

HENRYK PACHLA, FILIP PACHLA, KAROLINA WARTAK-DOBOSZ*

ZASTOSOWANIE PROGRAMU INŻYNIERSKIEGO ZSoil DO ANALIZY DEFORMACJI PODŁOŻA GRUNTOWEGO PODCZAS WYKONYWANIA GŁĘBOKIEGO WYKOPU

APPLICATION OF ENGINEERING SOFTWARE ZSoil FOR ANALYSIS OF SOIL DEFORMATIONS DURING EXCAVATION OF A DEEP TRENCH

Streszczenie

Projektowanie głębokich wykopów, obejmujących swym oddziaływaniem znaczne obszary w zwartej zabudowie miejskiej powinno być poprzedzone analizą wpływu technologii jego wykonania na zabezpieczanie obiektów znajdujących się w bezpośredniej strefie oddziaływania. Metody analityczne przestają być wystarczające do prawidłowego rozpoznania tych zjawisk, zwłaszcza w skomplikowanych warunkach wodno-gruntowych oraz przy dużym stopniu geometrycznego skomplikowania projektowanej konstrukcji. W takich przypadkach najbardziej wiarygodna wydaje się być trójwymiarowa analiza numeryczna. Taką analizę przeprowadzono w programie ZSoil 12.12 dla kolejnych etapów wykonywania głębokiego wykopu zabezpieczonego ścianą szczelinową, zlokalizowanego w ścisłym centrum Krakowa. Prawidłowość obliczeń jest weryfikowana stałym monitoringiem geodezyjnym.

Słowa kluczowe: głębokie wykopy, ściana szczelinowa, mikropale iniekcyjne

Abstract

Designing deep excavations in urban areas is a very complex geotechnical problem. Not only stability calculations should be conducted but also the influence on the objects behind the wall is to be checked to predict the settlements of the buildings around the excavation pit. Analytical methods are not efficient when analysing constructions in complicated ground conditions and very complex geometry. In such cases three-dimensional numerical analysis gives the most reliable results. Finite element method analysis in ZSoil 12.12 was conducted to analyze the construction steps of excavation pit supported by diaphragm walls. The construction site is located in the city centre of Cracow. Accuracy of the calculations is checked by appropriate geodetic measurements.

Keywords: deep excavations, diaphragm wall, injection micropiles

* Dr inż. Henryk Pachla, dr inż. Filip Pachla, mgr inż. Karolina Wartak-Dobosz, KROZ Henryk Pachla.

1. Wstęp

Projektowanie zabezpieczenia głębokiego wykopu w otoczeniu zwartej zabudowy miejskiej wiąże się nie tylko z wykonywaniem analiz wytrzymałościowych konstrukcji fundamentu, lecz również z analizą jej wpływu na obiekty znajdujące się w najbliższym otoczeniu. Nieodpowiedni dobór technologii wykonywania zabezpieczenia może być przyczyną zmiany istniejącego stanu równowagi, która w konsekwencji może spowodować katastrofę budowlaną. Metod analitycznych stosowanych jeszcze niedawno najpowszechniej do projektowania zabezpieczeń ścian głębokich wykopów [1, 5] nie można uznać za wiarygodne, szczególnie dla konstrukcji o dużym stopniu geometrycznego skomplikowania. Do takich analiz najbardziej wiarygodna wydaje się być przestrzenna analiza numeryczna wykonywana za pomocą wyspecjalizowanego oprogramowania dedykowanego geotechnice. O ile w dotychczas obowiązujących normach do projektowania fundamentów nie wspomina się nic na temat obliczeń numerycznych, o tyle w Eurokodzie 7 [8] metoda ta jest określona jako jedna z możliwości określenia stanów granicznych nośności i użyteczności.

Jednym z wielu dostępnych na rynku programów do analiz numerycznych jest program ZSoil, którego producentem jest szwajcarska firma Zace Services Ltd. W programie tym zaimplementowana została metoda elementów skończonych.

