

Analiza stateczności i stabilizacji zbocza osuwiskowego na trasie linii kolejowej w Świnnej Porębie

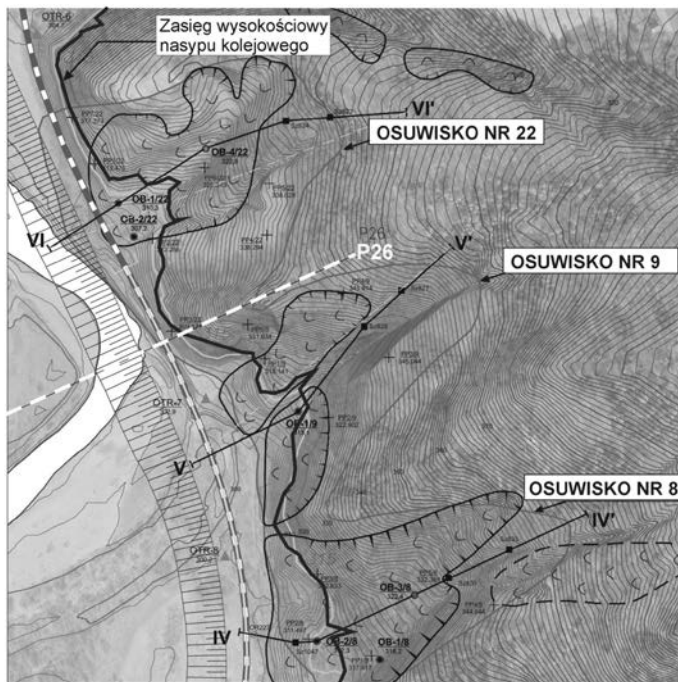
Dr hab. inż. Lesław Zabuski – Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku
Prof. dr hab. inż. Jarosław Przewłocki – Politechnika Gdańska, Wydział Architektury

Zbiornik i zaporę w Świnnej Porębie budowane były przez wiele lat. Budowę tę uzupełniają kilka inwestycji towarzyszących. Jedną z nich jest przekładana linia kolejowa Kraków – Zako-

pane. Pierwotnie biegła ona w centralnej części doliny Skawy, to jest na terenie dzisiejszego zbiornika wodnego (rys. 1). Inwestycja polegała na jej przełożeniu, bowiem dotychczasowa



Rys.1. Lokalizacja przełożonej linii kolejowej na odcinku Stryszów-Zembrzyce w rejonie zbiornika wodnego w Świnnej Porębie



Rys. 2. Mapa rejonu osuwisk nr 8, 9 i 22 z zaznaczonymi przekrojami geologiczno-inżynierskimi oraz przekrojem obliczeniowym nr 26

trasa została zalana. Po przebudowie nowa trasa trawersuje zbocza górskie pasma Beskidu Małego. Struktura geologiczna masywu skalnego zbocza jest tu zróżnicowana i skomplikowana, w wyniku przede wszystkim zaangażowania tektonicznego i zmienności litologicznej masywu, cech charakterystycznych dla obszaru Karpat fliszowych [14, 15, 16]. Tory poprowadzono po tak zwanym nasypie hydrotechnicznym, który stanowi przyporę geologiczną niestatecznych zboczy, wymagających ustabilizowania i podpora aż 23 z 74 osuwisk zewidencjonowanych w sąsiedztwie zbiornika [6, 10]. Na dziewięciokilometrowym odcinku wykonano także dwa mosty kolejowe, a równoległe do torów wybudowano drogę.

Celem artykułu jest analiza stateczności zbocza osuwiskowego oraz dokonanie oceny skuteczności jego zabezpieczenia na odcinku obejmującym trzy osuwiska (nr 8, 9, 22) podczas wykonywania zbiornika wodnego i w okresie jego eksploatacji (rys. 2).

WŁAŚCIWOŚCI MASYWU SKALNEGO ORAZ PROCESY OSUWISKOWE

Zapora i obiekty towarzyszące, a także zbocza osuwiskowe znajdują się w obrębie północnej, brzeżnej części jednostki tektonicznej śląskiej. Struktura geologiczna obszaru jest zróżnicowana i skomplikowana w wyniku przede wszystkim silnego zaangażowania tektonicznego i zmienności właściwości litologicznych masywu. Rejon budują utwory fliszowe z okresu kredy. Nadkład czwartorzędowy przykrywający masyw skalny zbudowany jest z osadów rzecznych (w dnie doliny), zaś na zboczach z produktów wietrzenia skał. Te ostatnie to głównie grunty spoiste z rumoszem gliniastym.

