Wpływ wybranych aspektów symulacji numerycznych na wyniki obliczeń stateczności Skarpy Warszawskiej w obszarze południowej obwodnicy Warszawy

Mgr inż. Łukasz D. Kaczmarek¹, dr hab. inż. Paweł Popielski, prof. PW² ¹Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii ²Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

OBSZAR BADAŃ

Potężnym narzędziem wykorzystywanym w praktyce geotechnicznej pozwalającym na analizy stanu pól naprężeń i odkształceń gruntu są symulacje numeryczne. Początkowo nie znalazły one zastosowania do oceny stateczności skarp [10]. Pierwsze zastosowanie przedstawiono dopiero w publikacji [11]. Obecnie można znaleźć wiele przykładów różnych zastosowań metod numerycznych, takich jak: wsteczne analizy parametrów gruntu [7], symulacje powierzchni poślizgu osuwisk [5] czy projektowanie zabezpieczeń osuwisk [12]. Analizując publikowane przypadki symulacji numerycznych, można zauważyć znaczący wpływ metodyki obliczeniowej na uzyskiwane wyniki.

W artykule przedstawiono analizy symulacji numerycznych stateczności skarpy oraz wpływ poszczególnych elementów metodyki obliczeniowej na wynik w postaci wskaźnika stateczności. Obliczenia przeprowadzono dla geometrii Skarpy Warszawskiej w obszarze projektowanej Południowej Obwodnicy Warszawy (POW). Projektowana Południowa Obwodnica Warszawy (inna nazwa: droga ekspresowa S2) będzie łączyć węzły autostrady A2. Obecnie rozpoczyna się w Konotopie, a kończy na węźle Puławska, skąd dalej ma przebiegać wzdłuż istniejącej ul. Płaskowickiej na obszarze dzielnicy Ursynów w Warszawie, przecinając Skarpę Warszawską (lokalna nazwa: Skarpa Ursynowska), będącą naturalną i administracyjną granicą Ursynowa z dzielnicą Wilanów. Cechą charakterystyczną analizowanego odcinka Skarpy Warszawskiej są obserwowane ruchy osuwiskowe, postępujące zniszczenia umocnień oraz obecność szczelin na elewacjach budynków.

Analizowany obszar jest położony po zachodniej stronie Wisły, która poprzez erozję boczną wykształciła skarpę. Na zachód od skarpy znajduje się wyżyna polodowcowa zbudowana głównie z glin lodowcowych (głównie zlodowacenie środkowopolskie), natomiast na wschód od skarpy leży Środkowa Doli-

Numer warstwy	Rodzaj gruntu	Ciężar objętościowy γ [kN/m ³]	Kąt tarcia wewnętrznego φ' [°]	Kohezja c' [kPa]	Współczynnik Poissona v [–]	Moduł Younga E [MPa]	Stopień plastyczności / stopień zagęszczenia $I_L / I_D[-]$
0	Nasyp niebudowlany	16,0	10	28	0,30	40	0,50
Ι	Grunty organiczne	12,0	5	10	0,30	4	0,35
II	Glina piaszczysta ze żwirem (koluria)	20,0	11	10	0,27	60	0,40
III	Piasek średni	19,6	33	0	0,25	140	0,50
IV	Glina piaszczysta	21,8	34	7	0,25	80	0,08
V	Glina piaszczysta	22,3	32	8	0,25	30	0,00
VI	Piasek drobny	19,9	35	0	0,30	60	0,75
VII	Piasek średni	20,9	38	0	0,25	160	075

 $Tabl. \ 1. \ Parametry \ charakterystyczne \ gruntów \ budujących \ analizowane \ odcinki \ skarpy \ [1,3]$

na Wisły, z plejstoceńskimi osadami piasków. Geomorfologia, budowa geologiczna oraz warunki gruntowo-wodne analizowanych przekrojów obliczeniowych opisano w artykułach [2, 4].

Skarpa jest zbudowana z gruntów spoistych, przede wszystkim glin piaszczystych (warstwy IV, V), które tworzą koronę skarpy (rys. 1). Grunty te zalegają na piaskach (warstwy VI, VII). Wody gruntowe występują około 2 m poniżej powierzchni terenu podnóża skarpy. Wysokość skarpy w pobliżu pierwszego wytypowanego przekroju obliczeniowego, wzdłuż ul. Płaskowickiej, wynosi 12 m, natomiast nachylenie jest równe 41°. Skarpa w pobliżu drugiego analizowanego przekroju ma 15 m wysokości oraz nachylenie 34°. W tabl. 1 przedstawiono parametry warstw geotechnicznych modelu numerycznego na podstawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej do celów budowy Południowej Obwodnicy Warszawy (POW) [1] oraz projektu badawczego [3].

