

*Marcin Derlacz**, *Krzysztof Sternik***

ZASTOSOWANIE KOTEW GRUNTOWYCH DO ZABEZPIECZENIA WYKOPU W REJONIE OSUWISKA

1. Wprowadzenie

Kotwy gruntowe iniekcyjne (inaczej zastrzykowe) należą do nowoczesnych technologii budowlanych, rozwiniętych w ostatnich dziesiątkach lat. Rozwój technologii kotwienia wynika z intensywnego rozwoju inżynierii miejskiej, a w szczególności tzw. urbanistyki podziemnej, zajmującej się budową podziemnych tras komunikacyjnych, wielopoziomowych skrzyżowań, garaży podziemnych, głębokich fundamentów pod wysokie budynki itp. Kotwy stosuje się także w konstrukcjach zapewniających stateczność nasypów, skarp i zboczy [1, 2].

Celem niniejszego referatu jest przedstawienie możliwości, jakie daje zastosowanie technologii kotwienia do stabilizacji skarpy i zabezpieczenia wykopu w rejonie istniejącego osuwiska. Osuwisko miało miejsce w trakcie trwania wykonywania głębokiego wykopu przy rozbudowie zakładu przemysłowego w bezpośrednim sąsiedztwie istniejących prywatnych budynków mieszkalnych.

2. Opis ogólny zagadnienia i warunki gruntowo-wodne

Na terenie jednego z zakładów przemysłowych na Górnym Śląsku prowadzona była rozbudowa polegająca m.in. na wykonaniu wykopu pod fundament obiektu posadowionego bezpośrednio, ale na dużej głębokości. Dno wykopu zaprojektowano na poziomie 272,32 m n.p.m., a wykonano go z poziomu rozleglejszego wykopu, uzyskanego po wstępnej makro-niwelacji i położonego na rzędnej 281,70 m n.p.m. Przewidziana projektem wysokość skarp przegłębienia wynosiła 9,38 m. Ściany wykopu nachylone były pod kątem 70°. Dodatkowo po stronie północnej ukształtowanie terenu powodowało, że wysokość skarpy zwiększała

* Stump-Hydrobudowa Sp. z o.o., Warszawa

** Katedra Geotechniki, Politechnika Śląska, Gliwice

się o kolejne 10,3 m, zatem całkowita docelowa wysokość skarpy po stronie północnej miała wynieść ponad 19 m. Wymiary dna wykopu miały w rzucie 54,0 m × 44,2 m.

Sytuacja po stronie północnej wymusiła schodkowy przekrój górnej części wykopu i podparcie skarpy jego dolnego piętra na fragmencie ścianką berlińską, a górnego — ścianą z betonu narzutowego (torkretu). Obie miały wysokość 4,5 m i były kotwione.

Obniżenie zwierciadła występujących na tym terenie wód gruntowych poniżej poziomu 272,32 m n.p.m. 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. (naziom przegłębionego wykopu) kontrolowane były za pomocą pomiarów inklinometrycznych.

W trakcie drażenia przegłębienia, gdy do osiągnięcia projektowanego poziomu dna brakowało 0,2÷0,8 m, nastąpił pierwszy obryw ściany północnej. Widok ogólny na skarpe północną po pierwszym jej obsunięciu przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Widok na skarpe północną w początkowej fazie osuwiska

Jedną z głównych przyczyn inicjacji osuwiska był niekorzystny układ warstw budujących górotwór z upadem w kierunku południowo-zachodnim, sprzyjającym przemieszczeniom do wnętrza wykopu. W obszarze głębokiego wykopu i na północ od niego podłoże zbudowane jest z osadów czwartorzędowych i triasu. Utwory czwartorzędowe występują przy powierzchni w postaci nasypów o miąższości dochodzącej do 10 m w rejonie działek należących do prywatnych właścicieli (widocznych na rys. 1 powyżej ściany torkretowej). Są to gliny pylaste i piaszczyste z kamieniami, gruzem betonowym oraz tłuczniem dolomitowym (prawdopodobnie pozostałości po podbudowach tymczasowych dróg). Trias reprezentowany jest przez gruby kompleks osadów dolnego psrego piaskowca, wykształcony jako osady spływów grawitacyjnych — flisz. Są to naprzemianległe ilowce, 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÷5 m (wyjątkowo 9 m), wyraźnie zwietrzałe, co przejawia się zmniejszeniem ich wytrzymałości.

