

ZASTOSOWANIE METODY DUNCANA I WRIGHTA DO OCENY STATECZNOŚCI SKARPY WARSZAWSKIEJ

Łukasz D. Kaczmarek¹, Paweł Popielski²

¹Uniwersytet Warszawski, Warszawa

²Politechnika Warszawska, Warszawa

Streszczenie. W artykule przedstawiono zastosowanie metody Duncana i Wrighta do oceny stateczności na przykładzie wybranego odcinka Skarpy Warszawskiej przy plebani kościoła św. Anny. Przeprowadzone obliczenia wykonano w geometrycznym przestrzennym stanie odkształceń, wykorzystując metodę redukcji parametrów wytrzymałościowych, należącą do grupy metod MES. Na podstawie materiałów archiwalnych wytypowano trzy zestawy parametrów wytrzymałościowych (najmniejsze, średnie i największe), na których podstawie obliczono współczynniki stateczności (F). Wyniki obliczeń F zastosowano do oszacowania odchylenia standardowego oraz współczynnika zmienności F . Następnie określono prawdopodobieństwo osuwiska (P_f) i ostatecznie wskaźnik niezawodności (R), wykorzystując zależności korelacyjne wykonane przez Duncana i Wrighta. Przedstawiona analiza stateczności, za pomocą metody Duncana i Wrighta, pokazuje możliwość uwzględnienia w ocenie prawdopodobieństwa osuwiska różnych współczynników stateczności w odniesieniu do różnych parametrów wytrzymałościowych tych samych warstw geotechnicznych. Wykorzystana metoda dodatkowo umożliwia ilościowe porównanie oceny prawdopodobieństwa powstania osuwiska różnych analiz stateczności skarpy.

Słowa kluczowe: współczynnik stateczności, wskaźnik niezawodności, MES, Skarpa Warszawska

WSTĘP

Stateczność skarpy to stan równowagi, który wynika z równej lub większej wytrzymałości na ścinanie gruntu niż naprężenia ścinające. Odpowiedź na pytanie, czy skarpa jest stateczna, w postaci powszechnie stosowanej jednej wartości współczynnika stateczności (wskaźnika bezpieczeństwa – *safety factor*, F) powoduje dużą generalizację złożonych i skomplikowanych warunków gruntowych.

Adres do korespondencji – Corresponding author: Łukasz D. Kaczmarek, Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Zakład Geologii Inżynierskiej, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa, e-mail: lukasz.kaczmarek@uw.edu.pl

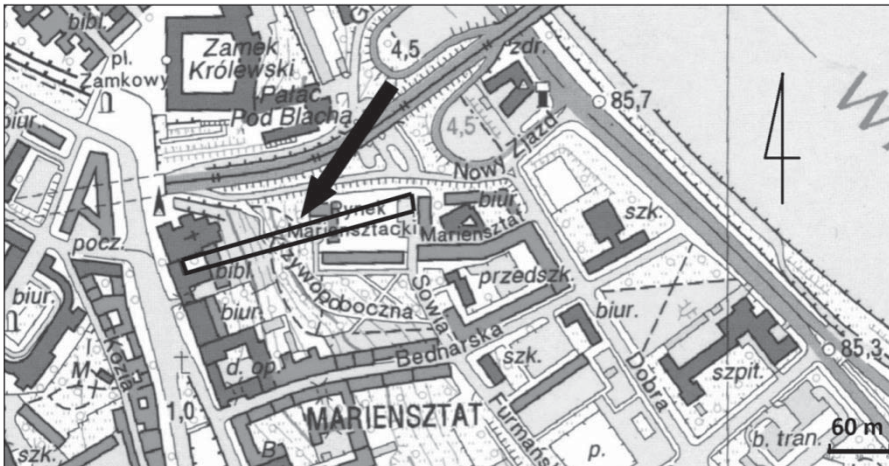
© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2015

Jedną z metod pozwalających na analizę stateczności skarp jest deterministyczne podejście za pomocą metody elementów skończonych (MES) [Zienkiewicz 1972]. Metoda ta pozwala na określenie wartości F oraz powierzchni lub strefy ścięcia gruntu po jego uplastycznieniu. W ostatnim czasie metody MES zdobywają coraz większą popularność z powodu zastosowania przy analizach stateczności złożonych układów geotechnicznych [Sanecki i in. 1999]. Najczęściej wykorzystywaną metodą z grupy MES jest metoda redukcji parametrów wytrzymałościowych [Sternik 2013], która została opisana m.in. przez Zimmermanna i in. [1987] oraz Matsuiego i Sana [1992]. Dzięki zaawansowanemu aparatowi matematycznemu oraz wzrostowi mocy obliczeniowej komputerów możliwe stało się odwzorowanie skomplikowanych geometrii i struktur warstw geologicznych oraz zmienności obciążeń w czasie. W literaturze można znaleźć przykłady analiz MES w aglomeracji warszawskiej, która charakteryzuje się wieloma antropogenicznymi czynnikami destabilizującymi stateczność skarp. Jednym z tych czynników są egzogenne obciążenia statyczne skarpy obiektami budowlanymi. Popielski [2012, 2013] przedstawia analizy MES weryfikowane pomiarami geodezyjnymi podczas głębokiego posadowienia obiektów budowlanych w środowisku o wysokim stopniu urbanizacji. Natomiast w artykule Kaczmarka i in. [2014] przedstawiono wykorzystanie wyników rozpoznania budowy geologicznej skarpy, za pomocą tomografii komputerowej, do budowy modelu numerycznego w celu obliczenia współczynnika stateczności. Warto również wspomnieć o artykule Bogusza [2014], w którym opisano analizę stateczności MES, z uwzględnieniem zaleceń zawartych w podstawowym dokumencie dotyczącym projektowania geotechnicznego Eurokodzie 7.

