

Zagadnienie stateczności ogólnej

konstrukcji oporowej z gruntu zbrojonego

mgr inż. Michał Kościelski
mgr inż. Piotr Kieliszczak
Optem Sp. z o.o.

Projektując mury oporowe (z gruntu zbrojonego oraz inne), przyczółki mostowe czy nasypy drogowe, należy zawsze analizować możliwość wystąpienia utraty stateczności ogólnej.

Stateczność ogólna skarp i zboczy jest bardzo skomplikowanym zjawiskiem i pozostaje jednym z wciąż nie do końca zbadanych zagadnień geotechnicznych. Utrata stateczności następuje, gdy wzdłuż dowolnej ciągłej powierzchni w zboczu lub skarpie siły ścinające przekroczą wytrzymałość gruntu na ścinanie [5].

W celu zapewnienia stateczności konstrukcji oporowej należy dokładnie zbadać budowę geologiczną oraz warunki wodne terenu, na którym będzie wznoszona budowla, wraz z wyznaczeniem fizycznych i mechanicznych cech gruntów i skał. W razie konieczności należy zaprojektować i wykonać odpowiednie zabezpieczenie takiego uskoku naziomu. Sprawdzenie stateczności ogólnej jest jednym z warunków wymaganych przez Eurokod 7 w ramach obliczeń stanu granicznego nośności – EQU (stan graniczny równowagi) [4].

Obliczenia sprawdzające zachowanie stateczności ogólnej można wykonać metodą Bishopa, której założenia są następujące:

- powierzchnia poślizgu ma kształt walca cylindrycznego,
- siły między blokami są skierowane poziomo, a ich wartości określa się za pomocą kolejnych przybliżeń z zastosowaniem ogólnych równań równowagi wewnętrznej,
- wartość reakcji normalnej określa się z sumy rzutów na kierunek pionowy,
- nie uwzględnia się oddziaływania między blokami, ponieważ wywołany przez nie moment dla całej bryły jest równy 0.

Zgodnie z EC7 wskaźnik stateczności μ definiuje się jako stosunek momentów sił czynnych (powodujących osunięcie) do momentów sił biernych (utrzymujących równowagę) [4].

Konsekwencje występowania gruntu słabonośnego na pewnej głębokości pod poziomem terenu

W celu zobrazowania problemu przeanalizowano dwa przypadki murów oporowych w systemie optemBLOK z wykorzystaniem zbrojenia geosyntetycznego w postaci georusztów Secugrid 40/20 R6. Analizowana konstrukcja ma 6 m wysokości i jest obciążona ruchem drogowym oraz ciężarem własnym elementów infrastruktury drogowej. Rzędną zwierciadła wody gruntowej przyjęto

SUMMARY

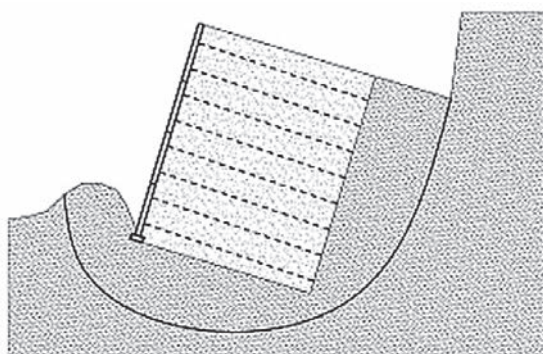
Slope stability of reinforced soil structures

The article discusses the slope stability of retaining walls made of small-dimensional concrete blocks and geosynthetics. It presents an insight into the issue based on two examples with different soil conditions and methods which can be used to mitigate the risk of failure of reinforced soil structures.

