

Dariusz SZWARKOWSKI¹

WPŁYW WYKONANIA GŁĘBOKIEGO WYKOPU POD BUDYNEK WYSOKI MOGILSKA TOWER W KRAKOWIE NA ISTNIEJĄCĄ ZABUDOWĘ W UJĘCIU MODELU PRZESTRZENNEGO OPARTEGO NA METODZIE ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH (MES)

Artykuł przedstawia kompleksowe podejście przy modelowaniu technologii zabezpieczenia głębokiego wykopu ścianką szczelną, typu Larsen budynku wysokiego Mogilska Tower w Krakowie. Budynek jako jeden z nielicznych, będzie posiadał trzy kondygnacje podziemne. Projektowanie i wykonanie głębokich wykopów wraz z wykonaniem ich zabezpieczenia jest zagadnieniem trudnym, wymagającym od projektanta szerokiej wiedzy z dziedziny geotechniki. Poprawne zaprojektowanie konstrukcji oraz zabezpieczenia wykopu wymaga znajomości zagadnień interakcji konstrukcji z podłożem gruntowym jak i wiedzy z zakresu przyjętej technologii obudowy wykopu. Wykonanie budynków wysokich z kondygnacjami podziemnymi w sąsiedztwie istniejących zabudowy wiąże się z koniecznością oceny wpływu wykonania głębokiego wykopu na obiekty narażone na nierównomierne osiadania. Instrukcja ITB dotycząca zabudowy w sąsiedztwie głębokich wykopów podkreśla wykonanie oceny wpływu głębokich wykopów na osiadania sąsiednich budynków przy metodzie uproszczonej lub szczegółowej opartej na metodzie elementów skończonych (MES). W artykule zaprezentowano rezultaty z modelowania numerycznego zabezpieczenia głębokiego wykopu ścianką szczelną typu Larsen. Uwzględniono przestrzenny układ warstw geotechnicznych. Założono przestrzenny stan naprężenia i odkształcenia modelu. Przyjęto etapy wykonania głębokiego wykopu. Wyniki obliczeń porównano z przemieszczeniami uzyskanymi z pomiarów geodezyjnych i otrzymanych naziemnym skanowaniem laserowym. Określono zasięg i wpływ głębokiego wykopu na osiadanie sąsiednich obiektów.

Słowa kluczowe: skaner laserowy, osiadania budowli, roboty ziemne, analiza numeryczna

1. Wprowadzenie

Budynki wysokie to obiekty budowlane o wysokości od 25 do 55 m [1]. Na terenach silnie zurbanizowanych, projektowanie budynków wysokich jest zabiegiem koniecznym i kosztownym. Ze względu na wysokie ceny działek budowlanych, coraz częściej inwestorzy decydują się na budynki wysokie. Wynika to rów-

¹ Dariusz Szwarkowski, Politechnika Krakowska, Katedra Współdziałania Budowli z Podłożem, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków; tel. 12-628-25-66; dszwarkowski@pk.edu.pl

niez z miejscowego planu zagospodarowania terenu. Na terenach miejskich, istnieją problemy z niewystarczającą ilością miejsc parkingowych. Konieczne jest zatem projektowanie budynków uwzględniających potrzeby mieszkańców. Wiąże się to z dodatkowymi kosztami realizacji kondygnacji podziemnych, przeznaczonych na miejsca postojowe. Wykonanie kondygnacji podziemnych, na terenach z gęsto sąsiadującą ze sobą zabudową wymaga stosowania zabezpieczeń wykopów głębokich w postaci ścianek szczelnych czy ścian szczelinowych. Bliskość sąsiedztwa głębokich wykopów, o głębokości powyżej 3 m [2] ma wpływ na przemieszczenia podłoża gruntowego w pobliżu sąsiadujących z wykopem budynków. Realizacja głębokich wykopów wymaga prowadzenia na każdym etapie pogłębiania wykopu, monitoringu geodezyjnego czy monitoringu za pomocą naziemnego skaningu laserowego, deformacji podłoża [3]. Niewielkie sztywności obudów wykopów ścianek szczelnych czy ścian szczelinowych wymagają również stosowania rozpór poziomych. Projektowanie zabezpieczeń wykopów wymaga szerokiej wiedzy z zakresu geotechniki oraz znajomości zagadnień związanych z interakcją konstrukcji z podłożem gruntowym. Determinuje to konieczność stosowania programów numerycznych, umożliwiających uwzględnienie szeregu zmiennych w projektowaniu konstrukcji. Obecnie w projektowaniu zabezpieczeń wykopów, powszechnie stosuje się analizy numeryczne oparte na płaskim stanie odkształcenia. Rozpatrywane modele nie uwzględniają przestrzennej pracy konstrukcji obudowy wykopu jak i również przestrzennego charakteru przebiegu warstw geotechnicznych. W przypadku niewielkich wymiarów rzutu wykopu, układ warstw geotechnicznych na terenach płaskich nie ulega znacznym zmianom. Jednak w przypadku głębokich wykopów o znacznym rzucie poziomym, nie uwzględnienie przestrzennego przebiegu warstw geotechnicznych spowodować może błędy już na etapie projektowania przyjętych założeń zabezpieczenia ścian wykopów. W artykule skupiono się na przedstawieniu wpływu wykonania głębokiego wykopu, o głębokości 10 m, na sąsiednią zabudowę. W modelowaniu uwzględniono przestrzenny charakter terenu oraz zmian przebiegu warstw geotechnicznych. Przyjęto technologię obudowy wykopu w postaci ścianek szczelnych typu Larssen, wzmocnionych opaskami stalowymi z kształtowników HP320, walcowanymi na gorąco. Na podstawie analizy numerycznej w przestrzennym stanie naprężenia i odkształcenia modelu, dla poszczególnych etapów realizacji inwestycji, wyznaczono przemieszczenia pionowe i poziome podłoża gruntowego. Uzyskane wyniki posłużyły do określenia maksymalnych przemieszczeń w pobliżu obiektu zlokalizowanego w sąsiedztwie głębokiego wykopu. Umożliwiło to ocenę zagrożenie obiektu na skutek ewentualnego przekroczenia dopuszczalnych deformacji podłoża, określonych w ITB [4] i w normie [5].

