60	0,4	0,8	0,9	0,8	0,8
450/1,2	PPF 60	1,5	2,3	2,7	2,7	2,5
	PPTF 60	1,3	2,4	2,9	3	2,9
	PET 60	0,7	1,1	1,3	1,4	1,4
450/0,8	PPF 60	1,6	2,8	3,4	3,2	3,0
	PPTF 60	1,8	2,7	3,2	3,2	3,0
	PET 60	1,1	0,8	1,0	1,0	1,0



Rysunek 12.22 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **60 mm** w ilości **10 kg/m³** w matrycy **400/1,6**



Rysunek 12.23 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **60 mm** w ilości **10 kg/m³** w matrycy **450/1,2**



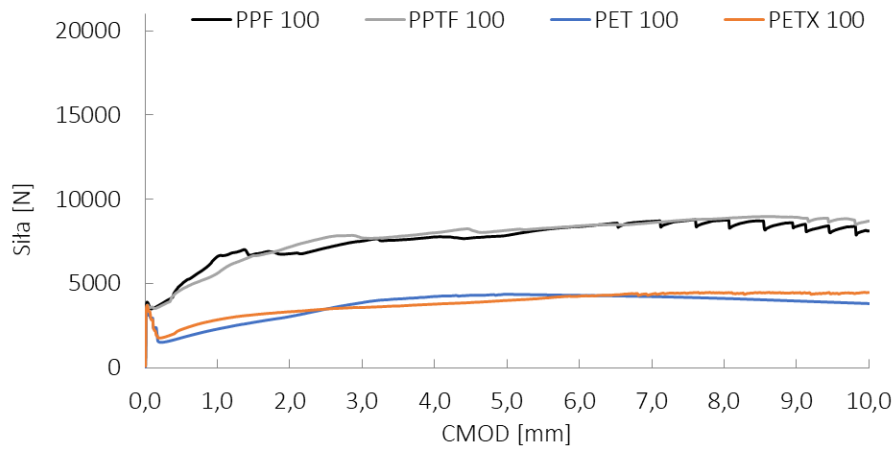
Rysunek 12.24 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **60 mm** w ilości **10 kg/m³** w matrycy **450/0,8**

Tabela 12.9 Właściwości mechaniczne fibrogruntobetonów z **gruntu niespoistego** z dodatkiem **10 kg/m^3** włókien o długości **60 mm**

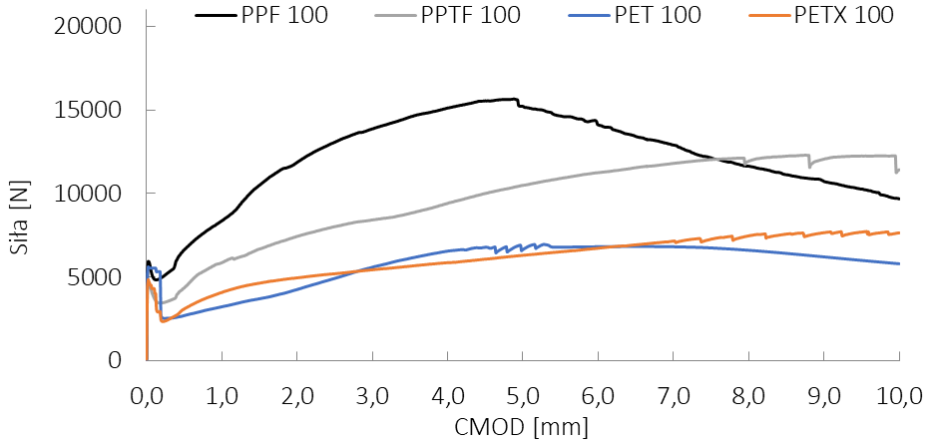
Matryca	Rodzaj włókna	Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]	σ_{LOP} [MPa]	σ_{MOR} [MPa]	$\sigma_{MOR} / \sigma_{LOP}$	G_{tot} [kJ/m^2]
400/1,6	PPF 60	4,6	1,2	2,4	2,0	3,97
	PPTF 60	3,3	1,1	2,1	1,9	3,61
	PET 60	6,1	1,2	1,4	1,2	2,52
450/1,2	PPF 60	8,9	1,6	2,9	1,8	4,56
	PPTF 60	8,2	1,6	3,4	2,1	5,73
	PET 60	10,8	1,8	2,7	1,5	4,47
450/0,8	PPF 60	18,4	2,5	6,0	2,4	8,79
	PPTF 60	17,3	2,8	5,7	2,0	9,69
	PET 60	20,3	2,8	2,0	0,7	3,32

Tabela 12.10 Wartości naprężeń pokrytycznych rejestrowanych przy rozwarciu rysy CMOD = 0,5 , 2,5 , 5,0 , 7,5 , 10,0 mm fibrogruntobetonów z **gruntu niespoistego** z dodatkiem **10 kg/m^3** włókien o długości **60 mm**

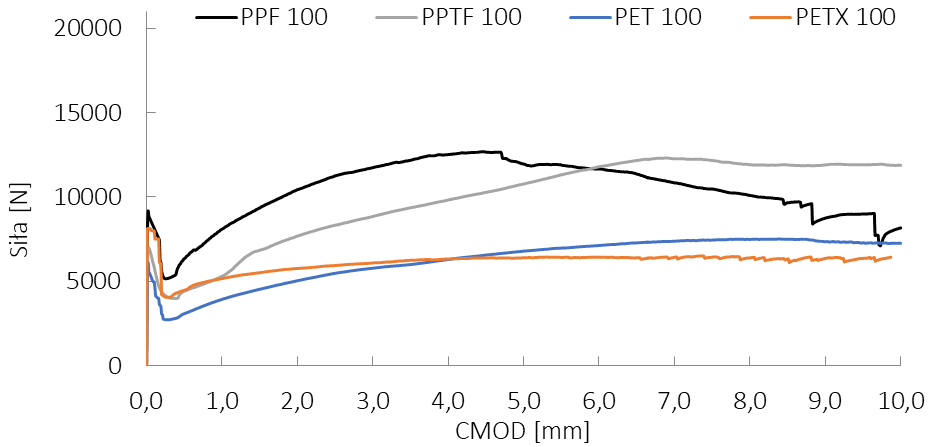
Matryca	Rodzaj włókna	$\sigma_{CMOD\ 0,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 2,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 5,0}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 7,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 10,0}$ [MPa]
400/1,6	PPF 60	2,0	2,3	2,3	2,1	2,0
	PPTF 60	1,6	2,0	2,1	2,1	2,0
	PET 60	0,8	1,3	1,4	1,5	1,5
450/1,2	PPF 60	2,1	2,6	2,9	2,7	2,4
	PPTF 60	2,0	3,0	3,3	3,4	3,3
	PET 60	1,4	2,2	2,6	2,7	2,7
450/0,8	PPF 60	3,3	5,8	5,6	4,7	4,2
	PPTF 60	3,6	5,2	5,4	5,7	5,5
	PET 60	1,8	1,7	1,9	1,8	1,8