METODYKA

Jednym z ważnych elementów poprzedzających symulacje numeryczne jest analiza materiałów archiwalnych, pozwalająca na stworzenie dokładnego modelu geometrycznego i wierne odzwierciedlenie modelu geotechnicznego, będącego uproszczeniem budowy geologicznej. W przeprowadzonej analizie stateczności przekroju przy ul. Kiedacza wykorzystano wyniki prospekcji tomografii elektrooporowej skorelowane do wyników referencyjnych wierceń [2] oraz uzupełniających płytkich wierceń rozpoznawczych, natomiast w przekroju przy ul. Płaskowickiej wykonano płytkie wiercenia uzupełniające wcześniejsze dokładne rozpoznanie [2].

W celu oceny wpływu wybranych aspektów metodyki wyznaczania stateczności skarpy na wartości wskaźnika stateczności przeprowadzono obliczenia dla dwóch przekrojów. Wskaźnik stateczności *F* jest stosunkiem sił lub momentów sił utrzymujących grunt do sił lub momentów sił powodujących jego przemieszczenie. Stan skarpy w przypadku F > 1 utożsamia się ze stanem równowagi chwilowej, aczkolwiek w obliczeniach inżynierskich przyjmuje się pewien zapas bezpieczeństwa [9]. Przy zastosowaniu MES obliczania stateczności są realizowane poprzez stopniową redukcję parametrów wytrzymałościowych – aż do momentu braku zbieżności procesu iteracyjnego, które jest utożsamiane z powstaniem osuwiska. Ta metoda jest zaimplementowana w takich programach obliczeniowych jak PLA-XIS oraz Z_Soil [9].

Podczas obliczeń z wykorzystaniem modelu sprężysto-idealnie plastycznego z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra przeanalizowano wpływ:

- 1) zmiany parametrów wytrzymałościowych gruntów tworzących koronę skarpy (analiza parametryczna),
- 2) metody obliczeniowej i programów obliczeniowych,
- 3) elementów siatki dyskretyzacyjnej:
 - a) liczby elementów MES,
 - b) geometrii siatki MES,
- wielkości modelu geometrycznego analiza zmiany wyniku wraz ze zwiększeniem obszaru przyjętego do obliczeń.

Do analizy wykorzystano programy GeoStudio SLOPE-/W 2007, PLAXIS 8.2 oraz Z_Soil 12.19.

DYSKUSJA WYNIKÓW

Pierwszym etapem analizy było sprawdzenie wpływu zmiany parametrów wytrzymałościowych gruntu tworzącego koronę skarpy na wynik obliczonego wskaźnika stateczności (analiza wrażliwości modelu na zmiany parametrów). Obliczenia wykonano za pomocą programu GeoStudio z wykorzystaniem metody Bishopa. W analizowanych przekrojach korona skarpy jest zbudowana głównie z glin piaszczystych (warstwy IV, V), dlatego też zmiany parametrów dotyczyły glin piaszczystych. Otrzymane wyniki wskazują, że stateczność skarpy w analizowanych przekrojach wykazuje większą wrażliwość na zmiany kąta tarcia wewnętrznego niż kohezji. W tabl. 2 przedstawiono wyniki obliczeń F dla drugiego przekroju obliczeniowego, z których wynika, że zmniejszenie o połowę parametrów spójności i kata tarcia wewnętrznego powoduje dwukrotne zmniejszenie wskaźnika stateczności. W przypadku zmniejszenia kąta tarcia wewnętrznego o 50% następuje obniżenie stateczności poniżej wartości granicznej.

