

Analiza stateczności wału przeciwpowodziowego Wisły w miejscowości Słupiec

Dr inż. Sebastian Olesiak

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii

W czerwcu 2010 roku w trakcie przejścia drugiej fali powodziowej doszło do przerwania wału przeciwpowodziowego rzeki Wisły w miejscowości Słupiec (gmina Szczucin, powiat dąbrowski, województwo małopolskie). Wyrwa w wale miała długość około 20 m, a wdzierająca się woda stanowiła poważne zagrożenie dla całej gminy liczącej 18 miejscowości. Zalaniu uległ znaczny obszar po stronie odpowietrznej wałów. Wraz z ewakuacją zagrożonych mieszkańców (akcja ewakuacyjna dotyczyła około 3 tysięcy mieszkańców) były prowadzone tymczasowe prace naprawcze mające na celu zatkanie wyrwy. W związku z brakiem możliwości dotarcia do wyrwy drogą lądową do pracy wykorzystano śmigłowce, które zrzucały na wyrwę worki z piaskiem.

Po powodzi, w ramach prac naprawczych, przewidziano wykonanie ekspertyzy dotyczącej oceny stanu technicznego oraz odbudowy i wzmocnienia prawego wału rzeki Wisły w km 43+600 ÷ 44+150 w rejonie miejscowości Słupiec. Zaproponowano wykonanie szczelnej, pionowej przesłony przeciwfiltracyjnej o grubości 60 cm z kolumn grunto-cementowych DSM (*Deep Soil Mixing*), wykonywanej z korony wału do głębokości około 10 m.

Technologia DSM polega na głębokim mieszaniu gruntu z zawieszoną twardniejącą (cement lub inne spoiwo hydrauliczne, bentonit, granulowany żużel wielkopiecowy lub popioły lotne oraz wypełniacze i domieszki) o określonej recepturze przy użyciu specjalnych wiertnic. Wiercenie odbywa się bez wstrząsów, a wspomagane jest wypływem zawiesiny. Po osiągnięciu żądanej głębokości następuje formowanie kolumn o typowej średnicy od 60 do 150 cm przez powolne podciąganie wiertła z równoczesnym mieszaniem zawiesiny z gruntem. Ilość zawiesiny dostosowuje się do rodzaju gruntu, w którym jest formowana kolumna. Kolumny powinny być formowane na zakład, aby przesłona miała odpowiednią szczelność [1].

Jednym z elementów projektu było przeprowadzenie analizy stateczności wałów przeciwpowodziowych po wykonaniu przesłony z kolumn DSM. Poprawne przeprowadzenie takiej analizy wymaga znajomości szczegółowych danych hydrogeologicznych. Niestety, w tym przypadku dysponowano tylko informacjami uzyskanymi w trakcie polowych prac geotechnicznych, które przeprowadzono rok po powodzi przy normalnym stanie rzeki Wisły i towarzyszącym mu naturalnym poziomie wód gruntowych.

