

ALEKSANDER URBAŃSKI, AGNIESZKA ŁABUDA*

METODA MODELOWANIA 2D/3D UKŁADÓW TYPU „ŚCIANKA BERLIŃSKA” ZABEZPIECZAJĄCYCH GŁĘBOKIE WYKOPY

A MODELING METHOD 2D/3D OF A DEEP EXCAVATION SUPPORTED BY A SOLDIER PILE WALL

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę symulacji numerycznych MES nośności zabezpieczenia wykopu ścianką berlińską. Podstawowa analiza, przeprowadzana w płaskim stanie odkształcenia, jest wzbogacana wynikami pomocniczych zadań 3D. Pozwala to na odtworzenie istotnych cech trójwymiarowych w zachowaniu się układu. Metoda jest efektywnym narzędziem służącym do odtworzenia stanu przemieszczeń i naprężeń w elementach konstrukcyjnych oraz do oceny stateczności układu. Metodę zastosowano do analizy rzeczywistego przypadku.

Słowa kluczowe: wykop, ścianka berlińska, MES

Abstract

In the paper a method of numerical simulations of an excavation supported by soldier pile wall is presented. Basic analysis, conducted in plane strain, is enriched with results of subsidiary 3D tasks. It allows to reconstruct some significant three-dimensional features of the system. The method is an effective tool used to model displacements and stresses in structural elements as well as to perform stability analysis. The method was used to analyze a practical case.

Keywords: excavation, soldier pile wall, FEM

* Dr hab. inż. Aleksander Urbański, prof. PK, mgr inż. Agnieszka Łabuda (doktorantka), Instytut Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

W artykule przedstawiono szczegółowo sposób modelowania ścianek berlińskich, pokazanych na rys. 1, nazwany przez autorów „metodą 2D/3D”, tj. taki, w którym zasadnicza analiza układu jest przeprowadzana w płaskim stanie odkształcenia (PSO), ale uzupełniona jest przez elementy łącznikowe, odzwierciedlające lokalnie trójwymiarową pracę masywu gruntowego w otoczeniu periodycznie usytuowanych pali. Identyfikacja cech sprężystych i wytrzymałościowych tych łączników wynika z pomocniczych zadań 3D. Pozwala to na odtworzenie istotnych zjawisk trójwymiarowych mających kluczowe znaczenie dla analizy statycznej układu.

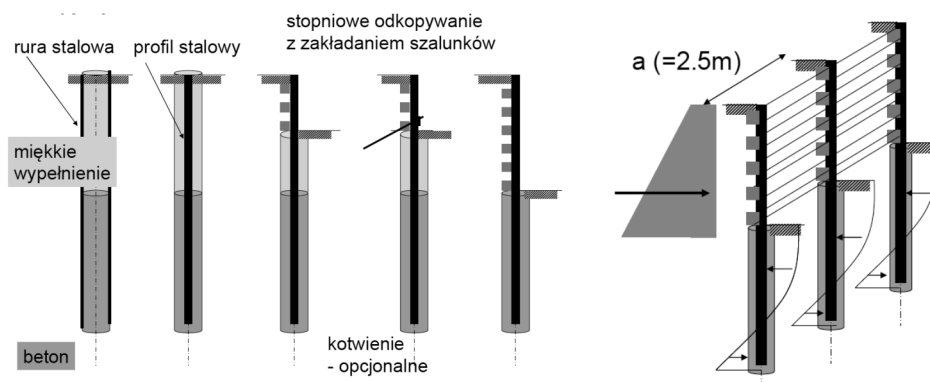
W pracy A. Urbańskiego i M. Grodeckiego [1] metodę tę zastosowano do analizy rzeczywistego przypadku stanu awaryjnego pewnej konstrukcji zabezpieczenia wykopów za pomocą ścianki berlińskiej. Tam też (we wstępie) przedstawiono główne zasady symulacji całego układu zawierającego ściankę, takie jak: użyte modele konstytutywne, etapowanie, kontrolowane odciążanie. W niniejszym artykule analizuje się ten sam obiekt, ale w odróżnieniu od pracy [1], rozważa się dla niego hipotetyczne scenariusze wynikające z odmiennego sposobu wykonywania robót ziemnych (zastosowanie przypór ziemnych). Celem artykułu jest:

- przedstawienie metody 2D/3D zastosowanej do obliczania układu periodycznego pali współpracujących z gruntem,
- wyjaśnienie, czy w zaistniałej sytuacji (opisanej w [1]), można było bezpiecznie wykonać ściankę berlińską tylko dzięki właściwej kolejności robót ziemnych.

2. Metoda obliczeń 2D/3D zastosowana do układu periodycznego pali

2.1. Uwagi wstępne o modelowaniu układów trójwymiarowych periodycznych za pomocą modelu MES 2D w płaskim stanie odkształcenia

Podstawowym problemem w modelowaniu ścianek berlińskich w systemie ZSoil lub innym podobnym programie MES stosowanym w geotechnice jest radzenie sobie z przestrzenią (3D) i periodyczną strukturą pokazaną na rys. 1, używając modelu 2D płaskiego stanu odkształcenia (PSO), nie tracąc istotnych cech 3D. Ważną konstatacją jest stwierdzenie, że deformacja i stateczność układu zależy głównie od **nośności gruntu wokół pali** obciążonego **znacznymi** siłami poziomymi. Tymczasem efekt koncentracji jest całkowicie pomijany przez analizę PSO. Operuje ona bowiem stałymi, uśrednionymi w kierunku przebiegu ścianki, wielkościami przemieszczeń i naprężeń. Stąd też użycie modelu PSO bez żadnych modyfikacji, poprawne np. w analizie ścian oporowych z betonu czy ścianek szczelnych z grodzic Larsena, w przypadku ścian berlińskich jest zasadniczo błędne. Prowadzi ono do wyników po stronie niebezpiecznej, znacznie przeszacowując stateczność oraz zaniżając wielkość deformacji. *Notabene* takie postępowanie było jedną z przyczyn wystąpienia stanu awaryjnego, opisanego w [1].