Masyw skalny na prawym wschodnim brzegu doliny rzeki Skawy, na którym znajduje się analizowane zbocze zbudowa-

ny jest z kompleksów warstw wykształconych w postaci ławic piaskowca, przewarstwionego łupkiem. Piaskowce – o spoiwie węglanowym – są różnoziarniste, zbite i zwięzłe. Łupki są na ogół ilaste, niekiedy margliste, niepęczniące. Pod wpływem wody ulegają rozmakaniu i wymywaniu. Granica kompleksów przebiega wzdłuż głównej dyslokacji w dolinie Skawy. Warstwy skalne zapadają pod kątem $20 \div 40^\circ$ na SSW. Masyw jest silnie zaangażowany tektonicznie. Strefy spękań i uskoki związane są z systemami dyslokacji odpowiednio równoległych i prostopadłych do Skawy. Dyslokacje dzielą masyw na bloki przemieszczone względem siebie w pionie i w poziomie. Na granicach bloków wzrasta intensywność spękania i rozluźnienie skał.

Powierzchnia zbocza w miejscu występowania osuwisk nr 8 i 9 jest bardzo urozmaicona i nieregularna, co świadczy o wcześniejszych ruchach osuwiskowych mających charakter pierwotny (osuwiska duże i stosunkowo głębokie), jak i wtórnych (osuwiska płytkie w obrębie pierwotnych, często na kontakcie nadkładu czwartorzędowego z podłożem fliszowym). Powstawaniu i rozwojowi osuwisk sprzyjało podcinanie przez rzekę Skawę płynącą poniżej zbocza. Liczne wąwozy, przebiegające zgodnie z nachyleniem zbocza, utrudniają właściwą interpretację procesów osuwiskowych. Z badań geologicznych wynika, że masyw budują warstwy o różnej zawartości ilolupku, łupku ilastego i piaskowca, a więc typowe warstwy fliszu [16]. Powierzchnie poślizgu zidentyfikowane poprzez pomiary inklinometryczne zaznaczają się na głębokościach 14,5 i 11 m oraz szczególnie wyraźnie na głębokości 6 m w twaroplastycznych warstwach łupku i piaskowca, gdzie w okresie 16 miesięcy nastąpiły kilkucentymetrowe przemieszczenia.

W miejscu występowania osuwiska nr 22 projektowany jest nasyp kolejowy oraz odwodnienie zbocza. Pomimo bliskiego sąsiedztwa osuwisk nr 8 i 9 struktura zbocza jest tu nieco inna, co wynika z odmiennej litologii masywu skalnego. W tym rejonie warstwy słabsze przykryte są piaskowcami, a więc skałą o znacznie lepszych charakterystykach geomechanicznych. Teren nie wykazuje tu wyraźnych śladów współczesnych ruchów i jest stabilny. Potwierdzają to wyniki pomiarów inklinometrycznych.

ANALIZA STATECZNOŚCI ZBOCZA OSUWISKOWEGO

Zagadnienie stateczności zboczy należy do jednych z najważniejszych, a zarazem najtrudniejszych problemów mechaniki gruntów. Z jednej strony utrata stateczności związana z ruchem olbrzymich mas gruntu może doprowadzić do poważnych i nieobliczalnych w skutkach katastrof. Z drugiej strony na stateczność wpływa wiele różnorodnych czynników, często określonych w sposób przybliżony, a ich uwzględnienie w modelu matematycznym nie zawsze jest możliwe. Występujące wciąż nowe osuwiska wymuszają konieczność lepszego poznania charakteru zboczy i występujących w nich zjawisk, a przede wszystkim oceny ich stateczności. Z kolei ciągły rozwój teorii i techniki obliczeniowej skłania do poszukiwania coraz to lepszych i bardziej efektywnych metod rozwiązania tego zagadnienia. Do oceny stateczności zboczy stosuje się wiele znanych i ogólnie przyjętych metod obliczeniowych. W przeciągu ponad dwustu lat od czasu ukazania się podstawowego dzieła Coulom-

ba zaproponowano około stu metod wymiarowania skarp i zboczy. Wyniki analizy mogą być jednak różne dla poszczególnych metod. Podstawowe metody analizy stateczności zboczy omówiono m. in. w pracy [11], gdzie szczególną uwagę zwrócono na różnice między nimi oraz występujące tu błędy. W ostatnich latach coraz większe zastosowanie przy analizie stateczności zboczy znalazły metody probabilistyczne [8, 12] wprowadzające dodatkowe miary bezpieczeństwa (niezawodność).

