

MARIAN ŁUPIEŻOWIEC*

WPLYW SZTYWNYCH GEOMATERACY
NA ODKSZTAŁCALNOŚĆ PODŁOŻA GRUNTOWEGO
POD NAWIERZCHNIE DROGOWETHE INFLUENCE OF THE RIGID GEOMATRIXES
ON STIFFNESS OF THE GROUND UNDER THE ROAD
PAVEMENTS

Streszczenie

W artykule przedstawiono problem zastosowania sztywnej konstrukcji geomateraca składającego się z warstw zagęszczonego kruszywa zbrojonych sztywnym georusztem. Konstrukcje te stosuje się w celu wzmocnienia podłoża pod nasypy i konstrukcje nawierzchni w budownictwie drogowym. Szczegółowo omówiono wymagania stawiane podłożu gruntowemu pod nawierzchnie oraz możliwości ich uzyskania z wykorzystaniem georusztu. Analizę wpływu wzmocnienia na charakterystyki odkształceniowe podłoża wykonano na podstawie wyników modelowania z wykorzystaniem MES badania próbnego obciążenia płytą VSS. Przeprowadzono dyskusję przyjętych wartości parametrów modelu oraz uzyskiwanych na ich podstawie wyników.

Słowa kluczowe: georuszty, geomaterace, wzmocnienie podłoża pod nawierzchnie drogowe

Abstract

In paper, the problem of using the stiff structures of geomatrix was shown. The geomatrix is composed with layers of condensed aggregate and the geogrid reinforcement. These structures are used in order to strengthening of subsoil under embankments and pavement structures in highway engineering. The discussion of detailed requirements for subsoil under road structures and methods which allow to obtain them was performed. Numerical analysis of the influence of the geomatrixes on the strain characteristics of road subsoil was done using FEM modelling of trial loads the VSS plate. The parameters values taken into calculations and obtained results was discussed.

Keywords: geogrid, geomatrix, strengthening of subsoil under road pavements

* Dr inż. Marian Łupieżowiec, Katedra Geotechniki, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska.

1. Wstęp

W celu właściwego wykonania poszczególnych warstw nawierzchni drogowych, uprzednio należy właściwie przygotować podłoże gruntowe. Musi ono zapewniać odpowiednią sztywność (w żargonie drogowym zwaną „nośnością”). Takie podłoże zapewni odpowiedni komfort jazdy, a przede wszystkim trwałość i bezpieczeństwo użytkowania nawierzchni drogowej. Obciążenia przekazywane przez poruszające się pojazdy na konstrukcję nawierzchni odznaczają się przede wszystkim dużą koncentracją naprężeń w miejscach styku ogumienia kół z nawierzchnią, a ponadto są to obciążenia dynamiczne. Do ich właściwego i bezpiecznego przejścia projektuje się odpowiednie konstrukcje, które jednak wymagają właściwego podłoża. Przyczyną powstawania kolein oraz przedwczesnego zużycia się drogi może być zbyt duża odkształcalność podłoża gruntowego lub też zbyt duża różnica w odkształcalności pierwotnej i wtórnej. Dlatego też właściwe zdefiniowanie wymagań odnośnie do jakości podłoża, a w przypadku braku możliwości ich osiągnięcia – wykonanie odpowiednich wzmocnień, będzie warunkiem koniecznym odpowiedniego zaprojektowania, a w przyszłości także odpowiedniego przygotowania podłoża.

Jednym ze sposobów odpowiedniego przygotowania podłoża pod konstrukcje nawierzchni drogowych jest wykonanie materacy z kruszywa zbrojonych wkładkami z geosyntetyków. Zadaniem tego rodzaju konstrukcji wzmacniających jest zapewnienie odpowiednio dużej sztywności podłoża, aby ułożona na nim nawierzchnia drogowa nie ulegała nadmiernym deformacjom, które bezpośrednio prowadzić będą do trwałych jej deformacji (np. koleiny) lub nawet spękań. Należy ponadto zwrócić szczególną uwagę, że praca zabudowanego geosyntetyku na rozciąganie pozostaje w ramach małych odkształceń, które zwykle nie przekraczają 0,5%. O ile stosowanie tych rozwiązań jest powszechne we współczesnym budownictwie drogowym, to wciąż brakuje jednoznacznych metod projektowania wzmocnień, które mogłyby być stosowane przez inżynierów. W artykule rozważane będą wpływy poszczególnych parametrów geomateraca na uzyskiwane sztywności wzmocnionego podłoża. Analizy, które będą symulować badania odbiorcze wykonywane przez próbne obciążenia płytą VSS, prowadzone będą z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

2. Wymagania stawiane podłożu gruntowemu pod nawierzchnie

Odpowiednia jakość i trwałość to wymagania stawiane każdemu z wytwarzanych produktów w obecnych czasach. W przypadku konstrukcji nawierzchni o jej jakości świadczyć będzie charakterystyka sprężysta jej pracy pod dużym skupionym obciążeniem dynamicznym pochodzącym od przejazdu pojazdów, a także w miarę możliwości jak największa odporność na trwałe deformacje uwidaczniające się w postaci kolein. Pierwszy z powyższych czynników decydować będzie o komforcie jazdy. Zbyt duża odkształcalność nawierzchni powodować będzie, oprócz redukcji dynamiki ruchu pojazdów oraz zmniejszenia bezpieczeństwa jazdy, także większe zużywanie się konstrukcji drogowej. W przypadku gdy konstrukcja wykonana jest z materiałów kruchych, będzie to prowadziło do pęknięć, a przy materiałach podatnych – do powstawania kolein. Dlatego też obydwa powyższe wymagania stanowiąc będą o jakości wykonania nawierzchni. Przekładając te wymogi na warunki odbiorowe, żąda się uzyskania odpowiedniej wartości wtórnego modułu odkształcenia E_2 (zapewnia uzyskanie odpowiedniej sztywności) oraz ogranicza się wartość tzw. wskaźnika odkształcenia I_0 ,

