Stateczność lewego obwałowania nasypu przeciwpowodziowego rzeki Tyny w miejscowości Raczki Elbląskie

Mgr inż. Dominika Iskra-Świercz, dr hab. inż. Andrzej Olchawa
Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu, Instytut Politechniczny

Praktyka procesów inwestycyjnych w zakresie ochrony przeciwpowodziowej na obszarze Żuław Elbląskich wykazuje, że decyzja o zakwalifikowaniu nasypu obwałowania przeciwpowodziowego do prac odtworzeniowych lub modernizacyjnych nie jest poprzedzana badaniami geotechnicznymi oraz analizami oceniającymi aktualny stan nasypu. Punktowe przesiąki lub punktowe rozmycia skarpy często kwalifikują całe obwałowania do remontu, zamiast odcinki o obniżonej sprawności technicznej. Decyzje takie są podejmowane często w obawie przed utratą stateczności nasypu dodatkowo obciążanego siłami hydrodynamicznymi podczas długotrwałych i wysokich stanów wód. Projekty techniczne odtworzeń lub modernizacji nasypu nie zawierają obliczeń ich stateczności. Wynika to z obecności w korpusach gruntów różniących się istotnie parametrami wytrzymałościowymi.

Wieloletnie obserwacje obwałowań nasypów przeciwpowodziowych na obszarze Żuław Elbląskich wskazują, że utrata ich stateczności nie występuje nawet przy długotrwałych najwyższych piętrzeniach wody. W dostępnej technicznej literaturze przedmiotu brakuje danych oceniających stateczność nasypów obwałowań przeciwpowodziowych w tym regionie.

Obliczenie stateczności nasypów wymaga znajomości efektywnych parametrów wytrzymałości materiału konstrukcyjnego wyznaczonych w specjalistycznych badaniach w aparacie trójosiowego ściskania. Ze względu na obecność w korpusie gruntów różniących się składem granulometrycznym, zawartością materii organicznej oraz stanem zagęszczenia jest konieczne pobranie do badań trójosiowych próbek NNS z kilku punktów na potencjalnej powierzchni poślizgu.

Alternatywą dla obliczeń stateczności na podstawie efektywnych parametrów wytrzymałościowych gruntu może być metoda oparta na polowych pomiarach wytrzymałości na ścinanie materiału konstrukcyjnego korpusu i ich implementacja do uproszczonego wzoru na stateczność nasypu. Obliczony w taki sposób wskaźnik stateczności $F_{(f)}$ musiałby być porównany z wartością wskaźnika $F_{(lab)}$ obliczonego na podstawie efektywnych parametrów wytrzymałościowych gruntu. Dostateczna liczba par ($F_{(f)}$; $F_{(lab)}$) umożliwia znalezienie związków statystycznych między tymi wielkościami i wyznaczenia współczynnika korygującego wartość $F_{(f)}$.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie obliczeń stateczności obwałowania rzeki Tyny w miejscowości Raczki Elbląskie na podstawie polowych badań wytrzymałości gruntu w korpusie nasypu.

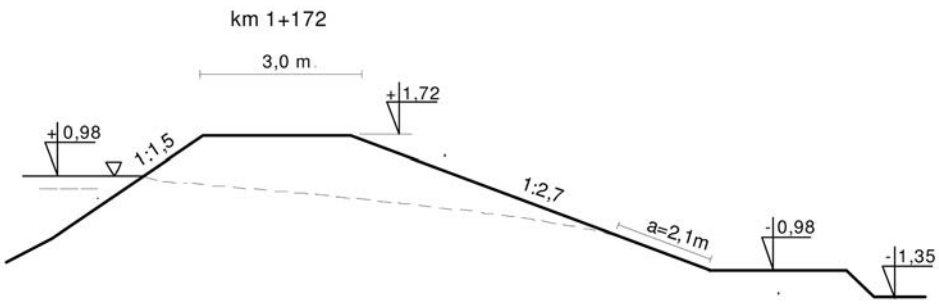
CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU

Obiektem, do którego wykonano obliczenia stateczności jest lewy nasyp obwałowania przeciwpowodziowego rzeki Tyny w miejscowości Raczki Elbląskie, na polderze 27. Raczki Elbląskie znajdują się na depresyjnym obszarze Żuław Elbląskich, gdzie lokalnie poziom terenu znajduje się 1,8 m. poniżej poziomu morza. Na obszarach depresyjnych wszystkie obwałowania stale piętrzą wodę i w rzeczywistości pełnią rolę zapór. Z tych powodów znajomość wskaźnika stateczności, będącego składową oceny stanu technicznego obwałowania, jest szczególnie istotna.

Przedmiotową budowlę zmodernizowano w 1994 roku. Modernizacja polegała na podwyższeniu korony nasypu, rozbudowie korpusu w kierunku odpowietrznym i wykonaniu rdzenia gruntowego technologią zagęszczania udarowego. Do rozbudowy i podwyższenia zastosowano grunt organiczny z tak zwanych rezerw materiałowych.

Projektowana wysokość nasypu wynikała z poziomu miarodajnego stanu wody w cieku i warunków technicznych III klasy obwałowań przeciwpowodziowych. Wzniesienie ponad miarodajny stan wody (wynoszący w cieku 0,98 m p.p.m.) dla tej klasy budowli wynosi 0,7 m (Rozporządzenie, 2007) [14]. Stąd rzędna korony po zakończeniu prac modernizacyjnych i oddaniu budowli do eksploatacji wynosiła 1,70 m n.p.m.

Po zakończeniu prac modernizacyjnych i oddaniu budowli do eksploatacji wykonano badania zagęszczenia mas ziemnych w korpusie w celu ustalenia średniej wartości wskaźnika zagęszczenia I_s. Wyniosła ona $I_s \geq 0{,}92$, spełniając tym samym warunek zagęszczenia materiału konstrukcyjnego w korpusach nasypów zaliczanych do III i IV klasy obwałowań, a wynoszący $I_s \geq 0{,}92$ (Roboty ziemne,1994; PN-97/B-12095 – Nasypy. Wymagania i badania przy odbiorze) [12, 13].



Rys. 1. Charakterystyka geometryczna przekroju poprzecznego nasypu

Wykonane przez autorów pomiary geodezyjne lewego nasypu, w kilometrażu 1+172, przedstawiono na rys. 1.

Charakterystyka geometryczna lewego obwałowania rzeki Tyny w miejscowości Raczki Elbląskie w kilometrażu 1+172 jest następująca:

- szerokość korony: 3,0 m,
- nachylenie skarp: odpowietrznej 1:2,7,
  odwodnej 1:1,5,
- rzędna korony wału: 1,72 m n.p.m.,
- wysokość korpusu: 2,70 m,
- rzędna stopy wału: 0,98 m p.p.m.

Długość krzywej depresji wychodzącej na skarpę odpowietrzną przy miarodajnym stanie wody obliczono według formuły van Itersona (Haar, 1990) [3]:

$$a = \frac{d}{\cos\alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2\alpha} - \frac{h^2}{\sin^2\alpha}} \tag{1}$$

gdzie:

d – odległość stopy wału do prostopadłej do podstawy wału przechodzącej przez najwyższy poziom krzywej depresji, przyjęto 10,5 m,

h – wysokość piętrzenia wody w korycie cieku, przyjęto 2,4 m,

α – kąt nachylenia skarpy odpowietrznej, przyjęto 20,3°.

Obliczona wartość a = 2,1 m.

WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁU KONSTRUKCYJNEGO I OBLICZENIE WSKAŹNIKA STATECZNOŚCI

Do badań właściwości materiału konstrukcyjnego korpusu pobrano grunt poniżej i powyżej krzywej depresji wody filtrującej przez nasyp. Grunt pobrano z trzech punktów: w osi korony oraz ze skarpy odpowietrznej w odległości 3 m i 6 m od krawędzi korony. Właściwości gruntu oznaczono zgodnie z PN-88/B-04481 [11]. Zawartość materii organicznej wyznaczono metodą termograwimetryczną, obliczając względną stratę masy gruntu w zakresie temperatur 378 ÷ 713 K – metoda C według ASTM D 2974 /1993 [1]. Wyniki badań laboratoryjnych zestawiono w tabl. 1. Gęstość właściwą szkieletu gruntowego r_s obliczono na podstawie zawartości materii organicznej według wzorów przeliczeniowych zawartych w pracy (Lechowicz, Szymański 2002) [5].

Badania wytrzymałościowe gruntu wykonano sondą obrotową typu ITB-ZW z końcówką krzyżakową VT12/6 w ośmiu punktach na potencjalnej powierzchni poślizgu, przy której wskaźnik stateczności ma wartość najmniejszą.

Powierzchnię wygenerowano za pomocą programu numerycznego INTERSOFT – Moduł, stateczność skarp i zboczy. Obliczenia wykonano uproszczoną metodą Bishopa. Wytrzymałościowe parametry materiału konstrukcyjnego korpusu, przyjęte do obliczeń, wyznaczono na podstawie badania trójosiowego ściskania jednej próbki gruntu. Próbkę wykonano z gruntu organicznego stosowanego do prac odtworzeniowych nasypu w 1994 roku. Szczegółowy opis wykonanych badań przedstawiono w (Olchawa A., Przewłócki J., 2013) [7]. Przy powierzchni walcowej o promieniu R = 7,7 m i środku znajdującym się w odległości x = 3,6 m i y = 1,1 m od prawej krawędzi korony nasypu obliczona wartość wskaźnika stateczności ma wartość najmniejszą.

Usytuowanie punktów pomiaru wytrzymałości na ścinanie w poprzecznym przekroju korpusu przedstawiono na rys. 2. Na rys. 3 przedstawiono pomierzone wartości wytrzymałości na ścinanie τ_{fv}.

Do obliczeń stateczności przyjęto wartości wytrzymałości na ścinanie bez odpływu τ_{fu}, mnożąc pomierzone w terenie wartości τ_{fv} przez współczynnik redukcyjny μ, to jest:

$$\tau_{fu} = \mu \cdot \tau_{fv} \tag{2}$$

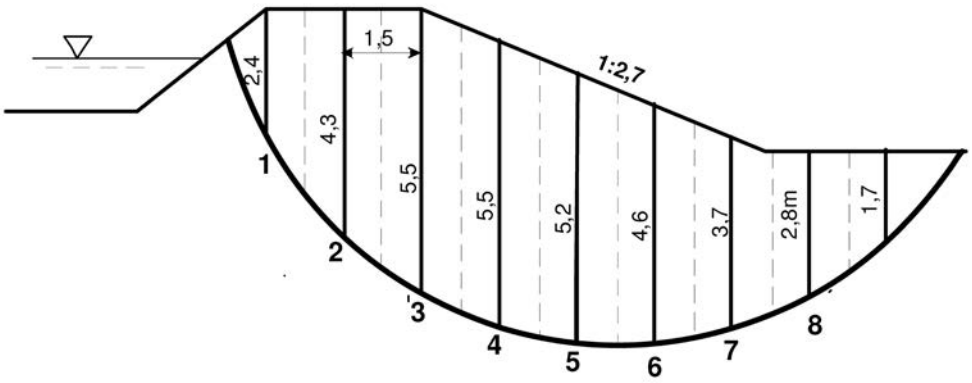
Do obliczeń przyjęto następujące wartości współczynników korekcyjnych:

- μ_{Ip} = 0,82 według Bjerruma z poprawką Azzouza, współczynnik jest zależny od wskaźnika plastyczności I_p, (Lechowicz, Szymański, 2002) [5];
- μ_{TTC} = 0,90 według propozycji Lechowicza i Szymańskiego (2002) [5], współczynnik wyznaczony na podstawie porównania wytrzymałości na ścinanie sondą polową z wytrzymałością wyznaczoną w badaniach trójosiowego ściskania;
- μ_{DT} = 0,55 jak wyżej, lecz na podstawie porównania z wytrzymałością gruntu wyznaczoną w laboratoryjnych badaniach bezpośredniego ścinania;
- μ_{LAB} = 0,58 według propozycji Lechowicza (1992) [4].