W niniejszej pracy obliczenia stateczności zbocza osuwiskowego wykonano komercyjnym programem FLAC [7] w układzie płaskim (2D). Program opiera się na metodzie różnic skończonych. Model obliczeniowy dzielony jest na różnice skończone, które – w reakcji na przyłożone siły i ograniczenia brzegowe – zachowują się zgodnie z prawami materiałowymi (to znaczy sprężyste, sprężysto-plastycznie, itd.). Materiał (w rozważanym zadaniu jest to masyw skalny lub gruntowy) może ulegać uplastycznieniu i płynięciu, co pociąga za sobą deformacje siatki różnic skończonych. Obliczenia współczynnika stateczności F opierają się na tak zwanej metodzie redukcji wytrzymałości [3, 4, 5]. Ta często stosowana metoda polega na stopniowym obniżaniu lub zwiększaniu wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie materiału, aż do momentu osiągnięcia stanu równowagi granicznej zbocza. W procesie obliczeń wykonuje się szereg symulacji przy zastosowaniu „próbnych” wartości parametrów spójności i kąta tarcia i w efekcie stopniowego obniżania lub zwiększania tych wartości osiąga się stan równowagi granicznej ($F = 1,0$).

Model geomechaniczny oraz obliczeniowy zbocza opracowano na podstawie wyników wcześniejszych badań oraz pomiarów inklinometrycznych [1, 6, 10, 13].

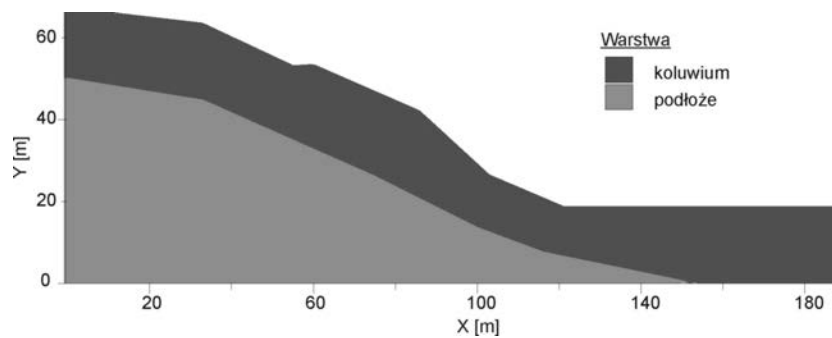
Przekrój obliczeniowy nr 26 wyznaczono pomiędzy geologiczno-inżynierskimi przekrojami osuwisk nr 9 i 22 (por. rys. 2).

Przekrój ten można uznać za reprezentatywny dla zbocza w tym rejonie. Oprócz geometrii zbocza, najistotniejszym elementem modelu mechanicznego i obliczeniowego są parametry geomechaniczne opisujące właściwości modelu, szczególnie spójność i kąt tarcia wewnętrzznego. Jednoznaczne ustalenie ich wartości na podstawie opisów geologiczno-inżynierskich nie było możliwe, gdyż mieszczą się one w szerokich przedziałach. I tak dla koluwium osuwiskowego wynoszą [2, 9, 6]:

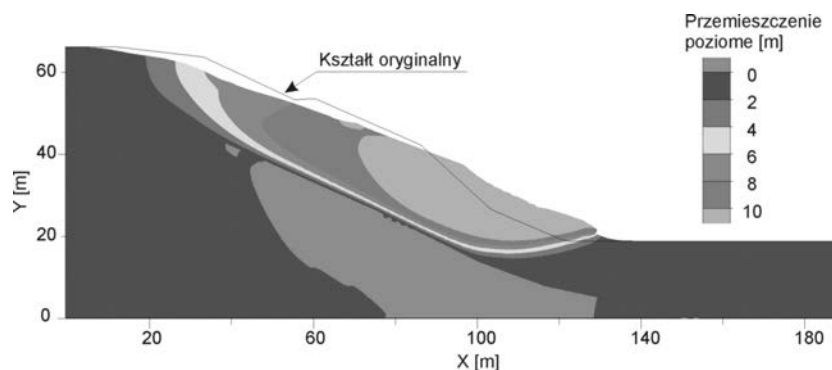
- osuwisko nr 8 – $c_u = 16,1 \div 42,4$ kPa, $\varphi_u = 16,5 \div 26,9^\circ$,
- osuwisko nr 9 – $c_u = 52,1$ kPa, $\varphi_u = 14,9^\circ$,
- osuwisko nr 22 – $c_u = 20,8 \div 36,5$ kPa, $\varphi_u = 20,5 \div 20,7^\circ$.

W związku ze znacznym rozrzutem parametrów geomechanicznych masywu, odpowiednią metodą wyznaczenia wielkości „miarodajnych” jest metoda analizy odwrotnej. W metodzie przyjęto pewne „próbne” wartości c_u oraz φ_u i w kolejnych wariantach obliczeń zmieniano je do momentu, w którym model zbocza znalazł się w stanie równowagi granicznej. Założenie tego stanu w przypadku analizowanego przekroju jest przybliżeniem dopuszczalnym, gdyż charakteryzuje go *de facto* równowaga dynamiczna objawiająca się przemieszczeniem zbocza.

W pierwszym przybliżeniu, dla strefy koluwium osuwiskowego, przyjęto $c_u = 16,1$ kPa, $\varphi_u = 16,5^\circ$, to jest najniższe wartości z badań na osuwisku nr 8. Dla stałego (nieruchomego) podłoża poniżej koluwium założono $c_u = 150$ kPa, $\varphi_u = 35^\circ$. Ze względu na różnice w wynikach kartowania i pomiarów inklinometrycznych zasięg koluwium osuwiskowego nie jest dokładnie określony. Dlatego przyjęto miąższość strefy koluwium równą około 20 m, umożliwiając w ten sposób wyznaczenie przebiegu powierzchni poślizgu w wyniku obliczeń numerycznych. W modelu pominięto nadkład czwartorzędowy, uznając go za mało istotny. Model zbocza z podziałem na warstwy geotechniczne przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Podział modelu zbocza w przekroju P26 na warstwy geotechniczne



Rys. 4. Pole przemieszczenia poziomego zbocza przy „próbnych” parametrach wytrzymałości na ścinanie

W wyniku obliczeń stwierdzono, że przy tak niskich wartościach parametrów przemieszczenia są bardzo duże i utrzymanie statecznego zbocza byłoby niemożliwe (rys. 4). Innymi słowy, gdyby parametry były takie jak wyżej, stateczne zbocze nie mogłoby istnieć. Dalsze symulacje pozwoliły wyznaczyć parametry, przy których zbocze znajduje się w stanie równowagi granicznej. Ich wartości wynoszą: $c_u = 43 \text{ kPa}$; $\varphi_u = 26,9^\circ$. Następne warianty obliczeń wykonywano dla modelu z tymi parametrami.

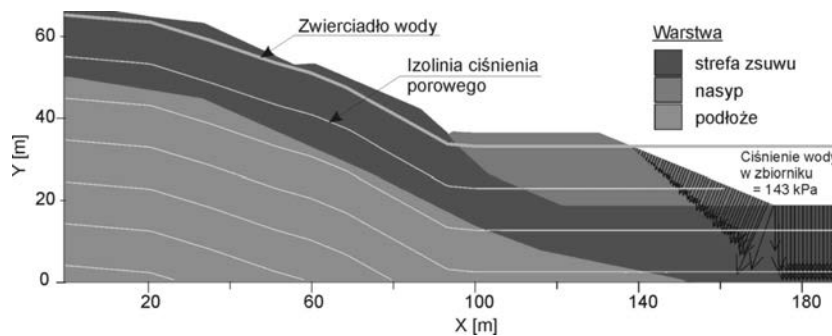
METODY STABILIZACJI ZBOCZA

Kolejnym etapem analizy było utworzenie modelu z nasypem podpierającym zbocze nachylonym od strony zbiornika wodnego 1:2,5, przy napełnionym zbiorniku wodnym (rys. 5). Stworzyło to stan stateczny zbocza przy oryginalnych parametrach masywu. Wówczas, gdy parametry obniżono 1,5-krotnie

