

Pełnoskalowe testy systemów stabilizacji skarp z użyciem siatek elastycznych

tekst: **MAREK CAŁA**, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, **MARTIN STOLZ**, **PIOTR BARANIAK**, **ARMIN RIST**, Berner Fachhochschule, Burgdorf, Szwajcaria, **ARMIN RODUNER**, Geobrugg AG, Romanshorn, Szwajcaria, zdjęcia: **GEOBRUGG AG**

Elastyczne systemy stabilizacji wykonane z siatki stalowej w połączeniu z gwoździowaniem podłoża są szeroko stosowane w praktyce stabilizacji skarp gruntowych i skalnych (ryc. 1). Stanowią one ekonomiczną i skuteczną alternatywę dla rozwiązań opartych na betonowych ścianach oporowych lub ciężkich konstrukcjach podporowych. Oprócz zastosowań wykorzystujących konwencjonalne siatki stalowe na rynku dostępne są również geosiatki wykonane z drutu stalowego o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie. Siatki tego typu mogą przejmować znacznie większe siły i przenosić je na gwoździe kotwiące.

1. Wstęp

Opracowane zostały specjalne wzorce wymiarowania elastycznych systemów stabilizacji powierzchniowej do zastosowań na stromych skarpach, wykonanych z mniej lub bardziej jednolitego materiału gruntowego lub mocno zwietrzałego luźnego materiału skalnego, a także w przypadku spękanego lub rozwarstwowanego podłoża skalnego, w którym odpajające się fragmenty determinowane są przez nieciągłości. Przykłady zastosowania systemów stabilizacji na podłożach gruntowych

i skalnych – zarówno pokrytych szatą roślinną, jak i jej pozbawionych – potwierdzają, że tego rodzaju środki zabezpieczające mogą być stosowane w praktyce [1].

Prace badawcze omówione w niniejszej publikacji obejmują praktyczną weryfikację istniejącej koncepcji wymiarowania powierzchniowego systemu stabilizacji skarp, opartej na serii testów pełnoskalowych. Przedstawiono wyniki badań i pomiarów oddziaływania stosowanego systemu stabilizacji oraz jego deformacje pod obciążeniem i siły oddziałujące na gwoździe kotwiące.

Poszczególne aspekty stateczności skarp stanowią przedmiot badań szeregu obszarów nauk inżynierskich, takich jak np. budownictwo drogowe i kolejowe czy górnictwo. Istnieje wiele metod stabilizacji skarp, ich wybór uzależniony jest od skali zjawiska, uwarunkowań technicznych czy też charakterystyki terenu.

Dokonanie optymalnego wyboru wymaga wzięcia pod uwagę szeregu zmiennych, które mogą mieć wpływ na skuteczność wybranego sposobu zabezpieczenia. Jednocześnie konieczne jest uwzględnienie aspektów technicznych i ekonomicznych proponowanego rozwiązania. Kolejnym aspektem do rozważenia jest to, czy dana konstrukcja jest przyjazna dla środowiska naturalnego. System stabilizacji skarpy musi zapewniać tak jej stateczność ogólną, jak i powierzchniową.

W wielu przypadkach optymalnym rozwiązaniem jest zastosowanie gwoździowania w połączeniu z elastyczną siatką stabilizującą. Taki układ zapewnia globalną stateczność skarpy (gwoździe kotwiące) oraz zabezpiecza skarpe przed lokalną utratą stateczności i obrywami skalnymi. Wysoka skuteczność tego rodzaju instalacji została potwierdzona w licznych wykonanych w ostatnich latach aplikacjach.

Można powiedzieć, że o ile technologia i różne aspekty zbrojenia gruntu metodą gwoździowania są dość dobrze znane,



Ryc. 1. Stabilizacja skarp z wykorzystaniem systemu TECCO, fot. Geobrugg Partner in Poland

o tyle jej zastosowanie w przypadku zabezpieczania skarp i zboczy nadal niesie ze sobą szereg pytań. Opisane w niniejszej publikacji pierwsze wyniki pełnoskalowych testów, ich metodologia i zastosowane urządzenia pozwolą na lepsze zrozumienie wzajemnych oddziaływań systemów gwoździowania i powierzchniowej stabilizacji skarp i zboczy oraz rolę siatki stalowej w odbiorze i przeniesieniu obciążeń na system gwoździ kotwiących.