Rys. 1. Ścianka typu „berlińskiego”. Etapy wykonania i schemat pracy w stanie końcowym

Fig. 1. A soldier pile wall. Construction stages and final schema

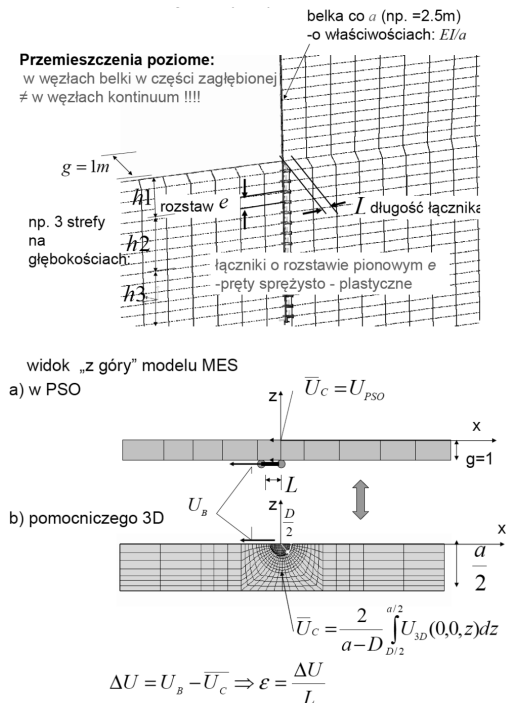
Układ pokazany na rys. 1 charakteryzuje się powtarzalnością (periodycznością), a także istotną przestrzennością (3D). Oczywiście, analiza trójwymiarowego zadania dla powtarzalnej sekcji rozważanego układu ścianowego jest obecnie w systemie ZSoil w pełni wykonalna. Pojawia się więc pytanie, dlaczego nie pełna analiza 3D? W tym jednak wypadku trudno zalecić modelowanie MES 3D jako metodę do powszechnego stosowania w projektowaniu, a to ze względu na wiele okoliczności występujących w praktyce:

- ograniczony czas, który w praktyce można poświęcić na modelowanie 3D. Jak to wynika z doświadczeń autorów, przy modelowaniu w 3D potrzeba ok. 3–10 razy więcej czasu na budowę modelu, przeprowadzenie obliczeń i przetwarzanie wraz z analizą wyników niż przy modelowaniu w 2D,
- pomimo (pozornej) prostoty układu, modelowanie MES 3D ścianki berlińskiej wymaga zaawansowanych opcji obliczeniowych: etapowanie, kontakt, duże przemieszczenia,
- konieczność gęstej dyskretyzacji strefy w otoczeniu pali powoduje potrzebę znacznej mocy obliczeniowej i zwiększenia czasu obliczeń,
- wciąż mała dostępność oprogramowania z opcją modelowania MES 3D,
- zbyt małe środki finansowe przeznaczane na tę część prac projektowych (często traktowaną jako drugorzędna).

Stąd też, mając na uwadze głównie efektywność procesu projektowania przedmiotowych konstrukcji, istnieje potrzeba opracowania uproszczonego, ale wiarygodnego, sposobu modelowania w 2D (lub 1D), dającego oszacowania sztywności i nośności granicznej periodycznego układu pali, oddającego najważniejsze zjawiska wynikające z pracy 3D. Zdaniem autorów postulaty te spełnia metoda przedstawiana poniżej, zwana dalej „metodą 2D/3D”. W metodzie tej cały układ wynikający z danego przekroju geotechnicznego analizowany jest przy założeniu płaskiego stanu odkształceń (PSO), przy założeniu modelu sprężysto-plastycznego (np. Mohr-Coulomb). W części zagłębionej pal traktuje się jako element belki zginanej, ale połączony z elementami continuum za pośrednictwem dodatkowych (fikcyjnych) prętów (łączników) sprężysto-plastycznych przebiegających poziomo, symulujących efekty trójwymiarowe w pracy pali. Identyfikacja sztywności i wytrzymałości tych łączników może być przeprowadzona w toku pomocniczych zadań 3D, opisanych poniżej.

2.2. Opis metody 2D/3D w analizie sekcji powtarzalnej układu periodycznego pali

Modele MES stosowane w rozważanej metodzie pokazano na rys. 2 i 3.



Rys. 2. Modele obliczeniowe MES w metodzie 2D/3D ścianki berlińskiej

Fig. 2. FEM models in the method 2D/3D of soldier pile wall

Cechą szczególną modelu PSO jest fakt, że węzły elementów belkowych modelujących część zagłębioną pala **nie pokrywają** się z węzłami kontinuum. Pomiedzy nimi znajdują się fikcyjne pręty o charakterystyce sprężysto plastycznej. Wydłużenie tych prętów ΔU odwzorowuje różnicę pomiędzy uśrednionymi przemieszczeniami (w węzłach kontinuum) a przemieszczeniami poziomymi w węzłach elementów reprezentujących pal.

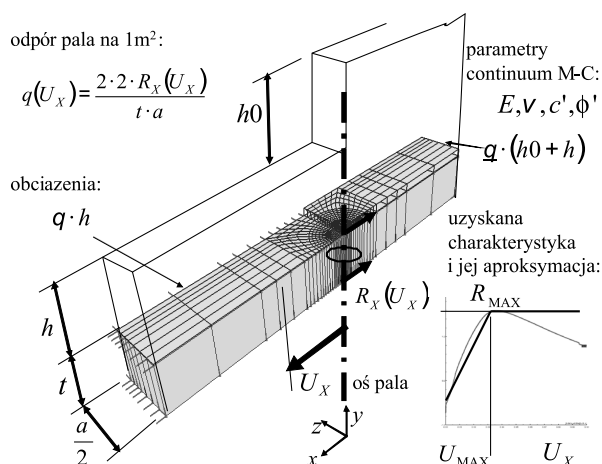
Identyfikacja ich charakterystyk wymaga rozwiązania pomocniczych zadań trójwymiarowych (3D) dla wycinka poziomego (warstwy) połówki sekcji powtarzalnej (np. o szerokości $a/2 = 1/2 \cdot 2,0 \text{ m} = 1,0 \text{ m}$, grubości dowolnej, np. $t = 0,1 \text{ m}$), obciążonego:

- pionowo działającym ciężarem gruntu ($p_y = -\gamma h$ dla wykopu, $p_y = -\gamma(h_0 + h)$ dla naziomu),
- narastającym wymuszonym poziomym przemieszczeniem U_x w węzłach pala.