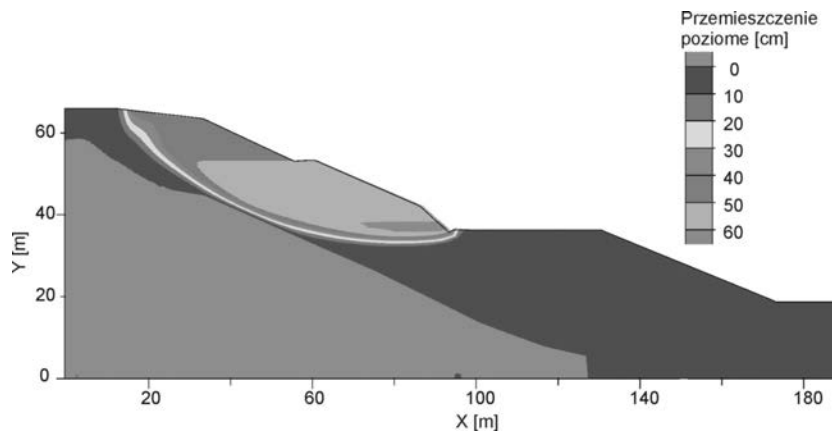
– co odpowiada standardowo zakładanemu współczynnikowi stateczności $F = 1,5$ (rys. 6) – uzyskano bardzo duże przemieszczenia.

Ze względu na tak duże przemieszczenia uznano, że przy współczynniku równym $F = 1,5$ stateczność zbocza w dłuższym okresie może okazać się problematyczna, co zagrażałoby konstrukcji nasypu i znajdujących się na nim torów kolejowych. Dlatego zaproponowano dodatkowe środki stabilizujące zbocze, to jest ścianę oporową, „zawieszoną” w głębi masywu na kotwach biernych.

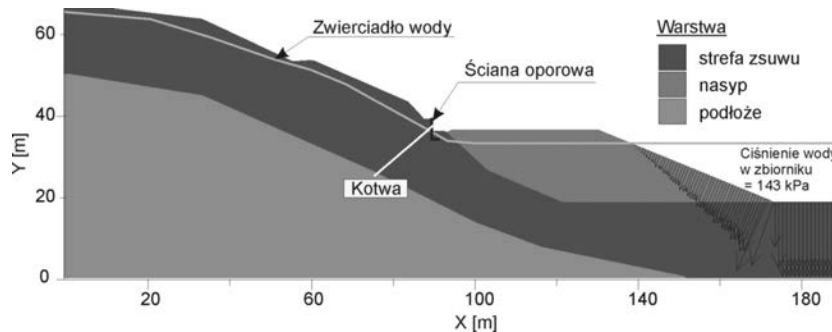
Model zbocza podpartego ścianą żelbetową o wysokości 5 m i grubości 60 cm przedstawiono na rys. 7. Ściana jest zakotwiona kotwami biernymi o długości 18 m w statecznym podłożu, poniżej strefy poślizgu. Kotwy są zbudowane z prętów stalowych wklejanych na zaprawę cementową na całej długości w otwory o średnicy 12 cm w rozstawie 0,5 m.