Całość przedsięwzięcia została sfinansowana z funduszy CTI w Szwajcarii i prowadzona przez Berner Fachhochschule we współpracy z firmą Geobrugg AG i AGH w Krakowie.

2. Cele

Celem pełnoskalowych testów było zbadanie natury utraty stateczności w warstwach powierzchniowych skarp stabilizowanych systemem stalowej geosiatki powierzchniowej i gwoździowania. Zebrane w czasie badań informacje posłużą jako podstawa do stworzenia ogólnej koncepcji pomiarowej tego rodzaju układów i dalszej ich optymalizacji. Dane pozwolą również na stworzenie i kalibrację modelu obliczeniowego, opartego na metodach numerycznego modelowania 3D. Do tej pory wykonywane były wyłącznie numeryczne obliczenia dwuwymiarowe dotyczące współpracy pomiędzy gruntem, gwoździami kotwiącymi a siatką [1].

W ramach testów pełnoskalowych planuje się zbadanie szeregu różnych typów siatek stalowych w tym samym układzie pomiarowym. Wykorzystane zostaną rozmaite rodzaje podłoża i schematy gwoździowania. Testy będą polegały na zmianie nachylenia skrzyni pomiarowej. Zmiany te będą realizowane przez unoszenie krawędzi skrzyni, podpartej z drugiej strony na betonowej płycie. Zmiany nachylenia będą następować w sposób ciągły lub skokowy (co 5°) do momentu utraty stateczności któregoś z elementów systemu lub osiągnięcia kąta nachylenia 85° . W czasie pomiarów rejestracji podlegają następujące dane: siły i momenty sił oddziałujących na siatkę i występujące w punktach łączenia siatki i gwoździ, a także w punktach przzerwania (uszkodzenia) siatki i gwoździ pod naciskiem osuwającego się gruntu.

3. Testy pełnoskalowe

Pierwsza seria prób została przeprowadzona w Winterthur w Szwajcarii na przełomie 2012 i 2013 r. Próby te miały na celu weryfikację założeń oraz zapewnienie jak najlepszego odwzorowania rzeczywistych parametrów i uwarunkowań w skarpach przez układ pomiarowy.

Wstępne testy i pomiary pozwoliły na optymalizację metodologii i procedury prowadzenia badań oraz lepszy dobór aparatury pomiarowej.

3.1. Układ pomiarowy

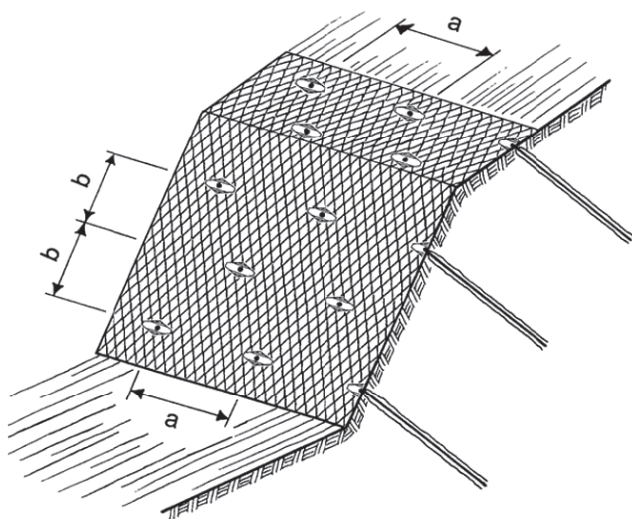
Układ zastosowany w eksperymencie pozwolił na fizyczną symulację fragmentu skarpy wykonanej z nieskonsolidowanego materiału gruntowego z powierzchniową stabilizacją elastyczną siatką i systemem gwoździ pasywnych (niesprężonych; ryc. 2). W zastosowanym układzie pomiarowym duża skrzynia uchylna była napełniana materiałem gruntowym, który następnie zabezpieczano elastyczną siatką, mocowaną powierzchniowo do gwoździ osadzonych w dnie skrzyni i sznurowaną do bocznych jej krawędzi linkami stalowymi. Skrzynia