3. Opis osuwiska

Osuwisko skarpy północnej głębokiego wykopu nastąpiło w dwóch etapach. W pierwszej fazie oberwaniu uległa ściana głębokiego wykopu (rys. 1) poniżej tymczasowej ścianki berlińskiej. Obryw podzielić można na dwie strefy: bezpośrednio poniżej ścianki berlińskiej nastąpił w formie luźnych bloków skalno-gruntowych, zaś w części zachodniej (na lewo od ścianki — rys. 1) odspojeniu uległa bryła masywu skalnego znacznych rozmiarów, po czym w całości pozostała jako przesunięta ściana wykopu. Zaznaczyć należy, że osuwisko nastąpiło w sposób nie sygnalizowany wcześniej przez wyniki prowadzonej w sposób ciągły kontroli przemieszczeń ścian wykopu (pomiaru geodezyjne na zainstalowanych reperach oraz pomiaru inklinometryczne).

Kilka dni później nastąpiła druga faza osuwiska. W jej wyniku zniszczeniu uległa znaczna część ścianki berlińskiej oraz ścianki torkretowej nad ścianą północną głębokiego wykopu. Swym zasięgiem pionowym osuwisko objęło strefę aż do naziomu wykopu ogólnego, tak że obsunięciu uległo ogrodzenie posesji prywatnych (rys. 2). Strefa osuwiska miała szerokość w poziomie ok. 35 m. W ciągu kolejnych kilku dni po drugiej fazie osuwiska obserwowano jego postępowanie w postaci przemieszczenia całego terenu powyżej skarpy.



Rys. 2. Druga faza osuwiska

4. Analiza przyczyn osuwiska

Wstępne analizy wskazywały, że ściany wykopu nie wymagają zabezpieczenia i pozostaną stateczne w trakcie robót ziemnych i fundamentowych, jednakże prace prowadzone były w bardzo szybkim tempie. Nastąpiło gwałtowne odprężenie masywu skalnego, co w połączeniu z niekorzystnym układem warstw gruntowych spowodowało w ostatniej fazie wykopu powstanie osuwiska. Do zaistniałej sytuacji w dużej mierze przyczynił się wspomniany niekorzystny układ warstw gruntowo-skalnych. Należy również dodać, że grunt określany w dokumentacji geotechnicznej jako skała miękka nie występował w postaci jednorodnej skały, lecz kompleksów iłowcowo-piaskowcowych (skała miękka — skała twarda) przewarstwionych miejscami gruntami nieskalistymi. Wśród skał miękkich występują ławice piaskowców o znacznie większej twardości. Takie występowanie warstw znacznie różniących się od siebie parametrami wytrzymałościowymi może powodować ryzyko powstania osuwiska, z płaszczyzną poślizgu znajdującą się na granicy pomiędzy warstwami, pomimo niewielkiego kąta upadu.

Dodatковым czynnikiem degradującym ogólną charakterystykę wytrzymałościową masywu była z pewnością woda gruntowa, której wycieki ze skarpy zauważono tuż przed wystąpieniem osuwiska. Jej obecność nie pozostała bez wpływu na wartości parametrów mechanicznych warstw kontaktowych pomiędzy blokami skały twardej.

5. Zabezpieczenie skarpy wykopu

Po zaistnieniu osuwiska powołany został zespół projektowy pod przewodnictwem prof. M. Gryczmańskiego z Politechniki Śląskiej, który opracował procedurę stabilizacji skarpy, składającą się z dwóch etapów:

1. doraźne zahamowanie ruchów górotworu;
2. ostateczna stabilizacja skarpy wykopu na czas prac fundamentowych.