Kinematyczne warunki brzegowe są następujące (rys. 3):

- w pł. XY (z warunków symetrii i periodyczności układu) $U_z(x, y, z = \frac{1}{2}a) = U_z(x, y, z = 0) = 0$;
- w pł. XZ (na spodzie modelu) $U_y(x, y = 0, z) = 0$;
- w pł. YZ (w dostatecznie dużej odległości l od rozpatrywanego zaburzenia jednorodności pola przemieszczeń) $U_x(x = \pm l, y, z) = 0$.

Zadanie to jest rozwiązywane jako sprężysto-plastyczne z warunkiem plastyczności Mohra-Culomba, z parametrami odkształcalności E , ν i wytrzymałościowymi c' , ϕ' . Uwzględnienie w modelu pomocniczym MES dla warstwy poziomej (rys. 3) obciążeń pionowych, pochodzących od ciężaru własnego gruntu znajdującego się powyżej danej warstwy poziomej, generujących w niej naprężenia ściskające pionowe σ_{yy} , powoduje konieczność rozważania w powyższym zadaniu trójwymiarowego stanu naprężenia. Jest to istotne, ponieważ naprężenia te wpływają zasadniczo na odpowiedź materiału (gruntu) przez zmianę warunku przejścia w stan plastyczny. W systemie ZSoil można to uzyskać, generując jedną warstwę elementów objętościowych prostopadłościennych (B8), zachowując geometrię 2D w warstwie w płaszczyźnie XZ .



Rys. 3. Zadanie pomocnicze w widoku 3D

Fig. 3. Subsidiary problem in 3D view

Podstawowym wynikiem jest zależność $U_x \sim R_x$, tj. przemieszczenie – reakcja w punktach wymuszenia przemieszczeniami. Przykład takiej zależności pokazano na rys. 3.

Pozwala ona określić charakterystykę **przemieszczenie–siła oporu bocznego** pala, rozmytą na szerokości $\frac{1}{2}a$ i wysokości wycinka $t - q$ kN/m². Ta silnie nieliniowa charakterystyka, uzyskana w pomocniczym zadaniu 3D, stanowi podstawę do zbudowania przybliżonej relacji sprężysto-plastycznej (biliniowej) dla fikcyjnych poziomych łączników prętowych wprowadzonych do modelu 2D (PSO), mających symulować efekty trójwymiarowe, takie jak **ograniczoną zdolność przenoszenia sił poziomych przez pale zagłębione w ośrodku gruntowym**.

Łączniki te należy rozmieszczać równomiernie (w rozstawie e , wtedy ich powierzchnia powinna być równa: $A' = e \cdot g$), pomiędzy każdym węzłem elementu belki zginanej (pal + profil stalowy) a odpowiadającym mu węzłem kontinuum. Długość łącznika L może być dowolna. Charakterystykę tych łączników (moduł Younga E_c , wytrzymałość na rozciąganie /ściskanie f_t/f_c) znajduje się z warunku równowagi sił w modelu 2D i 3D, wg następującego algorytmu. Mając daną zależność:

$$R_x = R_x(\Delta U) \quad (1)$$

można uzyskać uśrednione, fikcyjne naprężenia (odpór gruntu) na powierzchni $t \cdot a$:

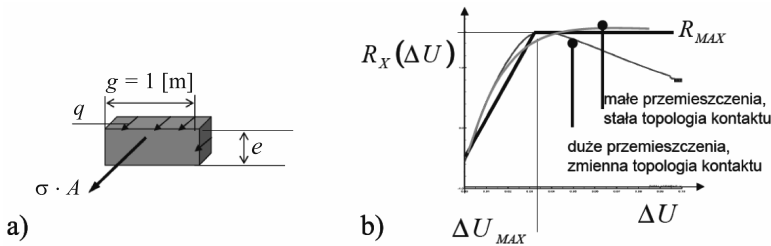
$$q(\Delta U) = \frac{2 \cdot 2 \cdot R_x(\Delta U)}{t \cdot a} \quad (2)$$

Żądanie statycznej równoważności obu modeli (3D i PSO), tj.: siła w łączniku o powierzchni A odpowiada sile na powierzchni $A' = e \cdot g$, gdzie g jest jednostkową grubością w modelu PSO, (por. rys. 4), prowadzi do związku:

$$\sigma \cdot A = q \cdot e \cdot g \quad (3)$$

Stąd naprężenia w łączniku:

$$\sigma(\epsilon) = \frac{q \cdot e \cdot g}{A} = \frac{4e \cdot g}{t \cdot a \cdot A} R_x(\epsilon \cdot L) \quad (4)$$



Rys. 4. Statyczna równoważność (a). Przykładowe relacje i ich biliniowa aproksymacja (b)

Fig. 4. Static equivalency (a). Exemplary relations and their bilinear approximation (b)

Z aproksymacji relacji $R_x(\Delta U)$ biliniową funkcją (jak dla zależności $\sigma(\epsilon)$ w modelu pręta sprężysto-plastycznego) otrzymuje się wytrzymałości na rozciąganie/ściskanie f_t i f_c oraz moduł Younga E_c materiału fikcyjnego łącznika o powierzchni A i długości L :

$$\left. \begin{matrix} f_t \\ f_c \end{matrix} \right\} = \frac{4 \cdot R_{MAX}^{\pm} \cdot e \cdot g}{t \cdot a \cdot A} \quad (5)$$

