

STATECZNOŚĆ NASYPÓW DROGOWYCH FORMOWANYCH Z MIESZANEK PIASKOWO-POPIOŁOWYCH W REJONIE WROCŁAWIA

THE STABILITY OF ROAD EMBANKMENTS CONSTRUCTED OF SAND-ASH MIXTURES IN THE WROCŁAW AREA

ANDRZEJ BATOG¹, MACIEJ HAWRYSZ¹

Abstrakt. Praca dotyczy możliwości bezpiecznego formowania nasypów drogowych z antropogenicznego materiału gruntowego w postaci mieszaniny naturalnego gruntu z odpadem paleniskowym (mieszanka popiołu i żużla). W artykule przedstawiono parametry takich mieszanek ze szczególnym uwzględnieniem parametrów wytrzymałości na ścinanie i ich zależności od parametrów zagęszczalności. Analizy stateczności skarp nasypu przeprowadzono, stosując obowiązujące podejście obliczeniowe zawarte w polskich przepisach prawnych. Uzyskane wyniki skonfrontowano z podejściem obliczeniowym dotyczącym analizy stateczności skarp wprowadzonym przez Eurokod 7.

Słowa kluczowe: stateczność skarp, grunty antropogeniczne, wytrzymałość na ścinanie.

Abstract. The work concerns the possibility of safe construction of road embankments of anthropogenic soil material as a mixture of natural soil with waste (a mixture of ash and slag). The paper presents the parameters of such mixtures with particular regard to shear strength parameters and their dependence on compactibility parameters. Embankment slope stability analysis was performed using the existing computational approach given in the Polish legislation. The results were confronted with the approach for computing slope stability analysis implemented by Eurocode 7.

Key words: slope stability, anthropogenic soil, shear strength.

WSTĘP

Licznie realizowane w kraju inwestycje drogowe, obejmujące budowy nowych odcinków autostrad, dróg ekspresowych czy obwodnic wielkich i mniejszych miast, borykają się z wieloma problemami, wśród których bardzo istotnym, aczkolwiek mniej eksponowanym w mediach jest bardzo duże zapotrzebowanie na kwalifikowany materiał gruntowy. Niestety na terenach zurbanizowanych w ostatniej dekadzie gwałtownie wyczerpują się złoża dobrego materiału gruntowego. Często są tam jednak dostępne zróżnicowane pod względem rodzaju materiały pochodzenia antropogenicznego o charakterze odpadów przemysłowych, które mogą być

przydatne do budowy nasypów drogowych bez zastrzeżeń lub zastrzeżeniami (PN-B-06050:1999), np. żużle, łożupki przepalone i nieprzepalone czy mieszaniny popiołowo-żużłowe. Istotnym argumentem przemawiającym za stosowaniem tego rodzaju materiałów jest prognozowany już na początek przyszłego roku znaczny deficyt kruszyw do budowy dróg.

Jednym ze sposobów rozwiązania problemu braku odpowiedniego materiału gruntowego do formowania nasypów komunikacyjnych jest wykorzystanie antropogenicznych materiałów gruntowych, takich jak odpady paleniskowe lub budowlane po ich odpowiednim przetworzeniu (Batog,

¹ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Instytut Geotechniki i Hydrotechniki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; andrzej.batog@pwr.wroc.pl, maciej.hawrysz@pwr.wroc.pl

Hawrysz, 2011), jako składników mieszanek z gruntami mineralnymi.

W pracy przedstawiono wyniki analiz dotyczących możliwości bezpiecznego formowania nasypów drogowych z antropogenicznego materiału gruntowego w postaci mieszaniny naturalnego gruntu, pochodzącego z czaszy zbiornika retencyjnego, z odpadem paleniskowym (mieszanka popiołu i żużla), pochodzącym ze spalania węgla w elektrociepłowni zlokalizowanej w pobliżu Wrocławia. Analizy stateczności

skarp nasypu przeprowadzono, stosując obowiązujące podejście obliczeniowe zawarte w rozporządzeniu ministra transportu i gospodarki morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Rozporządzenie ministra transportu..., 1999). Uzyskane wyniki skonfrontowano z podejściem obliczeniowym dotyczącym analizy stateczności skarp wprowadzonym w 2010 r. przez Eurokod 7 (PN-EN 1997-1:2008; PN-EN 1997-1:2008/Ap2:2010).