Jako pierwszy doraźny środek zapobiegający postępowi osuwiska zalecono zasypianie przemieszczonych mas gruntowo-skalnych koluwium, a tym samym wykonanie przypory ziemnej. Przypora powstała praktycznie na całej wysokości ściany głębokiego wykopu. Szerokość przypory pokryła w całości zasięg osuwiska. Ciągła kontrola geodezyjna nie wykazała dalszych przemieszczeń skarpy wykopu, co świadczy o skuteczności przyjętego rozwiązania.

W czasie dalszych prac ustalono zasięg przemieszczeń górotworu w kierunku prywatnych posesji, objawiający się spękaniem na naziomie, a także przebieg powierzchni poślizgu. Dane te pozwoliły na zaprojektowanie wzmocnienia skarpy za pomocą kotew gruntowych w celu ochrony pobliskich budynków i bezpiecznego przeprowadzenia prac fundamentowych w wykopie.

6. Analizy stateczności

Analizy stateczności skarpy niewzmocnionej i wzmocnionej kotwami przeprowadzone zostały w trzech ośrodkach: przez pierwszego z autorów (Stump-Hydrobudowa Sp. z o.o.), przez zespół pod kierunkiem dr K. Szcześniak w Politechnice Wrocławskiej oraz przez drugiego z autorów (Politechnika Śląska). Obliczenia prowadzone były w oparciu o metody równowagi granicznej (metoda Bishopa i Janbu) oraz metodą elementów skończonych (metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie).

Stateczność metodą Bishopa sprawdzano przy założeniu kołowych powierzchni poślizgu, zaś w metodzie Janbu narzucano przebieg płaszczyzny poślizgu w postaci łamanych. W przypadku wszystkich metod analizy prowadzono w płaskim stanie odkształcenia.

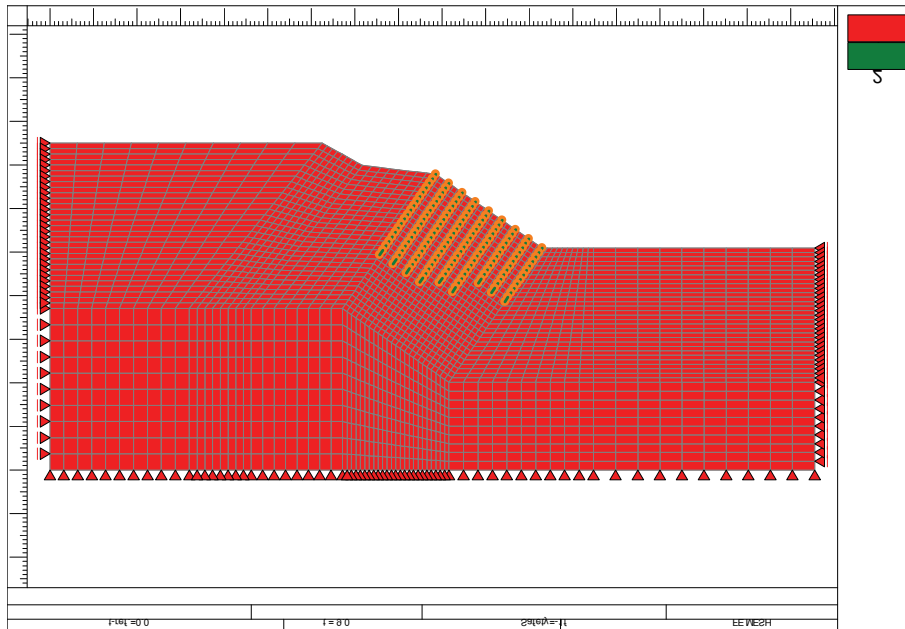
Przeprowadzono analizy stateczności w dwóch skrajnych przekrojach przez skarpe północną: profilu P1 o najłagodniejszym nachyleniu ok. $30\div 35^\circ$ i profilu P6 o najbardziej stromym pochyleniu ok. 46° (rys. 3). W wyniku wstępnych analiz, przeprowadzonych metodą Bishopa i metodą elementów skończonych, stwierdzono, że skarpa po usunięciu przypory nie będzie spełniać wymaganego kryterium stateczności $F_s \min = 1,5$. Niezbędne było zatem jej zabezpieczenie. Zaproponowane rozmieszczenie kotew pokazane jest również na rysunku 3. Ich nachylenie do poziomu, wynoszące ok. 45° , wynikało z dostosowania do upadu warstw i zdiagnozowanej powierzchni poślizgu.