Ryc. 2. Układ pomiarowy pełnoskalowego testu kombinacji elastycznej siatki stabilizującej i gwoździowania, fot. Geobrugg AG

była następnie unoszona dźwigiem z jednej strony, podczas gdy przeciwległa krawędź przesuwiała się po okrągłych płozach umieszczonych na betonowej płycie. Skrzynia uchylna jest sztywną konstrukcją wykonaną z profili stalowych, wypełnionych drewnianymi deskami (ścianki i podłoga). Wymiary wewnętrzne skrzyni to 12,08 x 9,99 x 1,20 m (szerokość x długość x wysokość). Całkowita objętość wypełnienia wynosi 144,82 m³. Oznacza to również, że w zależności od rodzaju wypełnienia całkowita masa materiału gruntowego może wynosić do 300 t. Aby powierzchnia przemieszczenia wytwarzała się w warstwie gruntu, a nie między wypełnieniem i podłogą skrzyni, do podłogi przybito w kierunku poprzecznym do kierunku zsuwania drewniane listwy o przekroju 30 x 60 mm, w odstępach co 500 mm.

W układzie pomiarowym zastosowane zostały gwoździe kotwiące typu GEWI o średnicy 28 mm. W celu symulacji wklejono gwoździe z zaprawą cementową zwiększającą wartość tarcia powierzchniowego, stalowe pręty użyte w układzie pomiarowym były wstępnie oblewane płaszczem z zaprawy cementowej, formowanej z użyciem karbowanej rury PCV o średnicy 100 mm. Płaszcz z zaprawy przesunięty był od górnego końca gwoździ o ok. 300 mm, tak aby umożliwić mocowanie płytki kotwiącej nakrętką na siatkę. Drugi koniec kotwy był przyspawany do stalowej płytki o wymiarach 250 x 250 mm, która z kolei była przykręcona do większej płytki, o wymiarach 500 x 700 mm, mocowanej ostatecznie do jednej ze stalowych belek podpierających drewnianą podłogę skrzyni. Nawiercenie odpowiedniej liczby otworów w większych płytkach mocujących pozwoliło na swobodny dobór rozstawu i odległości gwoździ kotwiących w szerokim zakresie. Schemat rozmieszczenia, typ i średnice gwoździ kotwiących dobierane były do typu stosowanej siatki elastycznej. Warto zauważyć, że w fazie testów gwoździe kotwiące były rozmieszczone tak, by ich kolejne rzędy były względem siebie przesunięte o połowę ich poziomej odległości. Oznacza to, że maksymalne wymiary lokalnego obszaru obsunięcia pomiędzy poszczególnymi gwoździami kotwiącymi były ograniczone do szerokości a i długości $2 \times b$, zgodnie z ryciną 3 [3].



Ryc. 3. Schemat rozmieszczenia gwoździ kotwiących z przesunięciem

W ostatecznej wersji układu pomiarowego siatka elastyczna była przymocowana do czterech krawędzi skarpki linkami stalowymi o odpowiedniej do występujących obciążeń wytrzymałości (linka o średnicy 22 mm i wytrzymałości na zerwanie 305 kN). Linka mocująca siatkę do górnej krawędzi skarpki została przymocowana do stalowej ramy w sposób imitujący kotwienie do dodatkowego rzędu gwoździ. Linkę po stronie dolnej krawędzi skarpki przymocowano do ostatniego rzędu gwoździ w celu odtworzenia warunków granicznych dla zabezpieczenia skarpy ciągłej. Aby uniknąć przesypania materiału wypełniającego przez otwory siatki stalowej, w eksperymencie wykorzystano geowłókninę o mniejszych otworach. Rozwiązanie to pozwoliło na jednoczesną symulację powszechnie stosowanych mat przeciwoerozyjnych układanych pod siatką stalową.