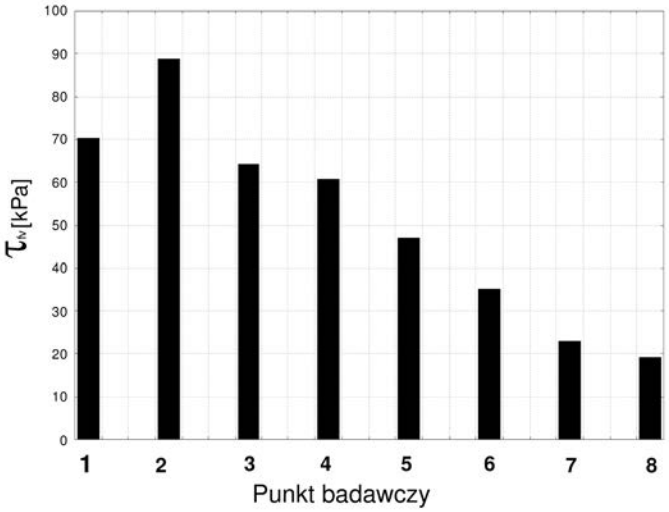
W praktyce największe zastosowanie do oceny stateczności wciąż znajdują metody równowagi granicznej, a zwłaszcza ich wersje uproszczone. Zakłada się, że lokalny wskaźnik stateczności zdefiniowany jako iloraz wytrzymałości rzeczywistej i zmobilizowanej jest równy globalnemu wskaźnikowi stateczności, będącemu ilorazem momentów od sił utrzymujących zbocze w równowadze do sił dążących do jej naruszenia. Oznacza to przyjęcie jednakowego stopnia zmobilizowanej wytrzymałości na ścinanie wzdłuż całej powierzchni poślizgu. W większości metod oceny stateczności końcowym wynikiem obliczeń jest bezwymiarowy parametr F, zwany wskaźnikiem stateczności. Wskaźnik ten jest odnoszony najczęściej do parametrów wytrzymałościowych i z reguły przedstawia się go jako

Tabl. 1. Wyniki badań laboratoryjnych materiału konstrukcyjnego nasypu

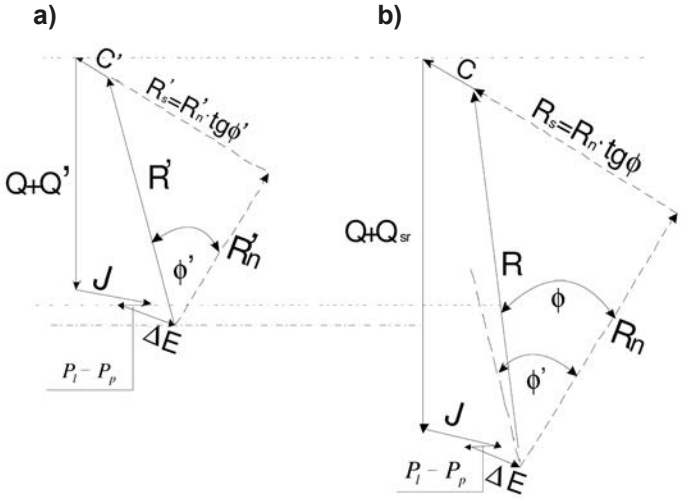
Miejsce pobrania	Głębokość poniżej korony/skarpy	Zawartość materii organicznej I_{om}	Wilgotność, w	r	r_s	Sr	n	W_P	W_L
	[m]	[%]	[%]	[Mg/m³]	[Mg/m³]	[%]	[–]	[%]	[%]
Oś korony	1,0	9,9	51,1	1,54	2,44	95,2	0,58	36,0	66,0
	3,5	10,2	54,0	1,77	2,43	99,7	0,46		
Skarpa odpowietrzna 3 m od krawędzi korony	0,8	12,7	54,3	1,51	2,41	89,7	0,59	35,0	70,1
	2,5	13,8	55,1	1,61	2,39	100,0	0,56		
Skarpa odpowietrzna 6 m od krawędzi korony	0,3	6,1	30,2	1,86	2,48	100,0	0,42	32,1	56,2
	1,5	6,0	29,1	1,87	2,49	100,0	0,41		



