XXIV awarie budowlane
XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna
Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009

Dr inż. KRZYSZTOF STERNIK, *krzysztof.sternik@polsl.pl*
Politechnika Śląska, Gliwice

ZASTOSOWANIE KOTEW GRUNTOWYCH DO STABILIZACJI NIESTATECZNYCH SKARP GŁĘBOKICH WYKOPÓW

APPLICATION OF GROUND ANCHORS TO STABILIZATION OF DEEP EXCAVATION SLOPES

Streszczenie Skarpy głębokich wykopów są szczególnie narażone na utratę stateczności ze względu na odprężenie masywu gruntowego. Jedną z metod zabezpieczenia skarpy wykopu jest jej kotwienie. W referacie przedstawiono dwa przykłady awarii skarp głębokich wykopów, podając ich opis, przyczyny i przyjęte formy zabezpieczenia.

Abstract Slopes of deep excavations are particularly exposed to instability due to rebound. One method of their protection is ground anchoring. In the paper two examples of slope failures are given along with their description, causes and protection solutions.

1. Przyczyny powstawania osuwisk i sposoby ich stabilizacji

Utrata stateczności skarpy następuje, gdy następuje spadek wytrzymałości gruntów na ścinanie lub wzrost naprężeń stycznych w masywie dążącym do zachowania równowagi. Przyczyny utraty stateczności omówione zostały szczegółowo w monografii [2].

Sposoby zabezpieczenia skarpy zależą od warunków gruntowo-wodnych i przyczyn powstania osuwiska. Czasem przed konsekwencjami ruchów mas ziemnych uchronić mogą proste prace porządkowe. W przypadku przewidywanego zagrożenia osuwiskiem lub w zaistniałej sytuacji awaryjnej z pomocą przychodzą metody geoinżynierii, jak wykonanie tymczasowych przypór gruntowych stabilizujących skarpę, zbrojenie masywu gruntowego za pomocą gwoździowania, kotwienia, palowania, podparcie masywu konstrukcjami oporowymi.

W dalszej części referatu przedstawiono przykłady dwu awarii skarp głębokich wykopów wynikające z niekorzystnej budowy masywu gruntowego, w którym zostały wykonane oraz degradującego wpływu filtrującej wody. Do stabilizacji skarp wykopów zastosowano zbrojenie kotwami gruntowymi (czynnymi i biernymi) z różnymi rozwiązaniami oparcia głowic kotew na powierzchni skarp.

2. Awarie głębokich wykopów

2.1. Wykop pod obiekt kubaturowy

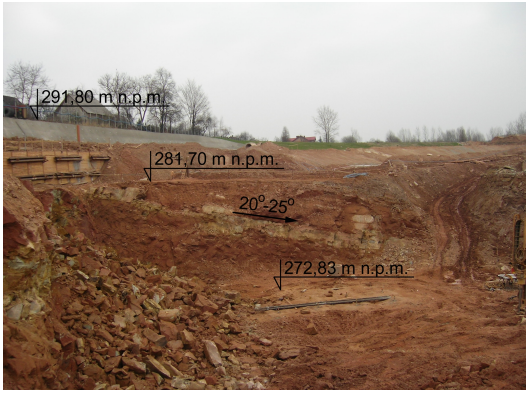
W trakcie rozbudowy dużego zakładu przemysłowego w marcu 2007 r. został wykonany wykop szerokoprzestrzenny z poziomu terenu o rzędnej około 291,80 m n.p.m. do poziomu

281,70 m n.p.m. Skarpa północna wykopu, granicząca z zabudowaniami indywidualnych właścicieli, ukształtowana została w sposób schodkowy. Jej wysokość przekroczyła 10 m. W jej przekroju zaprojektowano dwie podparte półki – w dolnej części ścianką berlińską, a w górnej ścianą z betonu narzutowego (torkretu). Obie miały wysokość 4,5m i były kotwione (rys. 1).

Projekt rozbudowy przewidywał wykonanie konstrukcji posadowionej bezpośrednio w przegłębieniu o dodatkowe 9,38 m. W trakcie robót ziemnych dno wykopu w najniższym punkcie znalazło się na poziomie 272,83 m n.p.m. Docelowo, przegłębienie miało być wykonane do poziomu 272,32 m n.p.m.