Program ten w wersji 12.12 posłużył do analizy wpływu wykonywania głębokiego wykopu, zabezpieczonego ścianą szczelinową na najbliższe otoczenie. Wykop zlokalizowany jest w zwartej zabudowie w centrum Krakowa. Projektowana ściana szczelinowa stanowi fundament pod rozbudowywany hotel. Przeprowadzona analiza miała za zadanie określić wpływ poszczególnych procesów technologicznych na deformację podłoża gruntowego znajdującego się w strefie bezpośredniego oddziaływania planowanej inwestycji. Wynikiem analizy numerycznej było zaprojektowanie zabezpieczeń obiektów, które znajdują się w bezpośredniej strefie oddziaływania.

2. Budynki zlokalizowane w obszarze głębokiego wykopu

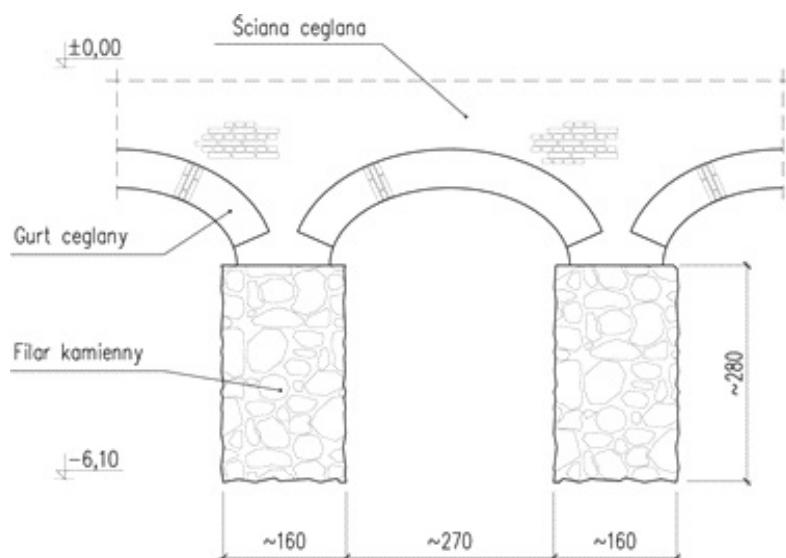
Projektowana inwestycja zlokalizowana jest w ścisłej zabudowie w centrum miasta. W strefie oddziaływania głębokiego wykopu znajdują się budynki z różnych okresów architektonicznych, o różnych konstrukcjach i układach nośnych. Na rys. 1 przedstawiono mapę sytuacyjną z zaznaczonymi strefami oddziaływań bezpośrednich i pośrednich, zaznaczono także obiekty budowlane narażone na negatywne skutki związane z wykonywaniem głębokiego wykopu. Strefy oddziaływań określono na podstawie instrukcji ITB dotyczącej ochrony zabudowy w sąsiedztwie głębokich wykopów [9].

W obszarze oddziaływań znalazł się budynek zabytkowy o konstrukcji murewej wraz z murem granicznym z drugiej połowy XIX w., należące do kompleksu zabudowań Państwowej Straży Pożarnej (nr 1 na rys. 1). Część kompleksu znajdująca się w strefie bezpośredniego oddziaływania wykopu to obiekt trzykondygnacyjny, mурowany z cegły. Ścianę graniczącą z głębokim wykopem wykonano jako ścianę arkadową fundowaną na filarach kamiennych (por. rys. 2). Ze względu na małą sztywność, ściana taka jest szczególnie wrażliwa na nierównomierne osiadanie filarów. Powstawanie dodatkowych sił ścinających i rozciągających zarówno w ścianie, jak i w gurtach, przy zaprawie wapiennej może prowadzić do zniszczenia elementów konstrukcji.



