

Dr inż. Angelika Duszyńska – Politechnika Gdańska

Stateczność nasypów drogowych ze wzmocnieniem geosyntetycznym

Wstęp

Bardzo często inżynierowie stają przed problemem budowy nasypów na słabym podłożu gruntowym. W przypadku, gdy tradycyjna wymiana gruntu jest nieekonomiczna, rozważa się specjalne techniki wzmocniania podłoża lub wykorzystuje różne technologie posadowienia pośredniego. Coraz częściej stosowanym rozwiązaniem problemu jest zastosowanie zbrojenia geosyntetycznego w podstawie nasypu, posadowionego bezpośrednio na gruncie nienośnym lub pośrednio na pionowych elementach nośnych (palach lub kolumnach).

Niestety, pomimo prężnie rozwijającej się branży geosyntetyków w budownictwie komunikacyjnym, w Polsce brak jest jednolitych norm i zaleceń do projektowania konstrukcji z zastosowaniem geosyntetyków.

W związku z wdrażaniem tzw. Eurokodów, które obowiązują w krajach Unii Europejskiej, w Polsce wprowadzono do obowiązkowego stosowania zalecenia normy EC 7 wraz z Załącznikiem Krajowym. Norma PN-EN 1997-1 [8] zawiera generalne zasady projektowania konstrukcji geotechnicznych, jednak swoim zakresem nie obejmuje procedur wymiarowania poszczególnych elementów konstrukcyjnych.

Dostępne polskie wytyczne dotyczące projektowania i wykonawstwa budowli ziemnych wzmocnianych geosyntetykami, wydane przez IBDiM [7] i ITB [10] nie są zgodne z obowiązującą normą PN-EN 1997-1 [8]. Brak polskich norm wymusza konieczność korzystania z zagranicznych wytycznych projektowych, głównie brytyjskich lub niemieckich. W Wielkiej Brytanii w 2010 roku znowelizowaną normę BS 8006 [1], która stanowi Załącznik Krajowy do Eurokodu 7 w odniesieniu do gruntów zbrojonych. W Niemczech ustanowiono nowe wersje norm DIN m.in. 1054 [2], wydano też nową wersję zaleceń EBGeo [6], tak aby wraz z wprowadzeniem EC 7 i DIN 1054 powstał spójny system normowy dotyczący projektowania konstrukcji z geosyntetykami.

Wykorzystanie geosyntetyków do zbrojenia nasypów drogowych

Konstruowanie nasypów na słabym podłożu jest dużym wyzwaniem. W tym kontekście, zastosowanie geosyntetyków w celu poprawy stateczności nasypu jest jedną z najbardziej efektywnych i sprawdzonych technik gruntu zbrojonego.

W przypadku budowy nasypów na słabym i ściśliwym podłożu gruntowym, zbrojenie dolnej części nasypu stosuje się w celu zapobieżenia ich nadmiernym odkształceniom i utracie stateczności. Wyroby geosyntetyczne ułożone w podstawie nasypu przecinają potencjalne powierzchnie poślizgu i zapewniają zachowanie stateczności w czasie budowy nasypu, jak również umożliwiają lepsze rozłożenie nacisków na słabe podłoże.

Zastosowanie zbrojenia z warstw geotekstyliów umieszczonych w podstawie nasypu poprawia jego stateczność, natomiast najczęściej ma niewielki wpływ na redukcję osiadań. W celu kontrolowania (ograniczenia, przyspieszenia) osiadań stosuje się zbrojenie geotekstyliami w połączeniu z innymi technologiami np. geodreny lub elementy nośne (pale, kolumny tłuczniowe), nad którymi układana jest warstwa geotekstylna rozkładająca obciążenie nasypem.

W podstawę nasypu wbudowywane są przepuszczalne geosyntetyki, czyli geowłókniny, geotkaniny i geosiatki (georuszty). Geowłókniny, charakteryzujące się stosunkowo niską wytrzymałością i dużą odkształcalnością, wykorzystywane są głównie w funkcji separacyjnej (rozdzielają materiały o odmiennych cechach np. niespoisty grunt nasypowy od gruntów słabonośnych w podłożu). Zbrojenie geotkaninami o wysokiej wytrzymałości jest stosowane wówczas, gdy w podstawie wzmocnianego nasypu występują bardzo duże siły rozciągające i konieczne jest zapewnienie wzmocnienia przez cały okres eksploatacji obiektu. Alternatywnym sposobem na zbrojenie nasypów jest zastosowanie geosiatek dwukierunkowych i georusztów trójosiowych.

