

Projektowanie nasypów komunikacyjnych ze zbrojeniem geosyntetycznym podstawy na słabym podłożu gruntowym

Angelika Duszyńska, Paweł Szypulski

W Polsce brak jest norm krajowych dotyczących projektowania konstrukcji ziemnych z zastosowaniem geosyntetyków. Celem niniejszego artykułu jest szczegółowe przeanalizowanie procedur wymiarowania wzmocnień geosyntetycznych podstawy nasypów na słabym podłożu gruntowym, zawartych w brytyjskiej normie BS 8006 i niemieckich wytycznych EBGEO. Jest bardzo prawdopodobne, że w przyszłości omawiane zalecenia zostaną wykorzystane jako baza do stworzenia polskiego załącznika krajowego do Eurokodu 7, dotyczącego projektowania konstrukcji z gruntu zbrojonego geosyntetykami.

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW

data zgłoszenia do redakcji: 29.01.2014

data akceptacji do druku: 06.04.2014



dr inż.
Angelika Duszyńska
Katedra Geotechniki,
Geologii i Budownictwa
Morskiego
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska,
Politechnika Gdańska
adusz@pg.gda.pl,



Mgr inż.
Paweł Szypulski
Katedra Geotechniki,
Geologii i Budownictwa
Morskiego
Wydział Inżynierii
Lądowej i Środowiska,
Politechnika Gdańska

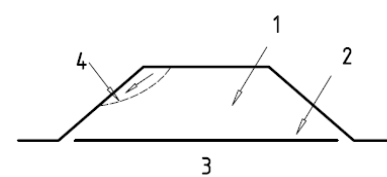
sowaniem wyrobów geosyntetycznych. Dostępne polskie wytyczne opublikowane na początku XXI wieku przez IBDiM [7] i ITB [11] nie są w pełni zgodne z obowiązującymi obecnie normami geotechnicznymi (m.in. PN-EN 1997-1 [9]). Projektanci mogą wspomagać się zaleceniami zagranicznymi dotyczącymi projektowania zbrojonych budowli ziemnych, na przykład brytyjską normą BS 8006:2010 [1] lub niemieckimi wytycznymi EBGEO 2010 [6]. Należy podkreślić, że wymienione zalecenia są zgodne z aktualnie obowiązującymi Eurokodami.

Szczegółowe porównanie obu zaleceń w zakresie projektowania zbrojenia geosyntetycznego podstawy nasypu na słabym podłożu gruntowym, wraz z przykładami obliczeniowymi, przedstawiono w pracy [10].

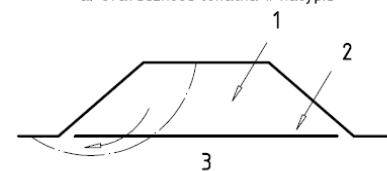
Projektowanie wzmocnienia nasypu zgodnie z normą BS 8006:2010 [1]

Według zaleceń normy brytyjskiej 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:

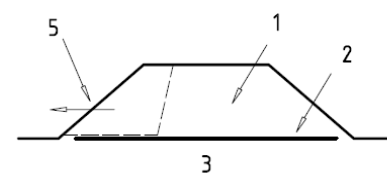
- utrata stateczności lokalnej w nasypie (rys. 1a),
 - utrata stateczności na obrót (rys. 1b),
 - poślizg w nasypie (rys. 1c),
 - wyparcie gruntu spod podstawy nasypu (rys. 1d),
 - utrata stateczności ogólnej (rys. 1e).
- Należy również rozpatryć również następujące stany graniczne użyteczności:
- nadmierne odkształcenie (wydłużenie) zbrojenia (rys. 2a),
 - osiadania nasypu (rys. 2b).



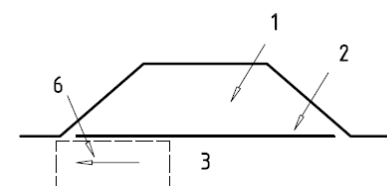
a) Stateczność lokalna w nasypie



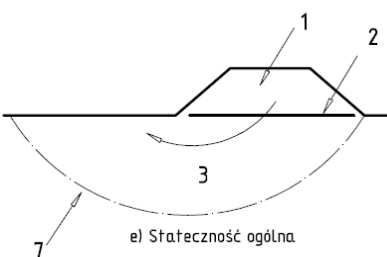
b) Stateczność na obrót



c) Poślizg w nasypie



d) Stateczność na wyparcie gruntu spod podstawy nasypu



e) Stateczność ogólna

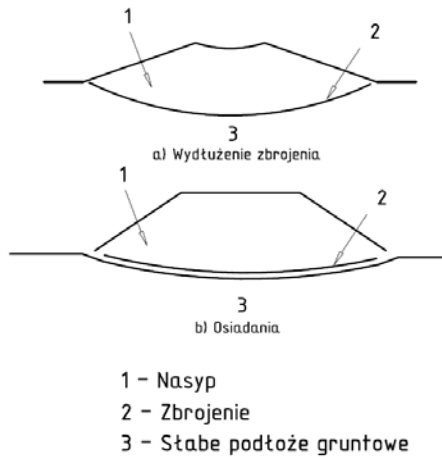
- 1 - Nasyp
- 2 - Zbrojenie
- 3 - Słabe podłoże gruntowe
- 4 - Poślizg w nasypie
- 5 - Poślizg poziomy w nasypie