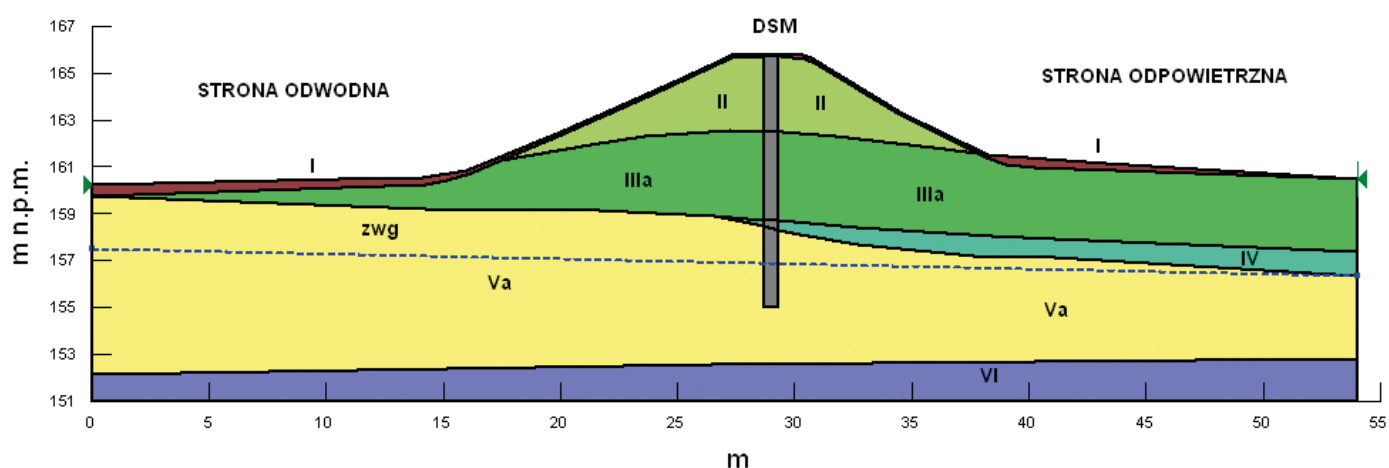
GEOLOGIA I WŁAŚCIWOŚCI GRUNTÓW PODŁOŻA I WAŁU PRZECIWPOWODZIOWEGO

Obliczenia stateczności wykonano na podstawie przekroju geotechnicznego, który zlokalizowano w pobliżu wyrwy powstałej w trakcie powodzi. W celu rozpoznania warunków geologicznych i hydrogeologicznych w analizowanym przekroju wykonano trzy wiercenia i trzy badania sondą dynamiczną lekką DPL. Wiercenia i towarzyszące im sondowania zlokalizowano odpowiednio po jednym, w koronie wału, od strony odwodnej i od strony odpowietrznej. Wiercenia prowadzono do głębokości od 4,4 do 10,0 m, a badania sondą do głębokości od 4,6 do 8,5 m. Na podstawie geotechnicznych badań polowych i badań laboratoryjnych wydzielono warstwy geotechniczne i określono podstawowe właściwości gruntów.

Parametry gruntów wykorzystywane w obliczeniach filtracji i analizy stateczności zebrano w tabl. 1. Na rys. 1 przedstawiono schematycznie geometrię modelu obliczeniowego z układem warstw geotechnicznych (I, II, IIIa, IV, Va i VI), położeniem naturalnego zwierciadła wód gruntowych (zwg) oraz miejscem wbudowania planowanej przesłony DSM.

Tabl. 1. Właściwości obliczeniowe gruntów przyjęte do analizy filtracji i stateczności

Warstwa geotechniczna	Rodzaj gruntu	Ciężar objętościowy γ [kN/m ³]	Spójność c_u [kPa]	Kąt tarcia wewnętrznego ϕ_u [°]	Porowatość n [-]	Współczynnik filtracji k [m·s ⁻¹]
I	H	17,6	13,5	9,0	0,50	$1 \cdot 10^{-4}$
II	Pg, G π , G π z	22,9	18,0	14,4	0,30	$3,6 \cdot 10^{-8}$
IIIa	G π , G π z, π //G, π p	23,0	17,8	14,6	0,40	$5,4 \cdot 10^{-7}$
IV	Nmg	19,3	4,5	4,5	0,30	$1 \cdot 10^{-8}$
Va	Ps, Ps+Ż, Pd+G, Pd+ π	20,4	0,0	28,8	0,25	$3,1 \cdot 10^{-4}$
VI	I π	21,1	45,0	10,8	0,40	$3,2 \cdot 10^{-9}$
DSM [1, 5, 10]		15,4	405,0	0,0	0,25	$1 \cdot 10^{-8}$