Poprawne zastosowanie geosyntetyków w podłożu gruntowym prowadzi do podniesienia nośności podłoża i wydłuża okres użytkowania konstrukcji. Samo ułożenie zbrojenia w gruncie nie gwarantuje jego poprawnej pracy w konstrukcji. Aby można było mówić o współpracy zbrojenia z gruntem, konieczne jest wywołanie stanu naprężenia w gruncie.

Geosyntetyki są materiałami podatnymi i we współpracy z gruntem mogą przenosić bardzo duże obciążenia. Dzieje się tak, dzięki włączeniu gruntu otaczającego geosyntetyk do współpracy, co prowadzi do znacznych redukcji obciążeń przekazywanych na podłoże.

Efekt zwiększenia nośności może nastąpić m.in. dzięki zjawisku przesklepienia gruntu (mechanizm ograniczenia bocznych przemieszczeń poziomych). Jest to zjawisko redystrybucji obciążeń w wyniku, którego następuje redukcja nacisku gruntu na podłoże. Efekt przesklepienia wstępuje w gruncie leżącym powyżej geosyntetyku. Zjawisko to jest szczególnie efektywne w przypadku zaistnienia zazębienia się kruszywa w oczkach geosiatki/georusztu.



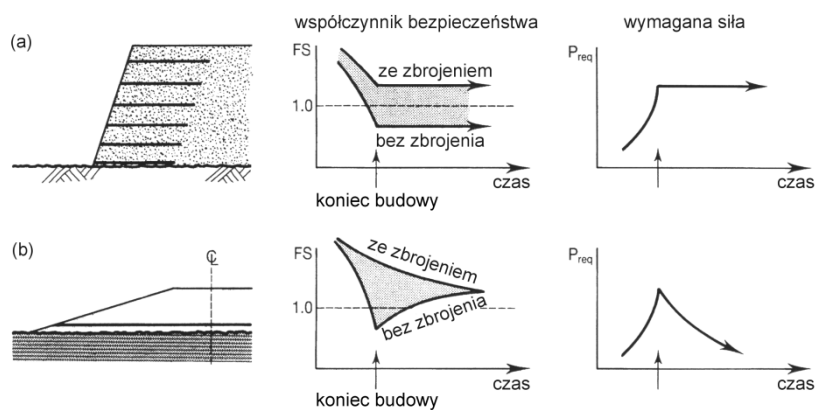
Zjawisko utworzenia łuku uwzględnia się również projektując wzmocnienia podłoża, posadawiając obiekty na tzw. pionowych elementach nośnych - palach lub kolumnach. Zbrojenie geosyntetyczne jest „mostem” pomiędzy elementami nośnymi. Słaby grunt zostaje częściowo lub prawie w całości odciążony, zależnie od relacji sztywności między gruntem zbrojonym a elementami nośnymi. Należy pamiętać, że bardzo zmienne obciążenia mają negatywny wpływ na formowanie sklepień powyżej elementów nośnych.

W przypadku efektu naciągniętej membrany, wzmocnienie wymaga znacznego odkształcenia układu grunt-geosyntetyk. Wskutek tego zbrojenie ulega wydłużeniu i w efekcie powstaje w nim siła rozciągająca, odciążająca słabe podłoże. Ten mechanizm wzmocnienia jest charakterystyczny w przypadku geosyntetyków wiotkich, o małej grubości, takich jak geowłókniny i geotkaniny oraz geosiatki przeplatane lub zgrzewane z cienkich pasm.

Podczas deformacji słabego podłoża pod obciążeniem, warstwa geotekstyliów rozciąga się jak membrana, powodując rozkład obciążenia na większej powierzchni. Deformacja podłoża i rozciąganie geosyntetyków postępuje do momentu osiągnięcia przez układ równowagi sił zewnętrznych i wewnętrznych. Efekt membrany powoduje także bardziej równomierny rozkład naprężeń i zmniejszenie wielkości odkształceń.