Ściany przegłębienia nachylone były pod kątem ok. 70°. Wymiary dna przegłębienia wynosiły w rzucie 54,0 m×44,2 m. Całkowita wysokość zestopniowanej skarpy północnej od poziomu 272,83 m n.p.m. do poziomu terenu przylegających do placu budowy posesji wyniosła około 19 m (rys. 1).

Obniżenie zwierciadła występujących na tym terenie wód gruntowych poniżej docelowego poziomu dna wykopu na czas wykonywania prac ziemnych i fundamentowych zrealizowano za pomocą studni głębinowych rozmieszczonych obwodowo wokół wykopu. Przemieszczenia skarpy północnej powyżej poziomu 281,70 m n.p.m (dno wykopu szerokoprzestrzennego) kontrolowane były za pomocą pomiarów inklinometrycznych.



Rys. 1. Widok na skarpę północną wykopu

Rys. 2. Stan awaryjny skarpy wykopu

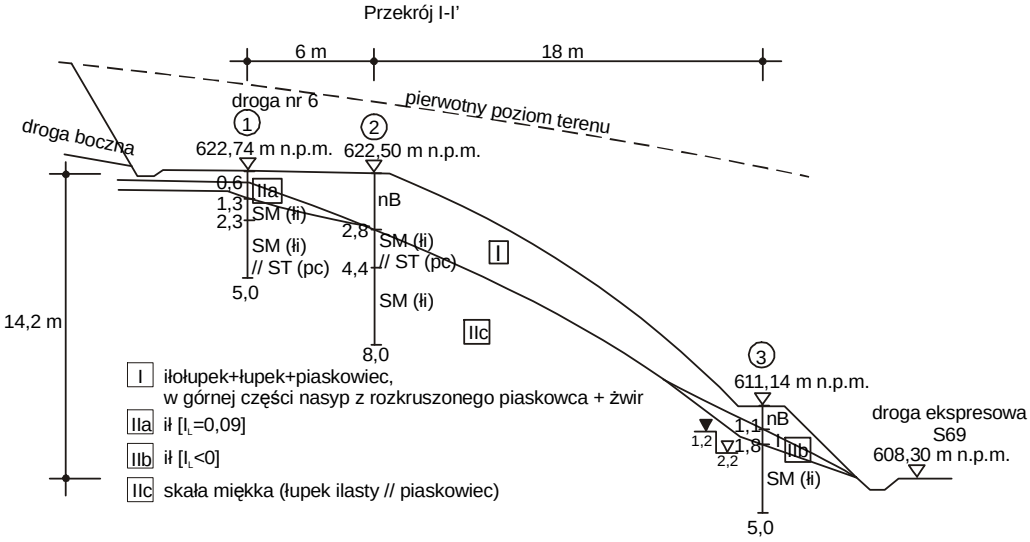
Podłoże w omawianym rejonie zbudowane jest z osadów czwartorzędu i triasu. Utwory czwartorzędowe występują w strefie przypowierzchniowej i reprezentowane są przez gliny pylaste i piaszczyste. Trias występuje w formie fliszu. Są to naprzemianległe iłowce, mułowce i piaskowce barwy ciemnoczerwonej, o spoiwie żelazisto-ilastym, zapadające na południe pod kątem ok. 20°÷25°. Są to skały miękkie, nie wykazujące oznak zmetamorfizowania, w strefie stropowej o miąższości 2 m do 5 m (wyjątkowo 9 m), wyraźnie zwietrzałe, co przejawia się zmniejszeniem ich wytrzymałości.

W trakcie drążenia przegłębienia, gdy do osiągnięcia projektowanego poziomu dna brakowało 0,2 m÷0,8 m, nastąpił pierwszy obryw ściany północnej. Oberwaniu uległa ściana głębokiego wykopu poniżej tymczasowej ścianki berlińskiej. Odspojony materiał gruntowo-skalny częściowo pozostał w postaci jednej wielkogabarytowej bryły przesuniętej ściany wykopu, a częściowo uległ rozkruszeniu i zaległ na dnie wykopu w postaci rumowiska bloków skalnych (rys. 1).