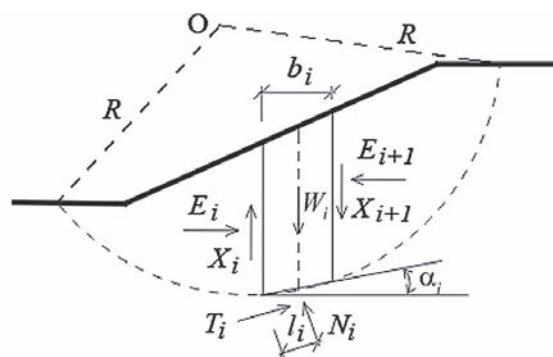
Keywords: retaining walls made of concrete blocks, geosynthetics, slope stability, reinforced soil structures

na poziomie 0,8 m poniżej poziomu terenu. W obu przypadkach przyjęto grunt zasypowy o kącie tarcia wewnętrznego $\phi' = 34^\circ$ i ciężarze $\gamma = 18,5 \text{ kN/m}^3$.

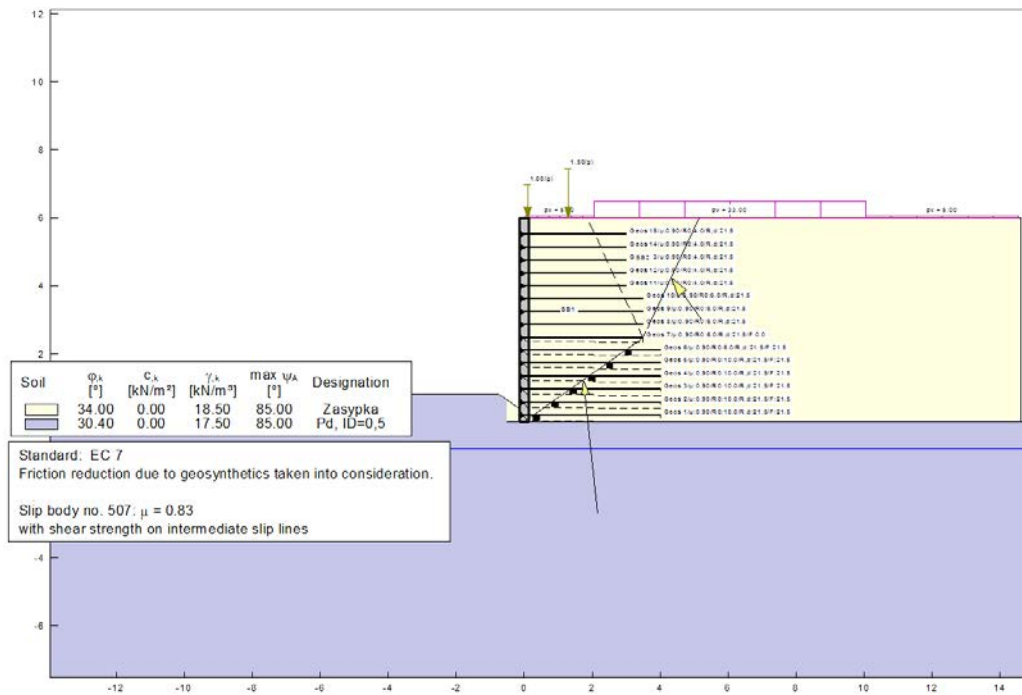
W pierwszym przypadku mur oporowy posadowiony jest na jednorodnej warstwie piasku drobnego o stopniu zagęszczenia $I_d = 0,5$. Jest to grunt, dla którego bez problemu można uzyskać wartość wtórnego modułu odkształcenia $E_2 \geq 50 \text{ MPa}$ w badaniu płytą VSS. Taka wartość tego parametru jest często podawana w specyfikacjach technicznych dla nasypów drogowych jako jedyny warunek nawiązujący do nośności podłoża. W rezultacie wykonawcy są często niechętni do wykonywania sprawdzających lub dodatkowych badań podłoża gruntowego, uznając ten warunek za wystarczający dla prawidłowej i bezpiecznej pracy konstrukcji. Z drugiej strony niektórzy projektanci nie starają się o dokładne rozpoznanie podłoża gruntowego i nie sprawdzają stateczności ogólnej projektowanych obiektów. Na rys. 3 przedstawiono obliczenia stateczności wewnętrznej wykonanych w programie GGU Stability metodą General Wedge. Przyjęte zbrojenie geosyntetyczne zapewnia stateczność wewnętrzną konstrukcji na poziomie wyłączenia 83%. Rys. 4 przedstawia z kolei sprawdzenie stateczności ogólnej obiektu metodą Bishopa. Wskaźnik bezpieczeństwa μ wyniósł 0,68. W drugim przykładzie ta sama konstrukcja oporowa z gruntu zbrojonego posadowiona jest na dwumetrowej warstwie piasku z pierwszego przykładu, jednak pod nią znajduje się warstwa miękkoplastycznej gliny o stopniu plastyczności $I_L = 0,65$. Również przy takim układzie warstw gruntowych możliwe jest uzyskanie wartości