CHARAKTERYSTYKA MIESZANEK I ICH PARAMETRY GEOTECHNICZNE

W celu budowy nasypów drogowych w rejonie Wrocławia rozważono wykorzystanie dwóch materiałów powstałych w wyniku zmieszania naturalnego gruntu piaszczystego, pochodzącego z budowanego lokalnego zbiornika retencyjnego, oraz odpadu paleniskowego (mieszaniny popiołowo-żużlowej), zdeponowanego na składowisku elektrociepłowni:

- **mieszanka I** – tworzące ją składniki są wymieszane w proporcji 1:1 pod względem objętości ($1 V_{pz}:1 V_p$), co odpowiada proporcji wagowej $1 m_{pz}:2/3 m_p$; mieszankę oznaczono symbolem 1:1;
- **mieszanka II** – tworzą ją półtorej jednostki objętościowej popiołu z żużlem i jedna jednostka objętości piasku ($1,5 V_{pz}:1 V_p$), co z kolei odpowiada jednokowej masie obu składników w tej mieszance, oznaczono symbolem 1,5:1,

gdzie:

V_{pz} – objętość mieszaniny popiołowo-żużlowej,

m_{pz} – masa mieszaniny popiołowo-żużlowej,

V_p – objętość piasku,

m_p – masa piasku.

Mieszanki zbadano pod kątem przydatności do budowy nasypów drogowych w rejonie Wrocławia (Batog, Hawrysz, 2010). Określone w toku badań wartości ich parametrów geotechnicznych zestawiono w tabeli 1.

Wytworzone w następstwie wymieszania w określonych proporcjach naturalnego gruntu (piasku) z gruntem antropogenicznym (odpadem paleniskowym) nowe mieszanki gruntowe uzyskały właściwości dobrze uziarnionego gruboziarnistego (niespoistego) materiału gruntowego klasyfikowanego jako pospółka.

Tabela 1

Zestawienie wartości parametrów geotechnicznych mieszanek

The values of geotechnical parameters of mixtures

Właściwości	Parametry	Mieszanka 1:1	Mieszanka 1,5:1	
Uziarnienie	symbol gruntu wg PN-B-02480:1986 i PN-EN ISO 14688-2:2006	Po/Sa + Gr	Po/siSa + Gr	
	wskaźnik jednorodności uziarnienia C_u	17,5	18,7	
	wskaźnik krzywizny uziarnienia C_c	3,0	2,9	
Wilgotność	naturalna (dla gruntu na hałdzie) w_1	12,1%	13,6%	
	nawilgocona (dla gruntu nasyconego wodą) w_2	18,2%	18,6%	
Parametry zagęszczalności	wilgotność optymalna w_{opt}	14,3%	14,7%	
	maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_d	1,81 g/cm ³	1,77 g/cm ³	
Wytrzymałość na ścinanie	mieszanka o wilgotności naturalnej	kąt tarcia wewnętrznego φ	35,5–41,1°	35,5–40,7°
		spójność c	0–2,6 kPa	0–5,3 kPa
	mieszanka nawilgocona	kąt tarcia wewnętrznego φ	30,9–36,1°	30,8–39,7°
		spójność c	0–5,0 kPa	0,7–4,9 kPa
Ścisłość	edometryczny moduł ścisłości M_o dla przedziału obciążeń $\sigma' = 25\text{--}100$ kPa	11,6–27,8 MPa	7,8–10,8 MPa	
	edometryczny moduł ścisłości M_o dla przedziału obciążeń $\sigma' = 100\text{--}200$ kPa	23,1–30,1 MPa	26,2–35,0 MPa	

Po – pospółka; Sa – piasek; siSa – piasek pylasty; Gr – żwir
Po – sandy gravel; Sa – sand; siSa – silty sand; Gr – gravel

Wyniki badań próbek wytworzonego materiału gruntowego wykazały, że z dopuszczalną zawartością części organicznych oraz niespalonego węgla obie mieszanki mogą być wykorzystane jako samodzielny materiał konstrukcyjny na górne i dolne warstwy nasypów poniżej strefy przemarzania. Ponadto stwierdzono, że mieszanka 1,5:1 (o większej zawartości popiołów i żużla) charakteryzuje się lepszymi parametrami mechanicznymi niż mieszanka 1:1, co pozwala na wykorzystanie znacznie większej ilości odpadów paleniskowych niż w przypadku użycia mieszanki 1:1, o ile nie zostaną przekroczone dopuszczalne wartości innych parametrów fizycznych i chemicznych. Mieszanki gruntowe spełniają wymagania dotyczące materiału gruntowego przeznaczonego do budowy nasypów drogowych, zawarte w normie PN-S-02205:1998.