W przeciągu kilku dni, po intensywnych opadach śniegu z deszczem, nastąpiła druga faza utraty stateczności ściany północnej wykopu. Tym razem przesunięciom uległy masy skalne na całej wysokości wykopu. Zniszczeniu uległa zarówno ścianka berlińska, jak i torkretowa. Obsunięciu uległo ogrodzenie sąsiednich posesji (rys. 2). Strefa osuwiska miała szerokość w poziomie ok. 35 m. W ciągu kolejnych kilku dni po drugiej fazie osuwiska obserwowano jego rozwój w postaci przemieszczenia całego terenu powyżej skarpy.

2.2. Wykop drogowy

Na potrzeby budowy drogi ekspresowej na południu województwa śląskiego w 1999 r. powstał wykop o zmiennej głębokości, dochodzącej do 17 m. Skarpa rozdzielona została ławką na wysokości rzędnej około 610,50÷611,20 m n.p.m., tj. w około 1/3 wysokości całkowitej licząc od dna wykopu. Od drogi ekspresowej wykonana została droga dojazdowa do posesji znajdujących się na terenie sąsiadującym z wykopem (droga nr 6). Droga dojazdowa wznosi się równolegle do drogi ekspresowej w łuku pionowym po jej skarpie, aż do maksymalnej wysokości w przekroju pokazanym na rys. 3, po czym opada na powrót do poziomu drogi ekspresowej.



Rys. 3. Przekrój I-I' przez skarpę wykopu drogowego w najwyższym przekroju

W kulminacyjnym punkcie niwelety droga dojazdowa łączy się prostopadle z biegnącą w górę zbocza w płytkim wykopie (w głąb lasu) drogą boczną prowadzącą bezpośrednio do posesji (rys. 4). Ukształtowanie tego połączenia stanowi istotny element przyczyniający się do powstałego stanu awaryjnego skarpy.

Rys. 4. Plan sytuacyjny z zaznaczoną lokalizacją otworów badawczych i przekroju geotechnicznego I-I'

Zgodnie z dokumentacją geologiczno-inżynierską, wykonaną na potrzeby budowy drogi ekspresowej S69, teren, na którym znajduje się opisywany odcinek zbudowany jest z fliszu karpackiego. Są to wzajemnie przewarstwiające się łupki z wkładkami piaskowców oraz łupki pstre. Osady te zapadają stromo, monoklinalnie, w kierunku południowym (do wykopu), skręcając ku południowemu-wschodowi, pod kątem 60°÷80° do poziomu.

Grunty skaliste pokryte są warstwą zwietrzelin. Są to głównie iłołupki, z domieszką okruchów łupków i piaskowca. Miąższość tych utworów waha się od 0,3m do 3,5m. Powyżej zalegają utwory czwartorzędowe koluwialne. Są to utwory gliniasto kamieniste, wykształcone w postaci glin pylastych, glin pylastych zwięzłych, glin i glin piaszczystych z domieszkami okruchów, głównie piaskowcowych różnych frakcji. Po wykonaniu głębokiego wykopu dla drogi ekspresowej, niewielkie ilości gruntów koluwialnych zalegają jeszcze w obrębie drogi dojazdowej, tj. w koronie skarpy głębokiego wykopu. Największa miąższość warstw nieskalistych wykazana została w rejonie podłoża drogi dojazdowej. Miąższość utworów nieskalistych budujących skarpę maleje systematycznie w kierunku dna wykopu (rys. 3).

W trakcie rozpoznania podłoża stwierdzono w nim występowanie wód szczelinowych, związanych na ogół z gruntami zwietrzelinowymi, kamienistymi. Wody gruntowe pojawiały się na ogół w postaci sączeń, ale także jako napięte, stabilizujące się około 1m powyżej głębokości nawiercenia.