Rys. 1. Schemat modelu obliczeniowego

ANALIZA FILTRACJI I STATECZNOŚCI

Do numerycznego modelowania zjawisk filtracji wykorzystano program SEEP/W wchodzący w skład pakietu GeoStudio firmy GEO-SLOPE International Ltd. Program pozwala na rozwiązywanie szeregu zagadnień związanych z przepływem wód w ośrodkach porowatych (skały i grunty). Jego wszechstronna formuła umożliwia rozwiązywanie problemów w warunkach całkowitego i częściowego nasycenia ośrodka oraz w warunkach przepływu ustalonego i nieustalonego w czasie [6]. Program SEEP/W ma możliwość współpracy z innymi aplikacjami pakietu GeoStudio, dlatego do analiz stateczności użyto program SLOPE/W. Jest on wykorzystywany do przeprowadzania analiz stateczności przy zastosowaniu między innymi następujących metod równowagi granicznej: Felleniusa (*ordinary*), Bishopa, Janbu, Spencera, Morgensterna-Price'a. Program ułatwia wykonywanie obliczeń dla zboczy o praktycznie dowolnym kształcie i skomplikowanej budowie geologicznej. Analiza może być prowadzona w przypadku dowolnych powierzchni poślizgu. Program umożliwia uwzględnianie wpływu wody (obciążenie wodą) i wody gruntowej na warunki stateczności oraz wzmacnianie górotworu poprzez kotwienie, gwoździowanie i stosowanie geowłóknin [7]. Do oceny stateczności wykorzystano metodę Bishopa, która jest uznawana powszechnie za jedną z najbardziej wiarygodnych [3], oraz metodę Morgensterna-Price'a, która jest rekomendowana przez Rozporządzenie [9].

Do określenia minimalnej wartości współczynnika stateczności wykorzystano klasyczną metodę „*grid and radius*” polegającą na wyborze najniższej wartości współczynnika stateczności spośród wartości uzyskanych dla zdeterminowanych, kołowych powierzchni poślizgu. W obliczeniach wykorzystano procedurę dotyczącą optymalizacji kształtu powierzchni poślizgu [7].

W metodzie „*grid and radius*” należy zdefiniować siatkę punktów (środki obrotów) i zakres stycznych, dla których są wykreślane kołowe powierzchnie poślizgu i obliczane wartości współczynnika stateczności dla poszczególnych metod równowagi granicznej. W trakcie wykonywania obliczeń należy zaznaczyć, czy obliczenia mają być prowadzone dla lewej czy prawej strony zbocza.

Sprawdzenie stateczności zbocza lub skarpy polega na obliczeniu minimalnej wartości współczynnika stateczności przy zastosowaniu odpowiedniej metody obliczeniowej z uwzględnieniem budowy geologicznej, położenia zwierciadła wód gruntowych oraz odpowiednich parametrów gruntowych. Tak wyznaczony współczynnik stateczności FS powinien być większy niż dopuszczalny przy danej metody obliczeniowej i ważności obiektu geotechnicznego $FS_{min} > FS_{dop}$ [11]. W tym przypadku, zgodnie z Rozporządzeniem [9], jest wymagana wartość współczynnika stateczności FS większa od 1,5 ($FS > 1,5$) lub w przypadku dokładnego rozpoznania budowy podłoża i przeprowadzenia badań właściwości gruntów spoistych wartość współczynnika stateczności FS może być zmniejszona do 1,3 ($FS > 1,3$).

Największy problem w analizie stateczności był związany z brakiem szczegółowych informacji dotyczących zmian poziomu wody w rzece Wiśle i czasu utrzymywania się wody na danym poziomie. Dysponowano tylko ogólnymi informacjami o maksymalnym (obserwacje poczynione między innymi w trakcie powodzi w 2010 roku) i naturalnym poziomie wody w rzece i odpowiadającym mu poziomie wód gruntowych. W związku z tym, we wszystkich wariantach obliczano położenie krzywej depresji w warunkach filtracji ustalonej [2].

W celu uwzględnienia najbardziej niekorzystnych sytuacji przeprowadzono analizy dla różnych poziomów wody w rzece i towarzyszących im zmian przebiegu krzywej depresji w obwałowaniu.

W celu uzyskania czytelności wykonanych obliczeń stateczności analizę prowadzono zawsze w dwóch przypadkach: wał przeciwpowodziowy bez przesłony DSM i z przesłoną DSM. Obliczenia wykonywano zarówno dla strony odwodnej, jak i od powietrznej wałów przeciwpowodziowych.

W analizie stateczności nie uwzględniono zjawisk dynamicznych związanych z gwałtownym przepływem wody w rzece oraz zmiany parametrów fizyko-mechanicznych gruntów znajdujących się poniżej i powyżej zwierciadła wody gruntowej.