Tabl. 2. Zestawienie wyników analizy parametrycznej wykonanej dla przekroju przy ul. Kiedacza

Numer obliczeń	Kohezja c' [kPa]	Kąt tarcia wewnętrznego φ' [°]	Wskaźnik stateczności F [–]	
1	8	32	1,584	
3	6	24	1,159	
5	4	32	1,453	
6	8	16	0,900	
7	4	16	0,770	

Zaletą obliczeń wykonanych z wykorzystaniem metody Bishopa jest czas potrzebny do uzyskania charakterystyki stateczności analizowanego przekroju przy zmianach parametrów wytrzymałościowych. Różne przekroje stanowią różne układy warstw, geometrie oraz mają odmienne warunki brzegowe, co powoduje, że na stan stateczności wpływa różna liczba czynników. Warto zaznaczyć, że obliczenia wymagały poczynienia założenia co do strefy materiałowej, w której istniało największe prawdopodobieństwo powstania osuwiska (rys. 1), co zdefiniowano na podstawie obserwacji terenowych.

Następny etap analizy dotyczył porównania metody obliczeniowej (metoda Felleniusa i metoda Bishopa oraz metody redukcji parametrów wytrzymałościowych) za pomocą wybranych programów obliczeniowych przy różnych stanach naprężeń. Metody równowagi granicznej, do których należy metoda Felleniusa i Bishopa, wymagają, jak wcześniej wspomniano, określenia obszaru obliczeń, jak również kołowo-walcowej powierzchni poślizgu opisanej przez określony punkt i promień. Takie założenia determinują wynik obliczeń momentów oraz sił działających na wyznaczone bloki gruntu objętego przemieszczeniami. Deterministyczne założenia w ekstremalnych sytuacjach mogą spowodować katastrofalne skutki. Na przykład w przypadku oceny stateczności zapór wodnych analizie może być poddana skarpa odwodna z wartością wskaźnika stateczności świadczącą o spełnionym warunku bezpieczeństwa, a jednocześnie jej od-



Rys. 1. Przykładowy wynik obliczeń metodą Bishopa



Rys. 2. Analizowane dwa przypadki wielkości modelu elementów skończonych przekroju I o różnej liczbie elementów skończonych A – model podstawowy, B – model rozszerzony

powietrzna strona może ulec osunięciu. Również w przypadku analizy przejścia fali wezbraniowej i w konsekwencji pojawienia się filtracji nieustalonej programy wykorzystujące metody równowagi granicznej nie są w stanie przeprowadzić wiarygodnych obliczeń [6]. Metody elementów skończonych pozwalają natomiast na analize całego obszaru bez determinowania a priori miejsc powstania osuwiska oraz jego geometrii.

W tabl. 3 przedstawiono zestawienie wyników obliczeń wskaźnika stateczności, za każdym razem większego od wartości granicznej. W przypadku pierwszego przekroju otrzymano wyniki wskaźnika stateczności niższe dla metod równowagi granicznej niż dla MES. Natomiast wyniki wskaźnika stateczności dla drugiego przekroju były odwrotne, niższe w przypadku wykorzystania metod równowagi granicznej. Zadanie płaskie 2D obliczone różnymi programami do obliczeń MES dały zbliżony rezultat, zbieżny z analiza 3D.

Istotna kwestie w procesie modelowania MES stanowi liczba i jakość elementów siatki dyskretyzacyjnej, tzw. mesh influence - jak pokazały wyniki obliczeń - związane ze zmianą wyniku wraz ze zmianą liczby elementów MES, aż do stabilizacji po przekroczeniu określonej ich liczby.

Tabl. 3.	Wyniki	obliczeń	wskaźnika	a stateczności F	
	-				

	Wskaźnik stateczności [-]				
Przekrój obliczeniowy	Metody równow	wagi granicznej	Metoda elementów skończonych		
	Metoda Felleniusa	Metoda Bishopa	Metoda redukcji parametrów wytrzymałościowych		ałościowych
	GeoStudio 2D		PLAXIS 2D	Z_Soil 2D	Z_Soil 3D
I (wzdłuż ul. Płaskowickiej)	1,510	1,637	1,731	1,73 ÷ 1,57	1,73
II (wzdłuż ul. Kiedacza)	1,500	1,584	1,348	1,35 ÷ 1,30	1,30



w przekroju wzdłuż projektowanej POW na odcinku ul. Płaskowickiej (przekrój I), z wynikami analizy większego modelu geometrycznego



Rys. 4. Wpływ liczby elementów MES na wskaźnik stateczności skarpy wzdłuż przekroju przy ul. Kiedacza (przekrój II), z wynikami analizy większego modelu geometrycznego