Problemy ze statecznością skarpy występowały od początku jej powstania. Na czas prac przy drodze ekspresowej drogą dojazdową nr 6 poprowadzono objazd. W wyniku intensywnego ruchu kołowego nastąpiło zainicjowanie obsuwania się skarpy w obrębie podłoża drogi dojazdowej nr 6. Wówczas, jako zabezpieczenie przed osuwiskiem wykonana została warstwa wzmacniająca z grubookruchowego materiału miejscowego na powierzchni skarpy wykopu. Rozwiązanie to okazało się skuteczne jedynie na krótki czas. Materiał wzmocnienia wraz z pozostałością rodzimych utworów czwartorzędowych oraz podbudową drogi jest oznaczony na rys. 3 jako warstwa I.

W okresie późniejszym ponownie podejmowano próby opanowania odnawiających się zjawisk osuwiskowych na przedmiotowym terenie. Na potrzeby jednej z takich prac w 2004 r. powstała dokumentacja z pomiarów georadarowych mających na celu rozpoznanie warunków gruntowych oraz określenia zasięgu widocznych na powierzchni ruchów masowych. Dokumentacja ta stwierdza występowanie płaszczyzn ścięć i stref rozluźnień w przypowierzchniowej strefie skarpy. Maksymalna miąższość strefy rozluźnionej stwierdzona badaniami georadarowymi wynosi 4,5 m ÷ 5 m w rejonie podłoża drogi dojazdowej, gdzie łączy się ona z drogą boczną prowadzącą do posesji. Miąższość strefy rozluźnionej maleje do 1,5 m÷2 m w dolnej części skarpy powyżej ławki.

Rys. 5. Spękana nawierzchnia drogi dojazdowej

Rys. 6. Osunięta skarpa drogi dojazdowej

Degradacja podłoża drogi dojazdowej na skutek stopniowego osuwania się warstw gruntowo-skalnych skarpy uwidoczniła się w postaci licznych spękań nawierzchni drogi dojazdowej (rys. 5) oraz lokalnych powierzchniowych zsuwów (rys. 6). Zjawiska te wystąpiły najintensywniej w rejonie połączenia drogi dojazdowej z drogą boczną. Długość spękanego odcinka nawierzchni drogi dojazdowej wyniosła w 2008 r. 120 m.

Zaistniała awaria w głównej mierze została spowodowana wadliwie funkcjonującym odwodnieniem powierzchniowym, niezdolnym do odprowadzenia strumienia wody opadowej, koncen-

trującego się w obrębie drogi bocznej, która charakteryzuje się znacznym pochyleniem i tworzy koryto dla intensywnego przepływu. Płytki wykop, w którym poprowadzona została droga boczna, przerywa rów stokowy wykonany w lesie powyżej drogi dojazdowej. W drodze bocznej nie wykonano odwodnienia powierzchniowego usytuowanego poprzecznie do osi drogi, przez co stanowiła ona na całej swej szerokości koryto dla napływającej wody opadowej. Rowy, których funkcją było odprowadzenie wód powierzchniowych wzdłuż drogi dojazdowej cechowały się na odcinku szczytowym zbyt małym spadkiem. Dodatkowo, bujna roślinność porastająca nie umocnione skarpy rowów spowodowała niedrożność rowów wzdłuż drogi dojazdowej. Nie odprowadzana należycie woda przedostawała się pod konstrukcją nawierzchni w podłoże drogi i warstwy budujące skarpę, które ulegały coraz większemu rozluźnianiu.

Dodać należy, że połączenie drogi dojazdowej z drogą boczną znajduje się w najwyższym miejscu łuku pionowego drogi dojazdowej. Dlatego wody opadowe rozlewały się również po nawierzchni drogi dojazdowej, a następnie przedostawały się na powierzchnię skarpy w rejonach bardziej odległych od połączenia z drogą boczną. Wzmożona niszczycielska działalność opadów na powierzchni skarpy uwidoczniła się lokalnymi spływami powierzchniowymi darniny i rozdarciami maty przeciwerozyjnej rozłożonej na skarpie.

3. Wspólne cechy niestateczności skarp głębokich wykopów

Przytoczone przykłady utraty stateczności skarp głębokich wykopów różniących się w rzucie wymiarami posiadają charakterystyczne cechy wspólne. W obu przypadkach do osunięcia się skarp doszło w wyniku penetracji warstw masywów skalno-gruntowych przez wodę.