W niniejszej pracy uwagę zwrócono głównie na wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie, od której w przeważającej mierze zależy stateczność skarp nasypów wykonywanych z przedmiotowych mieszanek. Badania wytrzymałości przeprowadzono na mieszankach o wilgotności naturalnej i na próbkach dodatkowo nasączonych wodą – mieszanki nawilgocone – aby uzyskać stan gruntu analogiczny do tego w strefie podsiąkania kapilarnego, mogącej występować w nasypie.

Badania wytrzymałości gruntu na ścinanie prowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania (ABS) na próbkach o wymiarach $12 \times 12 \times 6$ cm, wstępnie zagęszczonych do przyjętego poziomu gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_d , z różnymi naprężeniami pionowymi σ_n , odpowiadającymi obciążeniom w nasypach ziemnych o wysokości do 10 m. Na figurze 1 przedstawiono wykonany na pod-

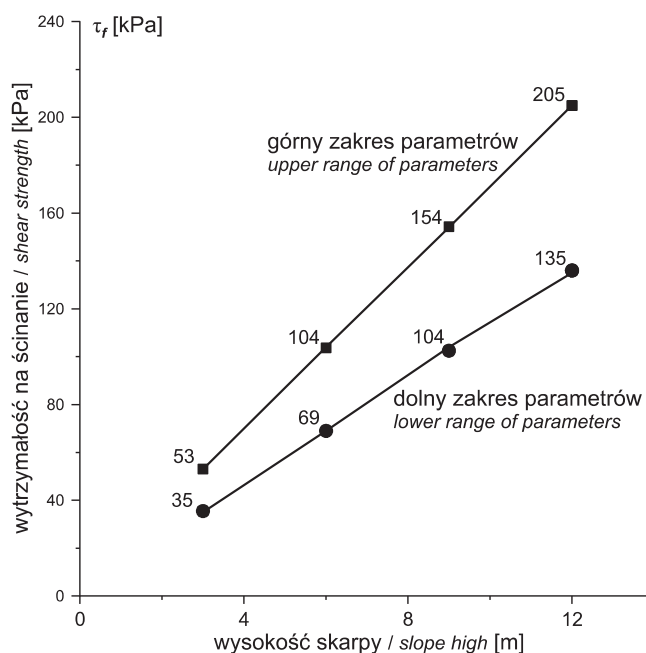


Fig. 1. Zależność granicznego oporu na ścinanie mieszanek w zależności od wysokości nasypu

Dependence of the shear limit resistance of mixtures on the height of the embankment

stawie przeprowadzonych badań wykres określający zakres zmienności wytrzymałości na ścinanie mieszanek w zależności od wysokości skarpy nasypu.

METODA ANALIZY STATECZNOŚCI

Do analizy stateczności przyjęto podejście obliczeniowe zgodne z Eurokodem 7 (PN-EN 1997-1:2008), które wymaga wykazania, że obliczeniowe skutki oddziaływań destabilizujących E_d są nie większe niż odpowiadający im obliczeniowy opór R_d (efekt oddziaływań stabilizujących):

$$R_d \geq E_d \quad \text{lub} \quad \frac{R_d}{E_d} \geq 1 \quad [1]$$

Analiza stateczności w ramach stanu granicznego nośności GEO powinna być przeprowadzona zgodnie z podejściem obliczeniowym 3 według załącznika krajowego do Eurokodu 7 (PN-EN 1997-1:2008/Ap2:2010). Wyznaczenie wartości minimalnej wskaźnika stateczności F_{min} wykonuje się z wykorzystaniem wartości obliczeniowych parametrów geotechnicznych, oddziaływań i oporów uzyskiwanych dzięki zastosowaniu wartości współczynników częściowych wyznaczonych w załączniku krajowym do Eurokodu 7.