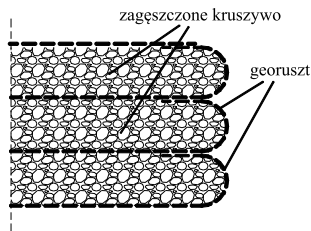
który definiowany jest jako iloraz modułu E_2 do E_1 (por. [7, 8]). Badaniami odbiorczymi są w przeważającej większości próbne obciążenia VSS realizowane przez obciążenie podłoża sztywną stalową płytą o średnicy 30 cm. Ze względu na konieczność znacznego przyspieszenia prowadzonych badań, niekiedy korzysta się z obciążenia tzw. płytą dynamiczną, która zapewnia jedynie uzyskanie tzw. modułu dynamicznego E_{vd} . Aby tego typu badanie mogło być dopuszczone do stosowania, konieczne jest wpisanie odpowiednich wymagań do właściwych specyfikacji. Porównywanie odpowiednio przeliczonych wartości modułów dynamicznych z wartościami E_2 (np. $E_2 = 2 E_{vd}$), choć często stosowane w praktyce, musi jednak zostać uznane za niewłaściwe. Tutaj należy zauważyć, że wielkość mierzona przez badanie płytą dynamiczną odpowiada raczej pierwotnemu modułowi odkształcenia (E_1), co nietrudno zauważyć choćby po wynikach uzyskiwanych z badań. Ponadto chęć porównywania wyników uzyskanych z badań dynamicznych z wartościami E_2 wynika również z tradycyjnego podejścia drogowców do wymagań stawianych podłożu gruntowemu i nawierzchni drogowej.

Omawiając wymagania i warunki odbioru należy także krytycznie odnieść się do żargonowego nazewnictwa funkcjonującego w budownictwie drogowymi, a będącym w sprzeczności z wielkościami zdefiniowanymi w ramach mechaniki gruntów. Otóż wartość E_2 nazywa się „nośnością”, mimo iż wielkość ta decyduje o sztywności (sprężystości) podłoża. Nośność w mechanice konstrukcji oznacza minimalne obciążenie, które powoduje zniszczenie konstrukcji lub jej elementu. Tak przedstawiona definicja stoi w oczywistej sprzeczności z jej żargonowym stosowaniem w drogownictwie. Podobnie wielkość I_0 błędnie bywa uznawana jako synonim zagęszczenia gruntów. Oczywiście w przypadku gruntów ziarnistych taka proporcjonalność jest obserwowana, jednak gdy we wbudowywanych warstwach lub gruncie podłoża znajdują się przeważnie grunty spoiste, to wymagając uzyskania niskiej wartości I_0 , powinno się mówić o skonsolidowaniu ośrodka gruntowego, a nie o jego zagęszczeniu. Oczywiście wtedy zabiegi wykonawców polegające na zagęszczaniu z użyciem walców, szczególnie przy dodatkowym stosowaniu wibracji, mogą dawać skutek odwrotny do założonego. Ponadto czasami zdarza się, że mimo uzyskania bardzo wysokich wartości (często znacznie ponad 100 MPa) obydwu modułów E_1 i E_2 , tak przygotowane podłoże nie jest odbierane właśnie ze względu na wartość wskaźnika I_0 ponad tę, którą dopuszczają dokumenty kontraktowe. W tym przypadku oczywiście nie może być mowy o powstawaniu kolein, z którego wynika ograniczenie na I_0 . Wtedy sztywne trzymanie się zapisów w dokumentach może świadczyć jedynie o nieznanym własności mechanicznych ośrodka gruntowego.

W świetle powyższych rozważań należy stwierdzić, że dla podłoża gruntowego (tutaj nie rozważa się warstw nawierzchni drogowej), parametrem najlepiej opisującym jego własności mechaniczne pod kątem przejmowania obciążeń jest wartość E_1 , czyli pierwotny moduł odkształcenia z badań płytą VSS, względnie wartość E_{vd} z badania płytą dynamiczną. Wielkości te świadczyć będą o odpowiedzi podłoża na przejmowane obciążenie oraz powstałych z tego powodu deformacji i osiadań. Oczywiście badania te dają odpowiedź jedynie odnośnie do stanu podłoża do głębokości 0,5–0,6 m. Rozpoznanie go na większej głębokości wymaga użycia innych metod, np. sondowań, badań presjometrycznych, dylatometrycznych, wielko-wymiarowych próbných obciążeń itp. Natomiast wymaganie odnośnie do wartości modułu E_2 powinno być w zasadzie ograniczone jedynie do warstw konstrukcyjnych nawierzchni drogowej.

