

Adam Balawejder, Wojciech Kozłowski, Andrzej Surowiecki

Wpływ zjawiska piętrzenia wody powodziorowej na stateczność nasypu kolejowego

**Zadaniem każdej budowli inżynierskiej jest bezpieczne przeniesienie i przekazanie nacisków na podłoże grunto-
we. W przypadku budowli ziemnych, do których zaliczają się nasypy komunikacyjne, zagrożeniem bezpieczeństwa ich pracy jest utrata stateczności skarp, polegająca na przemieszczeniu się masy gruntu. Zjawisko to jest wynikiem przekroczenia wytrzymałości gruntu na ścinanie wzdłuż pewnej powierzchni, nazywanej powierzchnią poślizgu.**

Przyczyną naruszenia równowagi mogą być siły masowe, zależne od masy gruntu. Dlatego w kształtowaniu geometrii budowli ziemnej ważne jest odpowiednie nachylenie skarp. Innym obciążeniem, wpływającym na stan równowagi ośrodka gruntowego są siły hydrodynamiczne, powodowane przepływem wody w ośrodku gruntowym [3, 4, 5]. Dodatkowym obciążeniem, mającym wpływ na stateczność nasypów komunikacyjnych, jest wartość i charakter działania obciążenia eksploatacyjnego (statyczne, dynamiczne), zlokalizowanego na koronie nasypu.

W artykule przedstawiono wybrane elementy analizy stateczności nasypu kolejowego w warunkach zagrożenia powodzią, czyli uwzględniając wpływ piętrzenia wody oprócz obciążenia eksploatacyjnego. Obliczenia i analizę zmian wartości współczynnika stateczności wykonano metodą Felleniusa i Bishopa [7], przyjmując obciążenie: ciężarem własnym i równomiernie rozłożone na koronie o zmiennej intensywności. Stosowano autorskie oprogramowanie [1, 2]: program SZMFIB-Stateczność zbczcy metodą Felleniusa i Bishopa oraz program FILTR-Filtracja ustalona w nasypach ziemnych piętrzących wodę.

Schemat obliczeniowy przyjęty do analizy

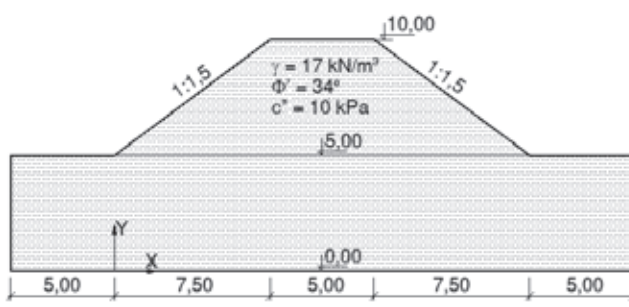
Ocenę stateczności skarpy komunikacyjnej budowli ziemnej wykonano na przykładzie nasypu jednorodnego, spoczywającego na podłożu odkształcalnym o takich parametrach jak nasyp [6]. Wysokość nasypu wynosi $H = 5$ m, nachylenie skarp 1:1,5; ciężar objętościowy gruntu $\gamma = 17,0$ kN/m³. Cechy geometryczne obiektu i efektywne parametry wytrzymałościowe podano na rysunku 1.

Wpływ obciążenia nasypu

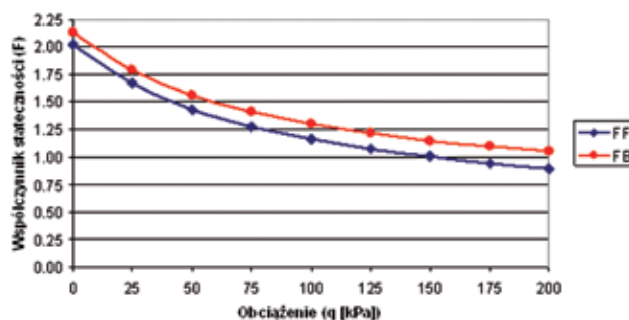
W przypadku obciążenia ciężarem własnym, wykonano serię obliczeń mających na celu określenie powierzchni kołowej o najmniejszym współczynniku stateczności. Otrzymano oboma metodami powierzchnie o zbliżonym przebiegu, jednak powierzchnia wyznaczona metodą Felleniusa ma większą krzywiznę, więc sięga głębiej w podłoże pod nasypem. Wykonując analizę stanu naprę-

żeń, stwierdzono przewagę naprężeń utrzymujących skarpe równowadze nad wartością naprężeń naruszających równowagę.