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

Wstęp

Istnieje wiele sposobów posadawiania obiektów na słabonośnym podłożu gruntowym, począwszy od metod fundamentowania pośredniego (na palach lub kolumnach), przez fundamenty powierzchniowe, a skończywszy na klasycznej wymianie gruntu. Jedną z rozważanych metod zapewnienia stateczności nasypu komunikacyjnego na słabym podłożu jest zastosowanie odpowiednio dobranego zbrojenia geosyntetycznego w podstawie nasypu. Rozwiązanie to jest coraz bardziej popularne ze względów ekonomicznych, związanych z czasem wykonania oraz z zakresem prac budowlanych.

Niestety polscy projektanci napotykają na problemem związany z brakiem odpowiednich krajowych norm w dziedzinie projektowania konstrukcji z zasto-



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

Stateczność lokalna

Według [1], utrata stateczności lokalnej skarp nasypu nie wystąpi, jeżeli zostanie spełniony warunek (1).

$$\frac{H}{L_s} \leq \frac{\tan \varphi_{cv}}{f_{ms}} \quad [-] \quad (1)$$

gdzie:

H - wysokość całkowita nasypu [m],

L_s - długość podstawy skarpy [m],

φ'_{cv} - efektywny kąt tarcia wewnętrznego gruntu nasypu, przy stałej objętości w stanie krytycznym [°],

f_{ms} - częściowy współczynnik bezpieczeństwa stosowany do $\tan \varphi'_{cv}$ [-].

Stateczność na obrót

Według normy brytyjskiej, w analizie stateczności na obrót można stosować efektywne parametry wytrzymałościowe (z uwzględnieniem ciśnienia wody w porach gruntu), jednakże obliczenia w warunkach bez odpływu upraszczają analizę oraz zapewniają bardziej trafne rozwiązanie dla nośności krótkotrwalej.

W celu poprawy stateczności ogólnej nasypu, przyjmuje się zbrojenie podstawy zapewniające dodatkowy moment utrzymujący. Siłę w zbrojeniu T_{roj} , w określonym miejscu 'j' podstawy nasypu, można wyznaczyć z zależności (2).

$$T_{roj} Y_j = M_{RRj} = M_{Dj} - M_{RSj}$$

[kN/mb] (2)

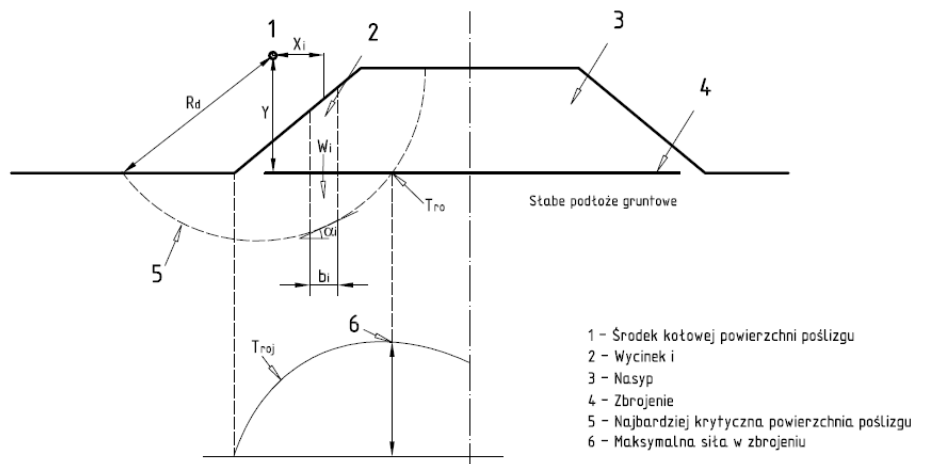
gdzie:

Y_j - pionowe ramie momentu dla krytycznej powierzchni poślizgu w punkcie j [m],

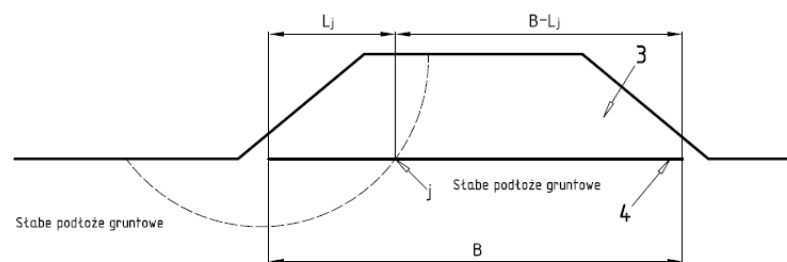
M_{RRj} - moment utrzymujący związany ze zbrojeniem w punkcie j [kN/m/mb],