3. Zastosowanie geomateracy w celu usztywnienia podłoża

Aby zwiększyć sztywność podłoża, na którym formowany będzie nasyp drogowy lub też wykonywana nawierzchnia, bardzo często wykonuje się konstrukcje wzmacniające w postaci geomateraców (por. rys. 1). Składają się one z silnie zagęszczonej warstwy kruszywa o grubości ok. 30 cm, która z góry i dołu skrzepowana jest geosyntetykiem w postaci sztywnego georusztu [3]. Alternatywnie w tym celu wykorzystywane są również geosiatki wstępnie naciągnięte. Na potrzeby niniejszego artykułu pominięto niekiedy stosowany szczegółowy podział tego rodzaju konstrukcji na materace, półmaterace ćwiermaterace itp., gdyż w dalszej części wykonane symulacje i analizy nie będą dotyczyć efektów związanych z pracą tych konstrukcji na ich brzegach czy krawędziach. Zasada działania konstrukcji geomateraców polega na przejmowaniu skupionych dużych nacisków i w miarę równomierne ich rozkładanie na większą powierzchnię. Dzięki temu górna powierzchnia geomateraca posadowiona nawet na słabym podłożu może odznaczać się znacznie lepszymi własnościami wytrzymałościowo-deformacyjnymi. Często możliwy wtedy jest przejazd ciężkiego pojazdu, który poruszając się po niewzmocnionym podłożu, najprawdopodobniej ugrzęzłaby w nim. Ponadto obecność materaca umożliwia zbudowanie dolnych warstw nasypu lub nawierzchni. Bardzo często podczas budowy drogi podłoże jest na tyle słabe, że mimo zastosowania odpowiedniego materiału nie ma możliwości jego prawidłowego zabudowania i odpowiedniego zagęszczenia, właśnie ze względu na zbyt dużą odkształcalność podłoża. Zastosowanie omawianych materacy (niekiedy stosowane są konstrukcje wielokrotne, powstałe przez ułożenie jednego na drugim) często umożliwia prawidłowe wykonanie zaprojektowanych warstw nawierzchni.

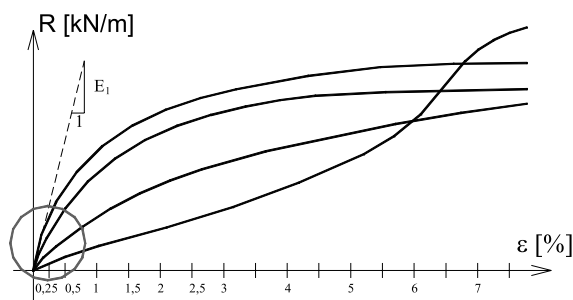


Rys. 1. Elementy składowe geomateraca

Fig. 1. Elements of geomatrix

Zagęszczone kruszywo geomateraca jest najbardziej istotnym elementem składowym opisywanej konstrukcji wzmacniającej. Zapewnia ono przejmowanie naprężeń ściskających i ścinających, które dominują w przejmowaniu obciążeń przez ośrodek gruntowy. Szczególnie ważna jest wytrzymałość na ścinanie, która warunkowana jest wysokim kątem tarcia wewnętrznego materiału zastosowanego jako kruszywo do geomateracy. Istotne jest, aby stosowany był materiał gruboziarnisty, pozwalający się dobrze zagęścić. Nie mniej ważny jest również geosyntetyk, którego rolą jest przejmowanie naprężeń rozciągających występujących w konstrukcji rozkładającej naciski na słabe podłoże. Najważniejszą cechą mechaniczną geosyntetyku jest tutaj jego sztywność w zakresie odkształceń występujących podczas pracy materaca, którą można oszacować w przedziale 0–0,5%. Większe odkształcenia występować mogą jedynie podczas procesu zagęszczania kruszywa, z tym że i tak prawie

nigdy nie przekraczają 2–3%. Należy tutaj podkreślić, że stawianie wymagań odpowiadającym większym odkształceniom georusztu lub geosiatki, w tym określanie ich wytrzymałości na rozciąganie nie odnosi się bezpośrednio do warunków, w jakich będą się znajdowały podczas rzeczywistej pracy. Nietrudno zauważyć, że w przypadku powstania w podłożu tak znacznych odkształceń, znacznie wcześniej doszłoby do powstania awarii, a przedmiotowa konstrukcja przestałaby pełnić swoją rolę.



Rys. 2. Charakterystyka siła – odkształcenie dla typowych georusztów lub geosiatek (podano za [4])

Fig. 2. Force – strain characteristic for typical geogrid or geonet (given by [4])

Projektując i wykonując geomaterace na słabym podłożu należy przede wszystkim pamiętać, że elementy zbrojące potrzebne są głównie podczas zagęszczania warstwy kruszywa, która będzie w przyszłości przenosić obciążenia. Ogólnie zastosowanie sztywnego georusztu pozwoli na redukcję grubości kruszywa, która w przeciwnym wypadku musiałaby być bardzo duża. Natomiast w czasie przyszłej pracy konstrukcji, po całkowitym wykonaniu konstrukcji nawierzchni, siła w geosyntetyku jest niewielka. Wynika to stąd, że przy odkształceniach w podłożu pod obciążeniem wynikającym z eksploatacji, które mają wartość rzędu kilku dziesiątych procenta, siła w geosyntetyku wyniesie od kilku do kilkunastu kiloniuutonów na każdy metr jego szerokości (por. rys. 2, [4]). Tutaj mamy do czynienia z tzw. sterowaniem odkształceniowym procesu, które polega na tym, że siła w elemencie zbrojącym wynika z jego rozciągnięcia. Jest to odwrotna sytuacja niż występująca przy badaniach laboratoryjnych produktu, gdzie siłę rozciągającą generuje się przez zawieszenie odpowiednich ciężarów. Należy zauważyć, że decydującym parametrem do projektowania tego rodzaju konstrukcji powinna być sztywność w początkowym zakresie charakterystyki siła–wydłużenie, natomiast własności odnoszące się do wytrzymałości, która dla wszystkich produktów występuje przy rozciągnięciu ponad 5–10%, a także własności reologiczne zastosowanego materiału, uwidaczniające się przy większym wyężeniu materiału, nie mają w przedmiotowym zagadnieniu większego znaczenia.