W pierwszych trzech pomiarach w serii do wypełnienia skarpki użyto żwiru (16/32). W kolejnych pomiarach żwir zastąpiono kruszywem z recyklingu (0/45). Parametry tych materiałów przedstawiono w tabeli 1. Materiał wypełniający był zagęszczany po nałożeniu każdej kolejnej warstwy. W warstwie powierzchniowej wykonane zostały niewielkie zagłębienia w miejscach osadzenia gwoździ kotwiących (wokół główek), mające umożliwić wstępne naprężenie siatki.

Tab. 1. Parametry materiału wypełniającego

Typ materiału	Uziarnienie [mm]	Kąt tarcia wewn. [°]	Spójność [kPa]	Gęstość [kg/m ³]
Żwir	16/32	34	0	1670
Kruszywo z recyklingu	0/45	38	0	1800

3.2. Wyniki pomiarów i oprzyrządowanie

Mierzone były następujące parametry: (1) siły działające na górne i dolne linki mocujące, (2) przemieszczenie główek gwoździ w kierunku osuwania, (3) trójwymiarowe odkształcenia powierzchni sztucznej skarpy, a także (4) kąt graniczny

przerwania systemu zabezpieczającego. Siły oddziałujące na linki mocujące siatki mierzone były z użyciem czujników tensometrycznych. Przesunięcie główek gwoździ w kierunku osuwania zmierzono enkoderem linkowym przymocowanym na stałe do stalowej ramy. Linka pomiarowa mocowana była do główki gwoźdźnia kotwiącego w drugim rzędzie od górnej krawędzi. Pozwoliło to na pomiar odkształcenia główki gwoźdźnia z pominięciem oddziaływania ścian skarpki czy występujących deformacji układu.

Czujniki tensometryczne i enkoder linkowy dokonywały pomiarów w sposób ciągły przez cały czas trwania próby. Dane z tych pomiarów były przesyłane do wzmacniacza pomiarowego (HBM Spider 8) i po sformatowaniu zapisywane w komputerze przenośnym. Przewody elektryczne łączące czujniki ze wzmacniaczem musiały być odpowiednio zabezpieczone na wypadek osunięcia materiału oraz przed uszkodzeniami wywołanymi jego przemieszczaniem (prowadzenie przewodów w odpowiednich kanałach i osłonach). Dodatkowo długość kabli sygnałowych musiała uwzględniać zmieniającą się odległość czujników od wzmacniacza pomiarowego w czasie przechylenia skarpki, tak aby zapobiec zerwaniu.

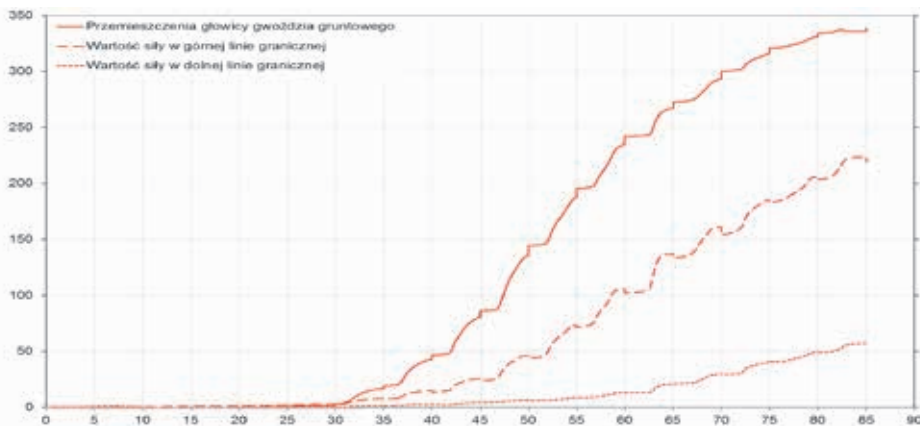
Trójwymiarowe odkształcenia powierzchni skarpy mierzone były przez firmę Terradata AG (dla każdego ze stopni nachylenia) z użyciem skanera laserowego Riegl VZ-400. Pozioma i pionowa kątowna rozdzielczość pomiaru została ustawiona na 0,02°, co zapewniło rozdzielczość przestrzenną od 7 mm do 10 mm dla zadanych odległości skanowania w zakresie 20 m i 30 m. Celowo zrezygnowano z wyższych rozdzielczości skanowania dla skrócenia czasu i zmniejszenia liczby danych. W celu dokonania pomiaru przemieszczenia kotwiących metodą skanowania laserowego na ich główkach umocowane zostały białe kulki o średnicy ok. 100 mm.