Rys. 1. Mapa sytuacyjna

Fig. 1. Sitemap



Rys. 2. Ściana arkadowa budynku murowanego znajdującego się w strefie oddziaływań bezpośrednich

Fig. 2. Arched bricked wall in the zone of influence

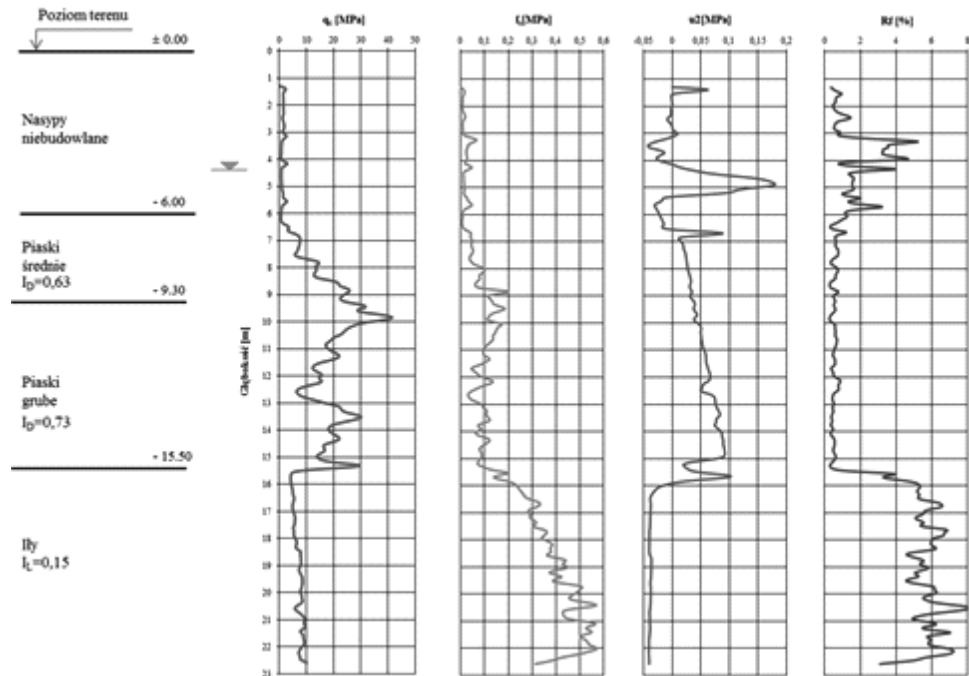
Obiekt oznaczony nr. 2 (por. rys. 1) to budynek o konstrukcji żelbetowej szkieletowej z wypełnieniem murowanym cegłą. Budynek usytuowany jest dłuższym bokiem do krawędzi wykopu.

Budynek oznaczony na rys. 1 jako nr 3 ma konstrukcję monolityczną żelbetową. Ściana graniczna do krawędzi wykopu posadowiona jest na palisadzie z pali CFA.

Szczegółowa analiza oddziaływania prac związanych z wykonywaniem głębokiego wykopu została przeprowadzona dla obiektów należących do Państwowej Straży Pożarnej.

3. Warunki geologiczne w obszarze analizowanego wykopu

Warunki wodno-gruntowe w obszarze analizowanego wykopu określono na podstawie badań własnych przeprowadzonych sondą CPTu oraz dokumentacji przekazanej przez inwestora [2]. Zarówno z badań, jak i z dokumentacji wynikało, że w gruncie znajduje się warstwa nieprzepuszczalna w postaci ilów na głębokości od ~15,5 m ppt. Ten fakt był również powodem przeważającym za wyborem ściany szczelinowej do zabezpieczenia głębokiego wykopu. Zdecydowano się wykonać ścianę szczelinową do warstwy nieprzepuszczalnej, bez konieczności obniżania zwierciadła wody gruntowej w obszarze poza ścianą, co wiązałoby się ze zwiększonym zagrożeniem dla zabudowy sąsiedniej. Poziom wody gruntowej stabilizował się na poziomie ~5 m ppt. Na rys. 3 przedstawiono wyniki badań sondą CPTu.