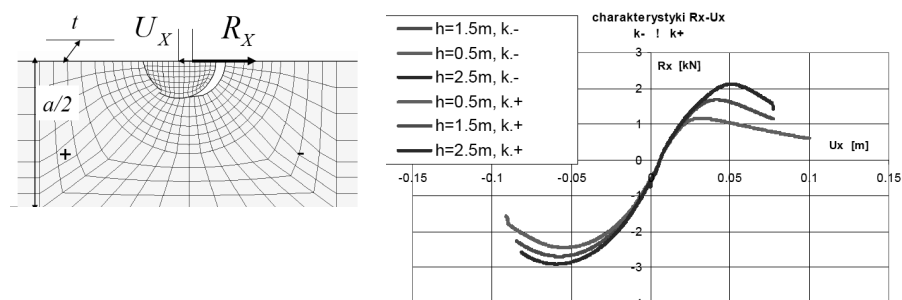
$$E_c = \frac{4 \cdot R_{MAX} \cdot e \cdot g \cdot L}{t \cdot a \cdot A \cdot \Delta U_{MAX}} \quad (6)$$

2.3. Przykładowa identyfikacja charakterystyk łączników sprężysto-plastycznych

Obliczenia przeprowadzono dla układu opisanego w [1]. Warunki gruntowe można uznać za przeciętne: jednorodna warstwa iltu twardo-plastycznego o parametrach modelu Mohra-Coulomba $c = 30 \text{ kPa}$, $\phi = 18^\circ$, $\psi = 0$, $E = 10 \text{ MPa}$, $\nu = 0,3$. Wysokość naziomu: $h_0 = 4,0 \text{ m}$. Graniczne wielkości odporu bocznego narastają wraz z głębokością, są różne w zależności od kierunku ruchu do (ozn. $k+$) lub od (ozn. $k-$) wykopu. W rozważanym

przykładzie wyodrębniono 3 strefy na głębokości $h_{\max} = 4,5$ m pala: 0–1,0 m (charakterystyka wyznaczana na głębokości $h_1 = 0,5$ m); 1,0–2,0 m, $h_2 = 1,5$ m; $> 2,0$ m, $h_3 = 2,5$ m. Wykonano pomocniczy model 3D w 3 wariantach różniących się obciążeniami pionowymi. Otrzymano $3 \times 2 = 6$ charakterystyk dla kierunków $k-$ i $k+$ pokazanych na rys. 5. Na każdej z nich odczytano wartość reakcji maksymalnej R_{\max} i towarzyszącego jej przemieszczenia U_{\max} . Odejmując od nich wartość uśrednionych przemieszczeń U_C otrzymano wydłużenie ΔU_{\max} . Ze wzorów (5) i (6) uzyskano poszukiwane wartości charakterystyk łączników (tab. 1). Przyjęto (dowolnie): powierzchnię łącznika $A = 0,2$ m², ich rozstaw $e = 0,2$ m i długość $L = 0,1$ m:

- wytrzymałość na rozciąganie łącznika (przy kierunku $k+$) f_t wg tab. 1;
- wytrzymałość na ściskanie łącznika (przy kierunku $k-$) f_c wg tab. 1;
- moduł Younga łącznika E_C –przyjęto wartość średnią z kierunków $k+$ i $k-$: $E_C = 85$ kPa.



Rys. 5. Funkcje $R_X(U_X)$ dla 3 różnych głębokości i 2 kierunków wymuszenia przemieszczeń

Fig. 5. Functions $R_X(U_X)$ for 3 different depth and 2 directions of imposed displacements

Uzyskane charakterystyki sprężysto-plastycznych łączników przedstawiono w tab. 1.

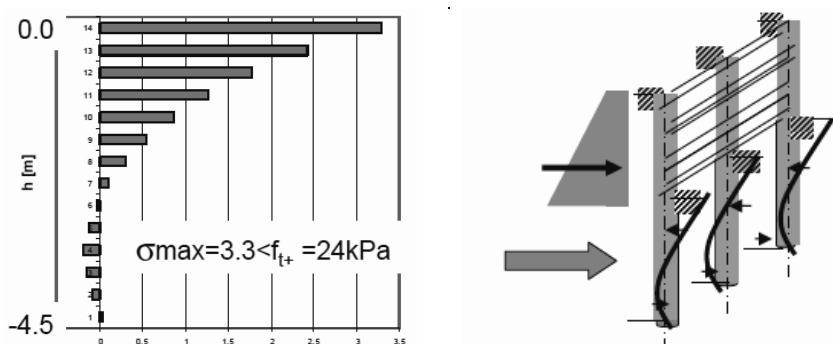
Tabela 1

Wartości charakterystyk fikcyjnych prętów łącznikowych

	i	h_i [m]	ΔU_{\max} [m]	R_{\max} [kN]	f_t^+/f_c^- [kPa]	ϵ	E_C [kPa]
$k+$	3	2,50	0,045	1,70	34,00	0,45	75,56
	2	1,50	0,040	1,50	30,00	0,40	75,00
	1	0,50	0,030	1,20	24,00	0,30	80,00
$k-$	3	2,50	0,050	2,30	46,00	0,50	92,00
	2	1,50	0,045	2,15	43,00	0,45	95,50
	1	0,50	0,040	2,00	40,00	0,40	100,0

2.4. Odpór boczny działający na pale

Przedstawia się wyniki dotyczące rozkładu odporu bocznego działającego na pale przemieszczający się poziomo (przykładowo dla przekroju I wg [1]), w warunkach wykonywania wykopu z pozostawieniem przypór ziemnych (jak w rozdz. 3.1). W tym przypadku, odmiennie niż w przypadkach opisanych w [1], gdzie wystąpił stan graniczny, istnieją duże rezerwy nośności. Reprezentują je naprężenia w fikcyjnych prętach łącznikowych, dane wzorem (4). I tak, w warstwie górnej fikcyjne naprężenie osiąga wartość $\sigma_{\max} = 3,3 \text{ kPa}$, a wartość graniczna jest oszacowana na $f_t = 24 \text{ kPa}$ (tab. 1).