Niniejszy artykuł przedstawia wykorzystanie metody Duncana i Wrighta w analizie stateczności Skarpy Warszawskiej w przekroju przy plebani kościoła św. Anny. Wynikiem przeprowadzonych obliczeń numerycznych było wyznaczenie wskaźnika niezawodności (R), wynikającego z obliczenia prawdopodobieństwa osuwiska (P_F). Jednym z etapów obliczeń było również obliczenie wartości współczynników stateczności (F), uwzględniających różne zestawy parametrów wytrzymałościowych profilu gruntowego. Schemat, korelacje oraz wzory wykorzystane do przeprowadzenia obliczeń zostały opublikowane przez Duncana i Wrighta [2005].

OPIS TERENU BADAŃ

Analizowany obszar położony jest na terenie lewobrzeżnej Warszawy przy plebani kościoła akademickiego pw. św. Anny przy ulicy Krakowskie Przedmieście na Starym Mieście. Obszar badawczy stanowi teren o dużych walorach historyczno-kulturowych, co było jednym z czynników wpływających na wybór obszaru analizy. Na północ od wybranego odcinka skarpy były prowadzone prace zapobiegające przemieszczeniom kościoła św. Anny w kierunku Trasy W-Z. Za wyborem lokalizacji na południe od kościoła św. Anny oraz Trasy W-Z przemawiały również dostępność terenu badawczego oraz dobre rozpoznanie ośrodka geologicznego. Korona Skarpy Warszawskiej w obszarze analizy zabudowana jest plebanią kościoła akademickiego. Bezpośrednio u podnóża skarpy położony jest skwer Samuela Orgelbranda, a w odległości około 30 m znajdują się zabytkowe mieszkaniowe budynki Rynku Mariensztackiego, przy ulicy Krzywopobocznej, które nie zostały zniszczone podczas II wojny światowej. Na wschód od skarpy, w odległości około 380 m, znajduje się Wisła (rys. 1).

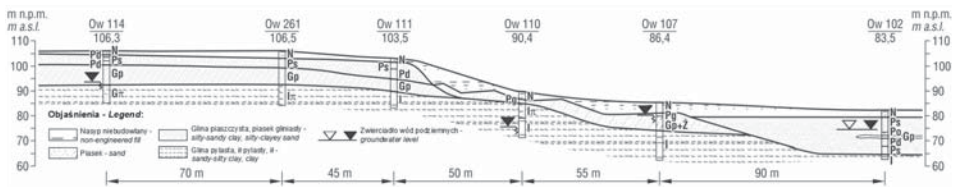


Rys. 1. Lokalizacja obszaru badań na mapie topograficznej [GUGiK 1992]

Fig. 1. Location of the field of study on the topographic map [GUGiK 1992]

W przeszłości w wyniku procesów urbanistycznych oraz budowy w 1949 roku. Trasy W-Z dochodziło do reaktywacji ruchów powierzchniowych, o największym natężeniu w obszarze między Trasą W-Z a kościołem. Dla stabilizacji wykonano wiele prac wzmacniających i odwadniających, skoncentrowanych szczególnie na obszarze o największych przemieszczeniach. Jednymi z wykonanych wtedy zabiegów wzmacniających skarpe były pale, opaska żelbetowa oraz zabieg „cebertyzacji”, który stanowił na ten czas nowatorskie rozwiązanie inżynierskie. Obecnie nie obserwuje się znaczących przemieszczeń na analizowanym terenie, niemniej pomiary geodezyjne wykazały przemieszczenia kościoła na poziomie około 1 mm rocznie oraz malejące tempo przemieszczeń [Zagórski i Gałęcki 2015].