Kąt nachylenia sztucznej skarpy był w sposób ciągły mierzony z użyciem prostego ręcznego goniometru zamocowanego do jednej z płoz przy dolnej krawędzi skarpki oraz czujnika kątownego podłączonego do wzmacniacza pomiarowego (HBM Spider 8). Dzięki ciągłemu pomiarowi kąta nachylenia możliwa była również rejestracja kątów, przy których następowało przerwanie ciągłości skarpy. Sytuacje przerwania ciągłości skarpy zdefiniowano jako przypadki wystąpienia deformacji nieciągłych, np. w momencie, kiedy ziarna wypełnienia znajdujące się bezpośrednio pod siatką zaczynały się staczać na dół lub cała warstwa zsuwała się po pochyłości. Jako zwiastuny utraty stateczności były traktowane także stany, gdy ziarna wypełnienia zaczynały w dużych ilościach przedostawać się przez oka siatki, gwoździe kotwiący ulegały widocznemu uszkodzeniu bądź wystąpiło uszkodzenie siatki zabezpieczającej lub innego elementu układu.

Obciążenie haka dźwigowego mierzone było przy kącie nachylenia skarpki testowej 30° i sporadycznie również przy kątach większych. Informacje te były ważne z punktu widzenia nieprzekraczania maksymalnej nośności dźwigu wynoszącej 500 t. Wyniki tych pomiarów były jednak również interesujące z punktu widzenia rezultatów testu.

4. Wyniki pomiarów

W momencie publikacji niniejszego artykułu przeprowadzona była pierwsza seria ośmiu pomiarów. Ze względu na fakt, że pierwsze cztery cykle pomiarowe doprowadziły do



Ryc. 4. Przemieszczenie wyposażonej w pomiar głowicy gwoźdźca kotwiącego oraz siły działające na linki mocujące (krawędzie siatki) w zależności od nachylenia

ujawnienia niespodziewanych błędów układu testowego, wszystkie wyniki tych pomiarów zostały sklasyfikowane jako wstępne testy urządzeń pomiarowych. Ponieważ wyniki ostatnich trzech pomiarów pierwszej serii nie zostały jeszcze przeanalizowane, niniejsza praca ogranicza się do przedstawienia wyników pierwszego wiarygodnego pomiaru (pomiar nr 5). Wyniki pomiarów wykonanych w ramach pierwszej i drugiej serii zostaną wkrótce zaprezentowane w całości.

Pomiar nr 5 został przeprowadzony na układzie zbudowanych z wykorzystaniem siatki stalowej z drutu o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie (siatka typu TECCO 65/3 z drutu o średnicy, stal o wytrzymałości 1770 MPa). Pomiar wykonano od początkowego nachylenia 0° . Pierwsze siły zostały zmierzone przez czujniki tensometryczne przy kącie nachylenia 30° . Fakt ten wynikał prawdopodobnie z wartości kąta wewnętrznego materiału wypełniającego skrzynię. Począwszy od tego nachylenia, wszystkie jego zmiany były rejestrowane w założonych interwałach co 5° . Pierwotny zbiór danych zawiera zmierzone parametry reakcji na zmianę nachylenia, tzn. przemieszczenia główek gwoździ kotwiących oraz siły oddziałujące na górne i dolne linki mocujące w funkcji czasu (ryc. 4).