Rys. 3. Wpływ liczby elementów MES na wskaźnik stateczności skarpy

Po zdefiniowaniu modelu geometrycznego następuje etap konwersji do modelu MES poprzez dyskretyzację i stworzenie siatki MES. Odpowiednio dobrana liczba elementów siatki MES pozwala na uzyskanie wiarygodnych wyników analizowanego zagadnienia. Zbyt mała liczba elementów powoduje niedokładność obliczeń oraz zbyt dużą generalizację modelu, natomiast nadmierna ich liczba wiąże się z wydłużeniem czasu obliczeń. Na rys. 3 i 4 przedstawiono wykresy zmiany wskaźnika stateczności w funkcji liczby elementów skończonych. Dodatkowo na wykresach zaprezentowano wyniki weryfikacji szerokości modelu obliczeniowego (tzn. odsunięcia pionowych warunków brzegowych). Rozszerzony model obliczeniowy to model powiększony o około 1/3 szerokości modelu wyjściowego (rys. 2).

W przypadku pierwszego przekroju wskaźnik stateczności początkowo spada wraz ze wzrostem liczby elementów siatki MES aż do 3053 elementów. Następnie wartość tego wskaźnika wzrasta, co pokazuje, że trend jego zmiany nie jest liniowy. Wielkość zmiany (0,07) jest stosunkowa mała, dlatego też nie kontynuowano zagęszczania siatki powyżej 4957 elementów z powodu długiego procesu obliczeniowego oraz zbyt dużego zagęszczenia węzłów siatki MES (40059). W drugim przekroju obliczeniowym następuje początkowo spadek wartości wskaźnika stateczności – aż do osiągnięcia liczby 3683 elementów, po czym jest obserwowana stabilizacja wyniku.

Zarówno w pierwszym, jak i drugim analizowanym przekroju można zaobserwować zbieżność wyników zmiany wskaźnika stateczności wyjściowego modelu geometrycznego ("podstawowego") z rozszerzonym modelem geometrycznym (powiększonym o 10 m). Taki rezultat potwierdza słuszność konstruowania modelu geometrycznego w myśl zasady, aby warunki brzegowe były oddalone o 1/3 zrzutowanej długości modelu od obszaru analizy (w tym przypadku skarpy).

Następnym celem analizy było porównanie rodzajów elementów dyskretyzacji modelu geometrycznego na wyniki symulacji numerycznych za pomocą MES. Na rys. 5 przedstawiono różne wykorzystane rodzajów elementów siatki dyskretyzacji.

Pomimo łatwiejszej dyskretyzacji modelu geometrycznego za pomocą trójkątnych elementów bardziej praktyczne jest wykorzystywanie siatki prostokątów – z powodu równomiernie podzielonego obszaru analizy oraz możliwości konwersji do układu trójwymiarowego. Warto zaznaczyć, że konsekwencją równo podzielonego obszaru jest wzrost wiarygodności wyniku [8].

PODSUMOWANIE

Pierwszy etap symulacji numerycznych stanowiło wykonanie analizy parametrycznej (tabl. 2), czyli analizy wrażliwości wyniku obliczeń współczynnika stateczności na zmiany parametrów gruntu. Zmiana parametrów wytrzymałościowych warstwy o największej miąższości pokazuje, że największy wpływ na stateczność ma wartość kąta tarcia wewnętrznego. Następnym etapem analizy było porównanie dwóch metod obliczeniowych: analitycznych metody Felleniusa i Bishopa (należących do metod równowagi granicznej) oraz metoda elementów skończonych z wykorzystaniem metody redukcji parametrów wytrzymałościowych. Zakres wyników, jaki otrzymano, jest duży: od F = 1,30 do F = 1,72, przy czym nie można wyznaczyć trendu, którą metodą uzyskuje się bardziej bezpieczne wyniki. Dwie różne tendencje dla dwóch przekrojów świadczą o wpły-

OPIS		WIZUALIZACJA	TYP ELEMENTÓW SIATKI MES	
si POW)	PLAXIS 8.2 (2D)		15-węzłowe trójkąty Dokładny podział nawet bardzo skomplikowanych geometrii modelu numerycznego. Brak możliwości konwersji do modelu 3D.	
Przekrój wzdłuż ul. Płaskowickiej (o	Z_Soil 2.19 (2D)	AVAILABLE ON MS TO S	9-węzłowe czworokąty Podział złożonych geometrii modelu numerycznego. W przypadku bardzo skomplikowanych geometrii możliwe duże różnice w wielkościach elementów MES.	
	Z_Soil 2.19 (3D)		8-węzłowe prostopadłościany Analizy modeli trójwymiarowych dla prostych modeli geometrycznych. Pracochłonność oraz podatność na błędy podczas dyskretyzacji (dla niedoświadczonych użytkowników).	