Rysunek 12.25 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **100 mm** w ilości **6 kg/m³** w matrycy **400/1,6**



Rysunek 12.26 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **100 mm** w ilości **6 kg/m³** w matrycy **450/1,2**



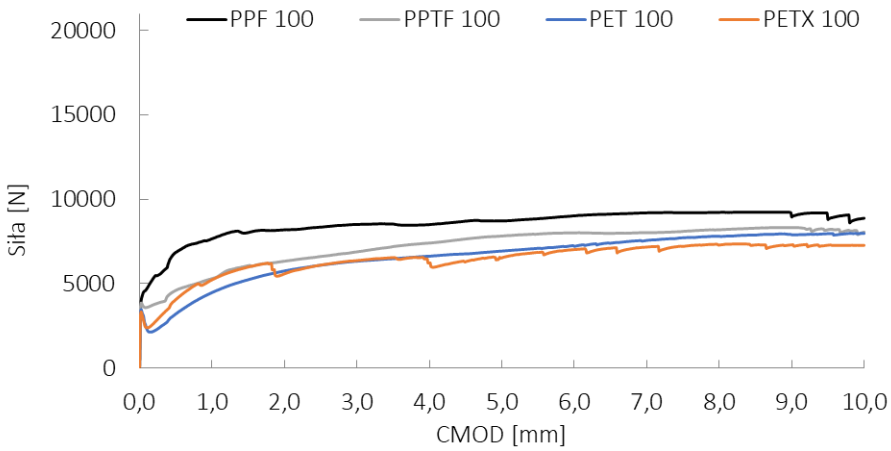
Rysunek 12.27 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **100 mm** w ilości **6 kg/m³** w matrycy **450/0,8**

Tabela 12.11 Właściwości mechaniczne fibrogruntobetonów z **gruntu niespoistego** z dodatkiem **6 kg/m^3** włókien o długości **100 mm**

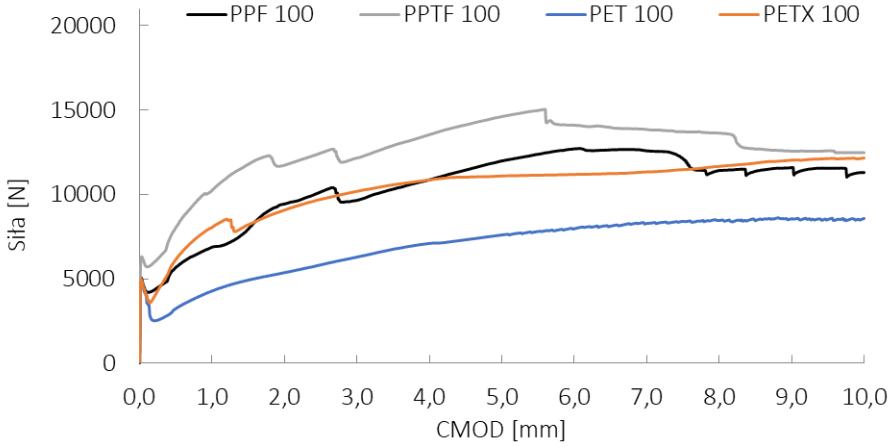
Matryca	Rodzaj włókna	Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]	σ_{LOP} [MPa]	σ_{MOR} [MPa]	σ_{MOR} / σ_{LOP}	G_{tot} [kJ/m^2]
400/1,6	PPF 100	5,9	1,1	2,5	2,3	4,15
	PPTF 100	5,4	1,1	2,4	2,2	3,91
	PET 100	4,3	0,9	1,3	1,4	2,04
	PETX 100	4,8	1,1	1,3	1,2	2,21
450/1,2	PPF 100	10,0	1,5	3,7	2,5	5,67
	PPTF 100	7,6	1,3	3,5	2,7	5,60
	PET 100	10,2	1,6	2,0	1,2	3,21
	PETX 100	7,1	1,4	2,2	1,6	3,91
450/0,8	PPF 100	18,8	2,6	3,7	1,4	5,40
	PPTF 100	16,5	2,0	3,5	1,8	5,50
	PET 100	20,0	1,8	2,2	1,2	3,45
	PETX 100	20,2	2,3	1,9	0,8	4,80

Tabela 12.12 Wartości naprężeń pokrytycznych rejestrowanych przy rozwarciu rysy CMOD = 0,5 , 2,5 , 5,0 , 7,5 , 10,0 mm fibrogruntobetonów z **gruntu niespoistego** z dodatkiem **6 kg/m^3** włókien o długości **100 mm**