4. Modelowanie pracy geomateraca w ujęciu MES

Opisując zachowanie się omawianej konstrukcji geomateraca, należy ująć zarówno jego dużą sztywność wynikającą z obecności zagęszczonej warstwy kruszywa, a także możliwość przenoszenia naprężeń rozciągających poprzez zabudowany w konstrukcję sztywne

georuszt. Warstwa kruszywa modelowana będzie przez zastosowanie elementów kontynualnych – czterowęzłowych czworokątów w analizach 2D oraz ośmiowęzłowych sześciokątów w 3D. Elementy te są identyczne jak pozostałe opisujące ośrodek gruntowy. Niektóre systemy MES umożliwiają wykorzystanie elementów bardziej zaawansowanych, o większej liczbie węzłów i wyższym stopniu aproksymacji analizowanych wielkości (przemieszczeń, odkształceń, naprężeń itp.). Własności materiałowe warstwy kruszywa opisywane będą z wykorzystaniem modelu sprężysto-idealnie plastycznego z warunkiem Coulomba-Mohra. Do analiz numerycznych należy przyjąć wysoką wartość modułu odkształcenia (modułu sprężystości), która wynika zarówno z własności samego materiału (ostrokrawędzisty, zapewniający klinowanie się ziaren i dużą odporność na przykładane obciążenia), jak i jego silne skrępowanie geosyntetykiem. Ponadto kruszywo odznacza się także wysokimi parametrami wytrzymałościowymi. O ile duża, często przekraczająca 40° , wartość kąta tarcia wewnętrznego nie budzi wątpliwości, to wyjaśnienia wymaga przyjęta kohezja, która niekiedy osiąga kilkanaście do kilkudziesięciu kPa. Zasadność założenia tak wysokiej wartości, pomimo występowania gruntu niespoistego, wynika przede wszystkim ze zjawiska interlockingu (klinowanie się ziaren). Ponadto duże znaczenie ma również wielkość ziaren kruszywa, która często przekracza 10% grubości materaca. Wynikający stąd efekt skali również wpływa na wartość parametrów przyjętych do analizy. Oczywiście jest również, że założona wartość spójności wpływa na opór ścinania w zakresie niewielkich naprężeń, natomiast nie powinna powodować, że materiał przejmowałby jakiegokolwiek rozciągania, co w przedmiotowym zagadnieniu byłoby znacznym błędem. Dlatego też w modelowaniu należy użyć tzw. opcji *cut-off* (np. wg Rankine'a), która przez dodanie kolejnej powierzchni ograniczającej spowoduje, że dany element skończony nie będzie przenosił naprężeń rozciągających.

Elementem, który w przedmiotowej konstrukcji geomateraca będzie w stanie przenieść naprężenia rozciągające, będzie geosiatka lub georuszt. Ten drugi produkt gwarantować będzie lepsze własności mechaniczne konstrukcji wzmacniającej podłoże ze względu na możliwość równomiernego przekazywania obciążeń we wszystkich kierunkach, a nie tylko w dwóch kierunkach ortogonalnych, co zapewniają geosiatki. W analizie MES geosyntetyki modelowane będą przez zastosowanie do obliczeń elementów membranowych. Elementy te są dwuwęzłowe (analiza 2D) lub czterowęzłowe (analiza 3D). Zasada ich pracy polega na przenoszeniu naprężeń normalnych (tutaj rozciągających) o kierunku równoległym do ich krawędzi lub płaszczyzny.

5. Analiza MES próbnych obciążeń VSS

Zagadnieniem brzegowym rozważanym w ramach niniejszego artykułu jest symulacja badania próbnego obciążenia płytą VSS. Tego typu próby są bardzo rozpowszechnione w budownictwie drogowym i wykorzystuje je się do badania jakości podłoża pod konstrukcję nawierzchni oraz kontroli jakości wykonywania poszczególnych warstw nasypów. Badanie to polega na przekazywaniu na podłoże lub wbudowaną warstwę nasypu bądź konstrukcji nawierzchni obciążenia przez sztywną płytę stalową o średnicy 30 cm. Maksymalne przekazywane naciski, w zależności od typu badanej powierzchni, wynoszą 150–350 kPa. Badanie to ma symulować zachowanie się podłoża poddanego obciążeniu kołem samochodu ciężarowego. Tego typu oddziaływania są typowe w budownictwie drogowym i na nie projektuje się warstwy konstrukcji. Badanie polega na zadaniu obciążenia po raz pierwszy (tzw. ścieżka

obciążenia pierwotnego), odciążeniu oraz kolejnym wywołaniu obciążenia (ścieżka obciążenia wtórnego). Z pierwszej z realizowanych ścieżek otrzymuje się wartość pierwotnego modułu odkształcenia E_1 , natomiast z drugiej – modułu wtórnego E_2 . Wartości tych modułów oblicza się na podstawie rozwiązania zagadnienia osiadania półprzestrzeni sprężystej obciążonej na pewnej powierzchni [5]:

$$E_1, E_2 = \frac{\Delta q \cdot \omega \cdot D \cdot (1 - \nu^2)}{\Delta s} \quad (1)$$

gdzie:

- ω – współczynnik kształtu (0,79 dla obszaru kołowego),
- D – średnica płyty stalowej (0,30 m dla płyty VSS),
- ν – współczynnik Poissona,
- Δq – przyrost obciążenia,
- Δs – przyrost osiadania środka płyty.