Rys. 2. Punkty 1 ÷ 8, w których wykonano pomiary wytrzymałości na ścinanie



Rys. 3. Pomierzone wartości wytrzymałości na ścinanie τ_{fv}, na potencjalnej powierzchni poślizgu w korpusie nasypu w kilometrażu 1+172



Rys. 4. Wielobok sił działających na pasek gruntu przy stosowaniu naprężeń efektywnych (a) i naprężeń całkowitych (b)

iloraz momentów lub sił utrzymujących zbocze w równowadze do momentów lub sił dążących do jej naruszenia.

W niniejszej pracy obliczenia przeprowadzono uproszczoną metodą Felleniusa-Peterssona, to znaczy metodą równowagi granicznej, wykorzystywaną najczęściej w praktyce projektowej. W metodzie zakłada się cylindryczną powierzchnię poślizgu, a masyw potencjalnego osuwiska dzieli się na pionowe paski jako elementy niezależne, nie mające wzajemnego powiązania. Takie uproszczenie jest równoważne przyjęciu poszczególnych pasków jako oddzielnych elementów, między

Oznaczenia na rysunku są następujące:

- Q – ciężar gruntu powyżej krzywej depresji [kN],
- Q' – ciężar gruntu poniżej krzywej depresji z uwzględnieniem wyporu [kN],
- Q_{sr} – ciężar gruntu poniżej krzywej depresji przy pełnym nasyceniu porów gruntu wodą [kN],
- R_n – składowa siły R normalna do podstawy paska [kN],
- J – siła filtracji [kN],
- f – całkowity kąt tarcia wewnętrznego gruntu [°],
- f – efektywny kąt tarcia wewnętrznego gruntu [°],
- c – całkowita spójność gruntu [kPa],
- c' – efektywna spójność gruntu [kPa].

$(P_L - P_P)$, DE – opis w tekście.

którymi nie występują żadne siły. Założenie to, zmieniające siłę normalną w pasku, zmniejsza wartość wskaźnika stateczności. Na rys. 4 przedstawiono wieloboki sił działających na pasek gruntu uwzględniający różnice sił parcia na boczne ścianki $DP = P_L - P_P$ i różnicę od oddziaływania sąsiednich pasków *DE* przy stosowaniu naprężeń efektywnych i stosowaniu naprężeń całkowitych (Czyżewski i inni, 1973; Whitlow, 2001) [2, 15].

Przyjmując uproszczenie, że między paskami nie występują żadne siły, wskaźnik stateczności *F*, przy stosowaniu naprężeń całkowitych, jest wyrażony wzorem:

$$F = \frac{\sum Q_i \cdot \cos\alpha_i \cdot \mathrm{tg}\,\phi + c_i \cdot l_i}{\sum Q_i \cdot \sin\alpha_i + J_{si} \cdot \frac{r_i}{R_c}} \tag{3}$$

gdzie:
Q_i – ciężar *i*-tego paska (poniżej zwierciadła wody przyjmuje się ciężar gruntu dla $S_r = 1$) [kN],
R_c – promień poprzecznego przekroju powierzchni poślizgu [m],
l_i – długość podstawy *i*-tego paska [m],
c_i – spójność gruntu w *i*-tym pasku [kPa],
ϕ_i – kąt tarcia wewnętrznego gruntu w *i*-tym pasku [°],
J_{si} – wartość siły od ciśnienia spływowego w *i*-tym pasku [kN],
a_i – kąt nachylenia podstawy paska do poziomu [°],
r_i – ramię momentu od siły J_{si} [kN].