W powszechnie stosowanych inżynierskich metodach analizy stateczności (tzw. metodach „pasków”) moment obra-

cający stanowi skutek oddziaływań M_{Ed} , a odpowiadający mu moment utrzymujący to opór wobec tych oddziaływań M_{Rd} . Zatem wskaźnik stateczności w ujęciu Eurokodu 7 opisuje ogólny wzór:

$$F = \frac{\sum M_{Rd}}{\sum M_{Ed}} = \frac{\sum_{i=1}^n r R_{ed,i}}{\sum_{i=1}^n r E_{d,i}} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{ed,i}}{\sum_{i=1}^n (W_{d,i} + Q_{d,i}) \sin \alpha_i} \geq 1 \quad [2]$$

gdzie:

$R_{ed,i}$ – obliczeniowy opór gruntu na ścinanie wzdłuż podstawy i -tego bloku (paska),

$E_{d,i}$ – obliczeniowe skutki oddziaływań destabilizujących w podstawie i -tego bloku (paska),

r – promień działania sił uogólnionych,

α_i – kąt nachylenia podstawy i -tego bloku do poziomu,

$W_{d,i}$ – obliczeniowy ciężar i -tego bloku,

$Q_{d,i}$ – obciążenie zewnętrzne przyłożone do i -tego bloku.

W takim ujęciu minimalny wskaźnik stateczności nie powinien być mniejszy od jedności $F_{dop EC} \geq 1,0$ (wzór [1]), co znacząco odbiega od tradycyjnie stosowanego w drogownictwie podejścia do obliczeń stateczności, w którym analizy prowadzono dla charakterystycznych wartości oddziaływań i reakcji gruntu, a wymagany zapas stateczności osiągano poprzez odpowiednio przyjętą wartość dopuszczalną F_{dop} , która np. według polskich przepisów (Rozporządzenie ministra transportu..., 1999) dla skarp nasypów drogowych wynosi $F_{dop} = 1,50$.

W załączniku krajowym do Eurokodu 7 (PN-EN 1997-1:2008/Ap2:2010) zalecono stosowanie podejścia oblicze-

niowego 3 (DA3) w analizach stateczności skarp prowadzonych w ramach stanu granicznego GEO. Dla wskazanego podejścia obliczeniowego w załączniku krajowym podano wartości współczynników częściowych, które zostały przyjęte do wykonania niniejszych obliczeń:

- współczynnik częściowy dla oddziaływań zmiennych niekorzystnych $\gamma_Q = 1,3$;
- współczynnik częściowy dla tangensa kąta tarcia wewnętrznego $\gamma_\phi = 1,25$;
- współczynnik częściowy dla spójności $\gamma_c = 1,25$.

Pozostałe współczynniki cząstkowe przyjmują wartość jedności.

SCHEMATY OBLICZENIOWE I PROGRAM ANALIZY

Analizie stateczności poddano typowy przekrój nasypu drogowego o wysokościach w przedziale 3–12 m, posadzonego na podłożu nośnym. Na powierzchni jezdni występuje statyczne obciążenie zastępcze od pojazdów w wysokości 25 kPa.

Obliczenia przeprowadzono dla obu mieszanek. Dla każdej przyjęto dwa zestawy parametrów wytrzymałości na ścinanie: minimalne i maksymalne, których wartości podano w tabeli 2.

W obliczeniach dla poszczególnych rodzajów mieszanek poszukiwano nachylenia skarp nasypu zapewniającego osiągnięcie wskaźnika stateczności $F_{dop} = 1,50$ wymaganego w rozporządzeniu ministra transportu i gospodarki wodnej (Rozporządzenie ministra transportu..., 1999). W celach porównawczych obliczono również dla tych samych przypadków wartości wskaźnika stateczności według zaleceń Eurokodu 7.

Tabela 2

Minimalne i maksymalne wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie mieszanek popiołowo-piaskowych

Minimum and maximum values of shear strength of ash-sand mixtures

Parametry wytrzymałości	Mieszanka 1:1		Mieszanka 1,5:1	
	najsłabsze	najmocniejsze	najsłabsze	najmocniejsze
Kąt tarcia wewnętrznego ϕ	30,9°	41,1°	30,8°	40,7°
Spójność c	0 kPa	2,6 kPa	4,9 kPa	5,3 kPa

WYNIKI ANALIZ STATECZNOŚCI

Łącznie przeanalizowano 16 schematów obliczeniowych nasypów, stanowiących kombinację 4 przypadków wysokości skarpy oraz 4 zestawów parametrów wytrzymałości, pozwalającą w zadowalającym zakresie określić zmienność rozwiązań.