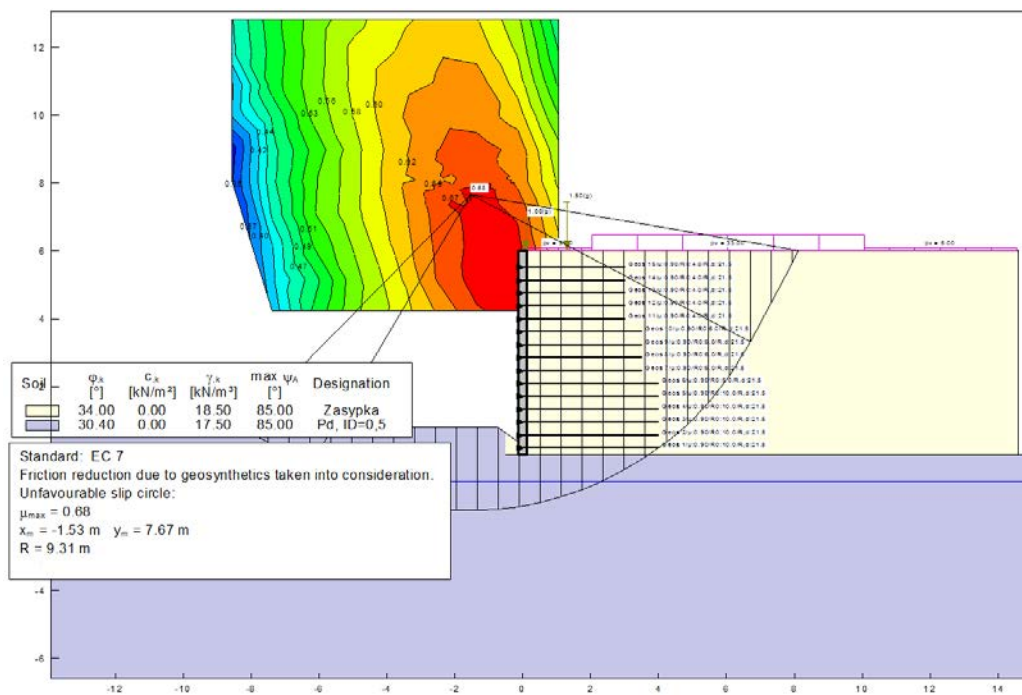
Rys. 1. Schemat utraty stateczności ogólnej



Rys. 2. Układ sił w metodzie Bishopa



Rys. 3. Obliczenia stateczności wewnętrznej – przykład 1.



Rys. 4. Obliczenia stateczności ogólnej – przykład 1.

wtórnego modułu odkształcenia $E_2 \geq 50$ MPa. Po analizie stateczności wewnętrznej otrzymaliśmy te same rezultaty co w poprzednim przykładzie, co zostało przedstawione na rys. 5. Na rys. 6 zostały pokazane obliczenia stateczności ogólnej. W metodzie Bishopa współczynnik bezpieczeństwa μ jest o wiele większy niż w pierwszym przykładzie i jego wartość wynosi 1,09. Oznacza to, że nie jest spełniony warunek stanu granicznego nośności – stateczności ogólnej i może nastąpić zniszczenie konstrukcji. Obliczenia pokazują, że przy projektowaniu oraz wykonywaniu konstrukcji oporowych konieczne jest wykonanie odpowiednich badań podłoża oraz sprawdzenie zarówno stateczności wewnętrznej, jak i zewnętrznej.