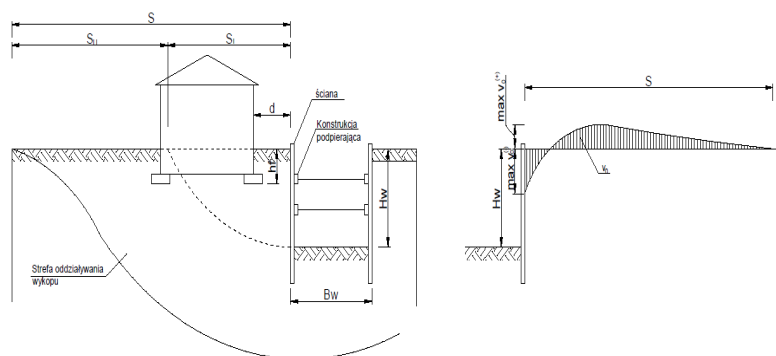
2. Wpływ głębokiego wykopu na budynki sąsiednie

Ze względu na obecnie często stosowaną praktykę projektowania i wykonywania budynków wysokich w sąsiedztwie istniejącej zabudowy, należy określić wpływ powstającego obiektu na sąsiadującą z nim zabudowę. Istotne jest określe-

nie maksymalnych przemieszczeń pionowych i poziomych, które spowodują negatywne oddziaływania na istniejące budynki. Zgodnie z zaleceniami ITB [4], przy ocenie wpływu głębokich wykopów na przemieszczenia sąsiednich budynków, istotne jest określenie strefy oddziaływania zasięgu głębokich wykopów na istniejącą zabudowę. Jest to obszar, gdzie wystąpią pionowe i poziome przemieszczenia gruntu, ze względu na realizowany wykop [4]. Można pominąć przy projektowaniu technologii wykonania ścianek obudów wykopów, wpływ głębokiego wykopu na osiadania budynków sąsiednich, jeśli odległość budynków od obudowy wykopu jest nie mniejsza niż podana we wzorze (1). Na rys. 1 przedstawiono zakres strefy wpływów głębokiego wykopu na sąsiednią zabudowę [4], [2].

$$d_{\min} > \beta H_w \quad (1)$$

gdzie: d_{\min} – minimalna odległość istniejącej zabudowy od krawędzi wykopu [m];
 β – współczynnik zależny od zabiegów obniżających poziom zwierciadła wód podziemnych, ($\beta = 5$, dla zabiegów obniżających poziom wodonośny, $\beta = 4$ jeśli nie przewiduje się wymienionych czynności);
 H_w – głębokość wykopu [m].

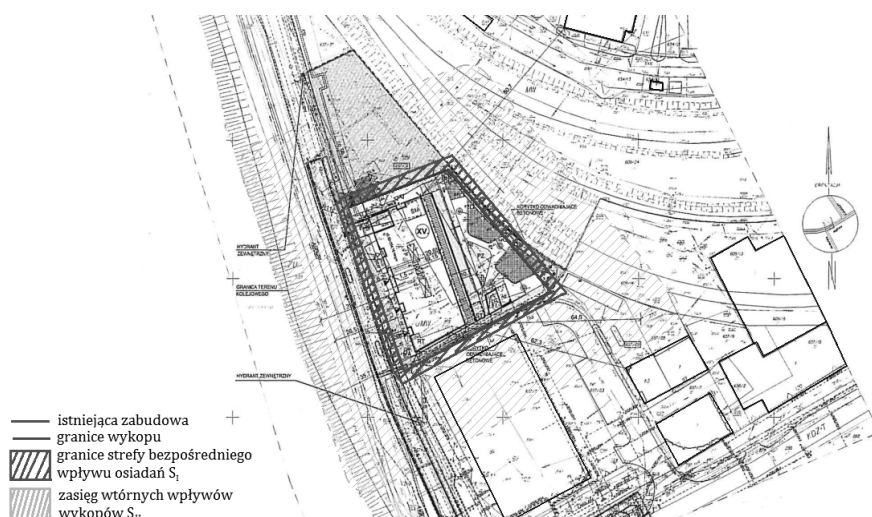


Rys. 1. Oznaczenia parametrów głębokiego wykopu i stref jego oddziaływania H_w , B_w – wymiary wykopu, S – zasięg strefy oddziaływania wykopu, S_I – zasięg strefy bezpośredniego oddziaływania wykopu, S_{II} – zasięg wpływów wykopów wtórnych, d – odległość od obudowy, h_r – głębokość posadowienia budynku, $\max v_0(-)$ – maksymalna wartość przemieszczeń ujemnych, $\max v_0(+)$ – maksymalna wartość przemieszczeń dodatnich (wypiężeń), opracowanie własne na podstawie [4]