Rys. 5. Model zbocza po wykonaniu nasypu i napełnieniu zbiornika wodnego



Rys. 6. Pole przemieszczenia poziomego zbocza po napełnieniu zbiornika wodnego

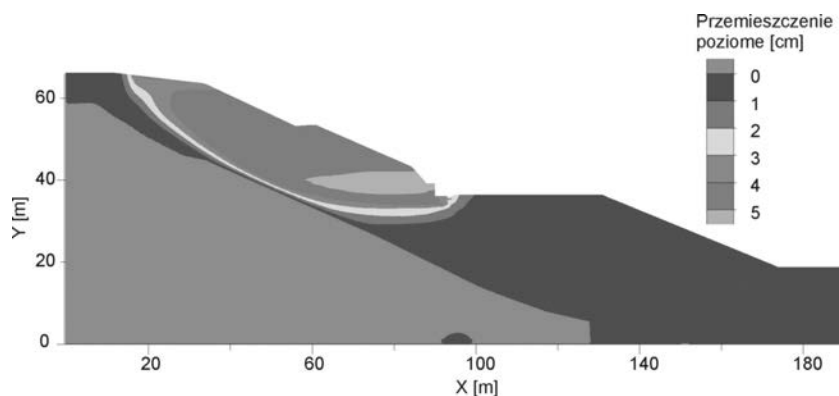


Rys. 7. Model zbocza ze ścianą oporową zamocowaną kotwami w masywie zbocza

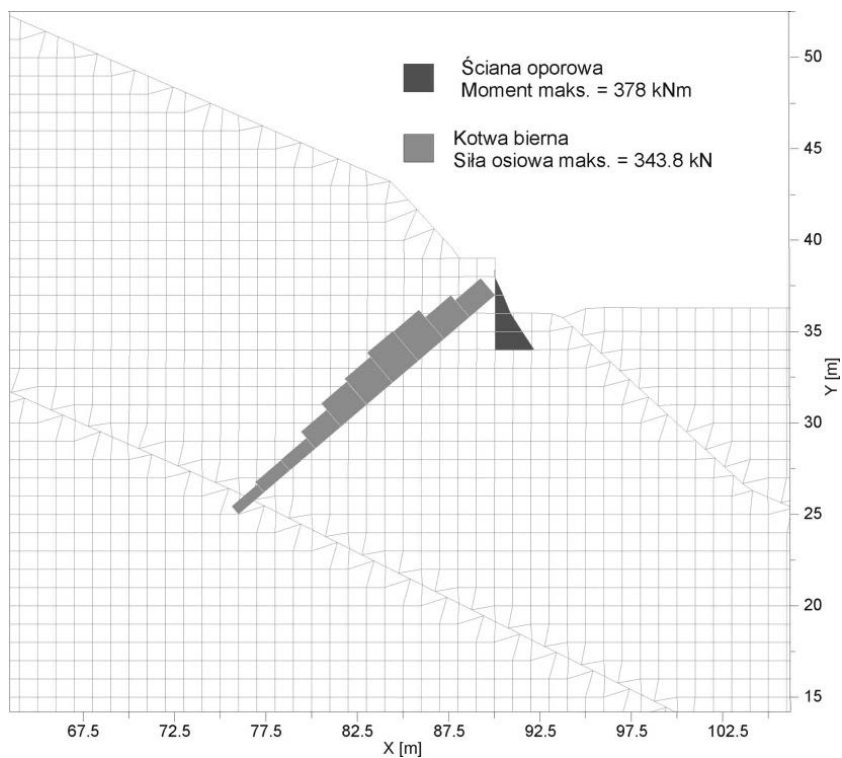
Przemieszczenia zabezpieczonego zbocza z parametrami skały zapewniającymi uzyskanie współczynnika $F = 1,5$ są małe (rys. 8), co świadczy o skuteczności zastosowanych środków stabilizujących. W praktyce konieczne jest dokładne zwymiarowanie konstrukcji z uwzględnieniem sił wewnętrznych dzia-

łających w ścianie oporowej i w kotwach (przykładowy wykres rozkładu tych sił pokazano na rys. 9).

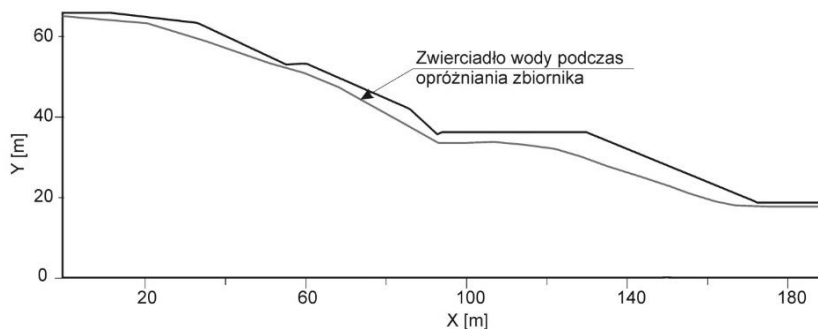
W kolejnym etapie analizy zbadano wpływ szybkiego obniżenia poziomu wody w zbiorniku na stateczność zbocza i nasypu. Założono, że w wyniku tej operacji zwierciadło wody będzie