Sposoby zabezpieczania konstrukcji przed utratą stateczności ogólnej

Jak przedstawiono powyżej, w przypadku występowania w podłożu (niekoniecznie w poziomie posadowienia) gruntów słabonośnych, w szczególności organicznych, zapewnienie konstrukcji bezpieczeństwa ze względu

na utratę stateczności ogólnej okazuje się zagadnieniem, któremu należy poświęcić szczególną uwagę w procesie projektowania konstrukcji oporowej.

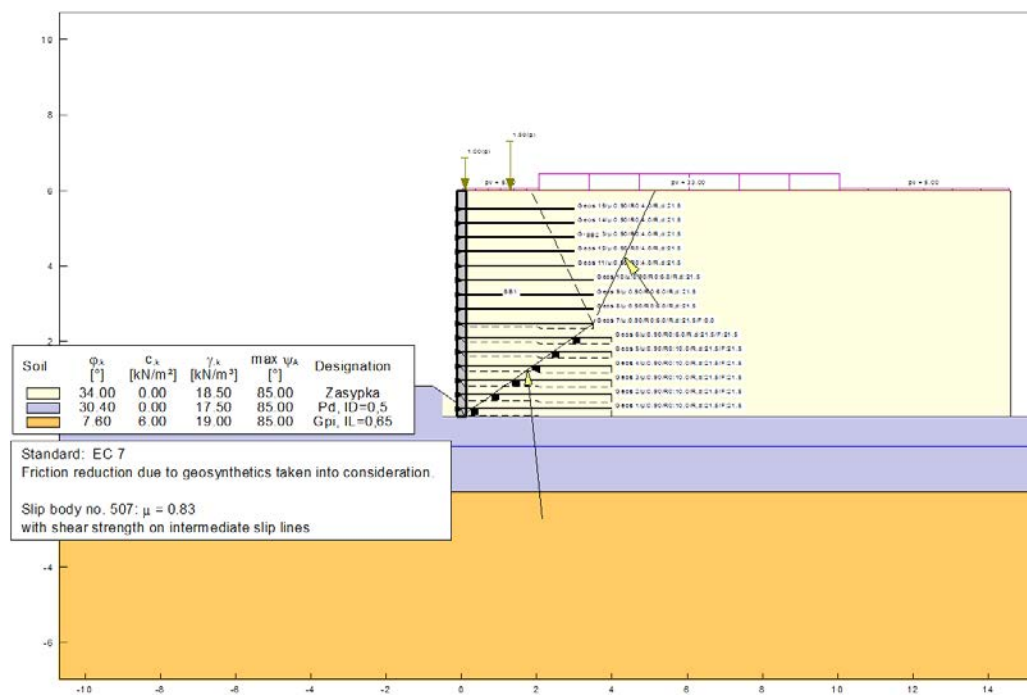
Jeżeli konstrukcja samoistnie nie zapewnia spełnienia warunku stateczności ogólnej, zachodzi konieczność wykonania wzmocnienia lub zabezpieczenia podłoża. Poniżej opisano wybrane, często stosowane sposoby wzmocnienia podłoża pod kątem stateczności ogólnej konstrukcji oporowej z gruntu zbrojonego.