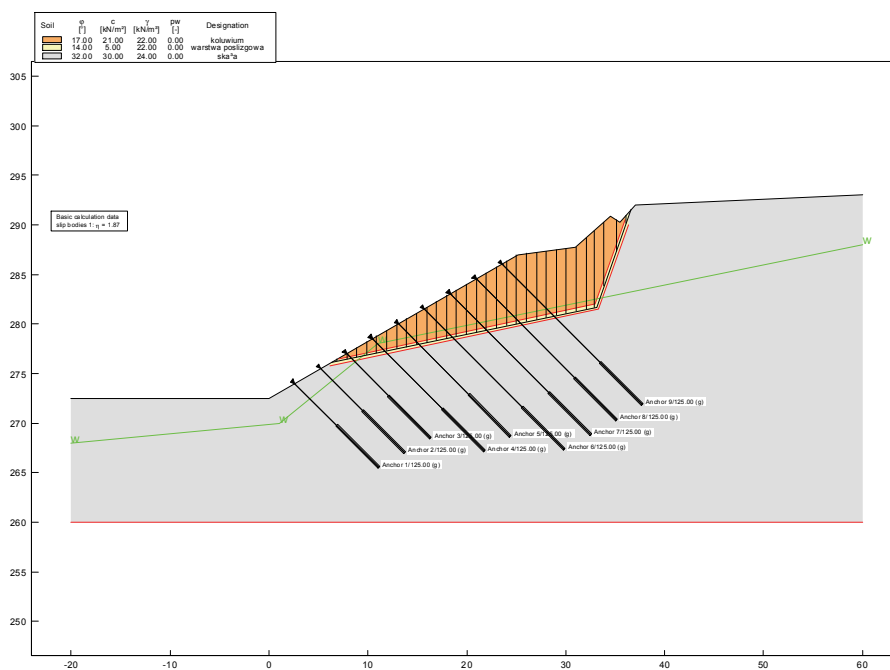
Rys. 3. Przekroje obliczeniowe

Przykładowe modele geometryczne, wykorzystane w analizach stateczności, pokazane są na rysunku 4 (model MES) oraz rysunku 5 (program GGU-Stability). W przypadku pokazanym na rysunku 5 obliczenia przeprowadzone były metodą Janbu z wymuszoną powierzchnią poślizgu zgodną z rzeczywistością, stwierdzoną badaniami w trakcie awarii.

Metodą elementów skończonych zbrojenie skarpy symulowane było za pomocą elementów belkowych bez wprowadzania sił naprężających. W analizach metodami równowagi granicznej wprowadzono dwa warianty, przyjmując do obliczeń alternatywnie kotwy bierne (gwoździe) lub kotwy wstępnie naprężane z wydzieloną częścią wolną i buławą poza strefą osuwiska.



Rys. 4. Model MES skarpy z gwoździami (elementy belkowe)



Rys. 5. Model z kotwami w metodzie Janbu

Wartości parametrów wytrzymałościowych rozluźnionych mas górotworu wyznaczono przeprowadzając próbne obciążenie stosem płyt drogowych na oberwanej masie koluwium. Jego celem było uzyskanie charakterystyki „obciążenie-przemieszczenie” gruntów obszaru osuwiska. Następnie, w drodze analizy numerycznej metodą elementów skończonych (analiza wsteczna), ustalone zostały parametry wytrzymałościowe koluwium: spójność $c = 21$ kPa, kąt tarcia wewnętrznego $\phi = 17^\circ$. Wartości te zostały przyjęte w obliczeniach stateczności skarpy.