Obliczenia numeryczne stateczności nasypu przeprowadzono za pomocą programu SMB v. 1.3. Ich wyniki przedstawiono w postaci wykresu warstwicowego izolinii stałych wartości wskaźnika stateczności, określonych wewnątrz zadanego prostokątnego obszaru położenia środków obrotu (fig. 2). Na figurze 2 podane są również położenia najniebezpieczniejszej powierzchni poślizgu, charakteryzującej się minimalną wartością wskaźnika stateczności.

Obliczenia prowadzono w celu wyznaczenia nachylenia skarp, dla których minimalny wskaźnik stateczności jest równy wymaganemu $F_{min} = F_{dop} = 1,50$. Przykładowe wyniki z położeniem najniebezpieczniejszej powierzchni poślizgu podano na figurze 2A. W przypadku wszystkich rozpatrywanych schematów stwierdzono, że w analizie opartej na wytycznych Eurokodu 7 minimalny wskaźnik stateczności $F_{min EC}$ wynosi 1,20 (fig. 2B). Ze względu na wymaganą przez Eurokod 7 graniczną wartość wskaźnika $F_{min EC}$ równą 1,0 uzyskane wyniki stanowią kolejną przesłankę wskazującą, że w rozporządzeniu ministra transportu i gospodarki morskiej (Rozporządzenie ministra transportu..., 1999) wprowadzono do projektowania wymóg uzyskania zbyt dużego zapasu

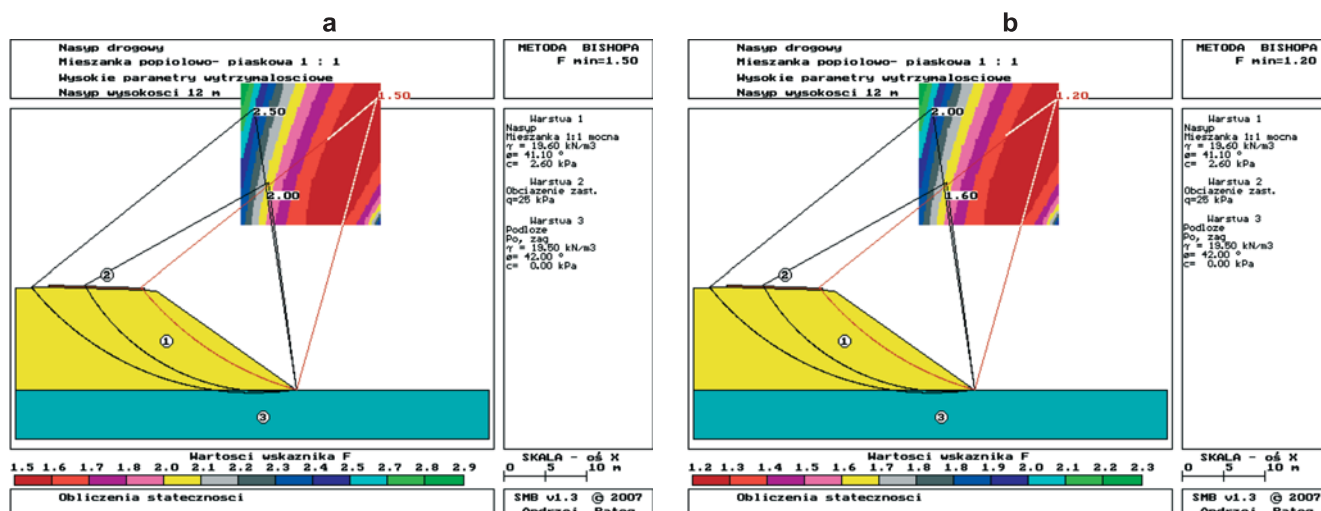


Fig. 2. Stateczność skarpy nasypu o wysokości 12 m uformowanego z mieszanki 1:1 o wysokich parametrach wytrzymałościowych. A – ocena stateczności wg Rozporządzenia ministra transportu... (1999); B – Ocena stateczności wg PN-EN 1997-1:2008

Slope stability analysis for a 12-meter high embankment made of a 1:1 mixture of high shear strength. A – evaluation of stability in accordance with the Rozporządzenie ministra transportu... (1999); B – evaluation of stability in accordance with the PN-EN 1997-1:2008