Budowa geologiczna analizowanego obszaru została przedstawiona na rysunku 2 i jest związana z kontaktem Wysoczyzny Warszawskiej i Doliny Środkowej Wisły [Kon-dracki 2011]. Wysokość Skarpy Warszawskiej w analizowanym przekroju to około 14 m, natomiast nachylenie skarpy wynosi około 15° . Na skłonie skarpy położone są nasypy niebudowlane, które mają miąższość około 7 m. Pod nasypami, na koronie skarpy, zalegają piaski fluwioglacjalne o miąższości 5 m, natomiast pod nimi znajdują się gliny zlodowacenia środkowopolskiego [Sarnacka 1992] o miąższości do 8 m. W podstawie skarpy obecne są iły mio-plioceńskie (neogeńskie), o nachyleniu konsekwentnym, które posiadają strukturę wrażliwą na zmiany wilgotności oraz nieciągłości, wynikające z obciążeń glacitektonicznych [Wysokiński 1976, Kumor 1985, Gorączko i Kumor 2011]. Pod nasypami na skłonie Skarpy Warszawskiej występują grunty koluwalne. W skłonie skarpy określono co najmniej cztery kliny nieaktywnych osuwisk [Wysokiński 1999]. Strefy kontaktu nasypów, utworów koluwalnych oraz ilów stanowią predysponowane obszary, gdzie mogą powstać powierzchnie poślizgu. W dolinie Wisły, u podnóża skarpy, obecne są osady aluwialne do 7 m p.p.t. Na rysunku 2 można odczytać poziom zwierciadła wód gruntowych, który znajdują się poniżej dolnej krawędzi skarpy [Wysokiński 1999].



Rys. 2. Przekrój geologiczny przez Skarpę Warszawską przy kościele św. Anny [Kowalczyk i in. 2014, za: Wysokiński 1999]

Fig. 2. Geological section through the Warsaw Slope near rectory of Saint Anne Church [Kowalczyk et al. 2014, for: Wysokiński 1999]

Oporając się na wynikach badań CPT zawartych w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej na potrzeby określenia przyczyn spękań kościoła św. Anny [Traczyński i Grela 2010], a także na podstawie publikacji opisującej Skarpę Warszawską [Wysokiński 1999], artykułu Kowalczyka i in. [2014], przedstawiającego m.in. wyniki badań ERT dla analizowanego obszaru, oraz zależności korelacyjnych zawartych w Polskiej Normie [PN81/B03020], wyznaczono poszczególne warstwy geotechniczne wraz z charakteryzującymi je parametrami (tab. 1).