Podczas projektowania zbrojenia geosyntetycznego należy zwrócić uwagę na znaczącą różnicę między zbrojeniem stromej skarpy a zastosowaniem zbrojenia pod nasypem na słabym podłożu. W pierwszym przypadku zbrojenie musi zapewnić stateczność przez cały okres użytkowania konstrukcji. Natomiast w nasypie na słabym podłożu, zbrojenie wymagane jest tylko w celu zwiększenia stateczności podczas krytycznego okresu wykonywania konstrukcji i późniejszej konsolidacji podłoża. Po zwiększeniu wytrzymałości gruntu w podstawie, zbrojenie nie jest dłużej potrzebne do zapewnienia stateczności. Różnicę tę zilustrowano na rysunku 1 poprzez zmianę w czasie współczynnika bezpieczeństwa, w przypadku bez i ze zbrojeniem oraz zmianę wymaganej siły w zbrojeniu. Zilustrowana na rysunku 1 zmiana w czasie wymaganej siły w zbrojeniu jest parametrem w dużym stopniu decydującym o doborze odpowiedniego geosyntetyku. W przypadku gdy wymagane jest utrzymywanie w miarę jednakowej siły w zbrojeniu przez długi okres, tak jak w przypadku zboczy, na wybór zbrojenia istotny wpływ ma charakterystyka pełzania materiału zbrojącego. W przypadku nasypów na słabym podłożu siła w zbrojeniu wymagana jest tylko podczas budowy nasypu i konsolidacji podłoża gruntowego, tak więc długoterminowe właściwości mechaniczne geosyntetyków nie są tak istotne.





Rys. 1. Zbrojenie geosyntetyczne: (a) strome skarpy, (b) nasyp na słabym podłożu.

Geosyntetyki przepuszczalne w budowlach ziemnych pełnią również inne funkcje niż tylko zbrojenie. Często wyroby te stosuje się jako separatory, filtry i elementy drenażu. Wielokrotnie zdarza się, że geosyntetyk pełni jednocześnie więcej niż jedną funkcję. W zależności od zastosowania, geotekstyliia powinny spełniać odpowiednie kryteria dotyczące właściwości hydraulicznych i mechanicznych.

Starannej analizy wymagają również rozwiązania zabezpieczenia antyerozyjnego skarp. Przyjęcie w projekcie wyrobu geosyntetycznego tylko na podstawie masy powierzchniowej i czasami dodatkowo wytrzymałości na rozciąganie to za mało. W takich przypadkach niezwykle istotna jest zdolność zatrzymywania materiału i współpraca wyrobów przeciwoerozyjnych z gruntem zabezpieczanej powierzchniowo skarpy. [3]

Nasypy ze zbrojeniem geosyntetycznym w podstawie

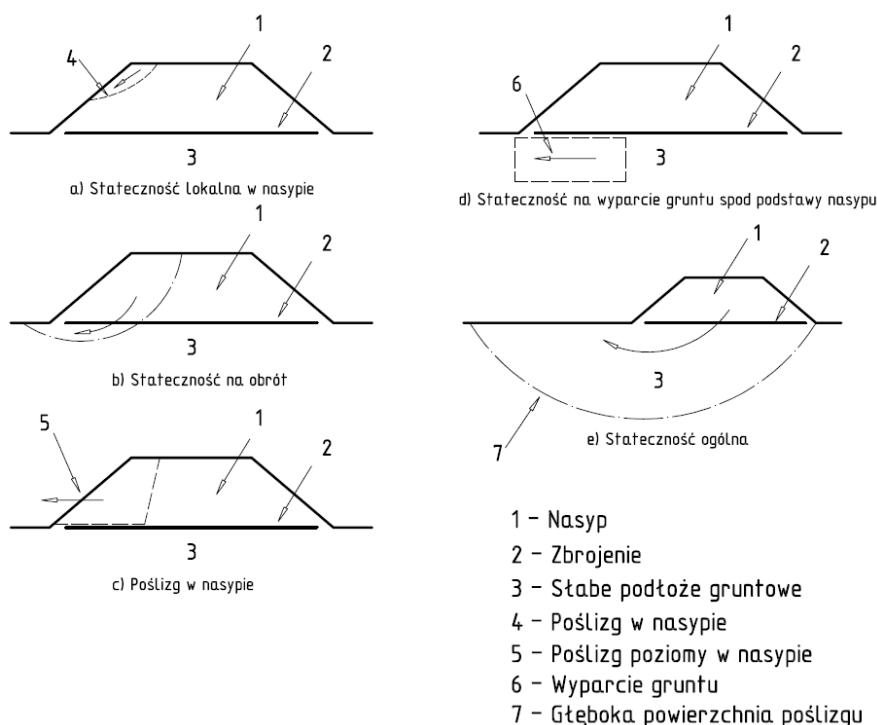
Według zaleceń normy brytyjskiej BS 8006 [1] dotyczącej gruntu zbrojonego (nie tylko geosyntetykami), podczas projektowania budowli ziemnych ze wzmocnieniem w podstawie, posadowionych na słabym podłożu gruntowym, należy przeanalizować następujące stany graniczne nośności:

- utrata stateczności lokalnej w nasypie (rys. 2a),
- utrata stateczności na obrót (rys. 2b),
- poślizg w nasypie (rys. 2c),
- wyparcie gruntu spod podstawy nasypu (rys. 2d),
- utrata stateczności ogólnej (rys. 2e).

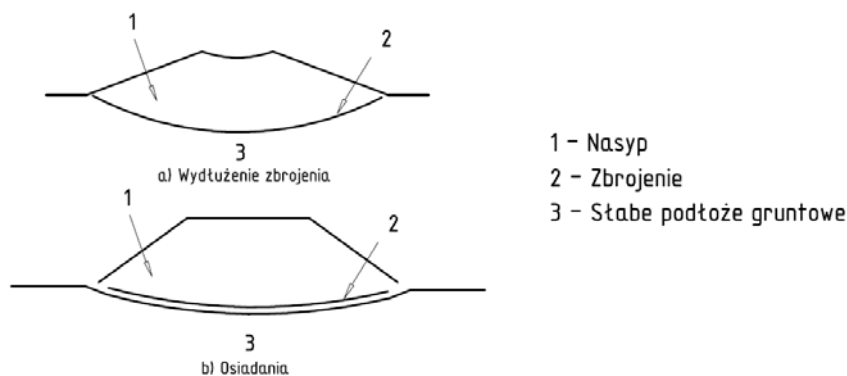
Należy również rozpatrzyć następujące stany graniczne użyteczności:

- nadmierne odkształcenie (wydłużenie) zbrojenia (rys. 3a),
- osiadania (rys. 3b).





Rys. 2. Stany graniczne nośności dla nasypów ze wzmocnieniem w podstawie, [1]



Rys. 3. Stan graniczny użyteczności dla nasypów ze wzmocnieniem w podstawie, [1]

Według niemieckich zaleceń EBGEO [6] analizę stateczności konstrukcji nasypu na słabym podłożu należy wykonać dla stanu: początkowego, końcowego oraz kolejnych etapów wznoszenia nasypu. Należy sprawdzić stateczność:

- ze względu na możliwość wyparcia słabego gruntu spod podstawy nasypu,
- na poślizg nad, jak również pod geosyntetykiem. W przypadku gdy opór tarcia jest niewystarczający, stateczność na poślizg może być zwiększona przez „zawinięcie” warstwy zbrojenia geosyntetycznego w nasypie. Należy sprawdzić stateczność na przesuw części nasypu znajdującej się powyżej wywinięcia zbrojenia, jak również nad warstwą zbrojenia zasadniczego,
- ogólną wzdłuż różnych krytycznych powierzchni poślizgu, które:



- zlokalizowane są wewnątrz nasypu i nie przecinają warstw zbrojenia,
- zlokalizowane są wewnątrz nasypu i przecinają warstwy zbrojenia,
- przebiegają przez nasyp, podłoże gruntowe i przecinają warstwy zbrojenia.