Rys. 5. Porównanie różnych rodzajów elementów siatki MES

wie geometrii warstw. Metoda elementów skończonych daje bardziej wiarygodne wyniki z powodu uwzględniania lokalnych zmian naprężeń i przemieszczeń, w przeciwieństwie do metod Felleniusa oraz Bishopa, które upraszczają stan naprężeń poprzez utworzenie bloków obliczeniowych. Dodatkowo rozbieżności w wynikach stateczności określonej metodami równowagi granicznej a MES są spowodowane deterministycznie przyjętym kształtem powierzchniami poślizgu. Metody równowagi granicznej znajdują zastosowanie w obliczeniach stateczności skarp o prostych warunkach geotechnicznych oraz w razie potrzeby szybkiego oszacowania stateczności.

W praktyce inżynierskiej występują różne inwestycje w różnych uwarunkowaniach środowiskowych. W zależności od złożoności budowy geologicznej oraz projektowanych rozwiązań geotechnicznych można wykorzystać różne metody obliczeniowe. Wybór metody powinien wiązać się ze świadomością konsekwencji ograniczeń oraz specyfiką uzyskanych wyników symulacji numerycznych, co pozwoli na optymalizację czasu analiz oraz adekwatności wyników.

LITERATURA

1. Grzelewski E., Pabich M., Socha T.: Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla ustalenia geotechnicznych warunków posadowienia tunelu pod dzielnicą Ursynów, na trasie projektowanej Południowej Obwodnicy Warszawy, na odcinku od węzła "Puławska" do węzła "Lubelska". Arcadis, 2009.

2. Kaczmarek Ł.: Geomorfologiczna i geofizyczna analiza uwarunkowań stateczności skarpy warszawskiej w rejonie Ursynowa. Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 23(3), 2014, 215-226. Kaczyński R.: Stan skonsolidowania i mikrostruktur glin zlodowacenia środkowopolskiego rejonu Warszawa-Służew na tle ich geologiczno-inżynierskich właściwości. Grant KBN nr 4T12B06228. UW WG, 2008.

4. Koda E., Rabarijoely S.: Numeryczna ocena stateczności i warunków posadowienia kościoła na krawędzi Skarpy Warszawskiej. Civil and Environmental Engineering, 4, 2013, 27-35.

5. Pilecki Z., Stanisz J., Krawiec K., Woźniak H., Pilecka E.: Numeryczna analiza stateczności skarp i zboczy z wykorzystaniem metody zbiorów losowych. Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN 86, 2014, 5-17.

6. Popielski P., Smoliński B.: Wpływ geometrii obwałowań przeciwpowodziowych na ich stateczność. Monografia "Eksploatacja budowli piętrzących-diagnostyka i zapobieganie zagrożeniom", Winter Jan, Wita Andrzej, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, 2015.

7. Popielski P.: Weryfikacja parametrów podłoża na podstawie wykonanej analizy wstecz przy realizacji głębokich posadowień w Warszawie. Acta Scientiarum Polonorum, seria: Architectura 12, 2013, 91-100.

8. Truty A., Zimmermann Th., Podleś K., Obrzud R., Urbański A., Commend S., Sarf J.: ZSOIL.PC 2014. User manual. Data preparation. Zace Services Ltd., 2014.

9. Wysokiński L. (ed.): Posadowienie obiektów budowlanych w sąsiedztwie skarp i zboczy. Instrukcja nr 304. Instytut Techniki Budowlanej, 1991.

10. Zienkiewicz O.: Metoda elementów skończonych. Arkady, 1972.

11. Zimmermann, T., Rodriguez, C., Dendrou, B.: Z_SOIL.PC: A program for solving soil mechanics problems on a personal computer using plasticity theory. International Conference on Geomechanics, 1987, Innsbruck, Balkema.

12. Zuljani, D., Peranić, J., Prodan, M.: Parametric analysis of anchored bored pile wall as a part of landslide stabilization measures on the Grohovo road landslide, Croatia. IX Regional Conference of Students from Geotehnical Faculties, 2015, At Sofia, Bulgaria.