Fig. 1. Determination of parameters of deep excavation and its impact zones H_w , B_w – excavation dimensions, S – range of excavation impact zone, S_I – range of the direct impact zone of the excavation, S_{II} – range of secondary excavation impacts, d – distance from trench casing, h_r – depth of building foundation, $\max v_0(-)$ – maximum negative displacement values, $\max v_0(+)$ – maximum positive displacement, own elaboration based on [4]

W artykule przedstawiono koncepcję wykonania głębokiego wykopu w technologii ścianki szczelnej, zabezpieczonej brusami stalowymi typu Larssen. Analizie poddano rzeczywisty wykop, realizowany pod projektowany budynek „Mogilska Tower”, w Krakowie. Projektowany budynek będzie wyposażony w trzy kondygnacje podziemne oraz 14 kondygnacji nadziemnych. Przewidywana wysokość obiektu wyniesie 45 m. Wiosną 2016 r. rozpoczęły się prace związane z wykonaniem I etapu wykopu wraz z wbiciem stalowych brusów. Ze względu na projek-

towaną głębokość wykopu, równą 10 m p.p.t., w artykule podjęto próbę oceny jego wpływu na sąsiednią zabudowę. Bezpośrednio w pobliżu wykopu zlokalizowany jest budynek handlowo-usługowy. Odległość elewacji północnej obiektu od krawędzi dna wykopu wynosi 7 m i jest mniejsza niż wartość określona z warunku (1) (50 m). Budynek charakteryzuje się jednolitą bryłą w kształcie prostopadłościanu. Wykonany jest w technologii tradycyjnej ze ścianami zewnętrznymi z pustaków. Posiada dach jednospadowy, o konstrukcji z dźwigarów prefabrykowanych drewnianych. Ze względu na bezpośrednie sąsiedztwo obiektu z planowaną inwestycją, niezbędne jest prowadzenie stałego monitoringu przemieszczeń podłoża gruntowego w sąsiedztwie budynku, na każdym etapie realizacji wykopu. Ocenę wpływu planowanego wykopu wyznaczono metodą uproszczoną, w oparciu o zalecenia podane w standardzie ITB[4], na podstawie projektowanego zasięgu stref oddziaływania wykopu S_{II} i zasięgu bezpośrednich oddziaływań S_I . Zasięg stref przedstawiono na rys. 2.

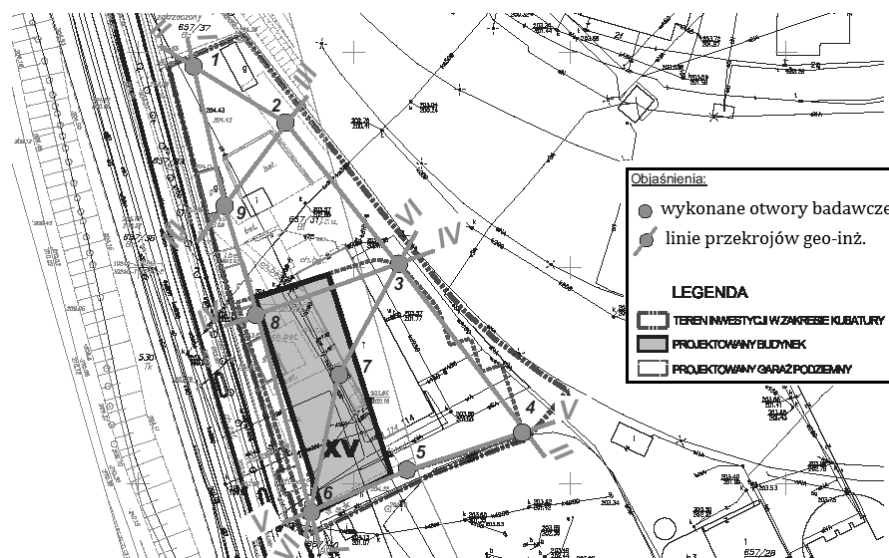


Rys. 2. Plan zagospodarowania terenu z zaznaczonymi strefami wpływu głębokiego wykopu, opracowanie własne na podstawie [7]

Fig. 2. Development plan with marked zones of influence of deep excavation, own elaboration based on [7]

3. Charakterystyka geologiczno-inżynierska obszaru badań

W analizie numerycznej wykonania ścianki szczelnej uwzględniono przestrzenny układ warstw geotechnicznych wraz z przestrzenną rzeźbą terenu w sąsiedztwie planowanego wykopu. Przestrzenny układ warstw geotechnicznych sporządzono na podstawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej [6], [7], rys. 3. Przyjęto liniową zmianę miąższości warstw geotechnicznych pomiędzy otworami badawczymi.



Rys. 3. Plan zagospodarowania terenu z zaznaczonymi strefami wpływu głębokiego wykopu, opracowanie własne na podstawie [7]

Fig. 3. Land development map with location of research holes, own elaboration based on [7]

Przyjęto, że w podłożu na głębokości 13,3-14,8 m p.p.t. zalegają utwory mioceńskie. Nad nimi znajdują się czwartorzędowe utwory piasków różnych frakcji i żwirów o miąższości 12 m. Nad warstwami czwartorzędownymi zalegają mady rzeczne w postaci glin pylastych, pyłów piaszczystych i piasków gliniastych. Powierzchnia terenu pokryta jest utworami nasypowymi o zróżnicowanej miąższości od 0,5 do 1,6 m. Teren inwestycji charakteryzuje się płaską rzeźbą terenu, położonego na wysokości 203,5-204,5 m. n.p.m.[7]. Na rys. 4 przedstawiono przekrój geologiczno-inżynierski zlokalizowany w ciągu badawczym I-I.