METODYKA

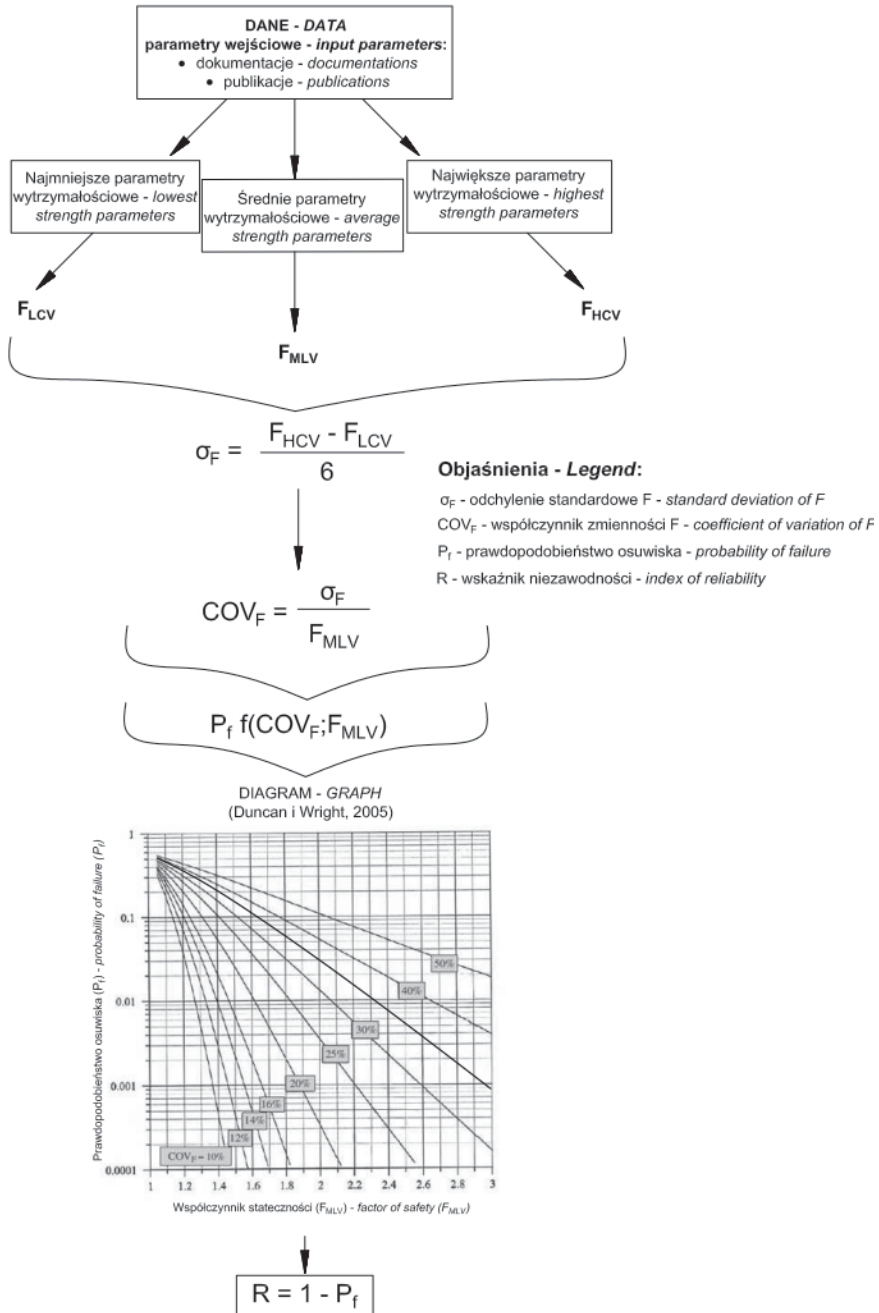
Rozwiązaniem, uwzględniającym w odpowiedzi na pytanie o stateczność wpływ najbardziej niekorzystnego wariantu parametrów gruntu i obciążeń, jest analiza prawdopodobieństwa osuwiska (P_f), z oszacowaniem zmienności współczynnika stateczności (COV_F) [Duncan i Wright 2005]. Największym błędem w analizach stateczności skarp obciążone jest obliczenie sił wytrzymałościowych [Duncan i Wright 2005]. Z tego powodu wyznaczono zakres współczynnika bezpieczeństwa, wykorzystując współczynnik zmienności. Dzięki temu można ująć w zbiorze rozwiązań zbiór rozmyty, wynikający z niedokładności określenia sił wytrzymałościowych, uwzględniający najmniej korzystny wynik F . W tym celu przeprowadzono symulacje numeryczne z wykorzystaniem trzech zestawów parametrów wytrzymałościowych gruntu, przypisanych poszczególnym warstwom geotechnicznym, ze zbioru parametrów uzyskanych w badaniach polowych zlokalizowanych na obszarze sąsiadującym z analizowanym, zawartych w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej [Traczyński i Grela 2010]. Rezultatem symulacji z pierwszym zestawem, stanowiącym zbiór najmniejszych parametrów wytrzymałościowych, było określenie współczynnika stateczności, tzw. *LCV* (*lowest conceivable value*). Drugi zestaw parametrów tworzyły wartości średnie parametrów. Na jego podstawie otrzymano tzw. *MLV* (*most likely value*), czyli wartość oczekiwaną zbioru parametrów. Trzeci zbiór parametrów stanowiły największe wartości, które pozwoliły na wyznaczenie tzw. *HCV* (*highest conceivable value*).

Na rysunku 3 przedstawiono schemat przeprowadzonych obliczeń, który został przyjęty na podstawie publikacji „Soil strength and slope stability” autorstwa Duncana i Wrighta [2005].

Tabela 1. Zestawienie zmiennych parametrów charakterystycznych gruntu w trzech wariantach dla poszczególnych warstw geotechnicznych [Traczyński i Grela 2010, PN81/B03020]

Table 1. Summary of variables characteristic of analyzed soils in three versions for different geotechnical layers [Traczyński and Grela 2010, PN81/B03020]

Nr warstwy Layer no	Rodzaj gruntu (skrót) według PN-EN ISO 14688 i geneza Soils type (abbreviation) by PN-EN ISO 14688 and genesis	Najmniejsze parametry Lowest conceivable value (LCV)				Średnie parametry Most likely value (MLV)				Największe parametry Highest conceivable value (HCV)			
		Kąt tarcia wewnętrzna Internal friction angle ϕ [°]	Spójność Cohesion c [kPa]	Ciężar objętościowy Unit weight γ [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$]	ϕ [°]	c [kPa]	γ [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$]	ϕ [°]	c [kPa]	γ [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$]			
I	Nasyt niebudowlany Non-engineered fill (NN) antropogeniczny anthropogenic Piasek średni Medium sand (MSa) aluwia alluvium	15,0	9,0	11,5	23,0	10,0	18,0	32,0	40,0	19,1			
II	Piasek giniasty Silty-clayey sand (siciSa) koluwia colluvium	28,0	0,0	16,5	31,0	0,0	17,0	33,0	0,0	17,0			
III	Piasek średni Medium sand (MSa) aluwia alluvium	11,0	10,0	21,0	15,0	14,0	21,0	19,0	18,0	21,5			
IV	Glina piaszczysta Silty-sandy clay (sisaCl) glacial glacial II	31,8	0,0	16,5	32,7	0,0	18,0	33,0	0,0	18,5			
V	Glina piaszczysta Silty-sandy clay (sisaCl) glacial glacial II	18,3	31,5	22,0	20,1	35,5	22,0	22,0	40,0	22,0			
VI	Sandy-silty clay (sasiCl) interglacialna interglacial	20,0	10,0	20,0	30,0	20,0	20,0	30,0	30,0	20,0			