W przypadku wykopu pod konstrukcję na terenie zakładu przemysłowego poziom wód gruntowych w jego obrębie był wysoki i musiał być obniżany za pomocą studni depresyjnych. Nie zapobiegło to jednak niewielkim sączeniom pojawiającym się na skarpach. Dodatkowym źródłem wody były gospodarstwa domowe usytuowane w pobliżu. Przesączające się w podłoże płynne nieczystości ujawniły się po awarii w postaci ciemnych plam i smug na przełomach brył skalnych. Dodatkowo, bezpośrednim czynnikiem przyczyniającym się ostatecznie do obrywu skarpy na całej wysokości wykopu wraz ze zniszczeniem obu ścian oporowych (berlińskiej i torkretowej) były opady śniegu z deszczem, które miały miejsce między pierwszym a drugim etapem awarii.

Osuwanie się skarpy wykopu drogowego nie miało tak gwałtownego charakteru. Degradacja masywu budującego skarpę trwała kilka lat. Pomimo prób ratowania konstrukcji drogi dojazdowej usytuowanej na skarpie prawdziwa okazała się i tym razem zasada, że „kropla drąży skałę”. Niemniej, w ostatnim okresie przed wzmocnieniem (pomiędzy kwietniem a wrześniem 2008 r.) obserwowane zniszczenia nawierzchni drogi dojazdowej na rozluźniającym się podłożu, na skutek intensywnych opadów w okresie letnim i znacznego wcześniejszego zerodowania przypowierzchniowej warstwy skarpy, znacznie się nasiliły.

Podkreślić należy, że oprócz działania wody, decydujący wpływ na utratę stateczności w warunkach dużego odprężenia wykopem miała budowa masywów, w których wykonane były oba wykopy. W obu przypadkach jest to podłoże fliszowe, a szczególne znaczenie dla awarii miały przewarstwienia ilaste, które poddane działaniu wody stanowiły warstwy poślizgowe dla zalegających wyżej warstw skał i gruntów.

4. Analizy stateczności i zastosowane zabezpieczenia skarp

W obu przypadkach, w celu naprawy zaistniałych stanów awaryjnych skarp powołane zostały odpowiednie zespoły badawczo-projektowe, w których uczestniczył autor niniejszego referatu. Zespołom wywodzącym się z Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej przewo-

dniczył prof. Maciej Gryczmański. W analizach stateczności skarpy wykopu obiektu przemysłowego brał udział zespół z Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej pod kierunkiem pani dr inż. Krystyny Szcześniak. Ostateczne rozwiązania wypracowane zostały w efekcie współpracy Katedry Geotechniki, Katedry Komunikacji Lądowej Politechniki Śląskiej, Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej oraz przedstawicieli firm wykonawczych i sprawujących nadzór geotechniczny.

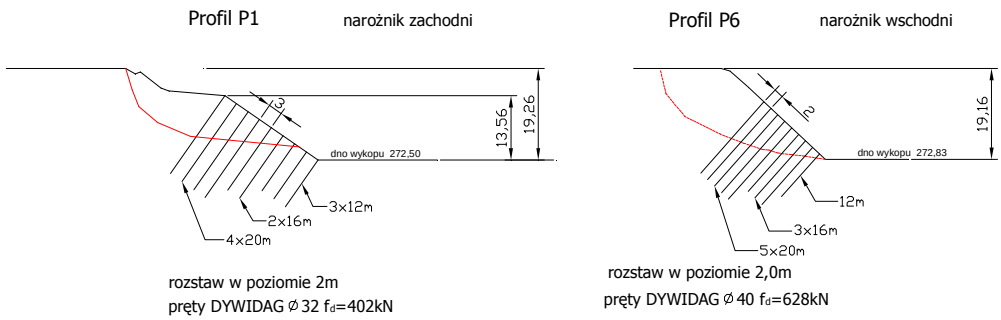
Analizie stateczności poddane zostały najbardziej charakterystyczne dla danego zagadnienia przekroje skarp. Obliczenia wykonane były zarówno metodami równowagi granicznej, jak i metodą elementów skończonych z algorytmem redukcji wytrzymałości na ścinanie określonej warunkiem Coulomba-Mohra. Stopień zagrożenia skarpy utratą stateczności określany był wartością współczynnika bezpieczeństwa

$$F_s = c/c_{kr} = \mathrm{tg}\phi/\mathrm{tg}\phi_{kr} \tag{1}$$

gdzie: c, ϕ – wartości rzeczywiste spójności i kąta tarcia wewnętrznego, zaś c_{kr}, ϕ_{kr} – najniższe wartości potrzebne do zachowania stateczności.