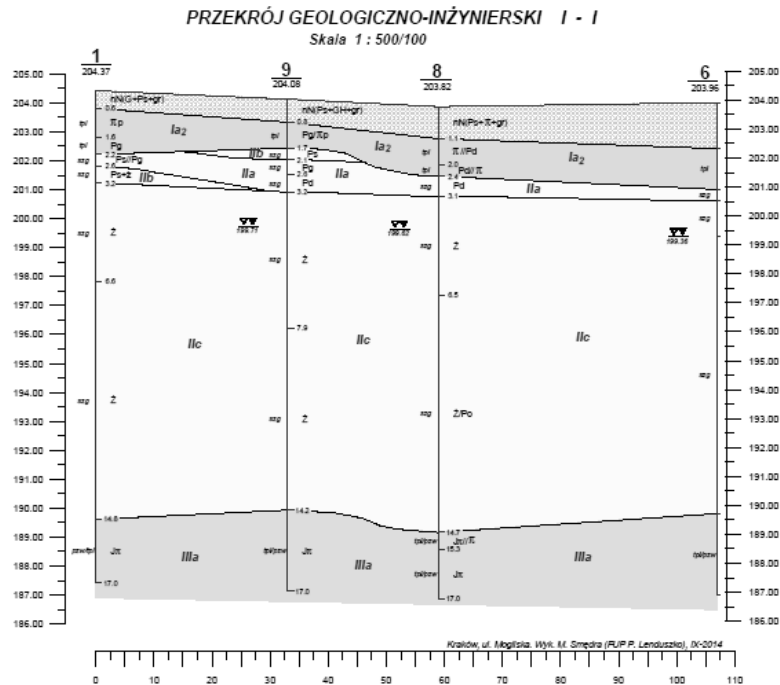
W modelowaniu numerycznym uwzględniono trzy warstwy geotechniczne. Parametry kąta tarcia wewnętrznego ϕ , kohezji c , ciężaru objętościowego γ , oraz stopnia plastyczności I_L , wraz ze stanem zagęszczenia gruntów I_D , wraz z modułem odkształcenia E_0 i współczynnikiem Poissona ν , zestawiono w tablicy 1.

Tabela 1. Parametry geotechniczne warstw przyjęte w modelowaniu numerycznym (opracowanie własne na podstawie [7])

Table 1. Geotechnical parameters of layers adopted in numerical modeling, own elaboration based on [7]

Lp.	Nazwa gruntu	Φ [°]	c [kPa]	γ [kN/m ³]	E_0 [MPa]	ν^*	I_L/I_D
1.	Ia1 (gliny pylaste)	13,00	13,50	20,50	16,50	0,25	0,30
2.	Ila (piaski drobne i gliniaste)	30,50	0,00	19,00	50,00	0,25	0,55
3.	Ilc (żwir, pospółki)	39,00	0,00	20,50	146,00	0,25	0,55
4.	IIIa (iły trzeciorzędowe)	13,00	60,00	21,50	22,00	0,25	0,00

*parametry dobrane na podstawie literatury, w założeniach do modelowania numerycznego [8],[9]



Rys. 4. Przekrój geologiczno-inżynierski I-I, na podstawie [7]

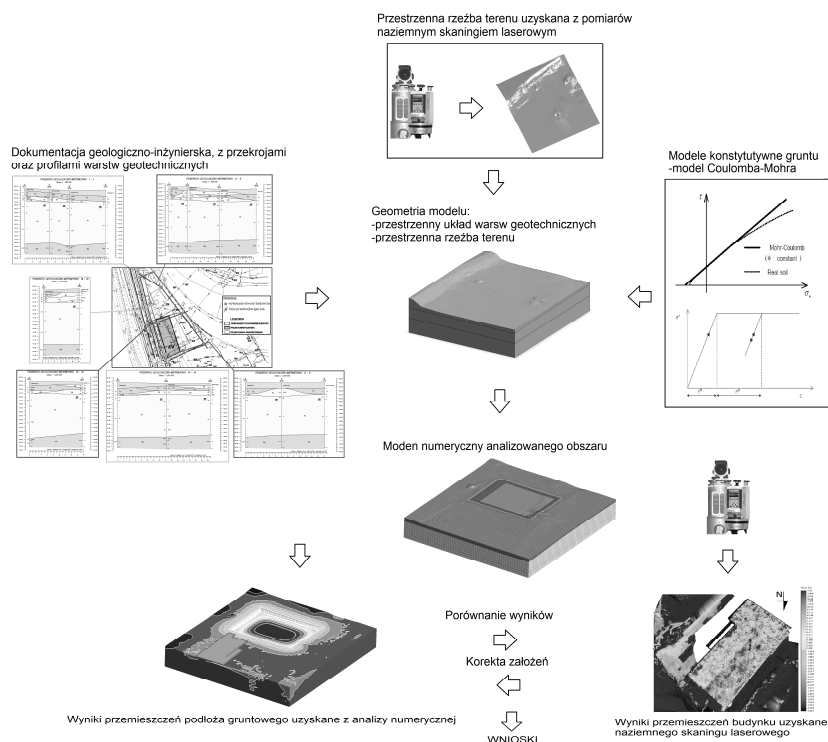
Fig. 4. Geological-engineering cross section I-I, based on [7]

4. Metodyka opracowania modelu numerycznego

4.1. Model przestrzenny

Model przestrzenny terenu wraz z lokalizacją miejsca wykonania głębokiego wykopu wykonano na podstawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej oraz naziemnego skaningu laserowego. Na rys. 5 przedstawiono procedurę otrzymania modelu numerycznego do analizy wpływu wykonania głębokiego wykopu na sąsiednią zabudowę.