Stosując do obliczeń wytrzymałość na ścinanie bez odpływu τ_{fu}, wzór (3) przekształca się do postaci:

$$F = \frac{\sum \tau_{fui} \cdot l_i}{\sum Q_i \cdot \sin\alpha_i + J_{si} \cdot \frac{r_i}{R_c}} \tag{4}$$

Wszystkie oznaczenia jak wyżej.

ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI

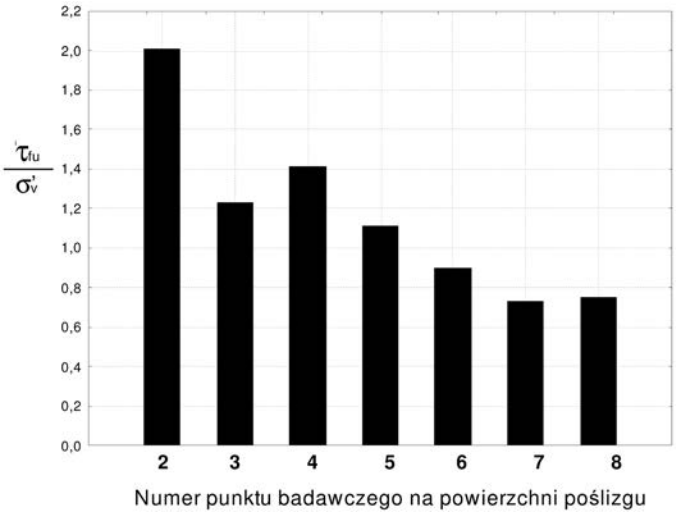
Stosowany do budowy i prac modernizacyjnych materiał konstrukcyjny jest gruntem organicznym. Zawartość materii organicznej zawiera się w przedziale od 6,0 do 12,7%. Zgodnie z podziałem rodzimych gruntów organicznych według PN-86/B-02480 [10] i oceną makroskopową jest to namuł gliniasty, a według PN-EN ISO – 14688-1 [8] jest to grunt organiczny.

Obliczony stosunek pomierzonych wartości wytrzymałości na ścinanie τ_{fv} do pionowej składowej naprężenia efektywnego σ'_v (rys. 5) zmniejsza się w kierunku skarpy odpowietrznej i jest zapewne skutkiem udarowego zagęszczania centralnej części poprzecznego przekroju nasypu.

Pomimo tego, że znacząco większa wytrzymałość na ścinanie gruntu na powierzchni poślizgu występuje w punktach badawczych leżących bliżej osi korpusu, to mniejsza porowatość gruntu ma miejsce bliżej stopy wału. Jest to prawdopodobnie konsekwencją stosowania do prac modernizacyjnych materiału konstrukcyjnego pochodzącego z różnych źródeł rezerw materiałowych. Drugą przyczyną mogą być procesy biochemicznej degradacji warstw gruntów leżących powyżej krzywej depresji (Olchawa, 2003) [6].

Obliczone wartości wskaźników stateczności w zależności od przyjętego współczynnika korekcyjnego μ do obliczeń wytrzymałości na ścinanie bez odpływu τ_{fu} zestawiono w tabl. 2.

Wartość momentu od sił filtracji stanowi 21,2% całkowitego momentu powodującego zsuw. Stosunkowo duży udział sił filtracji może być podstawą do analiz rozwiązań konstrukcyjnych



Rys. 5. Stosunek pomierzonych wartości wytrzymałości na ścinanie do pionowej składowej naprężenia efektywnego

Tabl. 2. Wyniki obliczeń wskaźnika stateczności nasypu w zależności od przyjętego współczynnika korekcyjnego μ