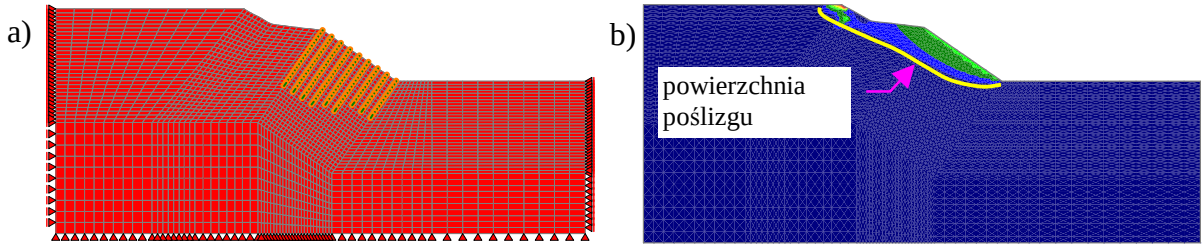
Dla każdego zagadnienia wyznaczone zostały wartości parametrów gruntów budujących masywy. W przypadku osuwiska skarpy wykopu pod konstrukcję przemysłową, w celu wyznaczenia parametrów wytrzymałościowych odspojonego koluwium zrealizowano próbne obciążenie, które zostało przeprowadzone na skarpie osuwiska za pomocą stosu płyt drogowych. Stos układany był na fragmencie skarpy utworzonej w masie koluwium, a przemieszczenia jego podstawy kontrolowane były geodezyjnie aż do momentu zniszczenia skarpy. Na podstawie charakterystyki „obciążenie-przemieszczenie" gruntów obszaru osuwiska, w drodze analizy numerycznej MES (analizy wstecznej), ustalone zostały parametry wytrzymałościowe koluwium: c = 21 kPa, ϕ = 17°, użyte następnie w obliczeniach stateczności skarpy.

Obliczenia stateczności skarpy wykonane zostały w kilku wariantach. Rozważono dwa skrajne przekroje przez skarpę północną: profil P1 o najłagodniejszym nachyleniu ok. 30°÷35° i profil P6 o najbardziej stromym pochyleniu ok. 46° (rys. 7). Założono dwa warianty materiałowe. W jednym, zachowawczym, parametry uzyskane dla koluwium przypisano całemu masywowi, zakładając jego jednorodność. W drugim założono istnienie trzech odrębnych stref materiałowych: koluwium, nienaruszonej skały miękkiej i strefy kontaktowej między nimi.



Rys. 7. Przekroje obliczeniowe skarpy wykopu pod konstrukcję przemysłową

Jeden z wariantów obliczeniowych – model MES zastosowany w obliczeniach stateczności, przedstawiony jest na rys. 8. Na rys. 8a pokazana jest siatka elementów skończonych modelująca skarpę wzmocnioną kotwami, zaś rys. 8b przedstawia kształt potencjalnej powierzchni poślizgu wynikający z pola przemieszczeń wypadkowych w fazie utraty stateczności. Zasięg i kształt powierzchni poślizgu widoczny na rys. 8b prognozowany jest przy wartości współczynnika bezpieczeństwa F_s = 1,5. Wzmocnienie skarpy w programie MES modelowane było za pomocą elementów belkowych.