Pomiar naziemnym skanerem laserowym wykonano w trzech punktach pomiarowych, umożliwiających stworzenie powierzchni analizowanego obiektu, narażonego na nierównomierne osiadania [3]. Metoda skanowania powierzchni polegała na wykorzystaniu wysokiej częstotliwości próbkowania, rzędu $f = 122 \text{ kHz}$ [10].



Rys. 5. Algorytm wyznaczenie wpływu wykonania głębokiego wykopu na osiadania budynku sąsiedniego (opracowanie własne)

Fig. 5. Algorithm to determine the effect of performing a deep excavation on the settlement of a neighboring building, own elaboration

Uzyskane pomiary obszaru, w postaci chmury punktów umożliwiają stworzenie przestrzennego kształtu rzeźby terenu, powstałego z połączenia elementów trójkątnych wygenerowanych z punktów pomiarowych. Powierzchnie terenu, powstałe z dwóch różnych pomiarów przeprowadzonych w ustalonych odstępach czasu, podanych w artykule [3], umożliwiły uzyskanie modelu różnicowego osiadań terenu. Model różnicowy powstaje jako różnica pomiędzy współrzędnymi pionowymi, otrzymanymi z pierwszego skanowania naziemnym skanerem laserowym, ze współrzędnymi stanowiącymi rezultat drugiego pomiaru skanowaniem laserowym.

Metoda badania skanerem laserowym umożliwiła wykonanie precyzyjnego odwzorowania terenu z dokładnością pomiarową 5 mm. Dodatkowo wyniki uzyskane naziemnym skanowaniem laserowym porównano z rezultatami otrzymanymi z reperów geodezyjnych zamontowanych w sąsiedztwie analizowanego obiektu [3]. Osiadania budynku umożliwiły weryfikację przemieszczeń uzyskanych z modelowania numerycznego.

4.2. Etapy modelowania

Analizę numeryczną wykonania głębokiego wykopu oraz ocenę jego wpływu na osiadania sąsiedniego budynku przeprowadzono w oparciu o poniższe etapy modelowania:

- Etap I liniowa analiza statyczna, z warunkami początkowymi modelu, przed wykonaniem wykopu,
- Etap II, nieliniowa analiza statyczna, zabicie brusów stalowych na głębokość 16m p.p.t., w warstwie ilów miocénskich,
- Etap III, nieliniowa analiza statyczna, wykonanie wykopu na głębokość 2m p.p.t., wraz z zamontowaniem oczepu stalowego z kształtowników HP320,
- Etap IV, nieliniowa analiza statyczna, pogłębienie wykupu na głębokość 4m p.p.t., zamontowanie wzmocnienia w postaci opaski stalowej z kształtowników HP320 na głębokości 2m p.p.t.,
- Etap V, nieliniowa analiza statyczna, zwiększenie głębokości wykopu do 6m p.p.t., wzmocnienie brusów opaską z kształtowników HP320 na głębokości 4m p.p.t.,
- Etap VI, nieliniowa analiza statyczna, pogłębienie wykopu do głębokości 8m p.p.t, wraz z zamontowaniem opaski z kształtowników HP 320 na głębokości 6m.p.p.t.,
- Etap VII, nieliniowa analiza statyczna, wykonanie wykopu do głębokości 10m p.p.t, wraz z zamontowaniem opaski z kształtowników HP320 na głębokości 8m p.p.t. ,
- Etap VIII, porównanie przemieszczeń pionowych uzyskanych z modelowania numerycznego z rezultatami otrzymanymi z naziemnego skaningu laserowego,
- Wydzielone warstwy geotechniczne zamodelowano modelem idealnie sprężysto – plastyczny z liniowym warunkiem plastyczności (Coulomba-Mohra),
- W modelowaniu numerycznym przyjęto następujące parametry materiałów.

Tabela 2. Parametry materiałowe uwzględnione w analizie numerycznej

Table 2. Material parameters included in the numerical analysis

L.p.	Symbol	Model materiału	γ [kN/m ³]	Φ [°]	c [kPa]	ν^*	E_0 [MPa]
1.	IaI	Coulomb-Mohr	20,50	13,0	13,5	0,25	16,5
2.	Ila	Coulomb-Mohr	19,0	30,5	0,1	0,25	50,0
3.	Ilc	Coulomb-Mohr	20,5	39,0	0,1	0,25	146,0
4.	IIIa	Coulomb-Mohr	21,5	13,0	60,0	0,25	22,0
5.	Larsen	sprężysty	77,8	-	-	0,3	210000
6.	HP320	sprężysty	77,8	-	-	0,3	210000
7.	Kontakt IaI	tarcie Coulomba	-	13,0	8,8	-	-
8.	Kontakt IIa	tarcie Coulomba	-	30,5	0,1	-	-
9.	Kontakt IIc	tarcie Coulomba	-	39,0	0,1	-	-
10.	Kontakt IIIa	tarcie Coulomba	-	13,0	39,0	-	-