Rys. 3. Schemat analizy stateczności skarp [Duncan i Wright 2005] zastosowany do oceny stateczności Skarpy Warszawskiej na wybranym odcinku

Fig. 3. Scheme analysis of slope stability [Duncan and Wright 2005] used to evaluate the stability of Warsaw Slope selected section

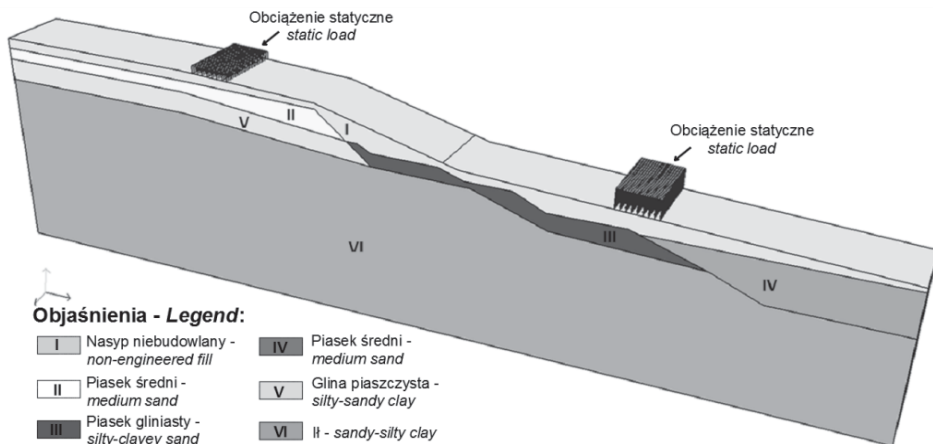
Podczas symulacji numerycznych wykorzystano metodę redukcji parametrów wytrzymałościowych. W przypadku zastosowanego do obliczeń kryterium zniszczenia Coulomba-Mohra metoda redukcji parametrów wytrzymałościowych polega na stopniowym zmniejszaniu parametrów kohezji (c') oraz kąta tarcia wewnętrznego (ϕ'), od czego pochodzi inna zwyczajowa nazwa tej techniki – metoda c-fi redukcji, aż do momentu przekroczenia stanu nośności gruntu. Proces zmniejszania tych parametrów jest iteracyjny i można go zapisać za pomocą wzorów [Griffiths i Lane 1999]:

$$c'_f = \frac{c'}{F}$$

$$\phi'_f = \arctan\left(\frac{\tan \phi'}{F}\right)$$

gdzie: c'_f oraz ϕ'_f to odpowiednio parametry kohezji oraz kąta tarcia wewnętrznego w momencie utraty stateczności.

Model numeryczny (rys. 4) został oparty na danych źródłowych zawartych w dokumentacji, materiałach literaturowych oraz opracowaniach kartograficznych i uzupełniających pomiarach terenowych. Ciągłość warstw w układzie trójwymiarowym określono na podstawie profili wierceń z dokumentacji oraz badań tomografii elektrooporowej opublikowanej przez Kowalczyka i in. [2014]. Analiza dotyczy opisywanego stanu zwierciadła wód gruntowych znajdującego się poniżej dolnej krawędzi skarpy [Wysokiński 1999], co pozwala na pominięcie tego czynnika w obliczeniach z powodu głębokiego zalegania. Niemniej jednak, jak pokazuje historia aktywności osuwiskowej obszaru między kościołem a plebanią, warunki wodne, a w szczególności wahania zwierciadła wód pod-



Rys. 4. Model numeryczny analizowanego obszaru z uwzględnieniem obciążeń statycznych na koronie oraz podnózu Skarpy Warszawskiej

Fig. 4. Numerical model of the analyzed area including static load on the crown and foot of the Warsaw Slope

ziemnych stanowią istotny element wpływający na stateczność. Wielkości obciążeń od budynku przyjęto szacunkowo i określono je na poziomie 100 kPa dla budynku plebanii kościoła św. Anny oraz 150 kPa dla kamienicy u podnóża skarpy.