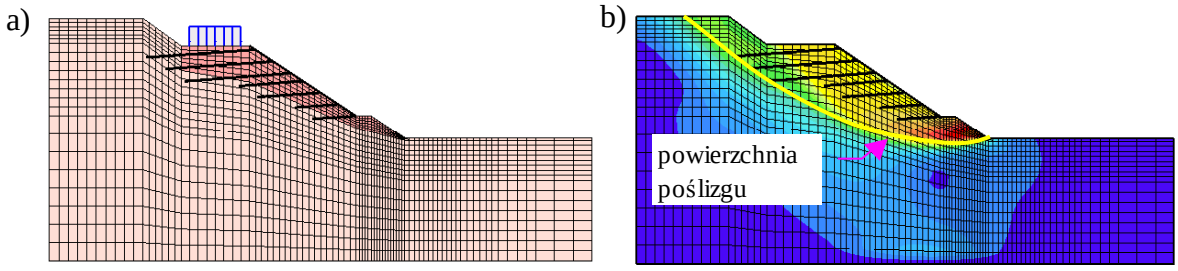
Rys. 8. Model MES skarpy wykopu pod konstrukcję przemysłową wzmocnionej kotwami (a) i potencjalna powierzchnia poślizgu przy F_s = 1,5 (b)

Ostatecznie przyjęto wariant skarpy wzmocnionej kotwami wstępnie naprężonymi, dla których obliczenia MES wykazały wartość współczynnika bezpieczeństwa F_s = 1,5. Na podstawie wyników przeprowadzonych analiz powstał projekt wykonawczy wzmocnienia. Zaproponowane rozmieszczenie kotew i ich długości pokazane są na rys. 7. Ich nachylenie do poziomu, wynoszące ok. 45°, wynikło z dostosowania do upadu warstw i zlokalizowanej powierzchni poślizgu. W tym przypadku elementami stabilizującymi powierzchnię skarpy były żelbetowe płyty podgłowicowe. Szczegóły analiz i przyjętych rozwiązań podane są w [1].

W marcu 2008 r. powstało opracowanie projektowe na remont nawierzchni drogi dojazdowej wraz z zabezpieczeniem skarpy za pomocą gwoździ gruntowych i siatki stalowej opinającej skarpę. Analizy stateczności skarpy przeprowadzone zostały z wykorzystaniem MES i algorytmu redukcji wytrzymałości na ścinanie.

Wartości parametrów do analiz dostarczyły wyniki badań gruntów. Próbki pobrane ze skarpy nad drogą dojazdową nr 6 (strefa nie narażona na wzmożoną infiltrację wody) charakteryzowały wartości c = 49÷73 kPa i ϕ = 15°÷27°. Dla próbek pobranych z powierzchni skarpy nad ławką (strefa rozluźniona) wyznaczono wartości c = 28÷40 kPa i ϕ = 13°÷25°.

Stateczność skarpy określona została dla kilku wariantów materiałowych (różnych charakterystyk wytrzymałościowych gruntów skarpy). W każdym wariancie najniższe wartości parametrów stwierdzone badaniami laboratoryjnymi (c = 28 kPa, ϕ = 13°) przypisano strefie rozluźnionej skarpy. Dla pozostałej części masywu założono trzy alternatywne charakterystyki wytrzymałościowe bazujące na wartościach oznaczonych na próbkach pobranych znad drogi dojazdowej. W obliczeniach uwzględniono również ciśnienie spływowe filtrującej wody po intensywnych opadach i obciążenie eksploatacyjne drogi dojazdowej nr 6 równe 25 kPa.