Rys. 6. Odpór boczny pala (naprężenie w łączniku)

Fig. 6. Lateral pressure acting on a pile (stress in the connector)

3. Zastosowanie metody 2D/3D do analizy symulacyjnej rzeczywistych układów zabezpieczeń ściankami berlińskimi

W pracy [1] przedstawiono analizę stanu awaryjnego układu ścianek berlińskich, wykonaną za pomocą rozważanej metody 2D/3D. Wykazano tam, że jedną z przyczyn zaistniałej awarii była niewłaściwa sekwencja wykonywania wykopu – dopuszczająca na pewnym etapie pracę wspornikową ścianki berlińskiej, co przy istniejącej geometrii i obciążeniach prowadziło do znacznego wyłączenia strefy gruntu, w której zagłębiono pale CFA i w konsekwencji do osiągnięcia stanu granicznego utraty stateczności całego układu.

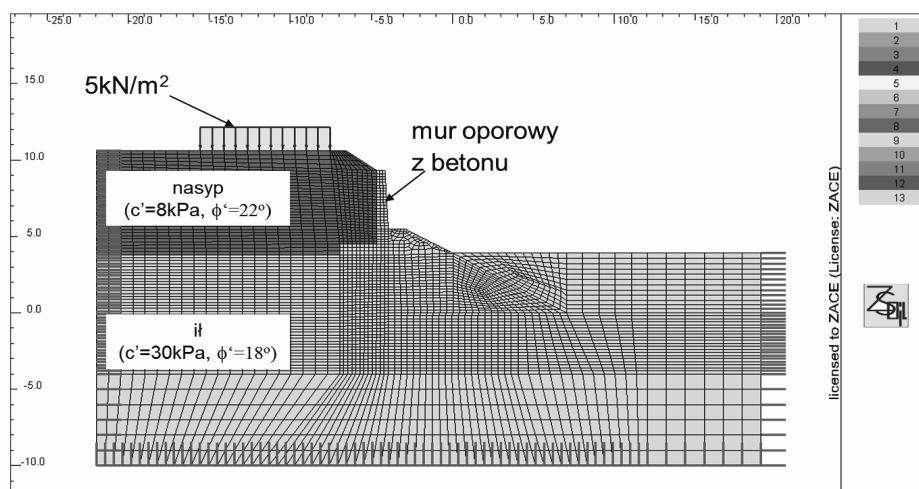
W niniejszym artykule przeanalizowano jeden (hipotetyczny) sposób prawidłowego zabezpieczenia wykopów polegający na częściowym zachowaniu przypór ziemnych. Przeprowadzono symulację MES tego samego układu palowego w programie ZSoil. Autorzy wykonali analizę dwóch przekrojów oznaczonych I i II (analogicznie do [1]).

3.1. Przekrój I wg [1]

Poniżej przedstawiono kolejne etapy symulacji alternatywnego rozwiązania problemu przedstawionego w pracy [1]. Symulację wykonano w następujących etapach:

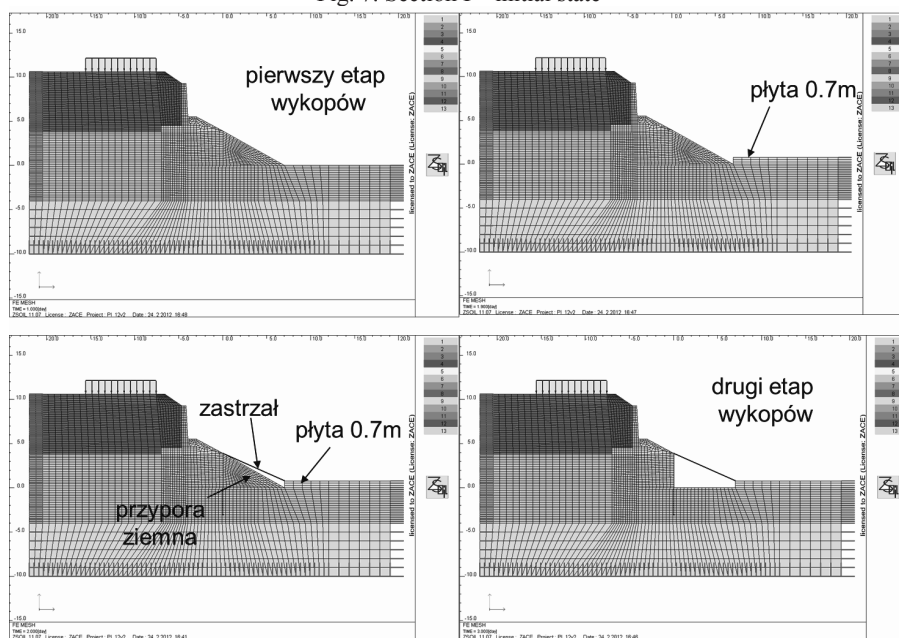
- 1) stan początkowy przed wykonaniem wykopu,
- 2) usunięcie warstwy gruntu na głębokość $-4,8 \text{ m}$ i zastosowanie przypory ziemnej,

- 3) wykonanie żelbetowej płyty fundamentowej o grubości 0,7 m,
- 4) wstawienie elementów konstrukcyjnych „ścianki berlińskiej” (pał CFA + profil IPE360) oraz zastrzałów podtrzymujących tę konstrukcję,
- 5) usunięcie przypory ziemnej.