Po dyskretyzacji modelu numerycznego zastosowano warunki brzegowe: na bocznych powierzchniach granicznych zablokowano przemieszczenia poziome, natomiast na podstawie modelu zdefiniowano warunek brzegowy zerowych przemieszczeń zarówno w kierunku poziomym, jak i pionowym. Podczas konstrukcji modelu numerycznego stworzono 94 775 trójwymiarowych elementów o strukturze nieregularnej oraz 102 856 węzłów obliczeniowych. Do przeprowadzenia symulacji wykorzystano program *Z_soil* v2014.08, który ma szerokie zastosowanie w geotechnice [Commend i in. 2013]. W celu jak najwierniejszego odwzorowania rzeczywistego stanu równowagi w modelu numerycznym uwzględniono stare powierzchnie poślizgu między gruntami, będącymi nasypami, koluwiami oraz łąkami neogeńskimi.

WYNIKI I DISKUSJA

Przeprowadzone symulacje numeryczne stateczności Skarpy Warszawskiej (tab. 2, rys. 5) w badanym obszarze dały wyniki zbliżone do przedstawianych w literaturze. Analizy archiwalne były wykonywane metodami równowagi granicznej. Płaszczyzną porównawczą wykorzystanej metody elementów skończonych oraz metod równowagi granicznej jest wynik w postaci współczynnika stateczności (F). Obliczenia wykonane przez Wysokińskiego [1999] dały współczynniki stateczności w zakresie 1,14–2,26 (metodą Bishopa) oraz 2,13–2,62 (metodą Janbu), natomiast Łukasik [2005] uzyskał wartość równą 1,48. Różnice w otrzymanych wynikach mogą być spowodowane różnymi lokalizacjami przekrojów obliczeniowych, warunkami brzegowymi oraz różną metodą obliczeniową.

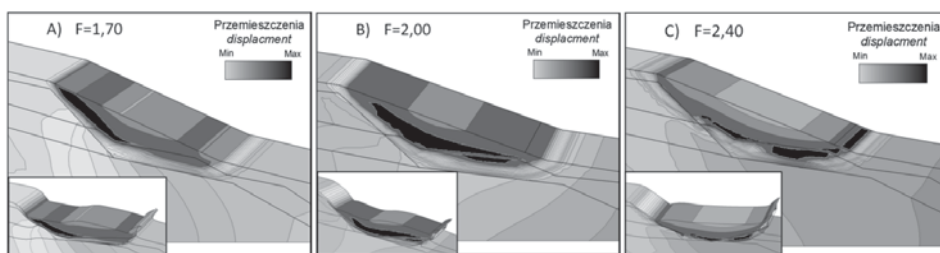
Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń numerycznych dla analizowanego obszaru
Table 2. Summary of the results of numerical calculations for the study area

Lokalizacja Location	Średnie nachylenie (H na V) Average inclination (V to H)	F_{MLV} [-]	COV_F [%]	P_f [%]	R [%]	Prawdopodobieństwo powstania osuwiska wg Wysokińskiego [1991] Possibility of a landslide according to Wysokiński [1991]
Skarpa Warszawska przy plebani kościoła św. Anny Warsaw Slope near rectory of St. Anne Church	0,3 na 1,0	2,00	35	3	97	Bardzo mało prawdopodobne Very unlikely

Otrzymane wyniki COV_F , P_f oraz R wskazują na kompleksowość oceny mogącej służyć do określenia potrzebnego zakresu prac wzmacniających, w zależności od potencjalnej wielkości gruntu, który może zostać przemieszczony w konsekwencji powstania osuwiska. Dla analizowanego modelu szerokości 25 m teoretyczna wielkość przemieszczonego gruntu wyniosła 6262 m³. Oceny prawdopodobieństwa wystąpienia osuwiska

w podejściu Instrukcji Technicznej nr 304 [Wysokiński red. 1991] oraz w wyniku obliczeń zgodnie z publikacją Duncana i Wrighta [2005] są zgodne, świadczące o marginalnym prawdopodobieństwie powstania osuwiska. Metoda Duncana i Wrighta pozwala dodatkowo na skwantyfikowaną ocenę prawdopodobieństwa powstania osuwiska, która może być porównywana do innych wyników analiz. Warto zaznaczyć również, że ocena prawdopodobieństwa zgodnie z Instrukcją oparta jest tylko na jednym wyniku współczynnika stateczności (F).

Ważnym elementem analiz stateczności jest zlokalizowanie powierzchni poślizgu, która została przedstawiona na rysunku 5. Poprzez oznaczenie powierzchni poślizgu można wyznaczyć strefę wpływu związaną z ruchem osuwiska, co ma bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo oraz straty ekonomiczne. Na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych określono powierzchnie poślizgu między gruntami nasypowymi a niżej zalegającymi kolumiami. W analizowanych trzech wariantach widać, że w przypadku teoretycznego powstania osuwiska przy przyjęciu najmniejszych parametrów wytrzymałościowych gruntu (wariant *LCV*) największe przemieszczenia nastąpią w górnej części skarpy (rys. 5A). W kolejnym wariantcie (*MLV*) maksymalne przemieszczenia obserwuje się w środkowej części skłonu skarpy (rys. 5B). Natomiast w ostatnim wariantcie (*HCV*) największe przemieszczenia zostały zlokalizowane w najniższej położonej strefie skłonu skarpy (rys. 5C).