Tabela 3

Minimalne bezpieczne nachylenie obciążonych skarp nasypów uformowanych z mieszanek popiołowo-piaskowych
Minimum safe inclination of the loaded embankment slopes made of ash-sand mixtures

Wysokość skarpy [m]	Minimalne bezpieczne nachylenie skarp nasypów obciążonych			
	Parametry wytrzymałości			
	Mieszanka I		Mieszanka II	
	najslabsze	najmocniejsze	najslabsze	najmocniejsze
3	1:2,48	1:0,96	1:1,15	1:0,65
6	1:2,48	1:1,24	1:1,60	1:1,00
9	1:2,48	1:1,34	1:1,78	1:1,16
12	1:2,48	1:1,40	1:1,89	1:1,25

stateczności skarp nasypów drogowych (por. Kłosiński, Leśniewski, 2009).

Na figurach 2A i 2B ukazano położenia powierzchni poślizgu obejmujących całe obciążenie, jak również przechodzących pod jego środkiem. Wartości wskaźników stateczności są znacznie większe niż wyznaczone dla najniebezpieczniejszej powierzchni poślizgu, przechodzącej tylko przez przyskarpową część nasypu. Na podstawie takich wyników analizy stateczności można stwierdzić, że nasypy formowane z mieszanek popiołowo-piaskowych są potencjalnie bardziej zagrożone powierzchniowym zsuwem niż globalną utratą stateczności, dotyczącą głębokich partii nasypu.

Określone w obliczeniach dopuszczalne nachylenia skarp nasypu drogowego wykonanego z mieszanek popiołowo-

-piaskowych zestawiono w tabeli 3 oraz przedstawiono na figurze 3.

Analizując zależności widoczne na figurze 3, można zauważyć, że dla najniższych wartości parametrów wytrzymałości mieszanki 1:1 – niezależnie od wysokości nasypu – uzyskano stałe bezpieczne nachylenie równe 1:2,5. Wynika to z położenia najniebezpieczniejszej powierzchni poślizgu (fig. 4), która niezależnie od wysokości nasypu przechodzi przez najpłytsze partie dolnej części skarpy. Należy dodać, że w przypadku wykonania ubezpieczenia przeciwozyjnego powierzchni skarpy nasypu (np. geokratą) możliwe jest bezpieczne zwiększenie nachylenia skarpy nasypu wykonanego z tego materiału do 1:2.

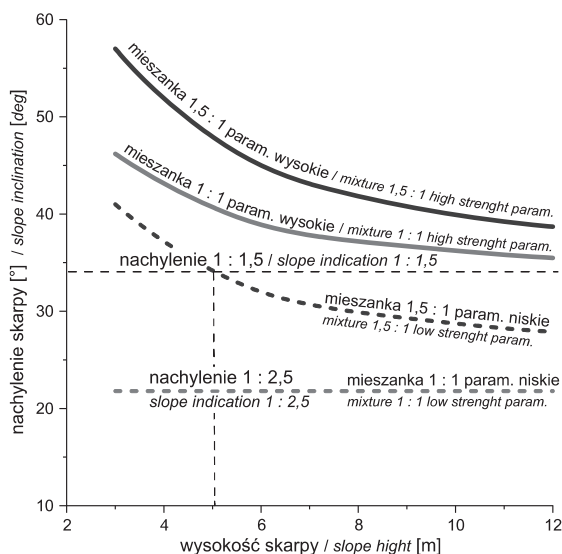


Fig. 3. Bezpieczne nachylenie skarp nasypu uformowanego z mieszanek popiołowo-piaskowych w funkcji ich wysokości

Safe inclination of embankment slopes made of ash-sand mixtures as a function of their height

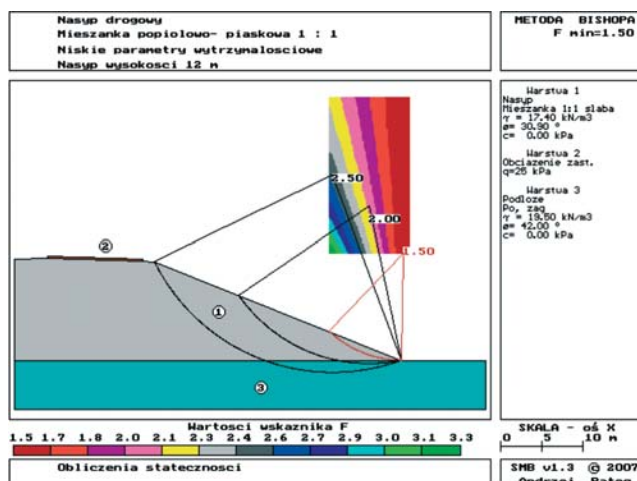


Fig. 4. Stateczność skarpy nasypu o wysokości 12 m uformowanego z mieszanki 1:1 o niskich parametrach wytrzymałościowych