Wyniki obliczeń filtracji i stateczności

Analizę przeprowadzono dla kilku poziomów wody w rzece, poczynając od sytuacji braku wody na przedpolu wałów przeciwpowodziowych i naturalnym poziomie wód gruntowych (około 3,0 m p.p.t. dla strony odwodnej). W kolejnych obliczeniach podwyższano poziom wody w rzece o 1 metr. W pierwszych symulacjach zmiana poziomu wody w rzece jest widoczna tylko jako zmiana poziomu wody gruntowej w podłożu wału (model od strony odwodnej nie obejmuje koryta rzeki, które w tym miejscu jest oddalone od obwałowania o ponad 200 m). Powolnemu podwyższaniu (obniżaniu) poziomu wody w rzece towarzyszy równoczesne podwyższanie się (obniżanie się) poziomu wody gruntowej w wale przeciwpowodziowym. Zatem poniższa analiza stateczności odnosi się zarówno do sytuacji powolnego opadania, jak i powolnego podnoszenia się poziomu wody w rzece.

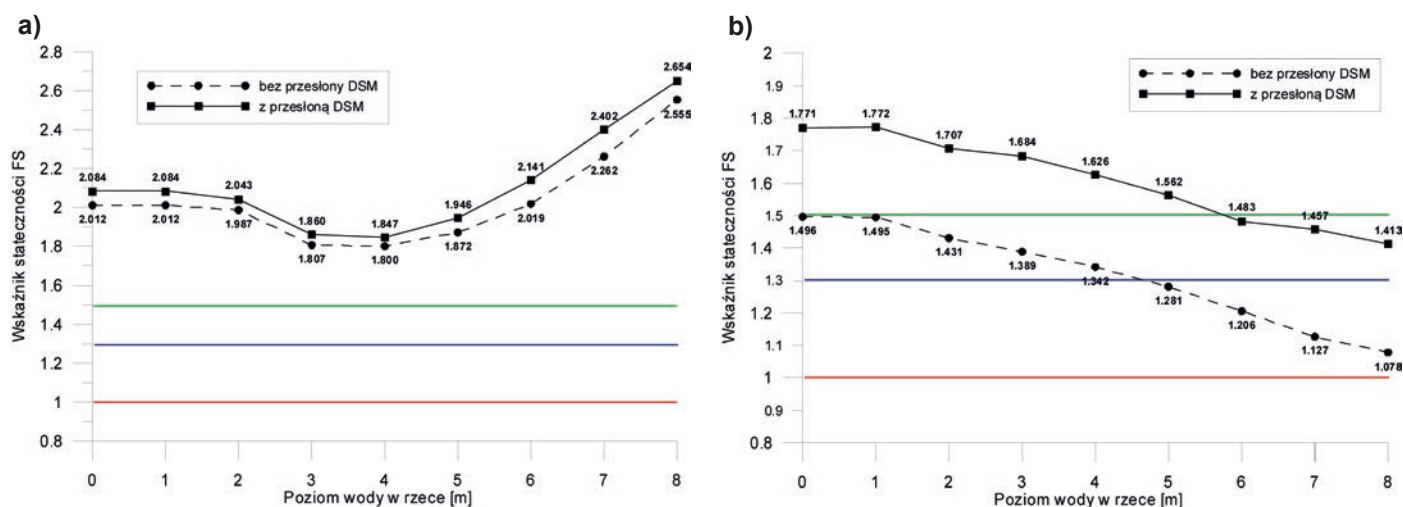
Analizę przeprowadzono dla dziewięciu poziomów wody w rzece i towarzyszących im poziomów krzywej depresji, które umownie nazwano:

- 0 m (157,5 m n.p.m.) – naturalny poziom wód gruntowych, brak wody na przedpolu wału,