Wymiana gruntu słabonośnego

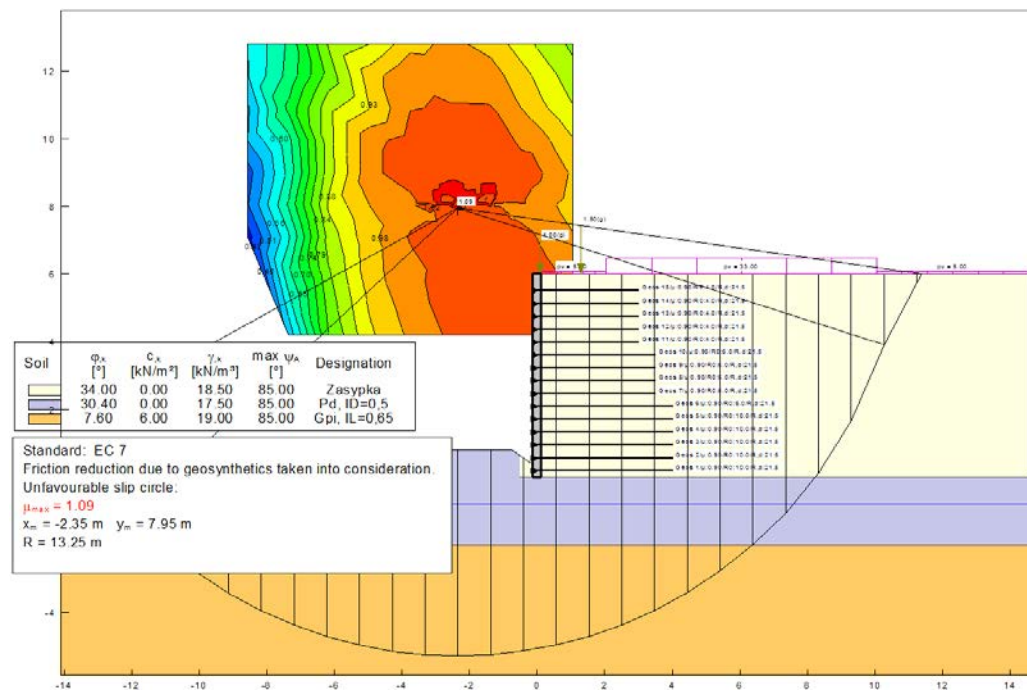
Wymianę gruntu wykonuje się w przypadku wierzchnich warstw podłoża zbudowanych z gruntów słabonośnych (organicznych, miękkoplastycznych gruntów spoistych, odpadów itp.). W miejsce wybranego gruntu wbudowuje się materiał nasypowy, spełniający wymagania stawiane gruntom na potrzeby budowy nasypów. [2] W praktyce stosuje się ją, gdy grunt słabonośny występuje do niewielkiej głębokości poniżej poziomu terenu oraz powyżej zwierciadła wody gruntowej. W przypadku wymiany

Piśmiennictwo

- Gajewska B., Kłosiński B.: *Wzmacnianie słabego podłoża kolumnami w budownictwie drogowym*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne”, 7-8/2012.
- GDDKiA: *Wytyczne wzmacniania podłoża gruntowego w budownictwie drogowym*. Warszawa 2002.
- German Geotechnical Society: *Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements – EBGEO*. Berlin 2011.
- PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7. *Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne*.
- Wiłun Z.: *Zarys geotechniki*. Warszawa 1987.



Rys. 5. Obliczenia stateczności wewnętrznej – przykład 2.



Rys. 6. Obliczenia stateczności ogólnej – przykład 2.

► gruntu poniżej poziomu ZWG konieczne jest zabezpieczenie wykopu ściankami szczelnymi, zapewnienie ciągłego wypompowywania wody lub innych dodatkowych zabiegów znacznie podwyższających koszt przedsięwzięcia. Należy mieć na uwadze obszar, na jakim należy wykonać płytką wymianę gruntu. Wymiana gruntu w pasie niewielkiej szerokości pod fundamentem lica muru często nie poprawia wystarczająco stateczności konstrukcji. Konieczna jest wymiana gruntu na całym obszarze występowania zbrojenia gruntu.

Wgłębne wzmacnianie gruntu

Spośród metod głębokiego wzmacniania gruntu można wyróżnić: kolumny kamienne, kolumny DSM, kolumny CMC lub jet grouting. W efekcie wykonania tego rodzaju wzmocnienia otrzymuje się warstwę materiału kompozytowego o parametrach wytrzymałościowych znacznie poprawionych względem gruntu w stanie naturalnym [1]. Metoda ta znajduje zastosowanie w przypadku gruntów słabonośnych występujących do głębokości ogranicza-