Rys. 3. Profil geotechniczny otrzymany z badań sondą CPTu [4]

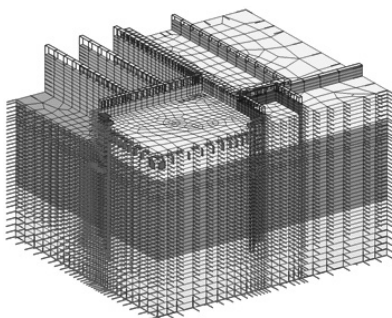
Fig. 3 Geotechnical cross-section from CPTu sounding [4]

4. Model obliczeniowy

W obliczeniach przyjęto przestrzenny model metody elementów skończonych (MES). Stan faktyczny aproksymowano modelem o dwóch osiach symetrii. Pozwoliło to modelować jedynie symetryczną ćwiartkę modelu, przyjmując symetryczne warunki brzegowe. Na rys. 4 przedstawiono przyjęty model przestrzenny zbudowany w środowisku ZSoil. Modelowano jedynie części podziemne budynków przyległych, dlatego też przyjęto obciążenie reprezentatywne z naziemnych części budynków przyległych do granicy wykopu. W obliczeniach rozważano model konstytutywny gruntu z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra. W tab. 1 przedstawiono zestawienie przyjętych parametrów materiałowych modelu Mohra Coulomba (MC) opracowanych na podstawie procedur interpretacyjnych z badań CPTu [4, 7, 8].

Materiały konstrukcyjne, z których wykonane są obiekty zlokalizowane w bezpośredniej strefie oddziaływań projektowanej konstrukcji ściany szczelinowej zamodelowano jako liniowo-sprężyste. Parametry materiałów dobrano na podstawie norm konstrukcyjnych [10, 11]. Przyjęte parametry przedstawiono w tabeli 2.

W obliczeniach rozważano wszystkie etapy wykonywania głębokiego wykopu (por. rys. 5). Warunki wodne w terenie otaczającym zamodelowano warunkami brzegowymi na ciśnienie słupa cieczy. Ze względu na technologię wykonywania, ścianę szczelinową podzielono na siedem sekcji realizowanych w kolejnych etapach. W etapach I–VII, w których następuje wykonywanie szczeliny w osłonie bentonitowej, dla kolejnych sekcji przyjęto obciążenie wynikające z ciśnienia, jakie wywiera zawiesina na ściany wykopu. W etapach wybierania gruntu, założono liniową funkcję odciążającą. W etapach II–VIII wprowadzono kolejne sekcje ściany szczelinowej. Ścianę modelowano jako element powłokowy dwuwarstwowy o grubości 60 cm. Zgodnie z projektem [2] przyjęto, że wykonana zostanie z betonu C25/30. Założono tarcie pomiędzy gruntem a pionowymi powierzchniami ściany szczelinowej. W etapie VIII wykonywany jest oczep żelbetowy o wysokości 60 cm. W etapie IX montowany jest pierwszy poziom rozpór i wykonywany jest wykop wstępny do głębokość równej posadowieniu sąsiednich budynków. Przekroje poprzeczne elementów rozporowych, które modelowano jako elementy kratowe, przedstawiono w tab. 3. Przy obliczeniach dla etapu wybierania gruntu wprowadzono liniową funkcję odciążającą. W etapie X zakładane są rozpory na drugim poziomie i wykonywany jest wykop docelowy do ~8 m ppt. W tym przypadku również zastosowano liniową funkcję odciążającą. W tym etapie wykonuje się również odwodnienie wykopu do poziomu wykopu docelowego. W kolejnym etapie (XI) wprowadzana jest płyta denna o grubości 90 cm z betonu klasy C25/30. Zaś w etapie zamykającym część podziemną inwestycji (XII) wprowadzono warunki brzegowe na ścianie szczelinowej w poziomie wykonanego stropu (na poziomie 0,00) uniemożliwiające jej przemieszczenia w kierunkach poziomych. W tym etapie następuje również demontaż wszystkich rozpór.