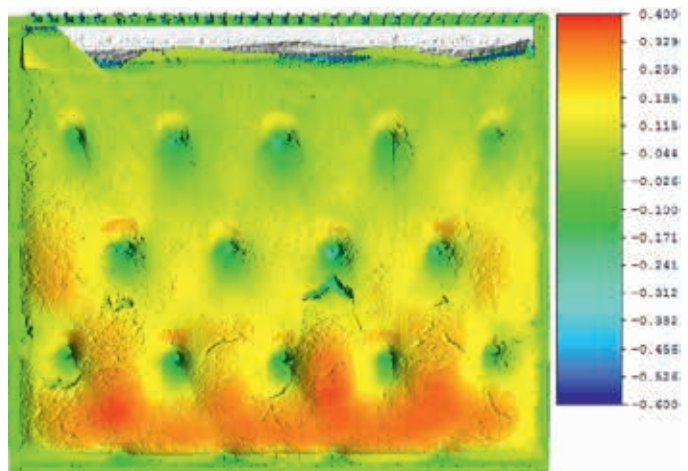
Pierwsze odkształcenia powierzchni skarpy oraz naprężenia siatki widoczne są przy kącie nachylenia 45° , ale równocześnie do tego momentu zaobserwowano przesunięcie gwoźdźca kotwiącego o 80 mm. Przy nachyleniu 50° zaobserwowano pierwsze osunięcia powierzchni w okolicach dolnej krawędzi skrzyni. Przy kącie 55° pęknięcia spowodowane osunięciami dotarły do połowy odległości między najniższym a drugim rzędem gwoździ. Przy nachyleniu skarpy 85° siatka wydłużyła się do 400 mm, ale skarpa zachowała stateczność, a całość materiału utrzymywała się pod zabezpieczeniem bez jakichkolwiek uszkodzeń siatki lub gwoździ kotwiących.

Rycina 5 ilustruje ostateczne wydłużenie siatki osiągnięte przy nachyleniu pod kątem 85° .

Wnioski i dalsze perspektywy

Można stwierdzić, że metoda i układ pomiarowy pełnoskalowego badania elastycznych zabezpieczeń powierzchniowych zapewnia doskonałe możliwości lepszego zrozumienia natury powierzchniowych ruchów gruntu na skarpach i zboczach oraz dalszego ulepszania technik i środków zabezpieczających. Au-

torzy są przekonani, że kolejne serie eksperymentów wykażą zalety i ograniczenia zastosowania wszystkich testowanych typów siatek. Opracowana w tym projekcie procedura badawcza będzie w przyszłości wykorzystana jako narzędzie do optymalizacji rozkładu punktów kotwienia i doboru elastycznych siatek zabezpieczających w zależności od lokalnych warunków gruntowych. Tego rodzaju eksperymenty mogą być również użyte do sprawdzania bieżącego stanu obliczeń i jako narzędzie do optymalizacji ich wyników, a także jako podstawa do kompleksowego numerycznego modelowania systemów stabilizacji skarp z użyciem gwoździ kotwiących i siatek elastycznych.



Ryc. 5. Pomiar nr 5 – wizualizacja powierzchni gruntu uzyskana metodą skanowania laserowego, przy nachyleniu pod kątem 85° . Wzniesienia i zagłębienia w stosunku do początkowej płaskiej powierzchni odniesienia wskazane są w skali kolorystycznej odpowiadającej wartości przemieszczenia w metrach, źródło: Terradata AG, 2012

Literatura

- [1] Cała M., Kowalski M.: *Reinforced slope stability analysis with FLAC. Continuum and distinct element numerical modeling in geo-engineering*. 1st international FLAC/DEM Symposium. Minneapolis, Minnesota. Eds. R. Hart, Ch. Detournay, P. Cundall. Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis 2008.
- [2] Cała M., Flum D., Roduner A., Rügger R., Wartmann S.: *TECCO Slope Stabilization System and RUVOLUM Dimensioning Method*. Beltz Bad Langesalza GmbH. Bad Langesalza 2012.
- [3] *TECCO Slope Stabilization System Summary of Published Technical Papers 1998–2011*. Geobruag AG, 2011.

Artykuł opracowany na podstawie wersji angielskiej: Cała M., Stolz M., Baraniak P., Rist A., Roduner A.: *Large scale field tests for slope stabilizations made with flexible facings*. In: *Proceedings of the EUROCK 2013 International Symposium on Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment*. International Society for Rock Mechanics. Hrsg. M. Kwaśniewski, D. Łydzba. CRC Press/Balkema. Leiden 2013, S. 659–662.