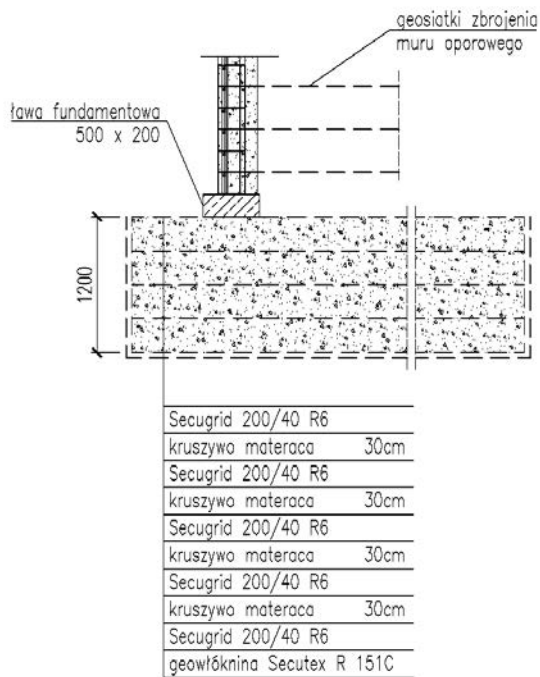
jącej możliwość wykonania płytkiej wymiany gruntu. Pozwala ona na bieżąco dostosować głębokość wykonania kolumn do miąższości gruntów o niskich parametrach geotechnicznych [1].

Wykonując wgłębne wzmacnianie gruntu kolumnami, należy wykonać dodatkowo warstwę transmisyjną, pozwalającą przekazać naprężenia bezpośrednio na kolumny dzięki efektowi przesklepienia gruntu [3]. W przypadku braku wykonania odpowiedniej warstwy transmisyjnej może dojść do uszkodzeń lica muru przez punktowe jego podparcie.

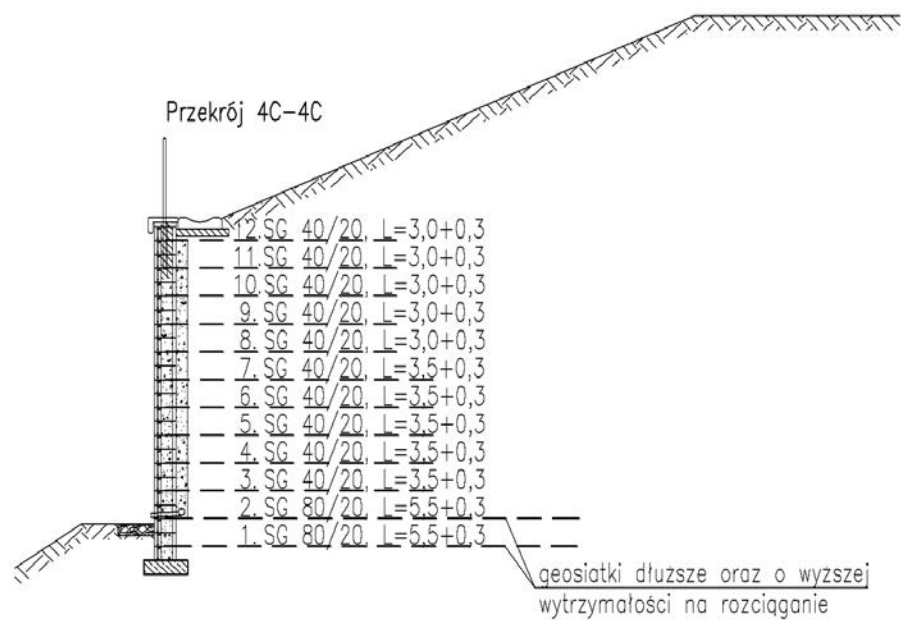
Projektując wzmocnienie gruntu kolumnami, należy sprawdzić ich wytrzymałość ze względu na możliwość ścięcia przy utracie stateczności ogólnej konstrukcji nasypu lub muru oporowego.