Rys. 4. Przestrzenny model numeryczny zbudowany w programie ZSoil

Fig. 4. A three-dimensional numerical model generated in ZSoil

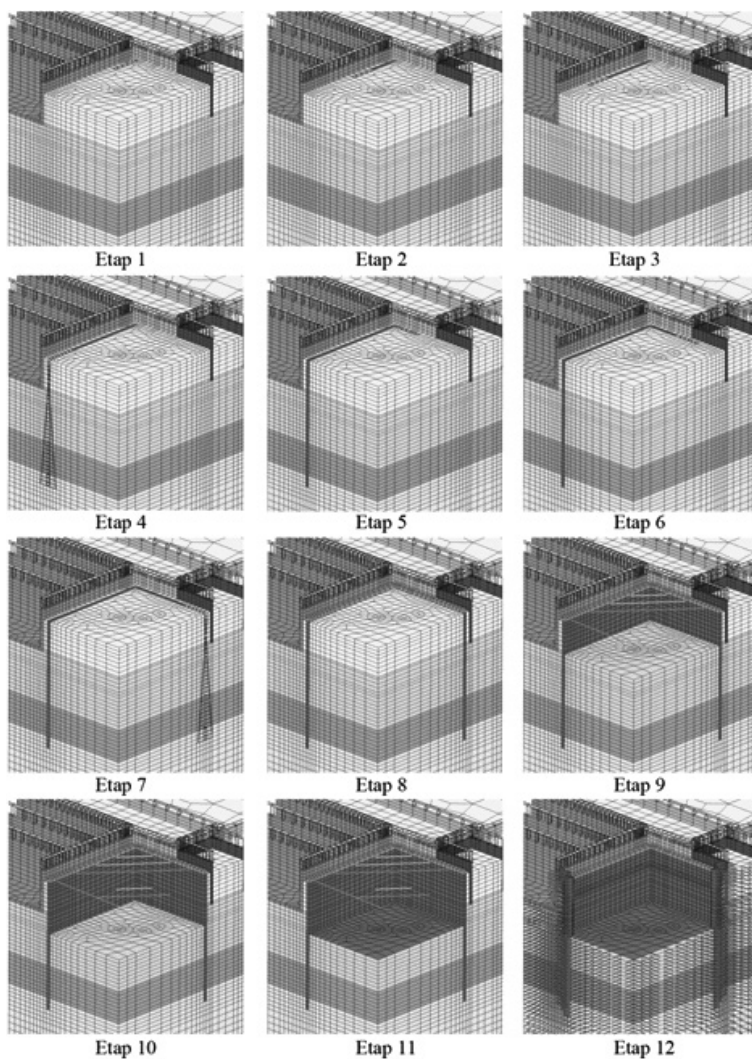
Tabela 1

Parametry materiałowe dla modelu Mohra-Coulomba

Material	Model	Właściwości	Jednostki	Wartość
Nasyp niebudowlany (Nn)	MC	E	[kN/m ²]	12 000
		ν	–	0,25
		γ	[kN/m ³]	16,5
		ϕ	[°]	15
		ψ	[°]	2
		c	[kN/m ²]	4
Piasek średni, piasek gruby (Ps)	MC	E	[kN/m ²]	55 000
		γ	[kN/m ³]	18
		ν	–	0,2
		ϕ	[°]	33
		ψ	[°]	7
		c	[kN/m ²]	1
Piasek gruby (Pr)	MC	E	[kN/m ²]	110 000
		ν	–	0,2
		γ	[kN/m ³]	19
		ϕ	[°]	38,5
		ψ	[°]	9
		c	[kN/m ²]	1
II (I)	MC	E	[kN/m ²]	58 000
		ν	–	0,25
		γ	[kN/m ³]	22,5
		ϕ	[°]	24
		ψ	[°]	0
		c	[kN/m ²]	8

Parametry materiałowe dla budynków sąsiednich

Element	Charakterystyki materiałowe		
	E [MPa]	ν [-]	γ [kg/m ³]
Mur kamienny	1000	0.25	2100
Beton C15/20	29000	0.2	2500
Beton C25/30	31000	0.2	2500