Następnie wykonano cykl obliczeń w celu określenia wpływu wartości równomiernie rozłożonego statycznego obciążenia, przyłożonego na koronie nasypu, na przebieg powierzchni poślizgu o najmniejszym współczynniku stateczności oraz na wartość tego współczynnika. Przyjęto wartości obciążenia rozłożonego w zakresie $q = 25$ kPa–200 kPa, natomiast interwał zmienności $\Delta q = 25$ kPa. Poza malejącą wartością współczynnika stateczności w funkcji powiększenia intensywności obciążenia, uwidacznia się w górnej części powierzchni poślizgu zwiększenie wartości naprężeń naruszających równowagę. Zmienność współczynnika stateczności w funkcji intensywności obciążenia ilustruje rysunek 2. Największy wpływ uwidacznia się w pierwszej połowie analizowanego przedziału, czyli od 0 kPa do 100 kPa. W tym przedziale wartość współczynnika mieści się w granicach dopuszczalnych, czyli w przypadku metody Felleniusa $FF_{dop} > 1,1$ – $1,3$; dla metody Bishopa $FB_{dop} > 1,3$ – $1,5$. Obciążenie z drugiej części przedziału zmienności obciążenia, tj. powyżej 100 kPa, powoduje naruszenie warunków równowagi, więc skarpa nasypu jest niestateczna. Z analizy kształtu krzywych poślizgu wynika, że wartość obciążenia nie wpływa w sposób znaczący na przebieg powierzchni poślizgu.

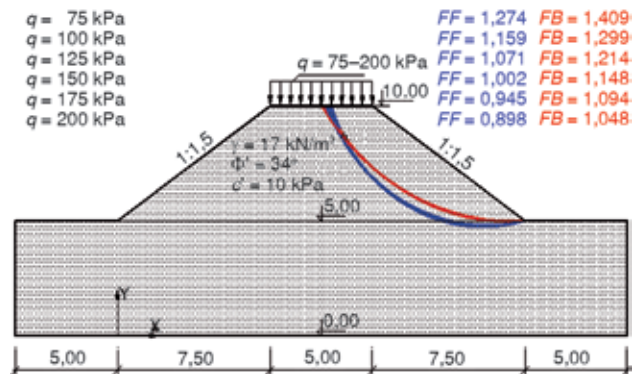


Rys. 1. Schemat obliczeniowy nasypu



Rys. 2. Zmienność współczynnika stateczności w funkcji intensywności obciążenia zlokalizowanego na koronie nasypu
FF-metoda Felleniusa; FB-metoda Bishopa

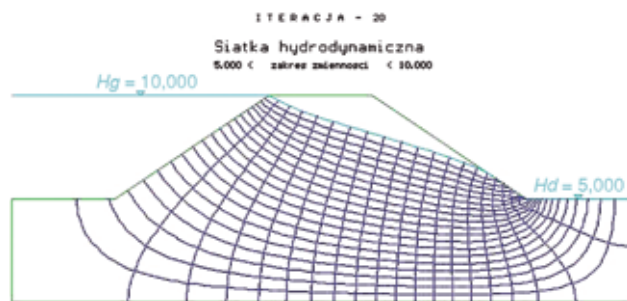
Na rysunku 3 przedstawiono krzywe, odwzorowujące potencjalne powierzchnie poślizgu, wyznaczone obiema metodami. Powierzchnie otrzymane metodą Felleniusa wykazują przebieg głębszy, czyli charakteryzują się bardziej wydatną krzywizną.



Rys. 3. Przebieg potencjalnych powierzchni poślizgu wyznaczonych metodą Felleniusa i Bishopa

Wpływ piętrzenia wody

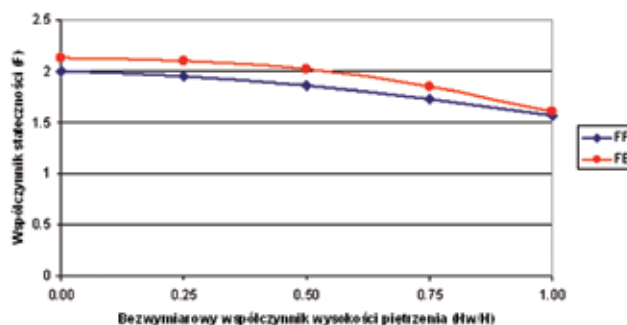
Przepływ wody przez korpus nasypu, wywołany stanem piętrzenia, powoduje obciążenie w postaci sił hydrodynamicznych. Wartości tych sił zależą od różnicy potencjałów w poszczególnych punktach obszaru filtracji [3, 4, 5]. W obu sygnalizowanych metodach obliczeń jest możliwe uwzględnienie wpływu filtracji na wartość sił utrzymujących i naruszających równowagę. Analizę wpływu piętrzenia wody na stateczność skarpy nasypu wykonano przyjmując poziome piętrzenia na wysokościach: 0,25H; 0,5H; 0,75H oraz 1,0H. W pierwszej kolejności wyznaczono położenie swobodnego zwierciadła wody w nasypie, przy założonych poziomach piętrzenia. Obliczenia wykonano przy użyciu programu numerycznego FILTR [2], opartego na zasadach metody elementów skończonych. Otrzymane rezultaty przy danym poziomie piętrzenia przedstawiono w postaci: dyskretyzacji obszaru filtracji, rozkładu prędkości i siatki hydrodynamicznej. Przykład siatki hydrodynamicznej przy poziomie piętrzenia równym wysokości nasypu H podano na rysunku 4.