W analizie stateczności opór zbrojenia uznaje się za oddziaływanie utrzymujące i przyjmuje się najmniejszą z poniższych wartości:

- wytrzymałość zbrojenia na rozciąganie (stan graniczny STR),
- opór zbrojenia na wyciąganie z gruntu zasypowego (stan graniczny GEO),
- opór tarcia na powierzchni geosyntetyku (stan graniczny STR).

Szczegółowo procedurę wymiarowania zbrojenia geosyntetycznego podstawy nasypu przedstawiono m.in. w [5].

Geosyntetyczne zbrojenie nadpalowe

Na obszarach występowania gruntów nienośnych, nieskonsolidowanych, celem posadowienia nasypów komunikacyjnych wykorzystuje się bardzo często techniki posadowienia pośredniego na punktowych elementach nośnych, tj. palach lub kolumnach, stosując zbrojenie geosyntetyczne, które układa się powyżej głowic lub „czapek”. System ten znany jest w świecie jako „*GPE*” - *geosynthetic reinforced and pile supported embankments*.

Zastosowanie geosyntetyku w podstawie nasypu może wyeliminować potrzebę stosowania pali ukośnych oraz pozwala zwiększyć rozstaw pomiędzy palami, redukując koszty budowy. Należy również zaznaczyć, że w posadowieniu można wykorzystać różne metody palowania.

Kompozyt z gruntu i geosyntetyków układa się na rodzimym, słabym podłożu i elementach nośnych. Zbrojenie podstawy budowli ziemnej jest pewnego rodzaju „mostem” pomiędzy elementami nośnymi wykorzystującym tzw. efekt membrany. Słaby grunt zostaje częściowo lub prawie w całości odciążony.

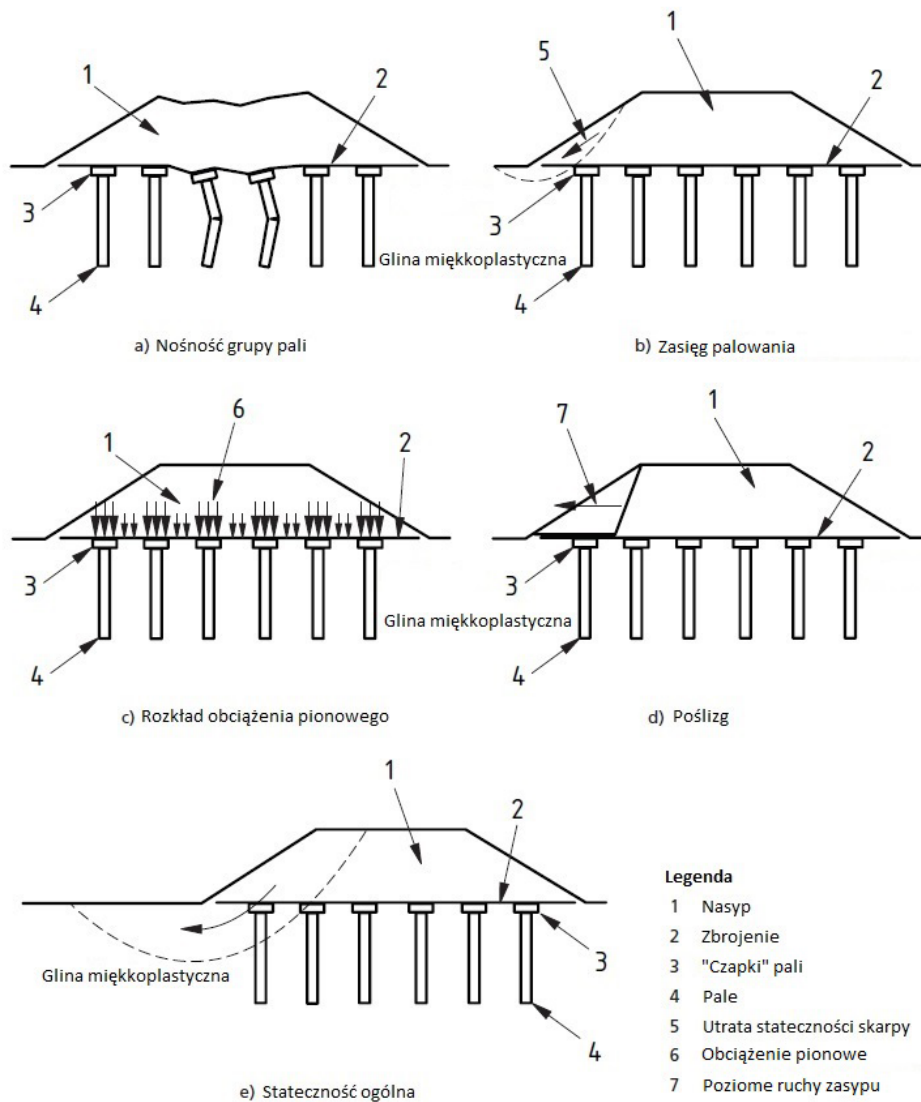
Efekt oddziaływania zbrojenia geosyntetycznego w konstrukcji z gruntu zbrojonego może uaktywnić się tylko w wyniku jego prawidłowego zakotwienia. W przypadku nasypów należy uwzględnić sprawdzenie stateczności skarp.