Sprawdzenie stateczności odbyło się w oparciu o dwa warianty dotyczące budowy górotworu. W pierwszym, zachowawczym, uzyskane z badań wartości parametrów koluwium przypisano całemu masywowi gruntowo-skalnemu, traktując go jako jednorodną strefę materiałową. W drugim założono istnienie trzech stref materiałowych odpowiadających koluwium, warstwie poślizgowej i nienaruszonej skale miękkiej. Wartości parametrów skały miękkiej przyjęto za wykonaną wcześniej dokumentacją geologiczno-inżynierską: $\phi = 32^\circ$, $c = 30$ kPa, $\gamma = 24$ kN/m³. Wartości parametrów warstwy poślizgowej wyznaczono na podstawie analizy wstecznej metodą Janbu, dobierając je tak, aby wartość współczynnika stateczności dla modelu z wymuszoną płaszczyzną poślizgu wynosiła $F_s = 1,0$. Stąd przyjęto dla tej warstwy: $\phi = 14^\circ$, $c = 5$ kPa, $\gamma = 22$ kN/m³.

7. Wyniki obliczeń stateczności

Wartości współczynnika stateczności uzyskane metodą elementów skończonych oraz metodami równowagi granicznej dla kołowych i łamanych powierzchni poślizgu przy zastosowaniu wstępnego naprężenia i bez niego zestawione są w tabeli 1. Analiza porównawcza uzyskanych wyników wykazała korzystny wpływ wstępnego naprężenia elementów kotwiących na stateczność ogólną skarpy.

TABELA 1
Zestawienie wyników obliczeń

	Warunki gruntowe jednorodne		Warunki gruntowe niejednorodne	
	MES	Janbu	Bishop	Janbu
Profil 1	1,50	2,73 3,32*	1,89 2,06*	1,95 1,87*
Profil 6	1,50	2,24 3,88*	1,45 1,81*	1,64 2,28*

* Wyniki obliczenia dla kotew gruntowych sprężonych siłą 250 kN/kotwę w przekr. 1 i 400 kN/kotwę w przekr. 6.

Wyniki analiz stateczności różnią się niekiedy znacznie między sobą. Dyskusja otrzymanych rezultatów jest trudna do przeprowadzenia, bowiem zależą one od poczynionych w analizach założeń. Najbardziej zachowawcze wartości F_s wykazała metoda elementów

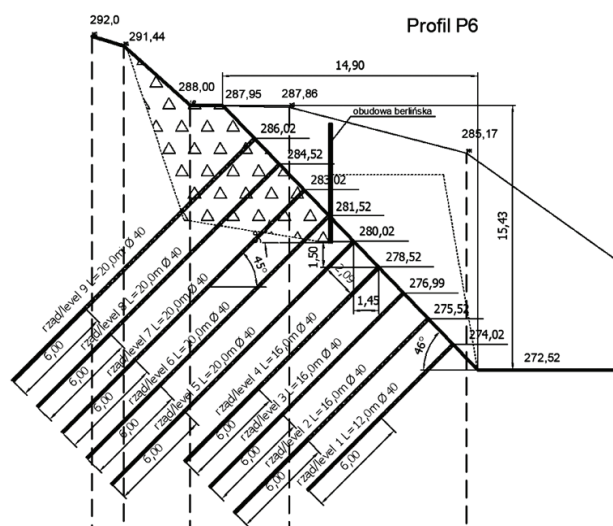
skończonych, w której powierzchnia poślizgu nie ma z góry narzuconego kształtu, a jest wynikiem rozwiązania zagadnienia brzegowego i wygenerowania pola przemieszczeń, dla którego nie jest możliwe uzyskanie stanu równowagi statycznej [3]. Źródłem różnic w uzyskiwanych rezultatach jest również fakt, że w analizach metodami równowagi granicznej, w przeciwieństwie do metody elementów skończonych, nie uwzględnia się historii obciążenia, która prowadzi do utraty stateczności. W analizowanym przypadku przez historię obciążenia należy rozumieć proces wykonywania wykopu i usuwania przypory ziemnej, które znalazły swoje odzwierciedlenie w obliczeniach MES.

Różne zapasy bezpieczeństwa, wyrażone zmiennymi wartościami F_s , uzyskuje się po uwzględnieniu siły wstępnie naprężającej kotwy. W przytoczonych analizach MES ten rodzaj symulacji nie był przeprowadzony.