Rys. 5. Etapy wykonywania ściany szczelinowej i głębokiego wykopu

Fig. 5. Stages of deep excavation performance

Parametry materiałowe i geometryczne rozpór ściany szczelinowej

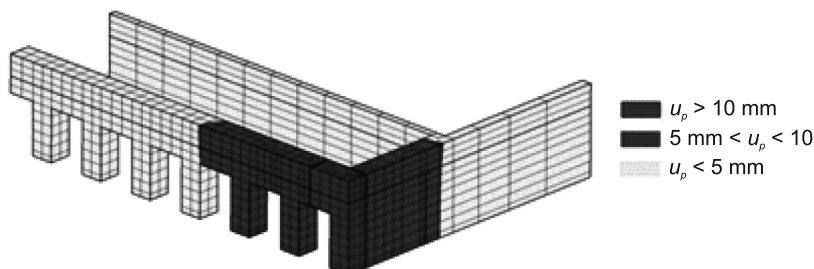
Rozpora	Charakterystyki materiałowe		Charakterystyki geometryczne
	E [MPa]	γ [kg/m ³]	A [m ²]
Ø813/11	200000	7850	0,028
Ø720/11	200000	7850	0,025
2 × HEB300	200000	7850	0,0298

5. Wyniki obliczeń i propozycja zabezpieczenia zabytkowego budynku sąsiedniego

Największe przemieszczenia pionowe w każdym z etapów wykonywania zabezpieczenia projektowanego głębokiego wykopu zawsze występują na ścianie szczytowej oraz tylnej ścianie arkadowej budynku bezpośrednio graniczącego z inwestycją (por. rys. 6). Ich wartości kształtują się w granicach od $-0,9$ do $-1,84$ mm dla etapów I–IV, następnie następuje ich znaczny wzrost w etapach V–VII do wartości $-6,62$ mm (por. rys. 6). W trakcie kolejnych etapów następuje dalszy wzrost przemieszczeń pionowych do wartości $10,64$ mm w etapach XI i XII (por. rys. 6).

Przemieszczenia te znacznie przekraczają wartości dopuszczane przez instrukcję ITB [9]. Przytaczając ww. instrukcję, graniczne wartości przemieszczeń pionowych konstrukcji dla budynków murowanych bez wieńców ze stropami ceramicznymi dla stanu granicznego użytkowności nie mogą przekraczać wartości 5 mm, natomiast dla stanu granicznego nośności 15 mm. Analiza wykazała, że narożnik ścian szczytowej i tylnej jest najbardziej narażony na awarię, gdyż przemieszczenia pionowe wynoszą powyżej 10 mm. Miejsca, gdzie przekroczone zostały graniczne wartości dopuszczalnych przemieszczeń pionowych przedstawiono na rys. 6.

Ściana szczytowa i tylna narażone są na nierównomierne osiadanie. Maksymalna wartość kąta odkształcenia postaciowego wynosi $\Theta_{sd} = 0,81 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$, przy wartości dopuszczalnej, która według normy [10] jest równa $0,5 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$.



Rys. 6. Przemieszczenia pionowe fundamentów analizowanych obiektów

Fig. 6. Vertical displacements in building's foundations in zone of influence

W związku ze stwierdzonymi przekroczeniami dopuszczalnych przemieszczeń pionowych fundamentów analizowanych obiektów należało zaprojektować wzmocnienia najbardziej narażonych na awarię części obiektów. Zabezpieczenia należało wykonać jeszcze przed rozpoczęciem inwestycji.

Wszelkie zabezpieczenia fundamentów i ścian nośnych obiektów Państwowej Straży Pożarnej należało wykonać przed rozpoczęciem budowy ściany szczelinowej. Już same prace przygotowawcze oraz rozbiórkowe w miejscu projektowanego wykopu spowodowały powstanie zarysowań na ścianie budynku Państwowej Straży Pożarnej, graniczącej z inwestycją.