Wartość współczynnika redukcyjnego μ	Moment utrzymujący	Moment powodujący zsuw	Moment od sił filtracji	Wskaźnik stateczności
	[kN·m]			[–]
$\mu_{Ip} = 0{,}82$	3645,7	992,7	265,5	**2,90**
$\mu_{TTC} = 0{,}90$	3999,3			**3,18**
$\mu_{DT} = 0{,}55$	2444,0			**1,94**
$\mu_{LAB} = 0{,}58$	2577,3			**2,05**

polegających na wykonaniu drenażu, dzięki któremu nastąpi redukcja sił hydrodynamicznych obciążających nasyp.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że wartość minimalnego wskaźnika stateczności $F_{(f)}$, w zależności od przyjętego współczynnika korekcyjnego m, wynosi od 1,94 do 3,18. Zakładając poprawność wykonanych obliczeń, zgodnie z (Rozporządzeniem, 2007) [14], stateczność nasypu jest zapewniona, bowiem „dla budowli hydrotechnicznych klasy III i IV, dla których obliczenia stateczności oblicza się metodami uproszczonymi, w tym metodą szwedzką, minimalna wartość wskaźnika stateczności wynosi 1,3”. Ustalenie zakresu stosowalności uproszczonej metody z zastosowaniem wytrzymałościowych badań polowych wymaga porównania wskaźników stateczności $F_{(f)}$ ze wskaźnikiem $F_{(lab)}$ obliczonym innymi metodami (np. Bishopa, Janbu, Morgensterna-Price'a), do których stosowane byłyby efektywne parametry wytrzymałościowe wyznaczone w badaniach trójosiowego ściskania. Dzięki zgromadzeniu dostatecznej liczby par ($F_{(f)}$; $F_{(lab)}$) jest możliwe statystyczne ustalenie związków korelacyjnych pomiędzy tymi wielkościami. Określenie funkcyjnej zależności $F_{(lab)} = F_{(lab)}\,[F_{(f)}]$ pozwoli na korektę wartości wskaźników stateczności obliczonych metodą uproszczoną.

Wdrożenie uproszczonej metody do praktyki inżynierskiej umożliwi okresowe analizy stateczności eksploatowanych korpusów nasypów na podstawie bieżących polowych pomiarów wytrzymałościowych. Jest to szczególnie istotne ze względu na postępującą degradację materiału konstrukcyjnego budowli wykonanych z miejscowych gruntów organicznych. Wyniki

bieżącego monitorowania stateczności nasypów mogą stanowić cenną informację w podejmowaniu decyzji o ich rewitalizacji lub modernizacji.

LITERATURA

1. ASTM D 2974/ 1993 – Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Organic Soils, 31-33.
2. Czyżewski Cz., Wolski W., Wójcicki S., Żbikowski A.: Zapory ziemne. Arkady, 1973.
3. Harr M. E.: Groundwater and seepage. Second Edition, Dover 1990.
4. Lechowicz Z.: Ocena wzmocnienia gruntów organicznych obciążonych nasypem. Wydawnictwo SGGW, 1992.
5. Lechowicz Z., Szymański A.: Odkształcenia i stateczność nasypów na gruntach organicznych, cz. 1, 2002.
6. Olchawa A.: Właściwości gruntowych kompozytów jako materiału do budowy obwałowań przeciwpowodziowych. WODA, ŚRODOWISKO, OBSZARY WIEJSKIE. Rozprawy naukowe I monografie nr 8. Wyd. IMUZ, 2003.
7. Olchawa A., Przewłócki J.: Stateczność czołowego obwałowania nasypu przeciwpowodziowego jeziora Druzno. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 6/2013, 501-505.
8. PN-EN ISO 14688-1:2006 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis.
9. PN-EN ISO 14688-2:2006 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.
10. PN-86/B-02480 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
11. PN-88/B-04481 Grunty Budowlane. Badania próbek gruntu.
12. PN- 97/B-12095 Nasypy. Wymagania i badania przy odbiorze.
13. Roboty ziemne. Warunki techniczne wykonania i odbioru. Praca zbiorowa pod redakcją W. Wolskiego, Warszawa: MOZNiL, 1994.
14. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20.04.2007 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie.
15. Whitlow R.: Basic Soil Mechanics. Fourth edition. Pearson Education Limited, Dorchester 2001.