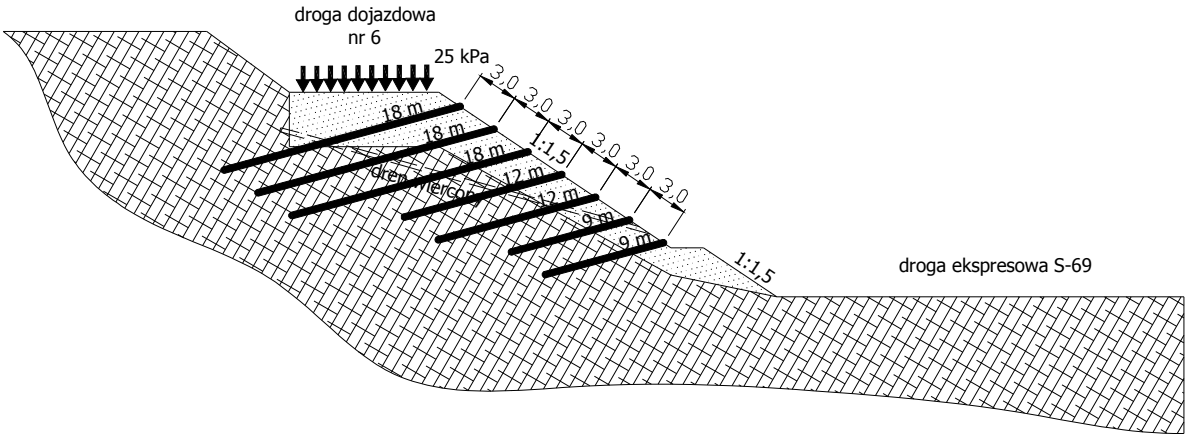


Rys. 9. Model MES skarpy wykopu drogowego wzmocnionej gwoździami (a) i potencjalna powierzchnia poślizgu przy F_s = 1,5 (b)

Model MES skarpy wykopu drogowego wzmocnionej gwoździami gruntowymi pokazany jest na rys. 9a. Rys. 9b przedstawia potencjalną powierzchnię poślizgu wzmocnionej skarpy, dla której wartości współczynnika bezpieczeństwa wynosi F_s = 1,50.

Przyjęte zabezpieczenie skarpy gwoździami gruntowymi (kotwami biernymi), stanowiło część kompleksowego projektu remontu drogi dojazdowej. Istotnym elementem stabilizującym skarpę było pogłębienie i umocnienie rowów przydrożnych oraz nadanie im odpowiednich spadków, a także odwodnienie wgłębne skarpy w postaci drenów wierconych z pozio-

mu ponad ławką, sięgających do podłoża konstrukcji drogi dojazdowej nr 6. Profil skarpy z rozmieszczonymi gwoździami pokazany jest na rys. 10.



Rys. 10. Profil wzmocnionej skarpy wykopu drogowego

Ważnym elementem zabezpieczenia skarpy jest siatka stalowa rozpięta na powierzchni skarpy. Siatka została przymocowana do głowic gwoździ w sposób, który wytworzył wielokierunkowe jej napięcie. Zabezpieczenie skarpy wykonano końcem 2008 r.

5. Podsumowanie

Przedstawione przykłady awarii głębokich wykopów dotyczą obiektów różniących się przeznaczeniem i wymiarami w rzucie. Niemniej, posiadają charakterystyczne cechy wspólne: w obu przypadkach o awarii zadecydowało znaczne odprężenie masywu, jego niekorzystna budowa (układ warstw) oraz wpływ filtrującej wody gruntowej i opadowej.

Zastosowane rozwiązania stabilizujące skarpę są podobne, choć różniące się w szczegółach. W obu przypadkach głównym elementem zabezpieczenia skarpy są kotwy gruntowe. Do zabezpieczenia skarpy wykopu na terenie rozbudowującego się zakładu przemysłowego zastosowano kotwy wstępnie naprężone z żelbetowymi płytami podgłowicowymi, zaś skarpa wykopu drogowego zabezpieczona została kotwami biernymi (gwoździami gruntowymi), do których głowic przymocowano napiętą siatkę stalową. W opinii autora, to drugie rozwiązanie będzie znajdować coraz szersze zastosowanie w Polsce w realizacjach zabezpieczeń skarp wyeksponowanych na widok publiczny ze względu na swą estetykę i trwałość.

W trwałym zabezpieczeniu stateczności skarpy niebagatelną rolę odgrywa również uregulowanie przepływu wód powierzchniowych oraz wykonanie odpowiedniego drenażu wgłębnego skarpy.

Literatura

1. Derlacz M., Sternik K: Zastosowanie kotew gruntowych do zabezpieczenia wykopu w rejonie osuwiska, XXXI Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu i Geoinżynierii Geotechnika i Budownictwo Specjalne, 9–14 marca 2008, Krynica Zdrój, Górnictwo i Geologia, Kwartalnik AGH im. Stanisława Staszica w Krakowie, rok 32, Zeszyt 2, 89–98.
2. Duncan J. M., Wright S. G.: Soil strength and slope stability, John Wiley & Sons, New Jersey, 2005.