Rys. 4. Siatka hydrodynamiczna przy poziomie piętrzenia równym wysokości nasypu H

W dalszej kolejności oszacowano przebieg powierzchni poślizgu o najmniejszej wartości współczynnika stateczności przy zadanych poziomach piętrzenia wody. Każdy z wyników jest efektem obliczenia kilkuset powierzchni o różnym położeniu punktu początkowego na koronie nasypu i punktu końcowego usytuowanego u podnóża skarpy oraz o zmieniającym się promieniu krzywizny. Zmienność współczynnika stateczności o minimalnej war-

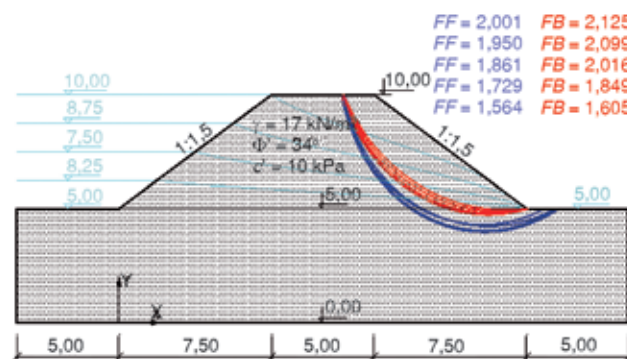
tości, w zależności od poziomu piętrzenia wody pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Zmienność współczynnika stateczności w funkcji wysokości piętrzenia wody

FF-metoda Felleniusa; FB-metoda Bishopa

Przebieg wszystkich wyznaczonych powierzchni poślizgu jako wynik końcowy i prezentację analizy stateczności ilustruje rysunek 6. Powierzchnie poślizgu wyznaczone metodą Felleniusa sięgają głębiej w podłoże i mają szerszy zasięg. Wszystkie wartości współczynników spełniają wymagany warunek stateczności.



Rys. 6. Przebieg powierzchni poślizgu o najmniejszej wartości współczynnika stateczności przy założonych poziomach piętrzenia wody

Skarpa podtopiona

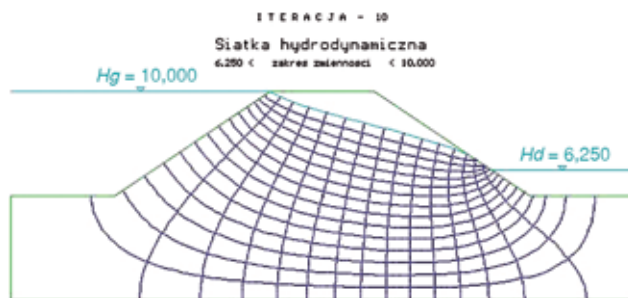
Rozpatrywany jest sytuacja, gdy przy piętrzeniu na poziomie równym wysokości nasypu H, skarpa odpowietrzna jest dodatkowo podtopiona do wysokości $H_d = 0,25H$. Dyskretyzację (na elementy trójkątne) obszaru filtracji pokazano na rysunku 7. Rysunek 8 przedstawia odpowiednią siatkę hydrodynamiczną. Analogicznie jak poprzednio, drogą stosownych obliczeń wyznaczono dla tego przypadku powierzchnie o najmniejszej wartości współczynnika stateczności. Natomiast wartości liczbowe parametrów opisujących powierzchnie zamieszczono w opracowaniu [6]. Rysunek 9 ilustruje powierzchnie wyznaczone obiema metodami. Cechą charakterystyczną otrzymanych wyników jest niewielka różnica między wartościami współczynnika stateczności obliczonymi metodą Felleniusa i Bishopa ($\Delta F = FB - FF = 0,011$).