Zbrojenie jest poddawane oddziaływaniu obciążeń pionowych między elementami nośnymi, które są zredukowane przez występowanie efektu sklepienia i odciążane na skutek reakcji gruntu poniżej zbrojenia.

Metoda obliczeniowa zaproponowana w wytycznych niemieckich [6] (szczegółowo opisana m.in. w [4]) opiera się na modelu sklepienia („łuku” z ang. arching) zaproponowanego przez Zaeske w 2001 roku. Korzystając z niej, należy mieć świadomość, że



nie uwzględnia ona wszystkich czynników oddziałujących na system: nasyp – zbrojenie geosyntetyczne – pale, jednakże zasadniczo otrzymane wyniki są po stronie bezpiecznej. Do czynników tych zaliczyć można: wpływ układu pionowych elementów nośnych, wpływ obciążeń cyklicznych na mechanizm przenoszenia obciążeń, wpływ struktury wyrobów geosyntetycznych i liczby warstw zbrojenia.



Rys. 4. Stany graniczne nośności nasypu na palach ze zbrojeniem w podstawie, [1]

Opisany w normie brytyjskiej [1] mechanizm przenoszenia obciążeń na pale opiera się również na teorii przesklepień. Projektant może wybrać pomiędzy dwiema metodami opisującymi teorię przesklepień – metodą Marstona lub Hewletta i Randolpha. Pierwsza wywodzi się z rozwiązania dla przewodów podziemnych i jest metodą starszą, natomiast druga lepiej opisuje rzeczywiste trójwymiarowe zjawisko przesklepienia. Norma brytyjska nie sugeruje przewagi żadnej z metod. Powoduje to często obieranie przez projektantów

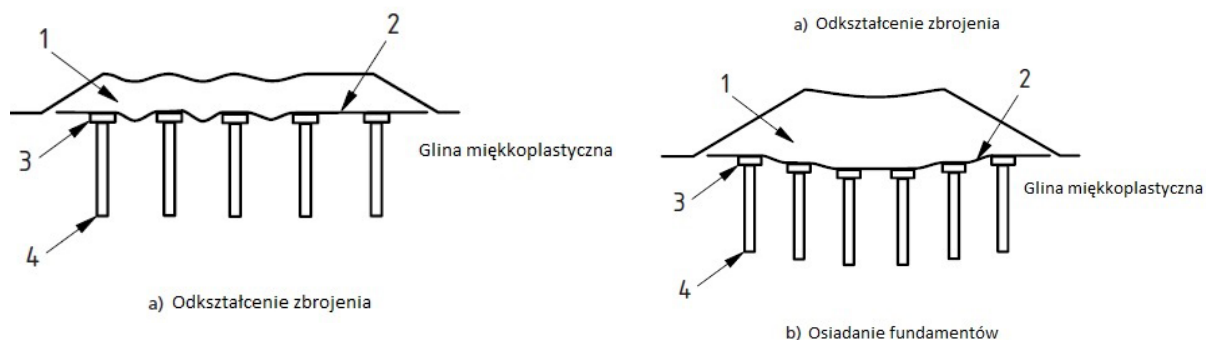
łatwiejszej ścieżki obliczeń metodą Marstona, bez uwzględnienia zalet dokładniejszej metody Hewletta i Randolpha.