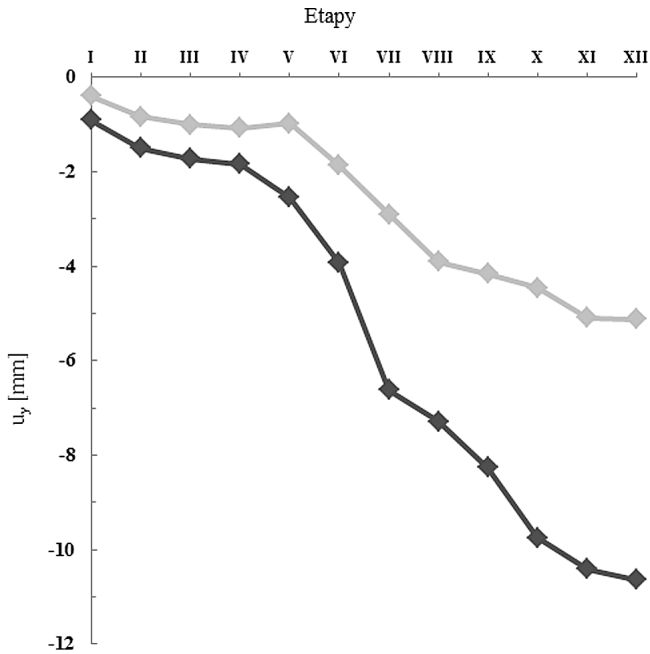
Prace zabezpieczające obejmowały ścianę tylną, szczytową, frontową przyległego budynku Państwowej Straży Pożarnej, oraz mur graniczny działek. Zaprojektowano wzmocnienie posadowienia w postaci pali kołowych o średnicy 150 mm zbrojonych koszem wykonanym z czterech prętów żebrowych o średnicy 14 mm i strzemion kołowych o średnicy 6 mm w rozstawie co 20 cm zgodnie z normą. Długości pali podzielono na trzy grupy, uwzględniając maksymalne przemieszczenia pionowe zagrożonej konstrukcji zgodnie z instrukcją ITB [9]. Najbardziej narażoną na awarię część budynku zabezpieczono palami, które zagłębiono co najmniej 2 m poniżej dna docelowego wykopu. Dla danych otrzymanych z sondowania CPTu (por. rys. 3) oraz dokumentacji geologicznej zaprojektowano wg normy [12] mikropale o długości 12 m od poziomu posadzki w budynku. Mikropale te umieszczono w narożnikach konstrukcji. Ścianę szczytową zabezpieczono palami iniekcijnymi o długości 10/12 m, a część ściany frontowej palami o długości min. 10 m od poziomu posadzki budynku PSP. Zabezpieczenie muru granicznego zrealizowano przez mikropale iniekcyjne w układzie kołowym o długości min 8 m od poziomu podworca budynku.

Narożnik ścian szczytowej i granicznej narażony na nierównomierne osiadanie poza wzmocnieniem palami iniekcijnymi przewiązано układem kotew stalowych o średnicy 20 mm osadzanych na iniekcje z zaczynu cementowego w przewiertach wspornych na całej wysokości muru. Takie rozwiązanie ma zespolić nieprzewiązany narożnik budynku i zapewnić odpowiednie zbrojenie muru wspornych ścian.

Zaprojektowane mikropale iniekcyjne w programie ZSoil zamodelowano w postaci sił pionowych przyłożonych w węzłach konstrukcji, których wartość była równa ich nośności obliczonej na podstawie normy [12]. Kotwy scalające narożnik konstrukcji zamodelowano w postaci belek stalowych o średnicy 20 mm.