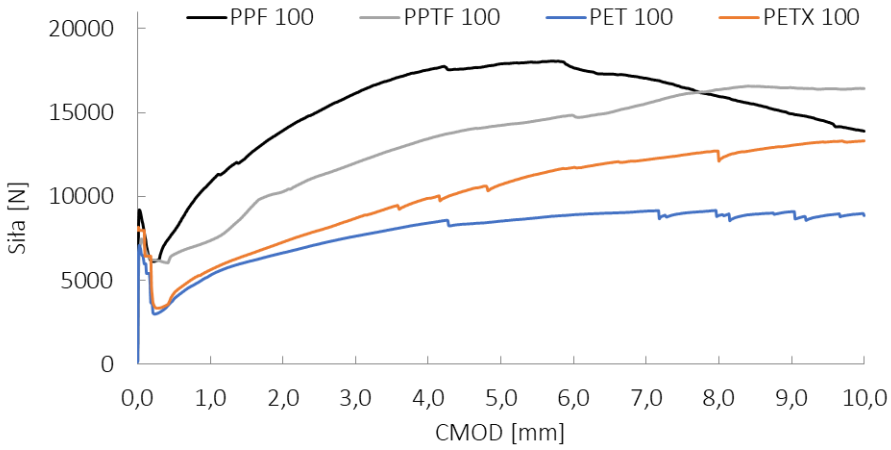
Matryca	Rodzaj włókna	$\sigma_{CMOD\ 0,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 2,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 5,0}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 7,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 10,0}$ [MPa]
400/1,6	PPF 100	1,4	2	2,3	2,5	2,3
	PPTF 100	1,3	1,9	2,2	2,3	2,3
	PET 100	0,5	1,0	1,3	1,2	1,1
	PETX 100	0,7	1,1	1,2	1,4	1,4
450/1,2	PPF 100	1,6	2,9	3,5	3,5	3,3
	PPTF 100	1,3	2,3	3,0	3,5	3,3
	PET 100	0,7	1,3	2,0	1,9	1,7
	PETX 100	1,0	1,7	2,1	2,4	2,5
450/0,8	PPF 100	1,8	3,2	3,4	3,0	2,4
	PPTF 100	1,3	2,4	3,1	3,5	3,4
	PET 100	0,9	1,6	2,0	2,1	2,1
	PETX 100	1,3	1,8	1,9	1,9	1,9



Rysunek 12.28 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **100 mm** w ilości **10 kg/m³** w matrycy **400/1,6**



Rysunek 12.29 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **100 mm** w ilości **10 kg/m³** w matrycy **450/1,2**



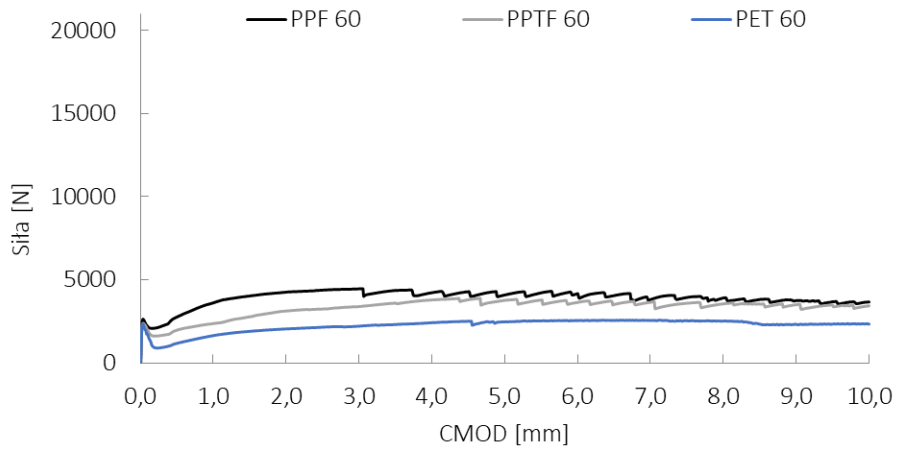
Rysunek 12.30 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **100 mm** w ilości **10 kg/m³** w matrycy **450/0,8**

Tabela 12.13 Właściwości mechaniczne fibrogruntobetonów z **gruntu niespoistego** z dodatkiem **10 kg/m^3** włókien o długości **100 mm**

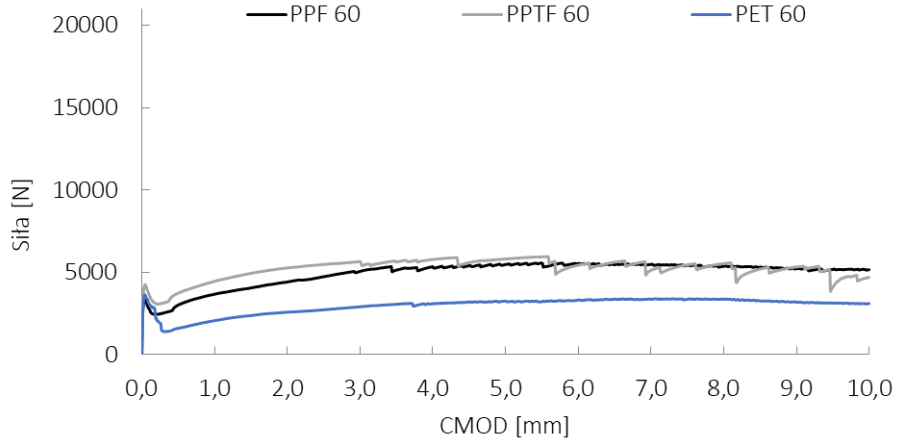
Matryca	Rodzaj włókna	Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]	σ_{LOP} [MPa]	σ_{MOR} [MPa]	σ_{MOR} / σ_{LOP}	G_{tot} [kJ/m^2]
400/1,6	PPF 100	6,2	1,3	2,7	2,1	4,56
	PPTF 100	5,2	1,0	2,6	2,6	4,21
	PET 100	4,8	1,0	2,3	2,3	3,68
	PETX 100	4,5	0,9	2,1	2,3	4,44
450/1,2	PPF 100	11,0	1,7	4,5	2,6	6,16
	PPTF 100	10,0	1,8	4,3	2,4	6,83
	PET 100	8,9	1,4	2,5	1,7	3,87
	PETX 100	8,3	1,4	3,5	2,5	5,79
450/0,8	PPF 100	18,8	2,6	5,2	2,0	7,63
	PPTF 100	15,7	2,1	4,8	2,2	7,45
	PET 100	17,1	2,0	2,6	1,3	4,41
	PETX 100	22,0	2,4	3,8	1,6	6,93