Według BS 8006:2010 [1] projektując nasyp ze zbrojeniem geosyntetycznym na pionowych elementach nośnych, należy wykazać spełnienie poniższych warunków stanu granicznego nośności:

- nośność grupy pali (rys. 4a);
- zasięg palowania w stosunku do krawędzi nasypu (rys. 4b);
- rozkład obciążeń pionowych (rys. 4c);
- stateczność na poślizg nasypu (rys. 4d);
- stateczność ogólna nasypu na palach (rys. 4e).

Podczas sprawdzenia stanu granicznego użyteczności, należy przeanalizować:

- nadmierne odkształcenie zbrojenia (rys. 5a);
- osiadanie fundamentów palowych (rys. 5b).



Rys. 5. Stany graniczne użyteczności dla nasypów na palach ze zbrojeniem w podstawie, [1]

Analiza stateczności ogólnej

Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej w sprawie geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych [9] nakłada obowiązek sprawdzenia stateczności nasypów komunikacyjnych wyższych niż 3,0 m, ponieważ są to konstrukcje zaliczane do drugiej kategorii geotechnicznej.

Biorąc pod uwagę, że omawiane wcześniej zalecenia - szczególnie EBGEO 2010 [6], w których bardzo szczegółowo przedstawiono procedury obliczeniowe (na końcu każdego rozdziału zamieszczono przykład obliczeniowy), ale również norma BS 8006 [1] - stanowią niejako spójną całość, pozwalającą projektantowi podążać kolejnymi etapami obliczeniowymi bez większych trudności, problemy mogą pojawiać się w momencie, gdy należy wykonać

sprawdzenie stateczności ogólnej. W analizie konieczne jest rozważenie wszystkich możliwych powierzchni poślizgu, a następnie zidentyfikowanie najbardziej niekorzystnej.

Według zaleceń Eurokodu 7 w przypadku skarp i zboczy należy sprawdzić ich stateczność ogólną ze względu na stany graniczne nośności GEO i STR, w których wytrzymałość gruntu podczas zniszczenia lub nadmiernego odkształcenia ma decydujące znaczenie.

Jedną z istotnych zmian w projektowaniu skarp i zboczy są wprowadzone w EC7 podejścia obliczeniowe. Różnią się one sposobem rozkładu współczynników częściowych pomiędzy oddziaływania, parametry wytrzymałościowe i opory gruntu. W normie sformułowano trzy podejścia obliczeniowe w których należy uwzględnić odpowiednie kombinacje współczynników częściowych.

Według PN-EN 1997-1 [8] w celu oceny stateczności ogólnej, należy sprawdzić warunek:

$$E_d \leq R_d$$

gdzie:

E_d – wartość obliczeniowa efektu oddziaływań,

R_d – wartość obliczeniowa oporu przeciw oddziaływaniu.

W Polsce, podobnie jak w Niemczech, do analiz stateczności skarp zaleca się przyjmować podejście projektowe 3, z kombinacją współczynników częściowych: A2+M2+R3.

- redukcja parametrów geotechnicznych gruntu (współczynniki $\gamma_M > 1$),
- obciążenia zwiększone (współczynniki $\gamma_F > 1$),
- wartość oporów bez redukcji (współczynnik $\gamma_R = 1$).

Stateczność ogólną zwykle opisuje się za pomocą współczynnika stateczności F , zwanego również współczynnikiem bezpieczeństwa, będącego stosunkiem oddziaływań stanowiących opory przed utratą stateczności (R) i oddziaływań destabilizujących (E).

Jeżeli, jak napisano powyżej, zadaniem projektanta jest sprawdzenie wszystkich możliwych powierzchni poślizgu, wykonanie tego nie jest zasadniczo możliwe, bez użycia programów inżynierskich. Obecnie, projektant ma do wyboru cały wachlarz możliwości, zaczynając od programów najprostszych, opartych na metodach równowagi granicznej, aż do tych, które pozwalają na dokładniejszą i pełniejszą analizę, ale trudniejszych w obsłudze, wykorzystujących metody numeryczne. Na przykład w metodzie różnic skończonych, współczynnik stateczności F wyznacza się metodą redukcji parametrów wytrzymałościowych gruntu.