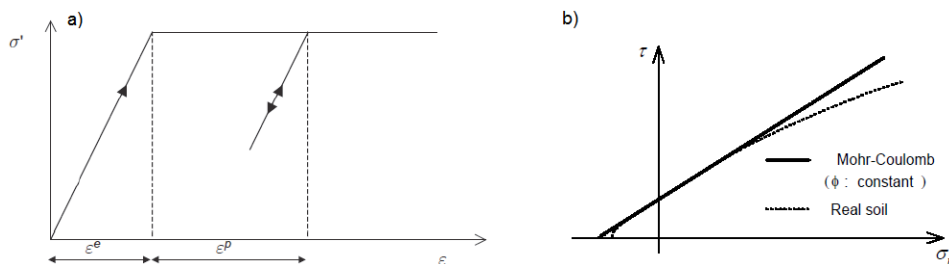
4.3. Modele gruntu

Obliczenia numeryczne modelu przeprowadzono w programie numerycznym, bazującym na metodzie elementów skończonych MIDAS GTS NX. Warstwy geotechniczne wykopu, o wymiarach rzutu 70x55m zostały zdyskretyzowane sześciobocznymi elementami skończonymi. Przyjęto wielkość oczka 1 m. Natomiast dla warstw geotechnicznych otaczających granice wykopu, dobrano wielkość oczka 2 m. Brusy stalowe wykopu zamodelowano płaskimi, czworobocznymi elementami skończonymi typu shell, o rozmiarze 1m. Elementy obudowy wykopu, tj. oczepek wraz z opaską stalową wykonaną z kształtowników HP320, zamodelowano jednowymiarowymi elementami belkowymi. Przyjęto wielkość oczka siatki równą 1m. Przyjęte rozmiary elementów skończonych wpływają na uproszczenie przebiegu warstw geotechnicznych powstałych na podstawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej [7]. Brzegi modelu zablokowano w trzech kierunkach, przyjmując nieprzesuwne warunki brzegowe. Dla bocznych powierzchni modelu, założono swobodę przemieszczeń wyłącznie na kierunku pionowym z. Dla warstw geotechnicznych dobrano model konstytutywny gruntu oparty na założeniach modelu Coulomba-Mohra, z uwzględnieniem właściwości sprężysto-plastycznych gruntu, bez wzmocnienia plastycznego [11],[12]. Kryterium Coulomba-Mohra można zapisać w ujęciu naprężeń głównych jako:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = -\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi + c \cos \phi \quad (2)$$

gdzie: σ_1, σ_3 – naprężenia główne [kPa],
 ϕ – kąt tarcia wewnętrznego gruntu [°],
 c – kohezja [kPa].

Na rys. 6 przedstawiono zależność zmian odkształceń sprężystych (ϵ_s) oraz plastycznych (ϵ_p) w zależności od wartości naprężenia efektywnego przekazywanego na próbkę gruntu w dobranym modelu.



Rys. 6. a) Zależność naprężenia-odkształcenia w modelu sprężysto, idealnie plastycznym, b) Zależność naprężeń normalnych od naprężeń stycznych w gruncie rzeczywistym (real soil) oraz w modelu Coulomba-Mohra (Mohr-Coulomb), na podstawie [12]

Fig. 6. a) strain-strain relationship in elastic, perfectly plastic model, b) the dependence between normal stress and shear stresses in real soil and in the Mohr-Coulomb model, based on [12]

Pomiędzy warstwami geotechnicznymi, a ścianką szczelną zamodelowano elementy kontaktowe wykorzystujące model tarcia Coulomba. Zakłada on że siła tarcia jest proporcjonalna do wielkości uzyskanej z przemnożenia współczynnika tarcia i siły działającej na kierunku stycznym. Kryterium uplastycznienia jest zdefiniowane jako [12]:

$$f = \sqrt{t_t^2} + t_n \tan \phi(\kappa) - c(\kappa) = 0 \quad (3)$$

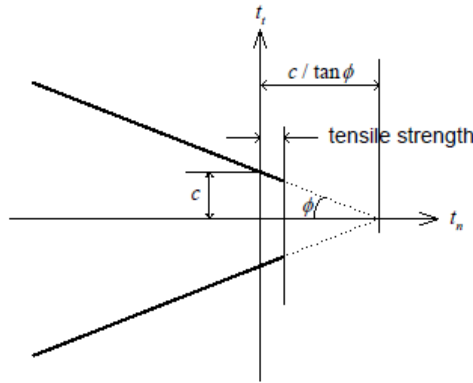
gdzie: t_t – siła działająca na kierunku stycznym do powierzchni kontaktu [kN],
 t_n – siła działająca na kierunku normalnym do powierzchni kontaktu [kN],
 ϕ – kąt tarcia wewnętrznego gruntu [°],
 c – kohezja [kPa],
 κ – funkcja względnych przemieszczeń plastycznych.

Na rys. 7 przedstawiono zależność pomiędzy wytrzymałością ośrodka gruntowego na ściskanie i rozciąganie, w ujęciu modelu tarcia Coulomba.

Funkcję względnych przemieszczenia plastycznych (κ), można wyznaczyć z zależności [12]:

$$\kappa = \Delta \dot{u}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial g}{\partial t} \quad g = \sqrt{t_t^2} + t_n \tan \psi \quad (4)$$

gdzie: ψ – kąt dylatacji [°],
 $\dot{\lambda}$ – mnożnik plastyczny.