Slope stability analysis for a 12-meter high embankment made of a 1:1 mixture of low shear strength

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania i analizy stateczności wykazały przydatność mieszanek popiołowo-piaskowych do budowy nasypów drogowych.

Z mieszanek przygotowanych z zachowaniem wysokich wymagań dotyczących reżimu technologicznego ich wytwarzania można formować nasypy o preferowanym w budownictwie nachyleniu 1:1,5 (fig. 3).

Ponadto stwierdzono, że z mieszanek o niskich wartościach parametrów wytrzymałościowych (niestarannie wytworzonych) można formować nasypy o wysokości do 5 m ze skarpami o nachyleniu 1:1,5. W przypadku wyższych nasypów konieczne jest zastosowanie dodatkowych środków technicznych podwyższający poziom ich stateczności.

LITERATURA

- BATOG A., HAWRYSZ M., 2010 — Przydatność mieszanek popiołowo-gruntowych do budowy nasypów komunikacyjnych. *Górnictwo i Geoinż.*, **34**, 2: 69–75.
- BATOG A., HAWRYSZ M., 2011 — Wykorzystanie do budowy nasypów drogowych kruszyw z recyklingu odpadów budowlanych. *Geoinż.: drogi, mosty, tunele*, **3**: 32–36.
- KŁOSIŃSKI B., LEŚNIEWSKI Ł., 2009 — O wymaganiach dotyczących stateczności zboczy i skarp. *Zesz. Nauk.-Techn. SITK Oddz. Kraków, Problematyka osuwisk w budownictwie komunikacyjnym*, Seria Materiały Konferencyjne, **88**, 144: 81–88.
- PN-B-02480:1986 — Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-B-06050:1999 — Geotechnika. Roboty ziemne. Wymagania ogólne.
- PN-EN 1997-1:2008 — Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- PN-EN 1997-1:2008/Ap2:2010 — Załącznik krajowy NA.
- PN-EN ISO 14688-2:2006 — Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2. Zasady klasyfikowania.
- PN-S-02205:1998 — Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
- ROZPORZĄDZENIE ministra transportu i gospodarki morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. *Dz. U.* Nr 43, poz. 430.

SUMMARY

In urban areas, there is rapid depletion of soil deposits of useful material in the last decade. A way to overcome the lack of suitable material for the formation of road embankments is the use of anthropogenic soil materials, such as a slag or building waste after appropriate processing as components of mixtures of mineral soil.

In order to build a road embankment in the Wrocław area, the use of two anthropogenic materials was considered, formed by mixing different proportions of the natural sandy soil (from a local reservoir under construction) and waste in the form of a mixture of ash and slag, deposited at a local landfill plant.

In this work, the main attention was paid to the values of shear strength parameters, which the stability of embankment slopes made of such mixtures is mainly dependent on.

Stability analysis was performed using the method of Bishop using two approaches: according to the Polish regulations, and according to Eurocode 7. Stability analysis was

performed for a typical cross section of the road embankment heights in the range of 3–12 m, founded on the bearing subsoil. A static load of the vehicles of 25 kPa acts on the surface of the roadway. Calculations were performed for two mixtures of 1:1 and 1.5:1 of ash and sand. Two sets of shear strength parameters: minimum and maximum, were assumed for each mixture. The obtained results are presented on the graph.

The studies and stability analysis have shown the usefulness of sand-ash mixtures for the construction of road embankments. The mixtures prepared with high requirements for their preparation regime may be formed embankments of the preferred slope inclination 1:1.5. Moreover, it was concluded that for mixtures with low values of strength parameters (e.g. wrongly prepared) may be formed embankments of up to 5 m from the slopes an inclination of 1:1.5. In the case of higher embankments requires additional strengthening of increasing the level of their stability.