Podsumowanie

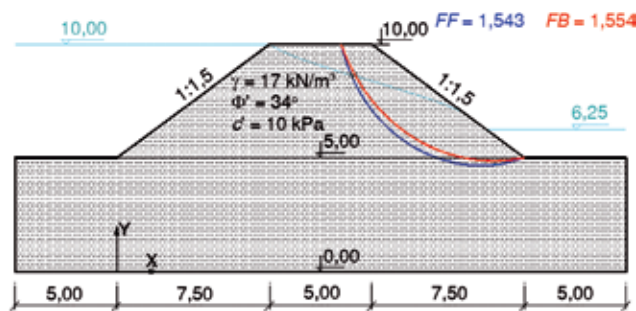
Przeprowadzono analizę stateczności nasypu drogi kolejowej, biorąc pod uwagę obciążenie ciężarem własnym i obciążenie eksploatacyjne równomiernie rozłożone na koronie nasypu. Uwzględniono także wpływ piętrzenia wody, która mogłaby pojawić się wskutek np. powodzi. Rozpatrzono ponadto przypadek, w którym przy piętrzeniu na poziomie równym wysokości nasy-



Rys. 7. Dyskretyzacja obszaru filtracji przy maksymalnym poziomie piętrzenia (H) i podtopieniu skarpy do poziomu $0,25 H$



Rys. 8. Siatka hydrodynamiczna przy maksymalnym poziomie piętrzenia równym wysokości nasypu H i podtopieniu skarpy do poziomu $0,25H$



Rys. 9. Przebieg powierzchni poślizgu o najmniejszej wartości współczynnika stateczności przy poziomie piętrzenia równym wysokości nasypu H i podtopieniu skarpy do poziomu $0,25 H$

pu H , skarpa odpowietrzna jest podtopiona do wysokości odpowiadającej $0,25H$.

W celu wykonania stosownych obliczeń wykorzystano autorskie oprogramowanie [1, 2], potwierdzając przydatność oryginalnych programów numerycznych (SZMFiB oraz FILTR).

Rozpatrując wpływ zastosowanego obciążenia, rozmieszczonego na koronie nasypu, traktowanego jako substytut eksploatacyjnego, na zasadzie analizy kształtu krzywych poślizgu stwierdzono, że wartość obciążenia nie wpływa w sposób znaczący na przebieg powierzchni poślizgu.

Biorąc pod uwagę wpływ pojawiającej się wody powodziowej oszacowano:

- przebieg powierzchni poślizgu o najmniejszym współczynniku stateczności w nasypie z wodą gruntową na poziomie terenu oraz przy różnych poziomach piętrzenia,

- zmienność najmniejszego współczynnika stateczności w zależności od poziomu piętrzenia wody.

Istotne spostrzeżenie dotyczy także powierzchni poślizgu wyznaczonych metodą Felleniusa: sięgają one głębiej w podłoże i mają szerszy zasięg.

W przypadku skarpy podtopionej, stwierdzono nieznaczną różnicę w wartościach współczynnika stateczności, obliczonego metodą Felleniusa i Bishopa ($\Delta F = FB - FF = 0,011$).



Literatura

- [1] Balawejder A.: *Program SZMFiB-Stateczność zboczy metodą Felleniusa i Bishopa*. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Inżynierii Środowiska, Wrocław 2007.
- [2] Balawejder A.: *Program FILTR-Filtracja ustalona w nasypach ziemnych piętrzących wodę*. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Inżynierii Środowiska, Wrocław 2008.
- [3] Strzelecki T.: *Proces przepływu filtracyjnego przez ośrodki niejednorodne*. DWE, Wrocław 1996.
- [4] Strzelecki T., Kostecki S.: *Analiza rozwiązania analitycznego przepływu przez groblę ziemną*. Sympozjum Hydrotechnika VIII, Wyd. Śląska Rada NOT FSNT w Katowicach, Ustroń 9–11.05.2005.
- [5] Strzelecki T., Kostecki S., Żak S.: *Modelowanie przepływów przez ośrodki porowate*. DWE, Wrocław 2008.
- [6] Surowiecki A., Balawejder A., Kozłowski W.: *Badanie możliwości wzmacniania nasypów kolejowych przy zastosowaniu zbrojenia gruntu, lekkich konstrukcji oporowych i maty komórkowej*. Raport serii SPR nr 6, projekt Bad. MNil nr 5 T07E 06024, Politechnika Wrocławska, Instytut Inż. Łąd., Wrocław 2006.
- [7] Witun Z.: *Zarys geotechniki*. WKiŁ Warszawa 2002.

Autorzy

dr inż. Adam Balawejder
 Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
 Wydział Kształtowania Środowiska i Geodezji
 Instytut Inżynierii Środowiska
 email: adam.balawejder@up.wroc.pl

dr inż. Wojciech Kozłowski,
 Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa
 Katedra Dróg i Mostów, email: w.kozlowski@po.opole.pl

prof. nazw. dr hab. inż. Andrzej Surowiecki
 Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
 Wydział Kształtowania Środowiska i Geodezji
 Katedra Budownictwa i Infrastruktury;
 Wyższa Szkoła Humanistyczna we Wrocławiu
 Wydział Techniczno-Ekonomiczny
 email: andrzej.surowiecki@up.wroc.pl;