Rys. 7. Zależność wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie w modelu tarcia Coulomba w zależności od siły stycznej (t_t) i siły normalnej (t_n) do powierzchni kontaktu, na podstawie [12]

Fig. 7 The dependence of compressive strength and tensile strength in Coulomb's friction model on the tangential force (t_t) and normal force (t_n) on the contact surface, on the basis of [12]

Należy zwrócić uwagę, że deformacje pionowe podłoża gruntowego uzyskane na podstawie modelu Coulomba-Mohra, są deformacjami powstałymi wskutek przekroczenia naprężeń dopuszczalnych w gruncie (rys. 6. a). W przeciwnym wypadku przemieszczenia pionowe powstałe w zakresie sprężystym są odwracalne.

5. Wyniki analizy

Model numeryczny przeanalizowano pod kątem wpływu deformacji podłoża gruntowego, powstałych w wyniku głębokiego wykopu, na sąsiedni obiekt budowlany. Na rys. 8 przedstawiono zmianę przemieszczeń pionowych w strefie bezpośredniego wpływu osiadań S_I [4] na sąsiedni budynek (krzywa żółta), jak i również uwzględniono zmianę przemieszczeń pionowych podłoża w strefie S_{II} wtórnego wpływu wykopu na istniejącą zabudowę (krzywa zielona). Wyniki zestawiono dla punktów, zlokalizowanych w kierunku prostopadłym od granicy wykopu do ścian elewacji budynku.



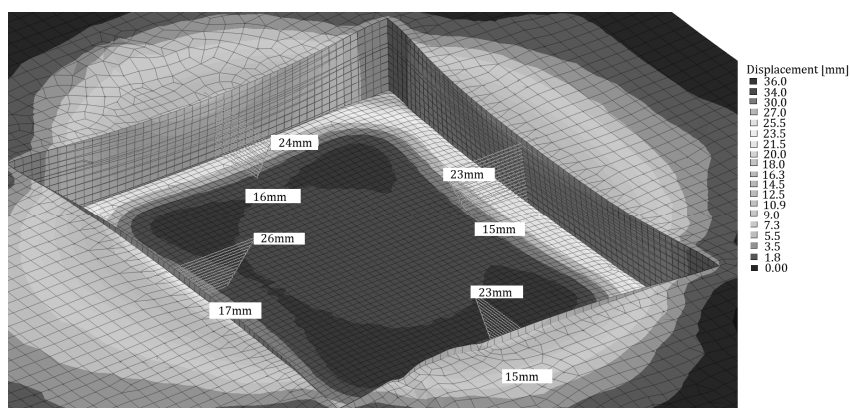
Rys. 8. Przemieszczenia pionowe podłoża gruntowego uzyskane z analizy numerycznej w strefie S_I i strefie S_{II} , opracowanie własne

Fig. 8 Vertical ground displacement obtained from numerical analysis in S_I and S_{II} zones, own elaboration

Na rys. 9 przedstawiono przemieszczenia całkowite obudowy wykopu wraz z deformacjami podłoża gruntowego w sąsiedztwie wykopu.

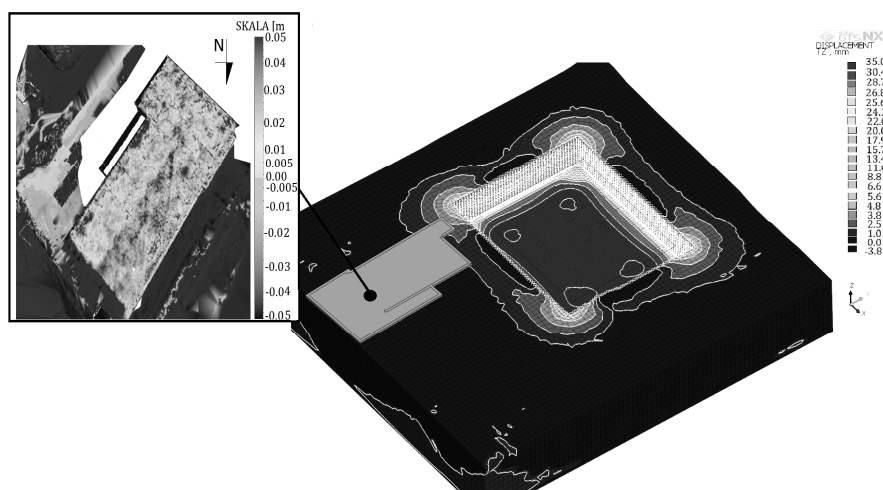
Na rys. 10 porównano wyniki uzyskane naziemnym skanowaniem laserowym z przemieszczeniami pionowymi uzyskanymi w wyniku modelowania numerycznego. Wyniki przemieszczeń pionowych uzyskane dla etapu VIII, wykopu głębokości 10 m p.p.t. są równe 3.8 mm, w sąsiedztwie budynku. Dodatkowo wartości przemieszczeń pionowych uzyskane z pomiarów geodezyjnych wynio-

sły 3 mm [12]. Wartości przemieszczeń pionowych z badań pomiarowych naziemnym skanerem laserowym, z zakresu od 10 do 50 mm, spowodowane są wykonaniem, na powierzchni dachu budynku, dodatkowej warstwy ochronnej, po badaniach pomiarowych.