Tabl. 2. Wyniki analizy stateczności metodami Bishopa i Morgensterna-Price'a

Analizowany przypadek	Zmiany poziomu wody w rzece								
	0 m	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
Skarpa odwodna									
Bez przesłony DSM	2,012 (1,979)	2,012 (1,979)	1,987 (1,961)	1,807 (1,811)	1,800 (1,797)	1,872 (1,871)	2,019 (2,010)	2,262 (2,247)	2,555 (2,529)
Z przesłoną DSM	2,084 (2,042)	2,084 (2,042)	2,043 (2,034)	1,860 (1,857)	1,847 (1,854)	1,946 (1,948)	2,141 (2,137)	2,402 (2,386)	2,654 (2,648)
Skarpa odpowietrzna									
Bez przesłony DSM	1,496 (1,473)	1,495 (1,472)	1,431 (1,413)	1,389 (1,372)	1,342 (1,324)	1,281 (1,296)	1,206 (1,194)	1,127 (1,114)	1,078 (1,061)
Z przesłoną DSM	1,771 (1,745)	1,772 (1,747)	1,707 (1,693)	1,684 (1,663)	1,626 (1,615)	1,562 (1,551)	1,483 (1,474)	1,457 (1,453)	1,413 (1,398)

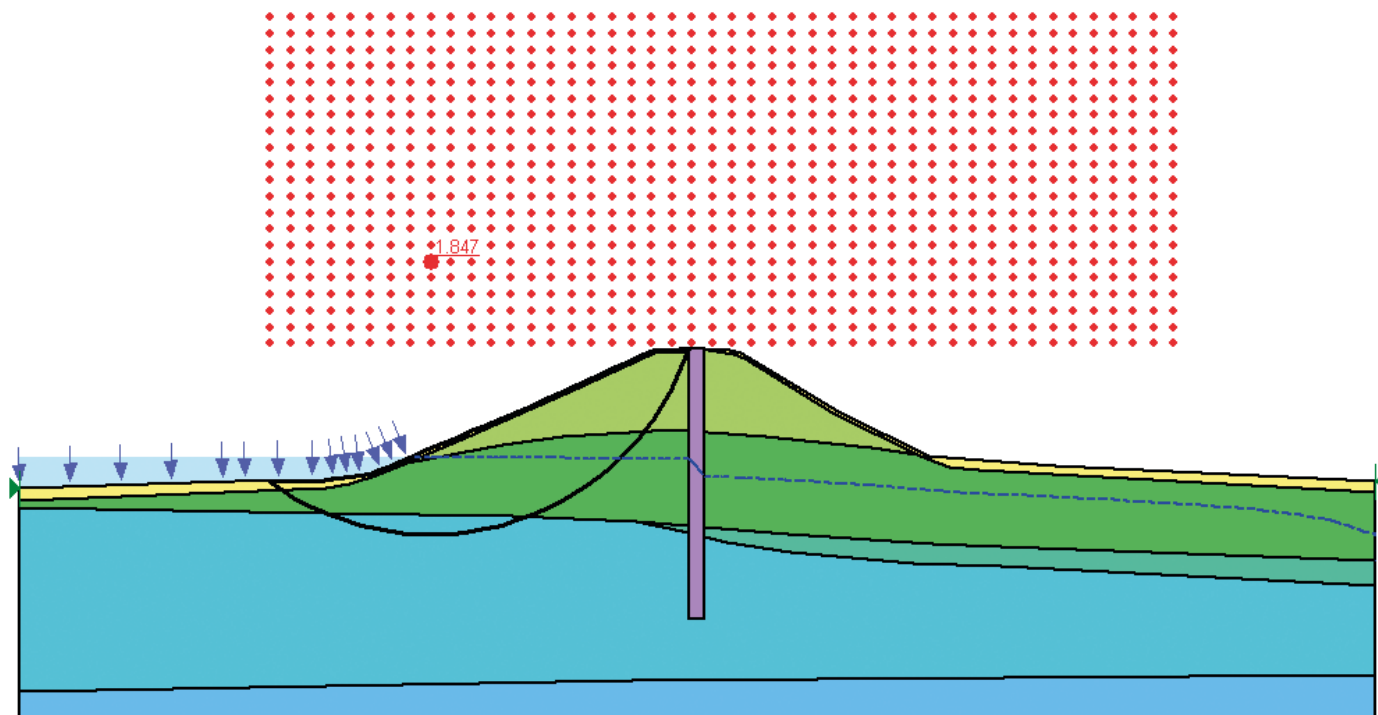
W nawiasach podano wartości współczynników stateczności wyznaczone metodą Morgensterna-Price'a