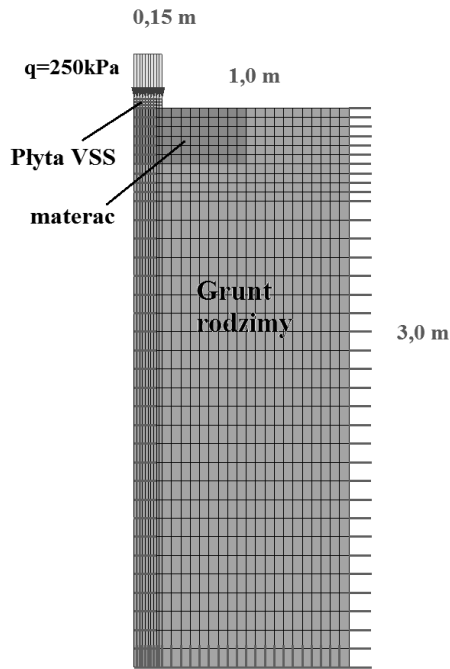
W zależności od tego, czy liczona jest wartość E_1 , czy też E_2 , wartości obciążeń i osiadań w powyższej zależności brane są ze ścieżki pierwotnej lub wtórnej próbnego obciążenia. W praktyce, dla uproszczenia, bardzo często zamiast zależności (1), wartości poszukiwanych modułów oblicza się ze wzoru:

$$E_1, E_2 = \frac{0,75 \cdot \Delta q \cdot D}{\Delta s} \quad (2)$$

Na podstawie rozważań przeprowadzonych w p. 2, z których wynika, że najbardziej właściwym parametrem dla oceny własności wytrzymałościowo-deformacyjnych podłoża gruntowego (nie warstw konstrukcji nawierzchni) jest wartość modułu E_1 , dlatego też dalszą analizę ograniczono tylko i wyłącznie do tej wielkości. Ponadto nie bez znaczenia jest fakt, że aby prawidłowo zamodelować przy wykorzystaniu MES odciążenie i obciążenie wtórne, konieczne jest wykorzystanie bardzo zaawansowanego modelu materiałowego, np. HS-Small w programie Z_Soil [6]. Z drugiej strony tego typu model wymaga podania wartości dużej liczby parametrów, co w świetle rozważanych zagadnień nie jest celowe.

W ramach obliczeń wykonywanych w ramach omawianej pracy przeprowadzono analizę odpowiedzi podłoża na obciążenie przykładowe przez stalową płytę VSS. Analizy wykonywano metodą elementów skończonych z użyciem programu Z_Soil_PC [6].

Siatkę elementów skończonych pokazano na rys. 3. Ze względu na możliwość wykorzystania symetrii osiowej analizowano płaski przekrój osiowy za pomocą właściwych formuł zawartych w programie komputerowym. Wymiary geometryczne modelu wykorzystanego w obliczeniach (szerokość: 1,0 m i wysokość: 3,0 m) była większa niż zalecane 3–5 szerokości obciążanego obszaru. W ramach wykonanej analizy MES, po uprzedniej generacji naprężeń pierwotnych w podłożu, w 10 krokach obliczeniowych zadano obciążenie równomiernie rozłożone na sztywną płytę stalową o wartości 250 kPa (wartość typowa w badaniach odbiorczych w drogownictwie). Założono, że grunt występujący w podłożu jest jednorodny, a jego zachowanie opisuje sprężysto-idealnie plastyczny model z powierzchnią plastyczności Coulomba-Mohra. Bezpośrednio pod sztywną stalową płytą przekazującą obciążenie znajduje się geomaterac modelowany jako inna strefa materiałowa. Wartości parametrów modelu różniły się w zależności od rozpatrywanego zadania i będą podane w dalszej części artykułu.



Rys. 3. Zagadnienie brzegowe symulacji badań płytą VSS

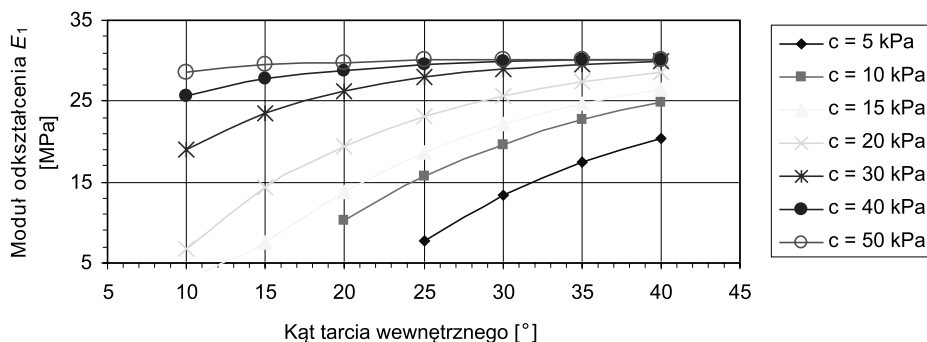
Fig. 3. Boundary problem of simulation the VSS test

W ramach przeprowadzonych obliczeń rozpatrywana będzie odpowiedź podłoża gruntowego w przypadku braku występowania geomateraca, a także wpływ jego pracy na uzyskiwane charakterystyki.