Tabela 12.14 Wartości naprężeń pokrytycznych rejestrowanych przy rozwarciu rysy CMOD = 0,5 , 2,5 , 5,0 , 7,5 , 10,0 mm fibrogruntobetonów z **gruntu niespoistego** z dodatkiem **10 kg/m^3** włókien o długości **100 mm**

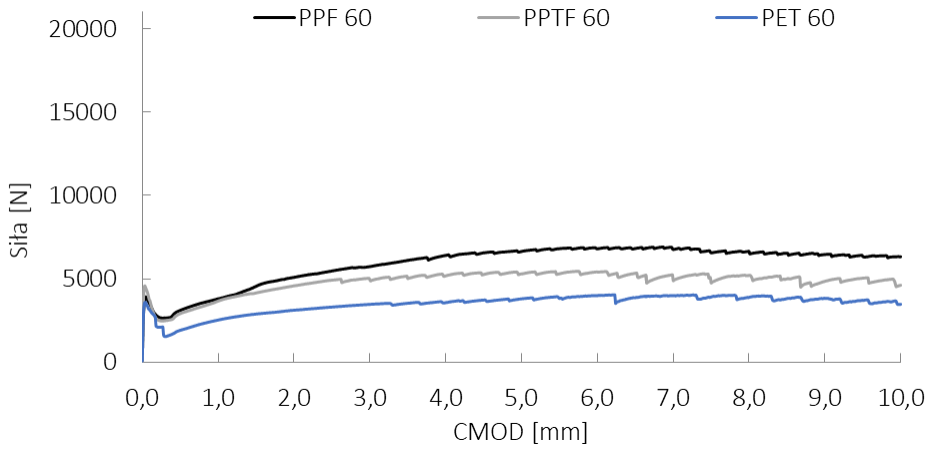
Matryca	Rodzaj włókna	$\sigma_{CMOD\ 0,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 2,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 5,0}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 7,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 10,0}$ [MPa]
400/1,6	PPF 100	2,0	2,4	2,5	2,7	2,6
	PPTF 100	1,3	2,2	2,4	2,5	2,5
	PET 100	0,9	1,8	2,0	2,2	2,3
	PETX 100	1,0	1,6	1,7	1,9	1,9
450/1,2	PPF 100	1,9	3,8	4,4	3,5	2,8
	PPTF 100	2,3	3,6	4,2	3,9	3,6
	PET 100	0,9	1,7	2,2	2,4	2,5
	PETX 100	1,7	2,8	3,2	3,3	3,5
450/0,8	PPF 100	2,3	4,4	5,2	4,8	4,0
	PPTF 100	1,9	3,2	4,1	4,6	4,7
	PET 100	1,1	2,1	2,5	2,6	2,6
	PETX 100	1,2	2,3	3,1	3,6	3,8



Rysunek 12.31 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **60 mm** w ilości **6 kg/m³** w matrycy **600/2,0**



Rysunek 12.32 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **60 mm** w ilości **6 kg/m³** w matrycy **600/1,4**



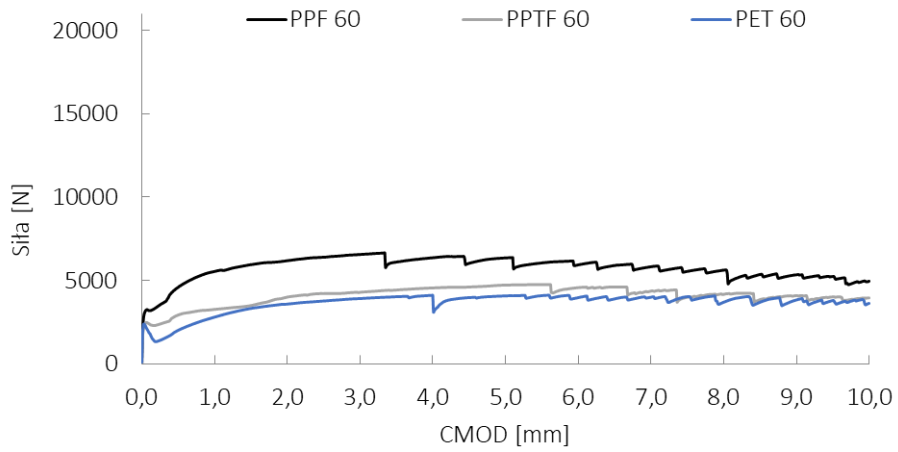
Rysunek 12.33 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **60 mm** w ilości **6 kg/m³** w matrycy **650/1,2**

Tabela 12.15 Właściwości mechaniczne fibrogruntobetonów z **gruntu spoistego** z dodatkiem **6 kg/m^3** włókien o długości **60 mm**