Rys. 9. Przemieszczenia całkowite obudowy wykopu z deformacjami podłoża gruntowego, opracowanie własne

Fig. 9. Total displacement of the excavation casing with deformation of the subsoil, own elaboration



Rys. 10. Porównanie przemieszczeń pionowych modelu przestrzennego z deformacjami uzyskanymi naziemnym skanerem laserowym, opracowanie własne

Fig. 10. Comparison of vertical displacements of spatial model with deformation obtained by terrestrial laser scanner, own elaboration

6. Podsumowanie

Analiza numeryczna umożliwiła ocenę wpływu wykonania głębokiego wykopu na deformacje podłoża gruntowego w sąsiedztwie istniejącego obiektu budowlanego. Uzyskane wartości przemieszczeń pionowych z obliczeń numerycznych modelu przestrzennego, uwzględniającego przestrzenny charakter zmian warstw geotechnicznych i rzeźby terenu, wyniosły 3.8 mm. Są one zbliżone z wartościami pomierzonymi naziemnym skanerem laserowym na elewacji budynku oraz pomiarami geodezyjnymi [3]. Otrzymane rezultaty obliczeń i wyników pomiarów nie przekraczają dopuszczalnych wartości osiadań pionowych dla budynków 1 kondygnacyjnych wynoszących 8cm. Również wartości przemieszczeń w strefie S_{II} związanej z wtórnym wpływem wykopu na istniejącą zabudowę są nieznacznie większe od wartości podanej w standardzie ITB (5 mm) [4]. Projektowany wykop nie wpłynie negatywnie na pracę konstrukcji obiektu sąsiadującego. W celu oceny dokładniejszego wpływu projektowanego wykopu na sąsiedni obiekt budowlany zaleca się wykonanie dodatkowych badań laboratoryjnych, z wykorzystaniem aparatu edometrycznego, umożliwiającego otrzymanie pełnej charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej badanej warstwy geotechnicznej przy zadanych obciążeniach. Umożliwi to dokładniejsze zamodelowanie zachowania się ośrodka gruntowego przy wykorzystaniu plastycznych modeli konstytutywnych gruntu, takich jak np. model Cam-Clay [11].

Literatura

- [1] Pawłowski A. Z., Cała I.: Budynki wysokie. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006.
- [2] Szulborski K., Michalak H., Woźniak M.: Zabezpieczenia i obserwacja obiektów w sąsiedztwie głębokich wykopów. XXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektowania Konstrukcji, Wisła, 2009.
- [3] Szwarkowski D., Zięba J.: Monitoring osiadań budynków w sąsiedztwie głębokiego wykopu budynku „Mogilska Tower” w Krakowie, przy zastosowaniu naziemnego skaningu laserowego Riegl VZ-400, Episteme, 2016, s. 149-158.
- [4] Kotlicki W., Wysokiński L.: Ochrona zabudowy w sąsiedztwie głębokich wykopów, ITB Seria: instrukcje, wytyczne, poradniki nr 376/2002, Warszawa, 2002.
- [5] PN-81/B-03020. Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [6] Firma P.B.H.T. „Edmund Leś” – generalny wykonawca „Mogilska Tower”.
- [7] Firma Usług Projektowych Paweł Lenduszek, Dokumentacja Geologiczno-Inżynierska dla projektowanej inwestycji: Budowa budynku mieszkalnego wielorodzinnego z usługami w parterze wraz z infrastrukturą techniczną i garażem podziemnym oraz zagospodarowaniem terenu w zakresie kubatury zlokalizowanej na działce nr 657/31 obr. 4 Śródmieście w rejonie ul. Mogilskiej w Krakowie, Kraków, 2014.

- [8] Cała M., Flisiak J.: Analiza stateczności skarp i zboczy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych. XXIII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, Bukowina Tatrzańska, 2000.
- [9] Griffiths D.V., Lane P.A.: Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, vol. 49 (3), 1999, pp. 387-403.
- [10] RIEGL LMS.: Oprogramowanie Systemowe i Przetwarzania Danych RiSCAN PRO dla skanerów laserowych 3D firmy RIEGL LMS. Austria, 2009.
- [11] Wrańa B.: Laboratory testing of soil mechanics, Kraków, Wydawnictwo PK, 2015.
- [12] MIDAS GTS NX, Manual specifications, 2016.

IMPACT OF DEVELOPING DEEP EXCAVATION UNDER HIGH CONSTRUCTION MOGILSKA TOWER IN KRAKOW FOR EXISTING BUILDING IN SPATIAL MODEL BASED ON FINITE ELEMENT METHODS (FEM)

S u m m a r y

This article presents a comprehensive approach for modeling the Larsen high-trench wall-tightening technology of the Mogilska Tower in Cracow. The building as one of the few in Krakow, will have three underground floors. Design and execution of deep excavations together with their security is a difficult problem, requiring the designer of a wide range of geotechnical knowledge. Correct design of the structure and trench protection requires knowledge of the interaction between the structure of the ground and the knowledge of the technology of the wall excavation. Execution of tall buildings with underground floors in the vicinity of existing buildings involves the need to assess the impact of deep excavation on objects exposed to unequal settlements. The ITB's Instruction for deep excavations emphasizes the impact of deep excavations on the settlement of neighboring buildings using a simplified or detailed method based on finite element method (FEM). The article presents the results of the numerical modeling of the deep excavation protection of the Larsen type. The spatial layout of the geotechnical layers is taken into consideration. The spatial state of strain and deformation of the model was assumed. The stages of deep excavation have been accepted. The results of the computations were compared with the displacements obtained from geodetic and terrestrial laser scanning. The reach and influence of the deep excavation on the settlement of neighboring objects was determined.

Keywords: terrestrial laser, building settlements, earthworks, numerical analysis

Przesłano do redakcji: 20.09.2017 r.

Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.