6. Wyniki obliczeń

6.1. Podłoże niewzmocnione

Pierwszą z wykonanych analiz jest wpływ parametrów wytrzymałościowych ośrodka gruntowego na uzyskiwane wartości modułów E_1 . Podłoże gruntowe w tym przypadku nie było wzmocnione geomateracem. Rozpatrywano wpływ wartości kąta tarcia wewnętrznego ϕ (w zakresie $10-40^\circ$) oraz spójności c (zakres $5-50$ kPa). Wartość modułu odkształcenia (sprężystości) gruntu zalegającego w podłożu wynosiła 30 MPa. Wyniki analiz przedstawiono na rys. 4. Wynika stąd, że w przypadku gdy podłoże odznacza się dużą wytrzymałością (wysokie wartości c i ϕ), to uzyskiwana z badań (tutaj z analizy numerycznej, po przeliczeniu wg wzoru 1) wartość modułu E_1 jest równa modułowi sprężystości ośrodka gruntowego. Natomiast w przypadku, gdy grunt w podłożu odznacza się gorszymi własnościami, wartość E_1 jest znacznie mniejsza. Wobec tego można stwierdzić, że w interpretacji badań VSS „nośnością” powinno się nazywać wartość modułu E_1 , która zależy od wartości parametrów wytrzymałościowych ośrodka gruntowego.



Rys. 4. Wartość modułu odkształcenia E_1 w zależności od parametrów wytrzymałościowych c i ϕ

Fig. 4. Value of stiffness modulus in dependence of c and ϕ parameters

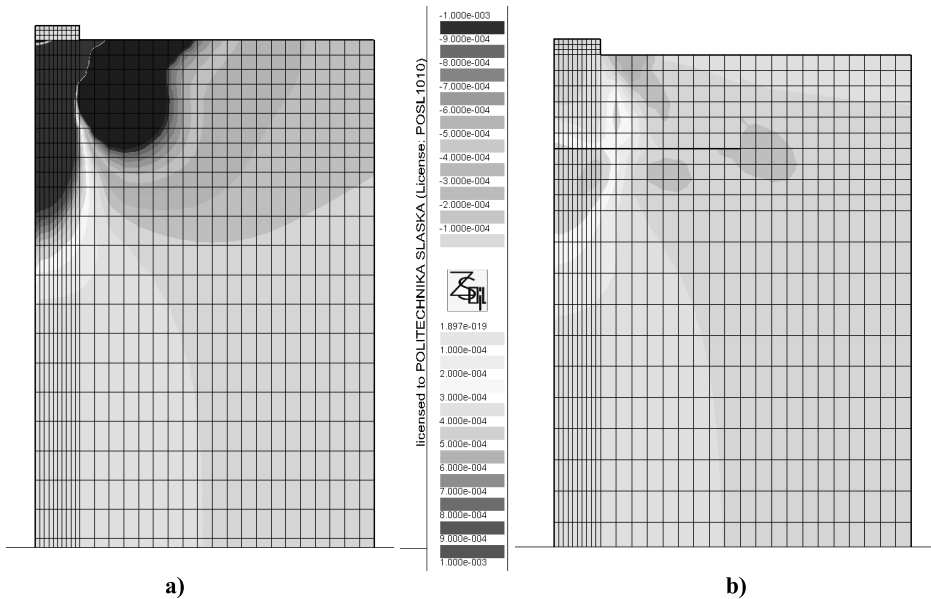
6.2. Wzmocnienie podłoża przez ułożenie geomateraca

Analizami będącymi przedmiotem rozważań w artykule jest wpływ zastosowania geomateraca (por. rozdz. 3) na sztywność podłoża gruntowego mierzonego modułem E_1 uzyskanym z badań VSS (tutaj z analiz MES modelujących analizowane zagadnienie). W tym celu rozważane będzie osiadanie podłoża w odpowiedzi na zadane obciążenie przez sztywną stalową płytę oraz uzyskiwana na jej podstawie wartość modułu E_1 (wzór 1). Geomaterac wzmacniający wierzchnią część podłoża to warstwa 30 cm kruszywa odznaczającego się wysokimi wartościami parametrów mechanicznych ($E = 150$ MPa, $c = 10$ kPa, $\phi = 42^\circ$) wraz ze zbrojeniem w postaci sztywnego georusztu. Sztywność zastosowanej konstrukcji geosyntetycznej (definiowana jako stosunek przyrostu przyjmowanej siły do odpowiadającego jej wydłużenia) waha się od 500 do 5000 kN/mb i będzie przedmiotem kolejnych analiz. Rozważany będzie też materac bez zbrojenia, co uwzględniono w obliczeniach przez przyjęcie sztywności równej 0. Rozpatrywano materac pojedynczy (jedna warstwa kruszywa wraz ze zbrojeniem), a także materac podwójny i potrójny. Ponadto analizowano uzyskiwany efekt wzmocnienia zarówno dla mocnego, jak i słabego podłoża. Mocne podłoże charakteryzowano się wartościami parametrów: $c = 20$ kPa, $\phi = 40^\circ$, natomiast słabe charakteryzowane było przez: $c = 10$ kPa, $\phi = 15^\circ$. W obydwu przypadkach, w celu możliwości łatwego porównywania otrzymanych wyników, założono, że wartość modułu odkształcenia ośrodka gruntowego wynosi $E = 30$ MPa, natomiast współczynnik Poissona $\nu = 0,30$. Uzyskane z obliczeń wyniki przedstawiono na rys. 5–8, a ich analizę przedstawiono w rozdz. 6.3.