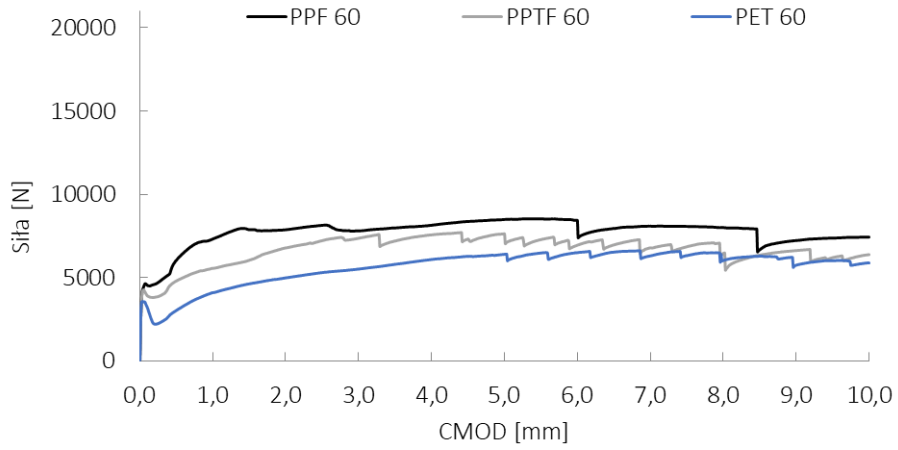
Matryca	Rodzaj włókna	Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]	σ_{LOP} [MPa]	σ_{MOR} [MPa]	σ_{MOR} / σ_{LOP}	G_{tot} [kJ/m^2]
600/2,0	PPF 60	4,4	0,8	1,3	1,7	2,03
	PPTF 60	5,1	0,7	1,1	1,6	1,78
	PET 60	4,3	0,7	0,7	1,1	1,22
600/1,4	PPF 60	6,7	1,0	1,6	1,6	2,64
	PPTF 60	7,8	1,2	1,7	1,4	2,90
	PET 60	8,9	1,1	1,1	1,0	1,59
650/1,2	PPF 60	8,2	1,1	2,0	1,8	3,18
	PPTF 60	9,7	1,3	1,6	1,2	2,80
	PET 60	11,8	1,0	1,2	1,1	1,85

Tabela 12.16 Wartości naprężeń pokrytycznych rejestrowanych przy rozwarciu rysy CMOD = 0,5 , 2,5 , 5,0 , 7,5 , 10,0 mm fibrogruntobetonów z **gruntu spoistego** z dodatkiem **6 kg/m^3** włókien o długości **60 mm**

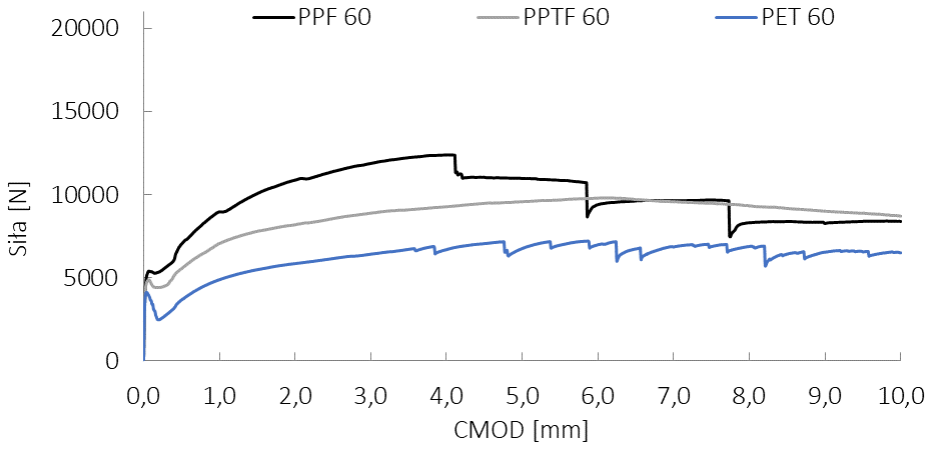
Matryca	Rodzaj włókna	$\sigma_{CMOD\ 0,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 2,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 5,0}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 7,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 10,0}$ [MPa]
600/2,0	PPF 60	0,8	1,3	1,2	1,1	1,0
	PPTF 60	0,6	0,9	1,1	1,0	1,0
	PET 60	0,3	0,6	0,7	0,7	0,7
600/1,4	PPF 60	0,9	1,4	1,6	1,6	1,5
	PPTF 60	1,1	1,6	1,7	1,6	1,4
	PET 60	0,5	0,8	0,9	1,0	0,9
650/1,2	PPF 60	0,9	1,6	1,9	1,9	1,8
	PPTF 60	0,8	1,4	1,5	1,4	1,3
	PET 60	0,6	1,0	1,1	1,1	1,0



Rysunek 12.34 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **60 mm** w ilości **10 kg/m³** w matrycy **600/2,0**



Rysunek 12.35 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **60 mm** w ilości **10 kg/m³** w matrycy **600/1,4**



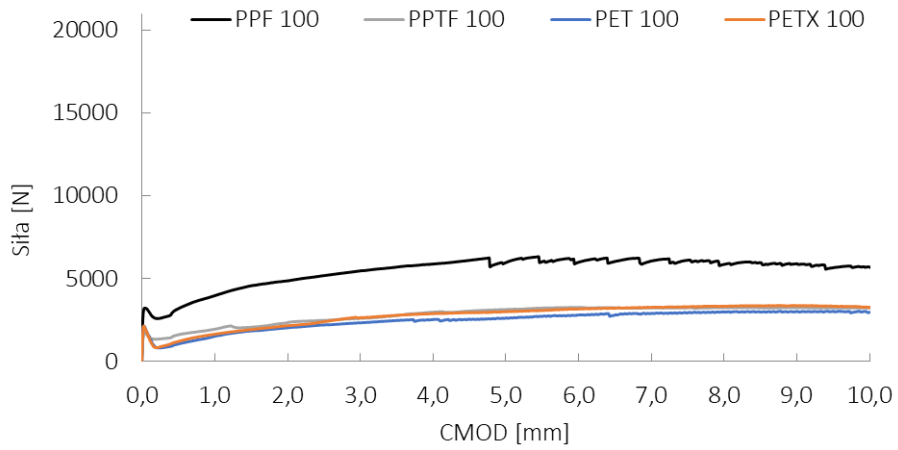
Rysunek 12.36 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **60 mm** w ilości **10 kg/m³** w matrycy **650/1,2**

Tabela 12.17 Właściwości mechaniczne fibrogruntobetonów z **gruntu spoistego** z dodatkiem **10 kg/m^3** włókien o długości **60 mm**