Należy zwrócić uwagę, że w niektórych programach komputerowych jako wynik obliczeń stateczności podaje się wskaźnik wykorzystania konstrukcji (ang. *utilization factor*) μ , będący stosunkiem sił niszczących (E) do sił utrzymujących (R). Czyli budowla jest stateczna, gdy $\mu \leq 1,00$ dla wszystkich sprawdzonych obliczeniami modeli zniszczenia konstrukcji.

Podsumowanie

Wzrost zastosowań geosyntetyków w budownictwie powoduje olbrzymie zapotrzebowanie na precyzyjne wytyczne odnośnie obliczeń budowli ziemnych z zastosowaniem tych wyrobów. Niestety w Polsce brak jest norm i spójnych zaleceń regulujących zasady projektowania w tej dziedzinie. Projektanci wspierają się zatem zagranicznymi opracowaniami, m.in. normą niemiecką DIN 1054 [2] wraz z zaleceniami EBGEO 2010 [6] i brytyjską normą BS 8006 [1].

Należy jednak mieć świadomość, że sam dostęp do w/w wytycznych, a nawet ich znajomość nie zawsze wystarczy do prawidłowego – bezpiecznego a jednocześnie ekonomicznego – zaprojektowania konstrukcji z zastosowaniem wzmocnienia geosyntetycznego. Inżynier powinien tę wiedzę uzupełnić znajomością klasycznej geotechniki, ale także interesować się wynikami aktualnych prac badawczych z tej dziedziny. Korzystając z omówionych metod obliczeniowych należy pamiętać, że opierają się one na pewnych założeniach upraszczających i nie uwzględniają wszystkich czynników wpływających na pracę systemu budowla ziemna – zbrojenie geosyntetyczne – podłoże gruntowe.

Piśmiennictwo

- [1]. BS 8006 British Standard. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. BSI 2010.
- [2]. DIN 1054 - Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd und Grundbau.
- [3]. Duszyńska A.: Co warto wiedzieć o geosyntetykach. Inżynieria Morska i Geotechnika 2/2010.
- [4]. Duszyńska A, Makasewicz-Dzieciniak M.: Nasyp z geosyntetycznym wzmocnieniem podstawy posadowiony na pionowych elementach nośnych. Inżynieria Morska i Geotechnika 3/2013.
- [5]. Duszyńska A., Szyplski P. Wymiarowanie wzmocnienia geosyntetycznego podstawy nasypu na słabym podłożu. Inżynieria Morska i Geotechnika 2/2012.



- [6]. EBGEO. Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements, Ernst W. & Sohn Verlag, 2011.
- [7]. IBIDiM. Wytyczne wzmocnienia podłoża gruntowego w budownictwie drogowym. Warszawa 2002.
- [8]. PN-EN 1997-1 Projektowanie geotechniczne. Część 1. Zalecenia ogólne.
- [9]. Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych. Dz.U. z 2012 r. poz. 463.
- [10]. Wysokiński L., Kotlicki W. Projektowanie konstrukcji oporowych, stromych skarp i nasypów z gruntu zbrojonego. Seria Instrukcje, Wytyczne, Poradniki ITB nr 429/2007.

Streszczenie: W Polsce brak norm i aktualnych zaleceń dotyczących projektowania konstrukcji ziemnych z zastosowaniem geosyntetyków. W niniejszym artykule przedstawiono zasady projektowania nasypów drogowych ze wzmocnień geosyntetycznych podstawy na słabym podłożu gruntowym – posadowionych bezpośrednio oraz na pionowych elementach nośnych, zgodnie z normą BS 8006:2010 i niemieckimi zaleceniami EBGEO 2010. Szczególną uwagę zwrócono na analizę stateczności ogólnej nasypu.

Stability of road embankment with geosynthetic reinforced base

In Poland there are no national standards and guidelines for the design of earth structures using geosynthetics. Design procedures for geosynthetic reinforcement of embankment base on soft subsoil and GPE system, according to British Standard BS 8006:2010 and German guidelines EBGEO 2010, were presented in this paper. Special attention was paid to the overall stability analysis of the embankment.