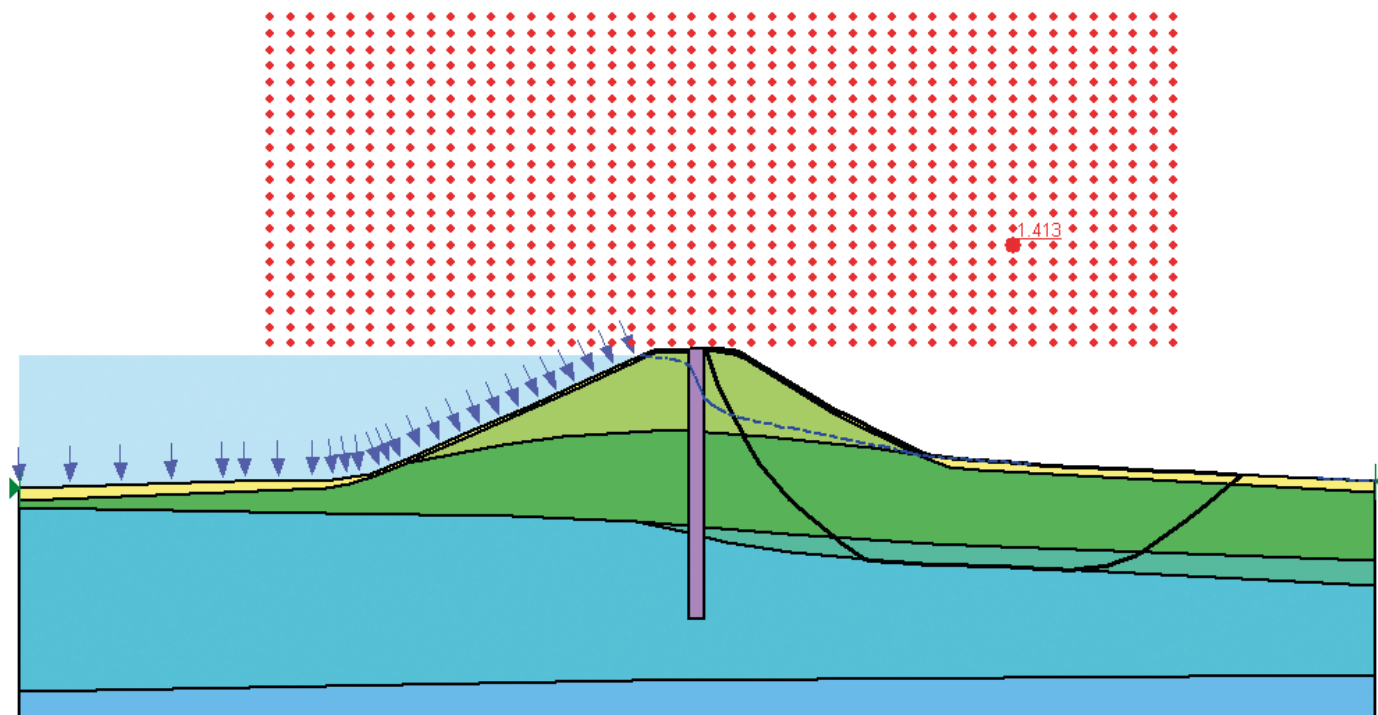
Rys. 2. Zestawienie wyników analizy stateczności metodą Bishopa
a) strona odwodna, b) strona odpowietrzna

- 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m, 7 m – poziom wody w rzece podniesiony odpowiednio o 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 metrów w stosunku do poziomu naturalnego,
- 8 m (165,5 m n.p.m.) – analizowany przypadek dotyczy wyjątkowego warunku pracy budowli hydrotechnicznej tego rodzaju. Poziom wody w rzece jest w tym przypadku niższy o około 30 cm w stosunku do wysokości ko-

rony wału [9]. Jest to sytuacja ekstremalna dla pracy budowli hydrotechnicznych, ale ma symulować zjawiska, które miały miejsce w maju i czerwcu 2010 roku, gdzie stan rzeki Wisły przekroczył ponad 400 cm w stosunku do stanu alarmowego, a woda w rzece w tym miejscu sięgała niemal korony wału.