Rys. 7. Przekrój I – stan początkowy

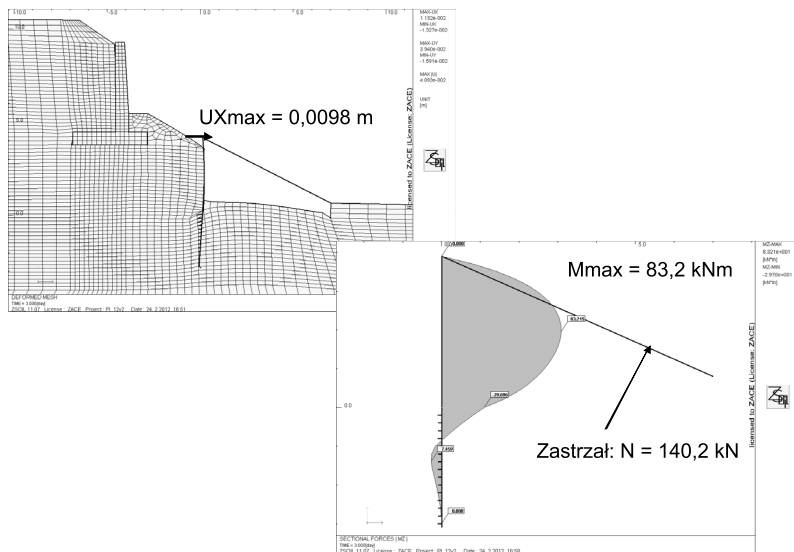
Fig. 7. Section I – initial state



Rys. 8. Przekrój I – ewolucja modelu obliczeniowego

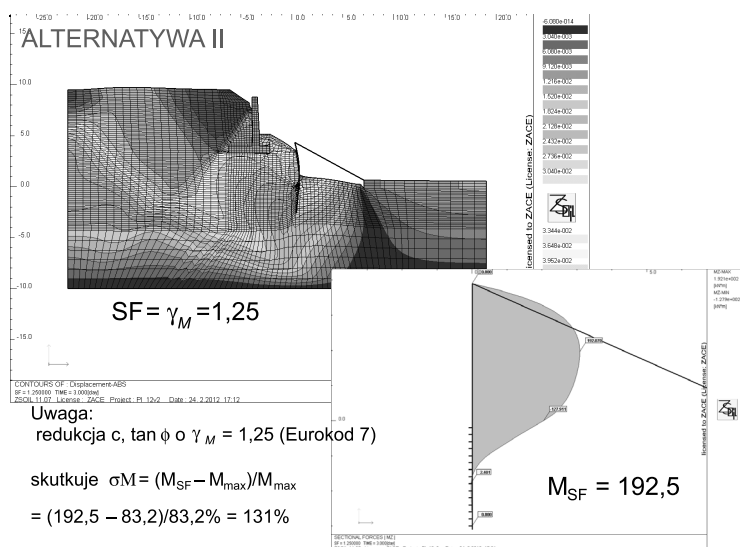
Fig. 8. Section I – evolution of the computational model

W etapie końcowym (p. 5) przeprowadzonej symulacji, uzyskano następujące wyniki:



Rys. 9. Przekrój I – deformacja i momenty zginające w palu w etapie końcowym

Fig. 9. Section I – deformation and the bending moment in the pile in a final step



Rys. 10. Przekrój I – deformacja i momenty zginające pal dla układu z parametrami wytrzymałościowymi zredukowanymi częściowym współczynnikiem materiałowym $\gamma_M = 1,25$, wg EC7

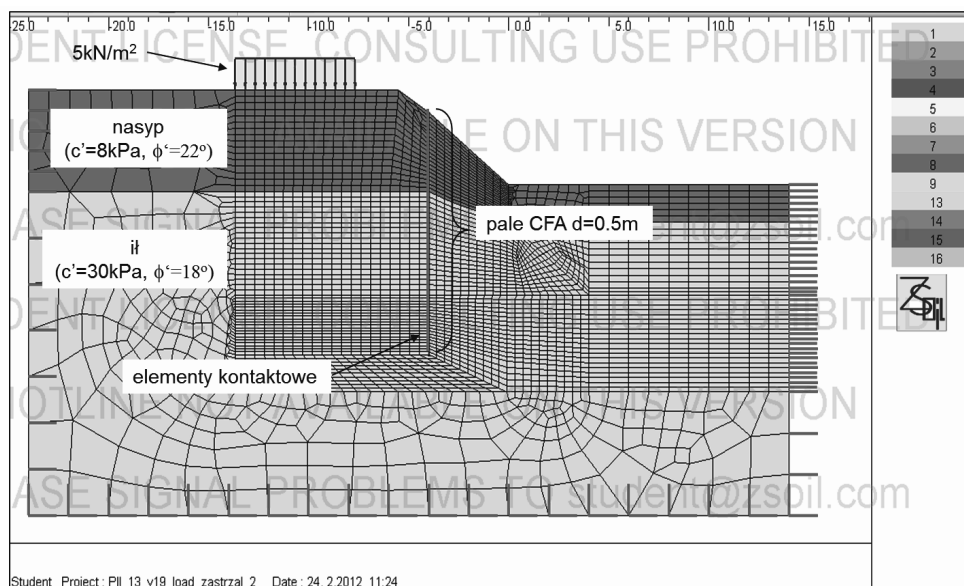
Fig. 10. Section I – deformation and bending moments in the pile for the system with strength parameters reduced by a partial factor $\gamma_M = 1.25$, acc. to EC7

Przedstawiona analiza alternatywnego rozwiązania dla przekroju I wykazuje, że powstałe przemieszczenie ścianki berlińskiej jest nieznaczne, w porównaniu z przemieszczeniami uzyskanymi w [1] ($u_{\text{MAX}} = 0,3 \text{ m}$) i wynosi zaledwie $u_{\text{MAX}} = 0,0098 \text{ m}$ (rys. 9). Pokazano również wykres momentu zginającego w pału oraz maksymalną siłę osiową w zastrzale (jako tzw. efekty oddziaływania) obliczane w stanie granicznym STR, podejście obliczeniowe 1, kombinacja A2 + M2 + R2 wg Eurokodu 7 (rys. 10).