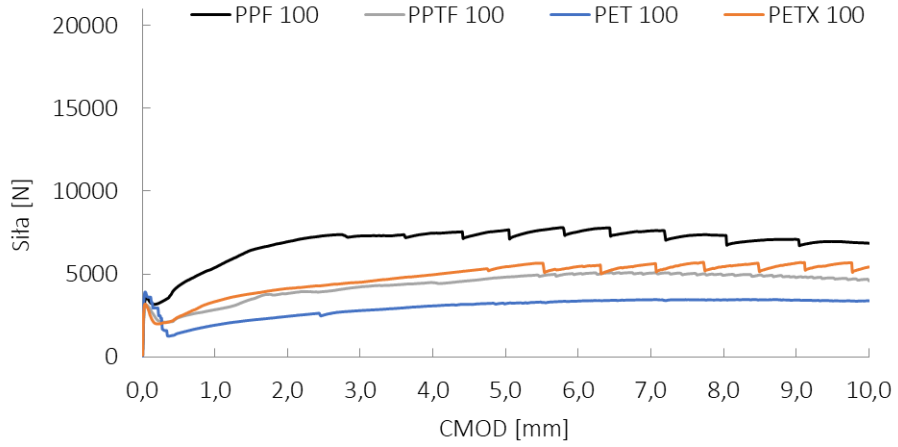
Matryca	Rodzaj włókna	Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]	σ_{LOP} [MPa]	σ_{MOR} [MPa]	σ_{MOR} / σ_{LOP}	G_{tot} [kJ/m^2]
600/2,0	PPF 60	4,7	0,9	1,9	2,0	3,09
	PPTF 60	4,0	0,7	1,4	1,9	2,28
	PET 60	4,6	0,7	1,2	1,8	2,01
600/1,4	PPF 60	8,7	1,3	2,5	1,8	4,25
	PPTF 60	9,2	1,2	2,3	1,8	3,65
	PET 60	9,0	1,0	1,9	1,8	3,01
650/1,2	PPF 60	12,2	1,5	3,6	2,4	9,72
	PPTF 60	9,5	1,3	2,8	2,2	4,59
	PET 60	12,2	1,2	2,1	1,8	3,44

Tabela 12.18 Wartości naprężeń pokrytycznych rejestrowanych przy rozwarciu rysy CMOD = 0,5 , 2,5 , 5,0 , 7,5 , 10,0 mm fibrogruntobetonów z **gruntu spoistego** z dodatkiem **10 kg/m^3** włókien o długości **60 mm**

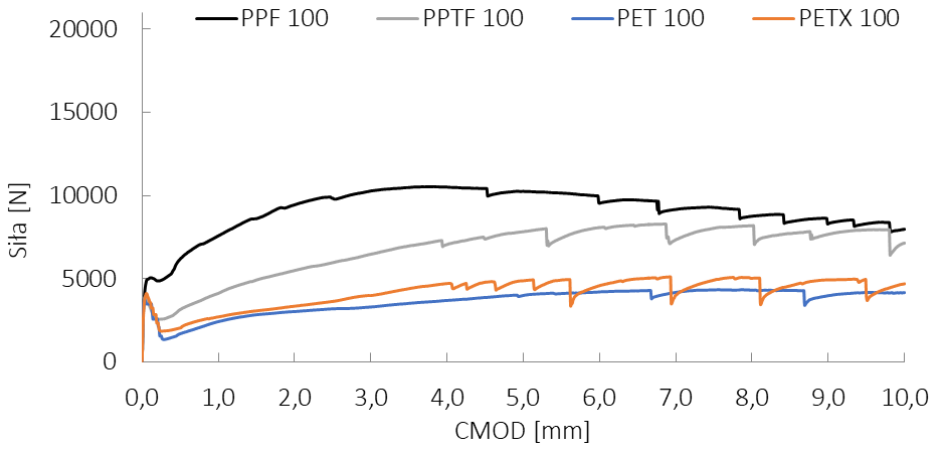
Matryca	Rodzaj włókna	$\sigma_{CMOD\ 0,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 2,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 5,0}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 7,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 10,0}$ [MPa]
600/2,0	PPF 60	1,3	1,8	1,8	1,6	1,4
	PPTF 60	0,9	1,2	1,4	1,2	1,1
	PET 60	0,6	1,1	1,2	1,2	1,0
600/1,4	PPF 60	1,7	2,3	2,4	2,3	2,1
	PPTF 60	1,4	2,1	2,2	2,0	1,8
	PET 60	0,9	1,5	1,9	1,8	1,7
650/1,2	PPF 60	2,0	3,3	3,2	2,8	2,4
	PPTF 60	1,6	2,5	2,8	2,7	2,5
	PET 60	1,1	1,8	1,9	2,0	1,9



Rysunek 12.37 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **100 mm** w ilości **6 kg/m³** w matrycy **600/2,0**



Rysunek 12.38 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **100 mm** w ilości **6 kg/m³** w matrycy **600/1,4**



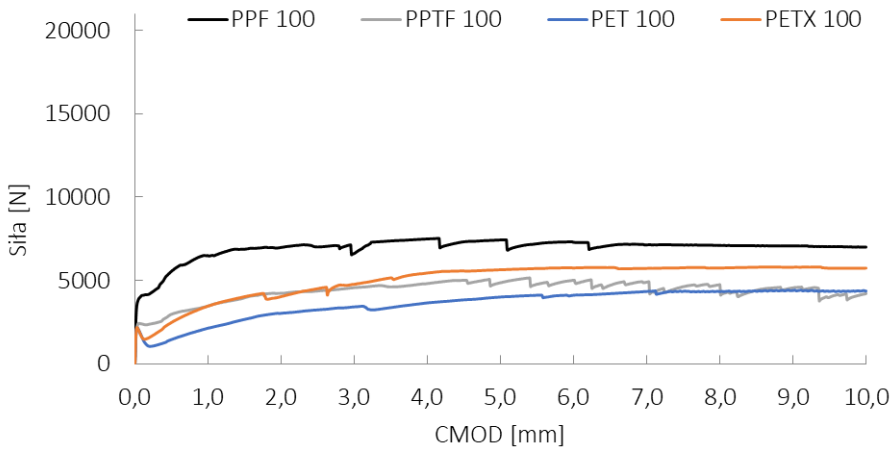
Rysunek 12.39 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **100 mm** w ilości **6 kg/m³** w matrycy **650/1,2**