Rys. 3. Przebieg powierzchni poślizgu przy minimalnej wartości współczynnika stateczności (metoda Bishopa) w przypadku strony odwodnej po wykonaniu przesłony DSM – poziom wody w rzece 4 m (161,5 m n.p.m.)



Rys. 4. Przebieg powierzchni poślizgu przy minimalnej wartości współczynnika stateczności (metoda Bishopa) w przypadku strony odpowietrznej po wykonaniu przesłony DSM – poziom wody w rzece 8 m (165,5 m n.p.m.)

Wyniki analizy metodami Bishopa i Morgensterna-Price'a, zestawiono w tabl. 2. Wartości współczynników stateczności uzyskane obiema metodami są do siebie podobne. Graficzną interpretację zmian wartości współczynników stateczności dla metody Bishopa przedstawiono na rys. 2. Dodatkowo, na rys. 3 i 4, przedstawiono wyniki analizy filtracji i stateczności uzyskanych minimalnych wartości współczynników stateczności po wykonaniu przesłony DSM, odpowiednio dla strony odwodnej i odpowietrznej.

W przypadku strony odwodnej podnoszący się poziom wody w rzece wpływa korzystnie na warunki stateczności wału przeciwpowodziowego. Jest to związane z faktem, że woda pełni funkcję quasy przypory. Najbardziej niekorzystna sytuacja ma miejsce, gdy poziom wody podniesiony jest o około 4 m (rys. 2a). Minimalna wartość współczynnika stateczności w metodzie Bishopa wynosi $FS_{\min} = 1,800$, czyli wystąpienie procesów osuwiskowych jest bardzo mało prawdopodobne. Po wykonaniu przesłony z kolumn DSM minimalna wartość współczynnika stateczności wzrasta i wynosi $FS_{\min} = 1,847$ (rys. 3), czyli wystąpienie procesów osuwiskowych jest bardzo mało prawdopodobne, a stan bezpieczeństwa należy uznać za w pełni zadowalający.

W przypadku strony odpowietrznej podnoszący się poziom wody w rzece wpływa niekorzystnie na warunki stateczności. Wraz z podnoszeniem się poziomu wody wartości współczynników stateczności dla metody Bishopa maleją (rys. 2b). Jak wspomniano badania geotechniczne prowadzono przy normalnym stanie rzeki Wisły i naturalnym poziomie wód gruntowych. Pomimo tego minimalne wartości współczynników stateczności są bliskie 1,0 ($FS_{\min} = 1,078$), czyli wystąpienie procesów osuwiskowych jest prawdopodobne. Po wykonaniu przesłony z kolumn DSM wartości współczynników stateczności wzrastają do wartości większych od 1,3 ($FS_{\min} = 1,413$, rys. 4), czyli wystąpienie procesów osuwiskowych jest mało prawdopodobne, a stan bezpieczeństwa należy uznać za zadowalający.

PODSUMOWANIE

Do przeprowadzenia prawidłowych obliczeń stateczności wałów przeciwpowodziowych niezbędny jest zestaw dokładnych danych dotyczących stanu wody w rzece. Dotyczy to zarówno poziomów wody w rzece, jak i czasu utrzymywania się wody na danym poziomie, co jest związane z nasycaniem się gruntów, z których wykonano wał.

W celu określenia wartości współczynników stateczności obliczenia prowadzono z wykorzystaniem metod równowagi granicznej. Jest to dopuszczalne z punktu widzenia Rozporządzenia [9]. Niestety, wymaga to poczynienia szeregu założeń, które mogą mieć wpływ na uzyskiwane wyniki. W analizach starano się, aby ograniczenia te wpływały na zmniejszenie wartości uzyskiwanych współczynników stateczności, a tym samym poprawę bezpieczeństwa modernizowanych wałów.