3.2. Przekrój II wg [1]

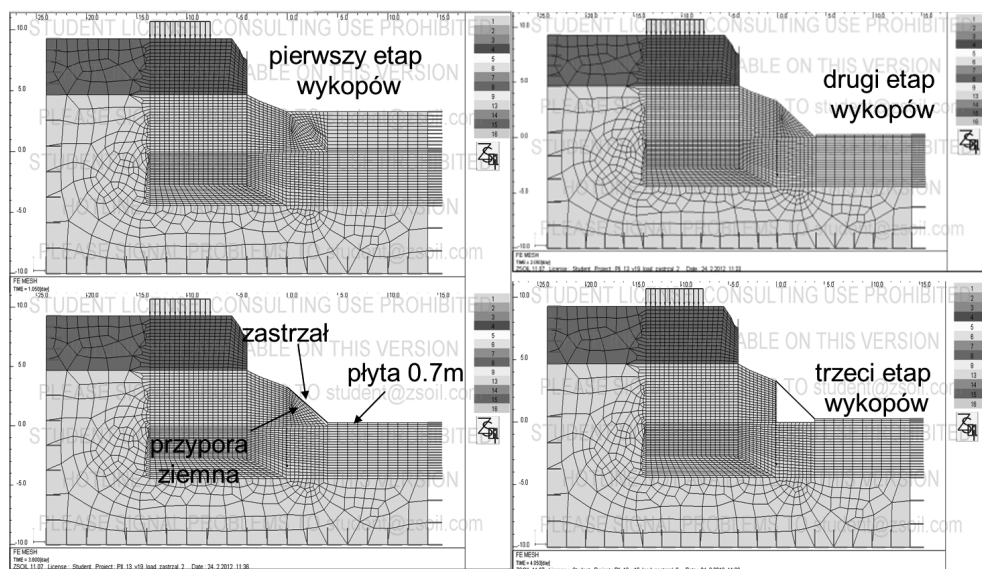
Na rysunku 11 przedstawiono model układu w stanie początkowym przed rozpoczęciem robót ziemnych w drugim z rozważanych przekrojów (por. [1]). Symulację wykonano w następujących etapach:

- 1) stan początkowy przed wykonaniem wykopu,
- 2) częściowe odkopanie palisady (ok. 4,5 m od górnej krawędzi),
- 3) usunięcie warstwy gruntu na głębokość $-4,8 \text{ m}$ i zastosowanie przypory ziemnej,
- 4) wykonanie żelbetowej płyty fundamentowej o grubości $0,7 \text{ m}$,
- 5) wstawienie elementów konstrukcyjnych ścianki berlińskiej oraz zastrzałów podtrzymujących tę konstrukcję,
- 6) usunięcie przypory ziemnej.



Rys. 11. Przekrój II – stan początkowy

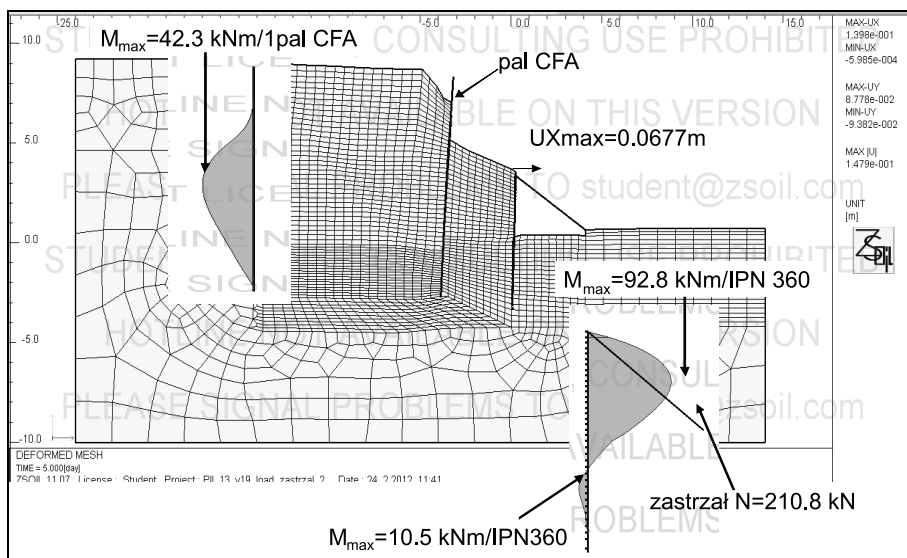
Fig. 11. Section II – initial state



Rys. 12. Przekrój II – ewolucja modelu obliczeniowego

Fig. 12. Section II – evolution of the computational model

Uzyskano następujące wyniki (po p. 6 symulacji):



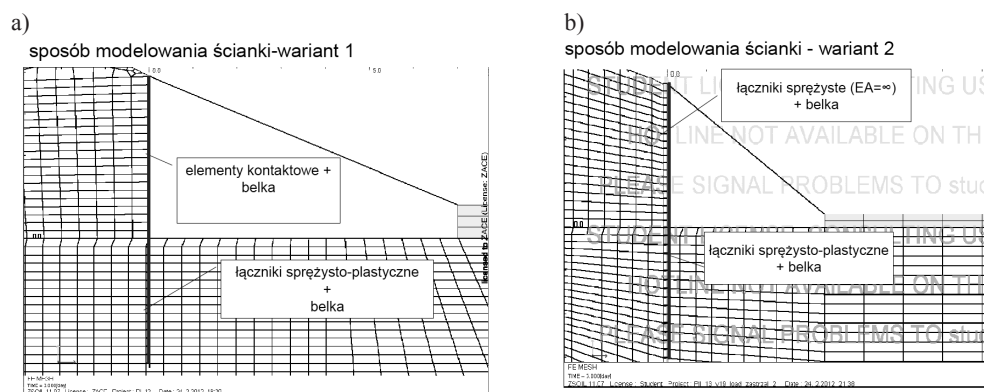
Rys. 13. Przekrój II – deformacja i momenty zginające w palu w etapie końcowym