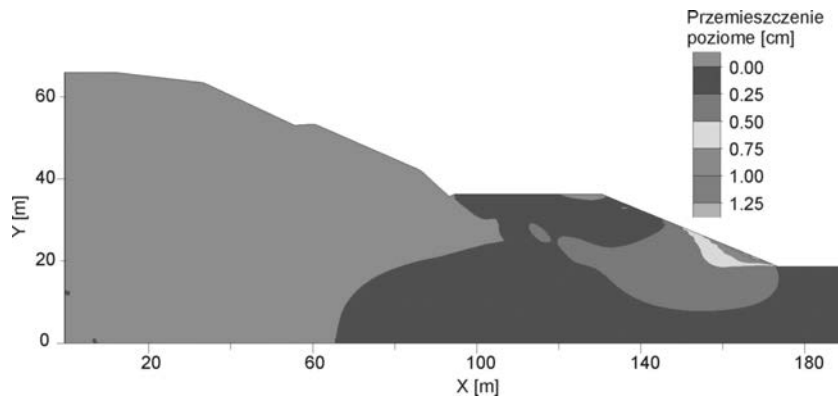
Rys. 8. Pole przemieszczenia poziomego w zboczu zabezpieczonym ścianą oporową i kotwami



Rys. 9. Rozkład sił wewnętrznych – momentów zginających w ścianie i sił osiowych w kotwie



Rys. 10. Położenie zwierciadła wody w zboczu i nasypie po szybkim opróżnieniu zbiornika



Rys. 11. Pole przemieszczenia poziomego generowanego przy opróżnieniu zbiornika wodnego

kształtować się jak na rys. 10. Ze względu na dobre właściwości filtracyjne gruntu (współczynnik filtracji rzędu 10^{-6}) obniżanie zwierciadła w nasypie powinno zachodzić szybko. Wyniki obliczeń dowodzą, że opróżnienie zbiornika nie powinno generować dużych przemieszczeń i stwarzać sytuacji niebezpiecznych dla konstrukcji (rys. 11).

UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

Szczegółowe rozwiązanie problemu stabilizowania zboczy, w szczególności osuwiskowych, na kilkukilometrowym odcinku i przy zmienionych warunkach zewnętrznych jest niemożliwe na etapie opracowania koncepcji przełożenia linii kolejowej i wykonania drogi dojazdowej do skupisk ludzkich. Utrudnieniem jest niewielka ilość informacji oraz rozbieżności przy ocenie osuwiskowości pomiędzy wynikami kartowania geologicznego i pomiarów inklinometrycznych.

Niezależnie od powyższych ograniczeń można określić sposoby zabezpieczenia osuwisk 8, 9 i 22. Poniżej przedstawiono proponowane środki stabilizujące:

- 1) **Podparcie nasypem.** Jest to najskuteczniejszy sposób stabilizowania zbocza i jego zastosowanie na całej długości trasy kolejowej pozwoliłoby uniknąć wykonywania innych kosztownych zabezpieczeń. Przepisy kolejowe i drogowe, a w pewnych przypadkach topografia terenu ograniczają jednak możliwości stosowania tego rozwiązania.
- 2) **Drenaż.** Drenaż wykonuje się w każdym przypadku, także tam, gdzie o tym nie wspomniano przy opisie osuwisk. W każdym przypadku, także na terenach nie-osuwiskowych, konieczne jest wykonanie rowów drenażowych powierzchniowych i podziemnych („dreny „francuskie”), rozmieszczonych z uwzględnieniem topografii terenu. Przy projektowaniu systemu drenażu na analizowanym zboczu należy wykorzystać w szczególności biegnące po upadzie naturalne wąwozy, oczyścić i wyrównać ich powierzchnię i obudować płytami oraz korytkami betonowymi. Ważne są rowy opaskowe, wykonane powyżej nisz osuwiskowych, zbierające spływającą wodę. Bogata szata roślinna – las, krzewy, nawet chwasty – dzięki transpiracji wód opadowych będzie sprzyjać poprawie warunków wodnych, dlatego należy w miarę możliwości unikać usuwania roślin.