Na podstawie wyników analiz stateczności widać, że założenie tylko przypadku z maksymalnym i minimalnym poziomem wody w rzece i towarzyszącym im poziomom krzywej depresji czy wody gruntowej w podłożu może prowadzić do poważnych błędów obliczeniowych, zwłaszcza dla strony odwodnej.

W tym przypadku najniższe wartości współczynników stateczności ($FS_{\min} = 1,800$) uzyskano w sytuacji, gdy woda w rzece jest podniesiona od 3 do 5 m w stosunku do stanu normalnego. Natomiast w innych analizowanych przypadkach tego rodzaju uzyskiwane wartości współczynników stateczności dla strony odwodnej były znacząco niższe [4, 8].

Należy zwrócić uwagę, że w większości przypadków przejście fali powodziowej ma miejsce, gdy wały są już mocno nasyczone na skutek długotrwałych opadów. Nie rzadko mamy do czynienia z drugą falą powodziową, która uderza w nie osuszone wały przeciwpowodziowe. Nie uwzględnienie takich przypadków znacznie zawyża uzyskane wartości współczynników stateczności, co w konsekwencji może doprowadzić do awarii konstrukcji ziemnej. Taka sytuacja miała miejsce również w analizowanym przypadku. Wpływy i sączenia wody od strony odpowietrznej obserwowano na niemal całej wysokości wału w zależności od poziomu wody w rzece. Prawdopodobnie na skutek uszkodzenia wału oraz całkowitego nasycenia gruntów budujących wał doszło do przebiccia hydraulicznego w korpusie wału, co w konsekwencji mogło być podstawową przyczyną przerwania wału.

Zgodnie z Rozporządzeniem [9], w celu zapewnienia długookresowej stateczności konstrukcji wałów przeciwpowodziowych wartości współczynników stateczności powinny być co najmniej większe od 1,3 ($FS > 1,3$). W powyższym przykładzie zastosowanie ekranu z kolumn gruntowo-cementowych DSM z punktu widzenia stateczności powinno być zabiegiem wystarczającym. Niemniej, w trakcie wykonywania przesłony należy w miarę możliwości dogłębie cały wał oraz wymienić grunty słabe, w tym przede wszystkim grunty organiczne.

LITERATURA

1. Borys M., Rychalska J.: Parametry zawieszin twardniejących stosowanych do wykonywania przegród przeciwfiltacyjnych w wałach przeciwpowodziowych. Raszyn, IMUZ Falenty, Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie, t. 6, z. 1, 2006, 47-56.
2. Borys M., Mosiej M., Topolnicki M.: Projektowanie i wykonawstwo pionowych przegród przeciwfiltacyjnych z zawieszin twardniejących w korpusach i podłożu wałów przeciwpowodziowych. Falenty, Instytut Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach, Wydawnictwo IMUZ, 2006.
3. Cała M.: Numeryczne metody analizy stateczności zboczy. Kraków, AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, 2007.
4. Flisiak J., Olesiak S.: Analiza stateczności obwałowań przeciwpowodziowych rzeki Kanał Strumień. Kraków, Górnictwo i Geoinżynieria, z. 2 (34), 2010, 255-263.
5. Kitazume M., Terashi M.: The Deep Mixing Method. Leiden, CRC Press/Balkema, 2013.
6. Krahn J.: Seepage modeling with Seep/W 2007. Calgary, Geo-Slope International LTD, 2010.
7. Krahn J.: Stability modeling with Slope/W 2007 Version. Calgary, Geo-Slope International LTD, 2010.
8. Olesiak S.: Problemy analizy stateczności wałów przeciwpowodziowych na przykładzie rzeki Wisły w Krakowie w rejonie ulicy Wioślarskiej. Warszawa, Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie, nr 1 (436), 2013, 14-17.

9. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 86 poz. 579).

10. Topolnicki M.: Wzmacnianie i uszczelnianie gruntu metodą wgłębnego mieszania na mokro (DSM). W: XXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projek-

tanta Konstrukcji. Naprawy i wzmocnienia konstrukcji budowlanych. Wisła, 17-20 marca 2009 roku, PZITB Oddział Małopolski w Krakowie, 2009.

11. Wilun Z.: Zarys Geotechniki. Warszawa, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2001.