Fig. 13. Section II – deformation and the bending moment in the pile in a final step

Na rysunku 13 przedstawiono przemieszczenia zamodelowanej ścianki berlińskiej, pali CFA oraz momenty i siły powstałe w przekroju ścianki oraz pali CFA. Jak pokazano na rys. 16, maksymalne przesunięcie ścianki berlińskiej wynosi $u_{MAX} = 0,067$ m. Moment maksymalny powstały w przekroju pala ścianki berlińskiej równy jest $M_{MAX} = 92,8$ kNm w części nadziemnej, maksymalna siła powstała w zastrzale ma wartość $N = 210,8$ kN.

4. Modelowanie ścianki berlińskiej

W niniejszym artykule zastosowano dwa warianty modelowania ścianki berlińskiej, które można wykonać w programie ZSoil. Na rys. 14 pokazano obydwie alternatywy.



Rys. 14. Dwie alternatywy modelowania strefy kontaktowej w górnej części ścianki berlińskiej

Fig. 14. Two alternative models of the contact zone in the upper part of the soldier pile wall

Ścianka berlińska została zamodelowana za pomocą elementów belkowych. Poniżej wykopu, w obu wariantach, zastosowano fikcyjne poziome łączniki sprężysto-plastyczne, opisane w rozdz. 2.2. Natomiast w obrębie wykopów zastosowano dwa różne warianty modelowania styku ścianki i gruntu. W pierwszym wariantcie (rys. 14a) użyto elementów belkowych wraz z **elementami kontaktowymi** (typu *interface*, por. [2]) do połączenia ich z elementami kontinuum. Drugi wariant (rys. 14b) polega na wprowadzeniu **łączników prętowych sprężystych o bardzo dużej sztywności** pomiędzy elementy belkowe a elementy kontinuum. Obydwa zaproponowane warianty umożliwiają wzajemne przemieszczanie się w kierunku pionowym ścianki i masywu gruntowego, przy jednoczesnej zgodności przemieszczeń poziomych i tym samym dobrze opisują współpracę opinki ścianki (wykonanej na ogół w konstrukcji drewnianej) z gruntem, eliminując efekt „zawieszania się”, por. [3].

5. Wnioski

5.1. Wnioski wynikające z zastosowania metody do analizy zadania praktycznego

W artykule przedstawiono alternatywne wykonanie prac ziemnych z zastosowaniem innej technologii wykopów niż w [1], polegającej na zachowaniu przypór ziemnych i ich

likwidacji dopiero po wprowadzeniu zastrzałów. Wykazano, analizując rozważany układ przedstawianą metodą 2D/3D, że w obu rozważanych przypadkach rozwiązanie byłoby bezpieczne ze względu na zachowanie stateczności (wysokie współczynniki stateczności) oraz znikomą wielkość przemieszczeń. Zaproponowane rozwiązanie nie jest jednak bez wad, tj. wydłużenie czasu realizacji inwestycji, podniesienie kosztów budowy, utrudnienia w wykonywaniu prac wpływających niekorzystnie na rentowność inwestycji. Niemniej jednak, gdyby je podjęto, pozwoliło by to uniknąć awarii.

5.2. Wnioski dotyczące metody 2D/3D do analizy statycznej ścian berlińskich

Przedstawiona metoda modelowania **ścianek berlińskich** uwzględnia, w sposób przybliżony, podstawową ich cechę, polegającą na przestrzennej pracy statycznej części zagłębionej, spowodowaną nieciągłym i skupionym oddziaływaniem pali na ośrodek gruntuwy. Metoda 2D/3D łączy w sobie efektywność modelowania w 2D (PSO) z realistycznym uwzględnieniem lokalnych stanów 3D w opisie deformacji i nośności układu. Jak to pokazano w pracy [1], gdzie w dwóch rozważanych przekrojach osiągnięto bardzo dobrą zgodność pomierzonych i symulowanych przemieszczeń, zaproponowana metoda mieszana analizy 2D/3D układów palowych okazała się być szybkim i wystarczająco dokładnym narzędziem pozwalającym na:

- wyjaśnienie obserwowanych zjawisk (trafna identyfikacja mechanizmu zniszczenia),
- ocenę stateczności systemu (współczynniki bezpieczeństwa),
- prognozowanie przemieszczeń poziomych (~ 5% dokładność),
- wyznaczanie sił wewnętrznych w układzie zawierającym pale.

W niniejszym artykule oraz w [1] przedstawiono jedynie pomysł metody, wraz z jej jednostkową weryfikacją, na praktycznym przypadku. Konieczna jest zatem jeszcze szersza weryfikacja metody obejmująca stopień zgodności wyników z pełną analizą 3D oraz z wynikami badań na rzeczywistych lub badawczych obiektach. Jeżeli będą one pozytywne, wówczas ma sens przeprowadzenie eksperymentu numerycznego obejmującego zadania pomocnicze wg rozdz. 2.2, przy różnych parametrach geometrycznych i materiałowych, i ujęcie ich wyników w zamknięte formuły. Korzystanie z metody byłoby wówczas ułatwione i mogłoby być przydatne dla szerokiego grona projektantów.

Literatura

- [1] Urbański A., Grodecki M., *Analiza stanu awaryjnego zabezpieczenia głębokich wykopów ściankami berlińskimi*, Czasopismo Techniczne, nr bieżący.
- [2] Z_Soil.PC, Theoretical Manual, ZACE Services Ltd., Lozanna 2007.
- [3] Grodecki M., *Modelowanie numeryczne statyki ścianek szczelnych i szczelinowych*, praca doktorska, Politechnika Krakowska, 2007.