W sposób oczywisty na uzyskiwane wartości współczynnika stateczności mają wpływ założenia dotyczące właściwości analizowanego masywu. Do szczególnie trudnych sytuacji można zaliczyć opisywaną w niniejszym referacie: górotwór był silnie niejednorodny, spękany, a wytworzona i rozpoznana powierzchnia poślizgu mogła okazać się tylko jedną z możliwych. Stąd obliczenia stateczności musiały być prowadzone w kilku wariantach.

8. Realizacja wzmocnienia skarpy

Bazując na przytoczonych wyżej wynikach obliczeń opracowano projekt wykonawczy zabezpieczenia skarpy w postaci iniekcyjnych kotew gruntowych wykonanych w dziewięciu rzędach z prętów DYWIDAG o średnicy 32 i 40 mm ze stali S1050/950. Długość kotew zaprojektowano od 12 m do 20 m (rys. 6).



Rys. 6. Przyjęty do realizacji przekrój zabezpieczanej skarpy

Roboty wykonano latem 2007 r., etapami, od góry do dołu, usuwając usypaną przyporę i montując kotwy w otworach wierconych systemem dwuprzewodowym (średnica rur 140 mm) z przedmuchem powietrza. Wiercenie prowadzono przez ustawione wcześniej żelbetowe płyty podgłowicowe (rys. 7). Po zagłębieniu zbrojenia w otworze uprzednio wypełnionym zaczynem cementowym i jego związaniu dokonywano wstępnego sprężenia kotew, wykonując zarazem badania odbiorcze przy obciążeniu równym 120% siły sprężającej. Sprawdzany był warunek stabilizacji przemieszczeń w czasie przez co najmniej 15 min [4, 5].



Rys. 7. Wzmacnianie skarpy głębokiego wykopu

W okresie od zatrzymania osuwiska do momentu wybudowania obiektu prowadzony był monitoring geodezyjny terenu w obszarze osuwiska, który wykazał przemieszczenia gruntu nie przekraczające 25 mm. Po wzmocnieniu skarpy głębokiego wykopu i zatrzymaniu ruchów górotworu prace fundamentowe w głębokim wykopie zostały pomyślnie przeprowadzone.

9. Podsumowanie

Zastosowanie kotew gruntowych jest skuteczną metodą stabilizacji stromych skarpy nawet w przypadku konieczności wykonania głębokiego wykopu w obszarze istniejącego osuwiska. Korzystnym czynnikiem wpływającym na stateczność skarpy jest wstępne naprężenie kotew gruntowych, powodujące docisk potencjalnej lub, jak w tym przypadku, rze-

czywistej bryły odłamu do stabilnego masywu. Technologia i konstrukcja kotew daje pewność wytworzenia docisku poprzez kontrolę nośności każdej kotwy w trakcie badań odbiorczych oraz wykształcenie części wolnej i buławy przekazującej siłę sprężenia na warstwy gruntu poza płaszczyzną poślizgu.

Z punktu widzenia projektanta istotna jest możliwość wykonania obliczeń kilkoma metodami, co pozwala na dobór technologii oraz parametrów kotew oraz uzyskanie pewności, że przyjęte ostatecznie rozwiązanie będzie bezpieczne.

LITERATURA

- [1] *Czaplicki J., Piotrowicz M.*: Iniecyjne kotwie gruntowe. XVI Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji. Ustroń 2001
- [2] *Czaplicki J., Piotrowicz M.*: Iniecyjne kotwie gruntowe. Materiały do projektowania zakotwień tymczasowych ścian obudowy wykopów. Cz. II. COBRBI Hydrobudowa. Warszawa 1989
- [3] *Griffiths D.V., Lane P.A.*: Slope stability analysis by finite elements. *Géotechnique*, Vol. 49, No. 03, 1999, 387–403
- [4] Norma DIN 4125: Kurzeitanker und Daueranker. Bemessung, Ausführung, und Prüfung
- [5] Norma PN-EN:1537:2002: Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Kotwy gruntowe