Tabela 12.19 Właściwości mechaniczne fibrogruntobetonów z **gruntu spoistego** z dodatkiem **6 kg/m³** włókien o długości **100 mm**

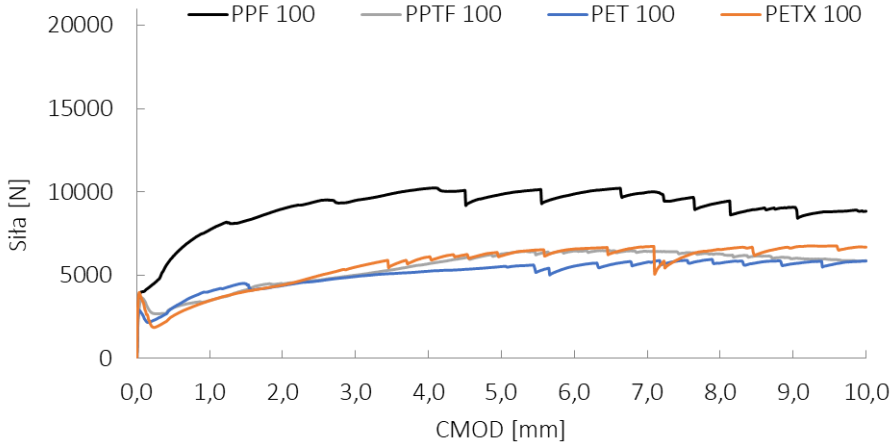
Matryca	Rodzaj włókna	Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]	σ_{LOP} [MPa]	σ_{MOR} [MPa]	$\sigma_{MOR} / \sigma_{LOP}$	G_{tot} [kJ/m²]
600/2,0	PPF 100	5,6	0,9	1,8	2,0	2,92
	PPTF 100	4,7	0,5	0,9	1,9	1,55
	PET 100	4,2	0,6	0,9	1,5	1,39
	PETX 100	4,3	0,6	1,0	1,6	1,59
600/1,4	PPF 100	9,7	1,0	2,3	2,3	3,62
	PPTF 100	8,1	0,9	1,5	1,6	3,34
	PET 100	9,8	0,9	1,0	1,1	1,63
	PETX 100	10,4	0,9	1,6	1,8	2,66
650/1,2	PPF 100	11,5	1,4	3,1	2,2	4,80
	PPTF 100	9,8	1,1	2,4	2,1	6,10
	PET 100	10,4	1,1	1,3	1,2	2,00
	PETX 100	12,3	1,2	1,5	1,2	2,32

Tabela 12.20 Wartości naprężeń pokrytycznych rejestrowanych przy rozwarciu rysy CMOD = 0,5 , 2,5 , 5,0 , 7,5 , 10,0 mm fibrogruntobetonów z **gruntu spoistego** z dodatkiem **6 kg/m³** włókien o długości **100 mm**

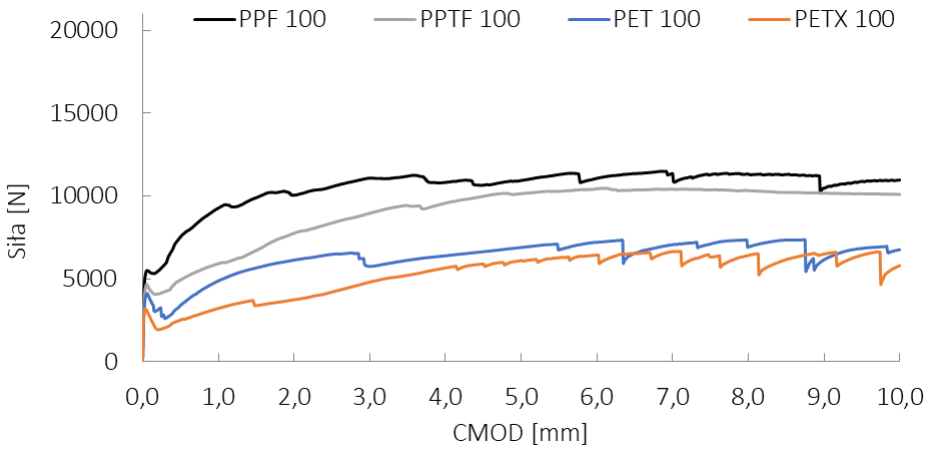
Matryca	Rodzaj włókna	$\sigma_{CMOD\ 0,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 2,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 5,0}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 7,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 10,0}$ [MPa]
600/2,0	PPF 100	0,9	1,5	1,7	1,8	1,6
	PPTF 100	0,5	0,7	0,9	0,9	0,9
	PET 100	0,3	0,6	0,8	0,9	0,9
	PETX 100	0,3	0,7	0,9	0,9	0,9
600/1,4	PPF 100	1,2	2,1	2,2	2,1	2,0
	PPTF 100	0,7	1,1	1,4	1,5	1,3
	PET 100	0,4	0,7	0,9	1,0	1,0
	PETX 100	0,7	1,2	1,6	1,6	1,6
650/1,2	PPF 100	1,8	2,8	3,0	2,7	2,3
	PPTF 100	0,9	1,7	2,3	2,3	2,1
	PET 100	0,5	0,9	1,2	1,2	1,2
	PETX 100	0,6	1,0	1,4	1,4	1,4



Rysunek 12.40 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **100 mm** w ilości **10 kg/m³** w matrycy **600/2,0**



Rysunek 12.41 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **100 mm** w ilości **10 kg/m³** w matrycy **600/1,4**



Rysunek 12.42 Wykresy zależności siła – CMOD dla włókien o dł. **100 mm** w ilości **10 kg/m³** w matrycy **650/1,2**

Tabela 12.21 Właściwości mechaniczne fibrogruntobetonów z **gruntu spoistego** z dodatkiem **10 kg/m^3** włókien o długości **100 mm**