Obliczenia przy uwzględnieniu zabezpieczeń wykazały zmniejszenie przemieszczeń pionowych fundamentów do wartości równej 5,12 mm oraz kąta odkształcenia postacio-

wego do wartości $\Theta_{sd} = 0,40 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$. Zmiana wartości przemieszczeń pionowych modelu bez i z wzmocnieniami przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Porównanie maksymalnych przemieszczeń pionowych fundamentów obiektu PSP bez (kolor czarny) i z zaprojektowanym wzmocnieniem (kolor szary)

Fig. 7. Comparison of the largest vertical displacements without (black graph) and with (grey graph) the strengthening

6. Wnioski

Przeprowadzone obliczenia wykazały realne zagrożenie wynikające z wykonania głębokiego wykopu dla zabudowy sąsiadującej bezpośrednio z planowaną inwestycją. Obliczenia wskazały również na konieczność wykonania zabezpieczeń budynku murowanego. Jako podstawę określania zagrożenia dla budynku murowego przyjęto instrukcję ITB dotyczącą projektowania obiektów w sąsiedztwie głębokich wykopów [9], jak również normę dotyczącą projektowania konstrukcji murowych [10]. Obliczenia numeryczne modelu wraz z zaprojektowanym zgodnie z normą [12] zabezpieczeniem fundamentów palami iniekcyjnymi oraz kotwami stalowymi wskazuje na niewielki brak spełnienia minimalnego przemieszczenia pionowego konstrukcji. Zwiększenie sił modelujących pracę mikropali iniekcyjnych o ok. 10% dały rezultaty będące w granicach instrukcji [9] oraz normy [10]. Prowadzony monitoring geodezyjny analizowanego wzmocnionego obiektu wskazuje, że podczas wykonywania ściany szczelinowej wystąpiły zerowe przemieszczenia pionowe konstrukcji. Fakt ten należy podkreślić, gdyż teoretyczne przemieszczenia pionowe są równe $-3,90$ mm. Pomiary te dają możliwość wysunięcia wniosku, że obliczenia wg normy [12] dają znaczne zapasy nośności i są mało efektywne dla mikropali iniekcyjnych. Potwierdzają to badania omówione w pracy [3]. Należy rozważyć zweryfikowanie obowiązujących modeli współpracy podłoża gruntowego z konstrukcją, a także metodologię obliczania nośności mikropali iniekcyjnych ze

względu na znaczne zapasy nośności, które ujawniane są podczas wykonywania próbnych obciążeń.

Pomiary geodezyjne będą kontynuowane dla kolejnych etapów wykonywania głębokiego wykopu, co pozwoli w pełni zweryfikować poprawność zaprojektowanych zabezpieczeń.

Analizowany przypadek wskazuje na konieczność przeprowadzania obliczeń numerycznych przy podobnych, tak skomplikowanych geologicznie i geometrycznie przypadkach. Uczestnicy procesu inwestycyjnego często w sposób niewystarczający podchodzą do zagrożeń związanych ze zjawiskami zachodzącymi w gruncie i na styku grunt–konstrukcja.

Literatura

- [1] Jarominiak A., *Lekkie konstrukcje oporowe*, WKiŁ, Warszawa 1982, 2000.
- [2] Kowalski T., Stefański M., *Projekt ściany szczelinowej*, Kraków 2011.
- [3] Pachła H., *Przemieszczenia pali iniekcyjnych w warunkach obciążenia osiowego*, Geoinżynieria, Drogi, Mosty, Tunele, 03.2012.
- [4] Robertson P.K., *Interpretation of cone penetration test – a unified approach*, Canadian Geotechnical Journal, 2009.
- [5] Siemińska-Lewandowska A., *Głębokie wykopy*, WKiŁ, Warszawa 2010, 2011.
- [6] Truty A., Zimmermann Th., Podleś K., Obrzud R., Commend S., Sarf J.-L., *ZSoil.PC 2011 User Manual 2011*.
- [7] Wiłun Z., *Zarys geotechniki*, WKiŁ, Warszawa 1976, 2005.
- [8] EN 1997-1-1 Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne.
- [9] Instrukcja ITB nr 367/2002, Ochrona zabudowy w sąsiedztwie głębokich wykopów, ITB, Warszawa 2002.
- [10] PN-B-03002 1999 Konstrukcje murowe niezbrojone – Projektowanie i obliczanie.
- [11] PN-B-03264 1999 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [12] PN-83/B-02482 Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.