- 3) **Konstrukcja oporowa (ściana + kotwy).** Ściana może mieć wysokość dostosowaną do kształtu zbocza. Przestrzeń za ścianą jest wypełniona gruntem o dobrych właściwościach filtracyjnych, a w ścianie wykonane są otwory w celu odprowadzenia wody. Ze względu na znaczne obciążenia wywołane parciem aktywnego osuwiska niezakotwiona ściana mogłaby ulec zniszczeniu lub przesunięciu. Dlatego konieczne jest jej zakotwienie w głębi masywu zbocza. Długość kotew może być zróżnicowana w zależności od lokalnych warunków geologicznych. Końcówka kotwiąca powinna znajdować się w masywie o dobrych właściwościach mechanicznych. Ze względu na możliwą nieskuteczność zakotwienia w masywie znacznie bardziej efektywne jest stosowanie kotwi biernych, wklejanych na zaprawę cementową na całej długości. Wskazane jest przeprowadzenie badania wrywania kotwy dla oszacowania jej nośności. Nie należy obawiać się o wytrzymałość stalowego pręta kotwy, gdyż „najsłabszym ogniwem” jest kontakt wzdłuż ścianek otworu, to jest między skałą na jego obwodzie i zaprawą cementową.

LITERATURA

1. AGH: Projekt prac geologiczno-inżynierskich dla przełożenia linii kolejowej Kraków – Sucha Beskidzka, odcinek: Stryszów-Zembrzyce, Wyd. Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH, Kraków, 2005.
2. Broniatowska M.: Modelowanie masywów fliszowych i dobór parametrów do obliczeń stateczności zboczy, Czasopismo Techniczne. Środowisko, R.105, z.1-Ś, Wyd. PK., 2008, 3-11.
3. Cheng Y. M., Lansivaara T., Wei W. B.: Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods, Computers and Geotechnics, 34, 2007, 137-150.
4. Dawson E. M., Roth W. H., Drescher A.: Slope Stability Analysis by Strength Reduction, Géotechnique, 49(6), 1999, 835-840.
5. Fu W., Yi Liao: Non-linear shear strength reduction technique in slope stability calculation, Computers and Geotechnics, 37, 2009, 288-298.
6. Gaszyński J., Pabian Z., Zapal A.: Analiza warunków geotechnicznych terenów osuwiskowych na trasie projektowanej linii kolejowej Stryszów – Zembrzyce w rejonie zbiornika wodnego Świnna Poręba, Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie, Seria: Materiały Konferencyjne, Nr 88, z.144, Kraków, 2009, 61-83.

7. Itasca C.G.: FLAC 2D Manual, Minneapolis USA, 2000.
8. Knabe W., Przewłócki J.: Probabilistyczna ocena stateczności zboczy. Publikacja zwrta 230 s., Wyd. Prace IBW PAN, nr 18, 1990.
9. Pabian Z.: Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla określenia stabilności osuwisk w rejonie zbiornika wodnego Świnna Poręba na rzece Skawie wraz z siecią kompleksowego monitoringu i programem obserwacji oraz wytycznymi dla sporządzenia map ruchów osuwiskowych, konsorcjum: Wydział Ochrony Środowiska Instytutu Geotechniki PK, PUG-L „Chemkop-Laborgeo”, PIG OK-Kraków, 2007.
10. Przedsiębiorstwo Geologiczne: Raport z pierwszej serii pomiarów inklinometrycznych w otworach na osuwiskach w rejonie zbiornika wodnego (w budowie) w Świnnej Porębie, etap I i II”, Kraków, 2007.
11. Przewłócki J.: Kilka uwag o ocenie stateczności zboczy. Część I: Analiza deterministyczna. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 2, 89-97, 2004.
12. Przewłócki J.: Kilka uwag o ocenie stateczności zboczy. Część II: Analiza probabilistyczna. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3, 141-149, 2004.
13. Wolski W., Dziewański J.: Ekspertyza dotycząca warunków geotechnicznych w obrębie obszarów osuwiskowych na trasie projektowanej drogi Skawce-Zembrzyce, 1988.
14. Zabuski L., Thiel K., Bober L.: Zjawiska osuwiskowe w polskich Karpatach fliszowych – Geologiczno-inżynierskie właściwości wybranych osuwisk, IBW PAN, Gdańsk, 1997.
15. Zabuski L., Thiel K., Bober L.: Osuwiska we fliszu Karpat polskich. Geologia – modelowanie-obliczenia stateczności, IBW PAN, Gdańsk, 1999.
16. Zabuski L., Przewłócki J.: Stability Analysis of a Road Scarp in the Carpathian Mountains and Methods of its Protection, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 471 042004; doi.org/10.1088/1757-899X/471/4/042004, 2018.