Wykonanie zbrojonej poduszki gruntowej

Alternatywną metodą wzmocnienia podłoża pod względem zapewnienia stateczności ogólnej muru oporowego jest wykonanie poduszki piaskowej lub żwirowej zbrojo-



Rys. 7. Schemat zbrojonej poduszki gruntowej



Rys. 8. Przykład wzmocnienia dolnych warstw zbrojenia gruntu

nej kilkoma warstwami odpowiednio sztywnego georusztu. Zaletą metody jest zdolność do korzystnego rozłożenia naprężeń w gruncie. Powoduje to zwykle zmniejszenie osiadań podłoża. Dodatkowo, wykonując odpowiednio sztywną poduszkę zbrojoną, nie ma potrzeby przegłębiania wykopu, tak jak ma to miejsce przy standardowej wymianie gruntu. Ma to szczególne znaczenie przy wysokim poziomie zwierciadła wody gruntowej, gdzie wykonywanie głębszego wykopu wiązałoby się ze znacznymi kosztami.

Wykonując zbrojoną poduszkę gruntową, mającą za zadanie zapewnienie stateczności ogólnej konstrukcji oporowej, należy zastosować georuszty o odpowiednio wysokiej sztywności. Przy konstrukcji liniowej, jaką jest mur oporowy, kluczowa jest sztywność osiowa geosyntezy w kierunku prostopadłym do muru. Nie ma więc potrzeby stosowania w tym celu georusztów dwukierunkowych.

Wzmocnienie dolnych warstw zbrojenia gruntu

Gdy nie przewiduje się wystąpienia nadmiernych osiadań podłoża gruntowego, a należy jedynie zapewnić spełnienie warunku stateczności ogólnej, czasami może wystarczyć wydłużenie czy wzmocnienie dolnych warstw zbrojenia gruntu za murem oporowym. Jest to rozwiązanie prostsze niż wykonanie poduszki zbrojonej, niestety możliwość jego stosowania jest ograniczona uwarunkowaniem podłoża gruntowego. Metoda ta ma zastosowanie jedynie przy występowaniu niewielkich przewarstwień gruntów słabonośnych, stanowiących uprzywilejowaną powierzchnię zniszczenia. Odpowiednio wydłużone i wzmocnione dolne warstwy zbrojenia za murem oporowym z gruntu zbrojonego pozwalają wyeliminować problem poślizgu masywu gruntowego po warstwie gruntu słabonośnego.

Podsumowanie

Projektując mury oporowe (z gruntu zbrojonego oraz inne), należy zawsze analizować możliwość wystąpienia utraty stateczności ogólnej. Jest to jeden z warunków stanów granicznych nośności i należy podchodzić do niego z równą uwagą jak do pozostałych warunków SGN. Wpływ na możliwość wystąpienia utraty stateczności ogólnej konstrukcji ma nie tylko grunt występujący w po-



Rys. 9. Przykład zrealizowanego muru oporowego z gruntu zbrojonego

ziomie posadowienia, ale również ten zalegający niżej. Co za tym idzie – należy zawsze wykonywać badania podłoża gruntowego do odpowiedniej głębokości, w zależności od geometrii konstrukcji i schematu jej obciążenia (zdaniem autorów powinno się przyjmować minimalną głębokość rozpoznania gruntu rzędu 6,0-8,0 m). Niekiedy projektanci murów oporowych nakładają jedynie wymóg sztywności podłoża gruntowego, podając go w formie minimalnej wartości modułu wtórny (np. $E_2 > 50 \text{ MPa}$), mierzonego przy pomocy płyty dynamicznej. Jest to warunek konieczny (głównie ze względów wykonawczych), lecz niewystarczający. Jego spełnienie nie świadczy o braku występowania gruntów słabonośnych poniżej wierzchnich, zagęszczonych warstw podłoża. Również projektując nasyp drogowy lub przyczółek mostowy, projektant powinien sprawdzić jego stateczność ogólną. Zdarzają się nasypy drogowy, których stateczności ogólnej nie sprawdzano, zakładając, że odpowiednie pochylenie skarp nasypu świadczy o całkowitej poprawności rozwiązania technicznego. □