6.3. Dyskusja otrzymanych wyników obliczeń

Pierwsze z uzyskanych rezultatów pokazano na rys. 5, który przedstawia mapę odkształceń poziomych w przypadku podłoża niewzmocnionego (rys. 5a) oraz z zastosowaniem pojedynczego geomateraca (rys. 5b). Obydwie mapy przedstawione są za pomocą tej samej skali pokazywanych odkształceń, co obrazuje widoczne różnice. Przede wszystkim bardzo wyraźna jest redukcja wartości odkształceń w podłożu pod przyłożonym obciążeniem. Wprowadzenie sztywnych elementów powoduje, że wartości odkształceń są często nawet

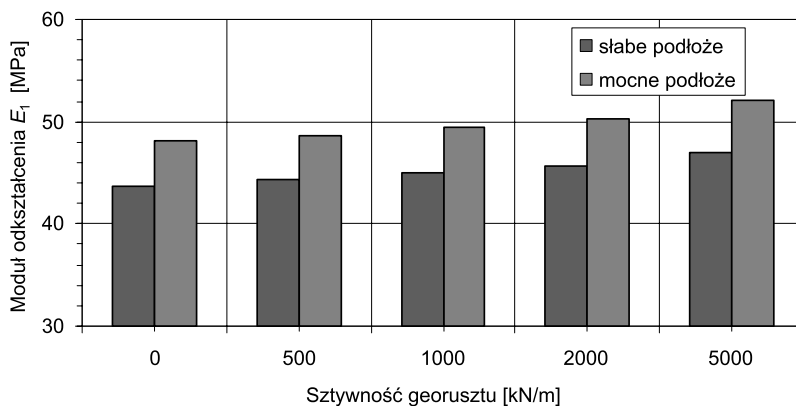
o rząd mniejsze w przypadku zastosowania omawianego wzmocnienia. Świadczy to o dużej skuteczności przedstawianego wzmocnienia oraz jego wpływu na sztywność tak przygotowanego podłoża oraz wartości osiadań pod przyszłą konstrukcją. Można więc oczekiwać, że omawiane rozwiązanie przyczyni się w znacznym stopniu do polepszenia własności podłoża pod fundamenty lub konstrukcje nawierzchni, gdyż występowanie małych (lub bardzo małych) odkształceń w zdecydowany sposób wpłynie na polepszenie własności deformacyjnych podłoża (por. [1]).



Rys. 5. Mapa rozkładu odkształceń poziomych w podłożu: a) bez geomateraca, b) z pojedynczą warstwą geomateraca

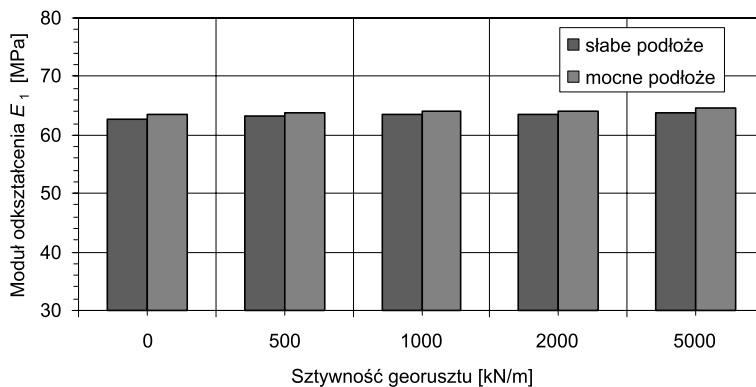
Fig. 5. Maps of strain distribution in subsoil: a) without geotextile, b) with a single layer of geotextile

Właściwym rozważanym zagadnieniem jest wpływ na sztywność różnych parametrów zastosowanego wzmocnienia w postaci sztywnej konstrukcji geomateraca. Wyniki tych analiz przedstawiono na rys. 6–8. Na diagramach zamieszczono zależność uzyskanej sztywności podłoża wzmocnionego geomateracem w zależności od sztywności zastosowanego georusztu. Zestawiono rezultaty zarówno dla mocnego, jak i słabego podłoża. Analizując uzyskane wartości E_1 odpowiadające wzmocnionemu podłożu po wykonaniu geomateraca, nietrudno zauważyć, że zastosowanie wzmocnienia przyniosło zauważalny efekt. Najbardziej widoczne jest zwiększenie sztywności w przypadku pojedynczego geomateraca, gdzie w porównaniu z wartościami modułu odkształcenia podłoża niewzmocnionego ($E = 30$ MPa) uzyskano wzrost wartości E_1 o 40–75%. Zastosowanie grubszej konstrukcji geomateraca (podwójny lub potrójny) ma sens jedynie w przypadku słabszego podłoża, a także przy wykorzystaniu georusztu o mniejszej sztywności. Jednak w każdym przypadku efekt dodatkowego wzmocnienia jest widoczny.



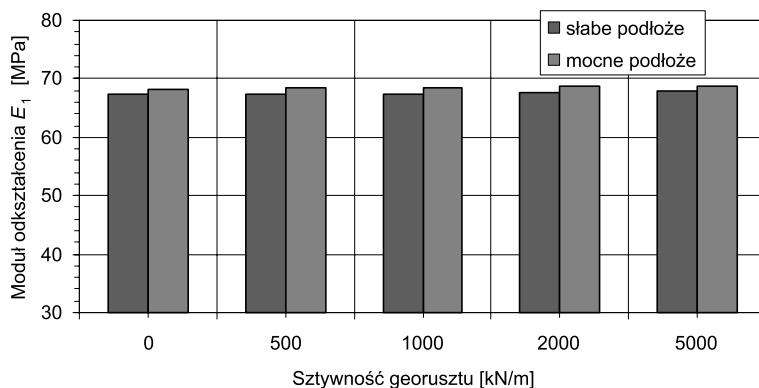
Rys. 6. Wpływ geomateraca na sztywność podłoża – pojedynczy geomaterac