Rys. 5. Wyniki analiz przemieszczeń oraz obliczeń współczynników stateczności dla trzech zestawów parametrów

Fig. 5. The results of movements analyzes and safety factor calculations for the three sets of parameters

Dla uzyskania odzwierciedlenia najmniej bezpiecznych warunków gruntowo-wodnych warto wykonać rozszerzoną analizę stateczności, z wykorzystaniem metody zbiorów losowych [Pilecki 2014], oraz uzupełnioną o dane na temat rocznych wahań poziomu wód gruntowych, mogących być przetwarzanych (np. interpolowanych) za pomocą systemów GIS [Zaszewski 2015].

PODSUMOWANIE

Analizie stateczności poddano Skarpę Warszawską na odcinku plebani kościoła św. Anny. Przy obliczeniach współczynnika stateczności oraz wskaźnika niezawodności skarpy uwzględniono obciążenie statyczne od budynków. W obliczeniach zastosowano iteracyjną metodę redukcji parametrów wytrzymałościowych (należącą do grupy MES).

Symulację przeprowadzono w geometrycznie przestrzennym stanie odkształceń. Do opisu stanu równowagi wykorzystano metodę zaproponowaną przez Duncana i Wrighta w 2005 roku. W pierwszym etapie obliczono trzy współczynniki stateczności, wykorzystując wytypowane trzy zestawy parametrów wytrzymałościowych warstw geotechnicznych. Pierwszy model obliczeniowy zawierał zestaw najmniejszych parametrów, drugi – średnich, natomiast trzeci – największych parametrów wytrzymałościowych gruntu. Ostatecznie po obliczeniu prawdopodobieństwa powstania osuwiska określono wskaźnik niezawodności ($R = 97\%$), świadczący o marginalnym prawdopodobieństwie wystąpienia osuwiska. Strefa poślizgu została zlokalizowana na kontakcie nasypu niebudowlanego i koluwiów. W przypadku teoretycznego powstania osuwiska zestaw najmniejszych parametrów wytrzymałościowych gruntu powoduje powstanie maksymalnych przemieszczeń gruntu w górnej części skarpy. W kolejnych zestawach, przy zwiększaniu parametrów wytrzymałościowych, obserwuje się stopniowe obniżanie położenia strefy maksymalnych przemieszczeń.

Przeprowadzona analiza pokazuje możliwość uwzględnienia w ocenie prawdopodobieństwa powstania osuwiska różnych współczynników stateczności w odniesieniu do różnych zestawów parametrów wytrzymałościowych. Przedstawiona metoda może stanowić rozwinięcie oceny prawdopodobieństwa na podstawie Instrukcji Technicznej nr 304 [Wysokiński red. 1991] oraz dodatkowo umożliwia ilościowe porównania różnych analiz stateczności skarp.

PIŚMIENNICTWO

- Bishop, A.W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5 (1), 7–17.
- Bogusz, W. (2014). Stosowanie współczynników częściowych do parametrów geotechnicznych według Eurokodu 7 w obliczeniach stateczności metodą elementów skończonych. *Acta Sci. Pol., Architectura*, 12 (3), 27–38.
- Commend, S., Obrzud, R., Podleś, K., Truty, A., Zimmermann, T. (2013). *Numerics in Geotechnics and Structures: ZSOIL.PC: getting started*. Lausanne Elmepress International.
- Duncan, J., Wright, S. (2005). *Soil strength and slope stability*. John Wiley and Sons, New York.
- Gorączko, A., Kumor, M.K. (2011). Pęcznienie mio-plioceńskich iłów serii poznańskiej z rejonu Bydgoszczy na tle ich litologii. *Biuletyn PIG*, 446, 305–314.
- Griffiths, D.V., Lane, P.A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Géotechnique*, 49(3), 387–403.
- GUGiK (1992). Mapa topograficzna Polski w skali 1 : 10 000 (<http://mapy.geoportal.gov.pl/imap/>).
- Kaczmarek, Ł., Mieszkowski, R., Kołpaczyński, M., Pacanowski, G. (2014). Application of electrical resistivity tomography(ert) in the investigation of quaternary landslide zones, based on the selected regions of Plock slope. *Studia Quaternaria*, 31(2), 101–107.
- Kondracki, J. (2011). *Geografia regionalna Polski*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kowalczyk, S., Mieszkowski, R., Pacanowski, G. (2014). Ocena stateczności wybranych fragmentów skarpy warszawskiej w świetle badań geofizycznych metodą tomografii elektrooporowej (ERT). *Przegląd Geologiczny*, 62, 634–640.
- Kumor, M.K. (1985). Zmiany wytrzymałości i struktury iltu plioceńskiego pod wpływem zamrażania. *Arch. Hydrotech.*, 32, 461–473.