Matryca	Rodzaj włókna	Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]	σ_{LOP} [MPa]	σ_{MOR} [MPa]	σ_{MOR} / σ_{LOP}	G_{tot} [kJ/m^2]
600/2,0	PPF 100	5,6	1,1	2,2	1,9	2,31
	PPTF 100	4,8	0,7	1,5	2,1	2,51
	PET 100	4,4	0,6	1,3	2,1	2,10
	PETX 100	4,6	0,6	1,7	2,7	3,12
600/1,4	PPF 100	10,1	1,2	2,9	2,5	5,84
	PPTF 100	9,0	1,0	1,9	1,8	2,93
	PET 100	9,0	0,8	1,7	2,1	2,86
	PETX 100	9,8	1,1	1,9	1,7	3,14
650/1,2	PPF 100	10,0	1,6	3,3	2,1	5,67
	PPTF 100	11,2	1,3	3,0	2,2	4,92
	PET 100	10,3	1,2	2,1	1,8	4,11
	PETX 100	12,6	0,9	1,9	2,1	3,01

Tabela 12.22 Wartości naprężeń pokrytycznych rejestrowanych przy rozwarciu rysy CMOD = 0,5 , 2,5 , 5,0 , 7,5 , 10,0 mm fibrogruntobetonów z **gruntu spoistego** z dodatkiem **10 kg/m^3** włókien o długości **100 mm**

Matryca	Rodzaj włókna	$\sigma_{CMOD\ 0,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 2,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 5,0}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 7,5}$ [MPa]	$\sigma_{CMOD\ 10,0}$ [MPa]
600/2,0	PPF 100	1,6	2,0	2,1	2,0	2,0
	PPTF 100	0,9	1,3	1,4	1,3	1,2
	PET 100	0,4	0,9	1,2	1,3	1,3
	PETX 100	0,7	1,3	1,6	1,7	1,7
600/1,4	PPF 100	1,8	2,7	2,8	2,8	2,5
	PPTF 100	0,9	1,4	1,8	1,8	1,7
	PET 100	0,9	1,3	1,6	1,7	1,7
	PETX 100	0,7	1,4	1,8	1,8	1,9
650/1,2	PPF 100	2,2	3,0	3,1	3,3	3,0
	PPTF 100	1,4	2,4	2,9	3,0	2,9
	PET 100	1,0	1,9	2,0	2,0	1,9
	PETX 100	0,7	1,2	1,8	1,8	1,7

ABSTRACT

Soil-cement is currently used as a material with many applications. An increasingly common use of this material is the construction of retaining structures for deep excavations. Soil-cement, however, is a material characterised by a low level of tensile strength, tends to be brittle, and its pseudo-plastic deformation is relatively low. Therefore, there is a need for reinforcement, mainly due to the tensile stress. One method of increasing the tensile strength of soil-cement is to use fibres as dispersed reinforcement. The composite created in this way is called fibre-reinforced soil-cement. The purpose of introducing fibres into the soil-cement is to increase its flexural tensile strength as well as to enable the soil-cement structure to retain working properties after cracking in the post-buckling state.

The dissertation first evaluates the effect of changing the compositions of soil-cement on the properties of soil-cement mixtures and hardened composites. This evaluation enabled the identification of the relationship between the composition of the mixture and the properties of both the mixture and the hardened material, which are necessary for the design of compositions of soil-cement and fibre-reinforced soil-cement from two types of native soil: cohesive – clay, and non-cohesive – medium sand. This was followed by an analysis of the interaction of selected soil-concrete matrices with synthetic fibres. Four types of fibres, differing in material and geometry, were evaluated for adhesion by conducting pull-out tests. Single polypropylene fibrillated tapes (PPTF), bundles of rolled five polypropylene fibrillated tapes (PPF), corrugated fibres made from waste polyethylene terephthalate with round cross-section (PET), and corrugated PET fibres with cross-shaped cross-section (PETX) were selected for the study. Conducting this analysis enabled the selection of fibre lengths, used in further studies of fibre-reinforced soil-cement composites, concerning the effectiveness of dispersed reinforcement. 60 to 100 mm was adopted as the effective length range of plastic fibres used to reinforce soil-cement. In order to research the effectiveness of dispersed reinforcement, based on the guidelines of the documents devoted to testing fibre-reinforced concrete, a test methodology was developed, adapted to the characteristics of fibre-reinforced soil-cement. The completed tests enabled the evaluation of the performance of selected types of synthetic fibres and led to the determination of the range of their quantitative dosage level, which is from 6 kg/m^3 to 10 kg/m^3. It was also confirmed that the use of dispersed reinforcement in the soil-cement causes an increase in their flexural tensile strength and results in a pseudo-plastic type of failure of the tested composites. The effectiveness of the obtained reinforcement depends on the type, length, and number of fibres. A more favourable reinforcement effect was obtained in composites with polypropylene fibres than in composites with polyester fibres. Improved reinforcement efficiency was also affected by a change in fibre length from 60 mm to 100 mm and a change in fibre dosage from 6 kg/m^3 to 10 kg/m^3. The next stage of the work

was to evaluate the effect of dispersed reinforcement on the elastic modulus of fibre-reinforced soil-cement composites made with cohesive soil. A positive effect on the $E_{c,s}$ value was achieved only by using PETX fibres, which have a high elastic modulus and a geometry that provides adequate stiffness. The last part of the dissertation is devoted to the evaluation of the properties of soil-cement and fibre-reinforced soil-cement in an existing structure made with trench mixing technology. The obtained level of compressive strength in the structure was close to the level achieved at the laboratory scale. The evaluated homogeneity of the properties of soil-cement and fibre-reinforced soil-cement, although less than the homogeneity typical for structural concrete, can be considered satisfactory.

The research carried out within the framework of the dissertation allowed to achieve the set objectives and confirmed the validity of the theses. The possibility of exploring new directions for the use of soil-cement and fibre-reinforced soil-cement as modern construction materials was identified, as well as the need to continue further research in at least some areas.