Fig. 6. The influence the geotextix on the subsoil stiffness – single geotextix



Rys. 7. Wpływ geomateraca na sztywność podłoża – podwójny geomaterac

Fig. 7. The influence the geotextix on the subsoil stiffness – double geotextix



Rys. 8. Wpływ geomateraca na sztywność podłoża – potrójny geomaterac

Fig. 8. The influence the geotextix on the subsoil stiffness – triple geotextix

Ponadto interesujące są również wartości sił rozciągających w elementach wzmacniających (georusztach), które otrzymano z wykonanych analiz. Wynoszą one maksymalnie do 30 kN/m. Należy zwrócić uwagę, że powyższa wartość odpowiada największej analizowanej sztywności georusztu (5000 kN/m), w przypadku pojedynczej konstrukcji oraz słabego podłoża. W pozostałych przypadkach wartości te były znacznie mniejsze i nie przekraczały od kilku do kilkunastu kN/m. Świadczy to o tym, że najbardziej istotną cechą stosowanego materiału do zbrojenia jest jego sztywność w zakresie małych odkształceń, która bezpośrednio wpływa na otrzymywane wyniki. Natomiast duże wartości sił rozciągających, które materiał geosyntetyczny jest w stanie przenieść przy odkształceniach rzędu kilku procent nie mają w tym przypadku kompletnie żadnego znaczenia.

7. Wnioski

Z przeprowadzonych w pracy obliczeń wynika, że obecność materaca pod konstrukcją nawierzchni w zdecydowany sposób wpływa na zwiększenie sztywności podłoża. Wpływ ten jest szczególnie widoczny w przypadku słabego podłoża. Dodatkowo na uzyskiwane charakterystyki podłoża wpływa sztywność samego geosyntetyku, co jest szczególnie widoczne przy cieńszej konstrukcji geomateraca. Ponadto zastosowanie sztywnej konstrukcji z gruntu zbrojonego powoduje dużą zmianę w rozkładach odkształceń w podłożu, co powinno skutkować znaczną redukcją otrzymywanych osiadań. Przedstawione w pracy wyniki nie pokazują aż tak zdecydowanych różnic, co najprawdopodobniej jest efektem przyjęcia nie do końca adekwatnego modelu obliczeniowego. Również modelowanie zachowania się georusztu jako elementu membranowego w zakresie bardzo małych odkształceń, które są charakterystyczne dla rozważanego przedziału obciążeń, nie jest do końca właściwe (por. [2]).

Poważną trudnością podczas wykonywania analiz jest dobór parametrów do obliczeń, szczególnie dotyczących geosyntetyku. W artykule przedstawiono wpływ sztywności na otrzymywane wyniki, jednak w przypadku chęci modelowania zachowania się rzeczywistej konstrukcji, użytkownik może mieć trudności w prawidłowym doborze wartości do obliczeń, gdyż producenci nie podają tego typu informacji o swoich wyrobach. Informacje o własnościach geosyntetyków skupiają się przede wszystkim na ich wytrzymałościach na rozciąganie, która w przedmiotowym zagadnieniu ma mniejsze znaczenie.

Na zakończenie warto wskazać jeszcze jeden bardzo ważny aspekt zastosowania sztywnego georusztu do opisywanych konstrukcji wzmacniających. Nietrudno zauważyć, że warstwa kruszywa odznaczająca się bardzo wysokimi wartościami parametrów nie byłaby możliwa do wykonania bez elementu umożliwiającego właściwe klinowanie i utrzymywanie się ziaren kruszywa układanych na słabym podłożu oraz przenoszenie sił rozciągających. Własność ta nie ma wpływu na modelowanie zagadnienia (analizuje się konstrukcję już wykonaną), jednak decyduje o właściwym wykonaniu geomateraca. Oczywiście jest, że i w tym przypadku najważniejszą cechą materiału zbrojącego jest jego wysoka sztywność we wszystkich kierunkach i w zakresie małych odkształceń.

Literatura

- [1] Burland J.B., *Small is beautiful – the stiffness of soils at small strains*, 9th Bjerrum Memorial Lecture, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 26, 499-516.
- [2] Giroud J.P., *Development of criteria for geotextile and granular filters*, *Prestigious lecture*, Proceedings of the 9th International Conference of Geosynthetics, Guarujá, Brazil, 2010, Vol. 1, 45-64.
- [3] Judycki J., *Rola geosiatek Tensar przy wzmacnianiu słabych podłoży gruntowych pod nawierzchniami ulepszonymi*, Magazyn Autostrady, 1-2/2005.
- [4] Kawalec J., *Wpływ doboru parametrów georusztu na skuteczność stabilizacji warstwy kruszywa*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Budownictwo, z. 111, Gliwice, 2007, 211-218.
- [5] Wiłun Z., *Zarys Geotechniki*, WKiŁ, Wyd. 5, Warszawa 2001.
- [6] Zimmermann Th., Truty A., Urbański A., Podleś K., *Z_Soil.PC 2010 3D user manual, Theory, Tutorials and Benchmarks, Data Preparation*, Elmepress International & Zace Services Ltd, Switzerland, 2010.
- [7] Rozporządzenie ministra infrastruktury z dnia 16 stycznia 2002 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących autostrad płatnych (Dz.U. 12, Poz. 116).
- [8] Norma PN-S-02205: 1998: Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.