- Lukasik, S. (2005). Warunki geotechniczne w rejonie tunelu Trasy W-Z, kościoła św. Anny i Zamku Królewskiego w Warszawie. Pr. Inst. Tech. Bud., 135, 67–78.
- Matsui, T., San, K.C. (1992). Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique. Soil and Foundations, 32 (1), 59–70.
- Pilecki, Z., Stanisławski, J., Krawiec, K., Woźniak, H., Pilecka, E. (2014). Numeryczna analiza stateczności skarp i zboczy z wykorzystaniem metody zbiorów losowych. Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, 86, 5–17.
- PN81/B03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli, obliczenia statyczne i projektowane.
- PN-EN ISO 14688-1:2006 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część I: Oznaczanie i opis.
- PN-EN ISO 14688-2:2006 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.
- Popielski, P. (2012). Oddziaływanie głębokich posadowień na otoczenie w środowisku zurbanizowanym. Rozprawa habilitacyjna. Politechnika Warszawska, Warszawa.
- Popielski, P. (2013). Weryfikacja parametrów podłoża na podstawie wykonanej analizy wstecz przy realizacji głębokich posadowień w Warszawie. Acta Sci. Pol., Architectura, 12, 91–100.
- Sanecki, L., Truty, A., Urbański, A. (1999). O możliwościach modelowania komputerowego stateczności złożonych układów geotechnicznych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław.
- Sarnacka, Z. (1992). Stratygrafia osadów czwartorzędowych Warszawy i okolic. Wyd. PIG, Warszawa.
- Sternik, K. (2013). Porównanie prognoz stateczności skarpy metodami rosnącej grawitacji i redukcji wytrzymałości. Czasopismo Techniczne, 1-Ś, 121–130.
- Traczyński, K., Grela, M. (2010). Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla potrzeb określenia przyczyn spękań kościoła św. Anny w Warszawie przy ulicy Krakowskie Przedmieście. Geoteko, Warszawa.
- Wysokiński, L. (1976). Kryterium dynamiki zboczy na przykładzie badań brzegów zbiornika Włocławek. Rozprawa habilitacyjna. Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, Warszawa.
- Wysokiński, L. (1999). Warszawska skarpa śródmiejska. Drukarnia Piotra Włodarskiego, Warszawa.
- Wysokiński, L., ed. (1991). Posadowienie obiektów budowlanych w sąsiedztwie skarp i zboczy. Instrukcja nr 304. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa.
- Zagórski, M., Gałecki, S. (2015). Badania przemieszczeń pionowych portyku kościoła akademickiego św. Anny w Warszawie. Praca inżynierska. Politechnika Warszawska, Warszawa.
- Zaszewski, D. (2015). Tworzenie numerycznych modeli terenu i ich wykorzystanie w hydrogeologii. Mat. konf. GIS w UW „Pierwsze forum użytkowników licencji edukacyjnej SITE oprogramowania ArcGIS na Uniwersytecie Warszawskim”, Warszawa.
- Zienkiewicz, O. (1972). Metoda elementów skończonych. Arkady, Warszawa.
- Zimmermann, Th., Rodriguez, C., Dendrou, B. (1987). Z_SOIL.PC: A program for solving soil mechanics problems on a personal computer using plasticity theory. Int. Conf. on Geomechanics. Innsbruck, Balkema.

THE USE OF DUNCAN AND WRIGHT METHOD TO ASSESS THE WARSAW SLOPE STABILITY

Abstract. This paper presents an application of calculation scheme of slope stability reliability assessment published by Duncan and Wright in 2005. For the presentation of the calculation procedure, a case study of Warsaw Slope stability in the area adjacent to the rectory of St. Anne Church was analyzed. The shear strength reduction (SSR) technique, belonging to the FEM, was used for the calculation of geometrically spatial deformation state. On the

basis of archival materials three sets of strength parameters (the lowest, medium and highest) were selected. Sets of strength parameters were used to safety factors (F) calculations. The results of F calculations were used to estimate the standard deviation and coefficient of variation. Subsequently using correlations made by Duncan and Wright, the probability of failure (P_f) and finally index of reliability (R) were determined. The analysis of stability using the Duncan and Wright method shows the possibility to take into consideration various safety factors, in relation to different strength parameters. Furthermore the used method enables quantitative comparison of various probably of landslide evaluations.

Key words: factor of safety, index of reliability, FEM, Warsaw Slope

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 20.06.2015.

Cytowanie: Kaczmarek, Ł.D., Popielski, P. (2015). Zastosowanie metody Duncana i Wrighta do oceny stateczności Skarpy Warszawskiej. *Acta Sci. Pol., Architectura*, 14(2), 19–30.