M_{Dj} - moment destabilizujący w punkcie j [kN/m/mb],

M_{RSj} - moment utrzymujący związany z wytrzymałością gruntu w punkcie j [kN/m/mb],



a) Przypadek zastosowania analizy metody kotowej powierzchni poślizgu w celu określenia maksymalnej siły rozciągającej w zbrojeniu



b) Wymagana długość zakończenia zbrojenia określona przez punkt j na zbrojeniu nasypu

3. Stateczności na obrót, [1]

$$M_D = [\sum (f_{fs} W_i + f_q b_i w_{si}) \sin \alpha_i] R_d \quad [\text{kN/mb}] \quad (3)$$

Moment utrzymujący związany z gruntem:

$$M_{RS} = \sum_{i=1}^n \frac{[\frac{c_i b_i}{f_{ms}} + (f_{fs} W_i + f_q b_i w_{si})(1 - r_u) \frac{\tan \varphi_{cvi}}{f_{ms}}] \sec \alpha_i R_d}{1 + \frac{\tan \varphi_{cvi} \tan \alpha_i}{f_{ms}}} \quad [\text{kN/mb}] \quad (4)$$

Moment utrzymujący związany ze zbrojeniem:

$$M_{RR} = T_{roj} Y \quad [\text{kN/mb}] \quad (5)$$

Moment destabilizujący związany z ciężarem gruntu oraz obciążeniem naziomu:

Wykres wartości siły rozciągającej T_{roj} występującej w zbrojeniu podstawy nasypu przedstawiono na rysunku 3a. Maksymalna potrzebna siła w zbrojeniu T_{ro} występuje w miejscu osiągnięcia przez siłę T_{roj} maksimum.

Zbrojenie powinno osiągnąć odpowiednią więź (przyczepność) z przyległym gruntem, tak by zapewnić wygenerowanie siły T_{roj} . Taka przyczepność powinna wystąpić wzdłuż zbrojenia, zarówno przed jak i za powierzchnią poślizgu (rys. 3b). W części zsuwu (poślizgu), powinien być spełniony warunek (6).

$$f_n f_p T_{roj} \leq \gamma h \frac{a' \tan \varphi'_{cv}}{f_{ms}} L_j + \frac{a' b c_u}{f_{ms}} L_j$$

[kN/mb] (6)

gdzie:

f_n - częściowy współczynnik bezpieczeństwa związany z ekonomicznymi konsekwencjami zniszczenia [-],

f_p - częściowy współczynnik bezpieczeństwa związany z oporem zbrojenia na wyciągnięcie [-],

T_{roj} - siła w zbrojeniu niezbędna do zapewnienia stateczności w punkcie j [kN/mb],

g - ciężar gruntu, z którego formowany jest nasyp [kN/m³],

h - średnia wysokość nasypu nad zbrojeniem na odcinku L_j [m],

a' - współczynnik współpracy grunt/zbrojenie ze względu na $\tan \varphi'_{cv}$ [-],

φ'_{cv} - efektywny kąt tarcia wewnętrznego w gruncie nasypu bez zmiany objętości w stanie krytycznym [°],

f_{ms} - częściowy współczynnik bezpieczeństwa stosowany do $\tan \varphi'_{cv}$ oraz c_u [-],

L_j - potrzebna długość zakotwienia zbrojenia [m],
 a'_{bc} - współczynnik współpracy związany z wzajemnym oddziaływaniem grunt/zbrojenie ze względu na c_u [-],
 c_u - wytrzymałość na ścinanie słabego podłoża gruntowego przyległego do zbrojenia w warunkach bez odpływu [kN/m²].

Poślizg skarpy po powierzchni zbrojenia

Stateczność na poślizg gruntu zasypowego po powierzchni zbrojenia (rys. 1c), należy sprawdzać dla każdej potencjalnej powierzchni poślizgu występującej pomiędzy gruntem zasypowym a górną powierzchnią zbrojenia podstawy nasypu.

Maksymalną siłę rozciągającą w zbrojeniu T_{ds} potrzebną do zrównoważenia parcie gruntu zasypowego (rys. 4) można wyznaczyć z zależności (7).

$$T_d = 0,5 \cdot K_a \cdot H \cdot (f_{fs} \cdot \gamma \cdot H + 2 \cdot f_q \cdot w_s) \quad [kN/mb] \quad (7)$$

gdzie:

K_a - współczynnik parcia czynnego [-],

H - wysokość nasypu [m],

g - ciężar gruntu zasypowego [kN/m³],

w_s - obciążenie użytkowe korony nasypu [kN/m²],

f_{fs} - częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla ciężaru gruntu [-],

f_q - częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla obciążeń zewnętrznych [-].

Minimalna długość zakotwienia zbrojenia w nasypie ze względu na poślizg, L_e powinien spełniać warunek (8).

$$L_e \geq \frac{0,5K_a H (f_{fs} \gamma H + 2f_q w_s) f_{fs} f_n}{\gamma h \frac{a' \tan \phi'_{cv}}{f_{ms}}} \quad [m] \quad (8)$$

gdzie:

f_{fs} - częściowy współczynnik bezpieczeństwa ze względu na poślizg po powierzchni zbrojenia [-],

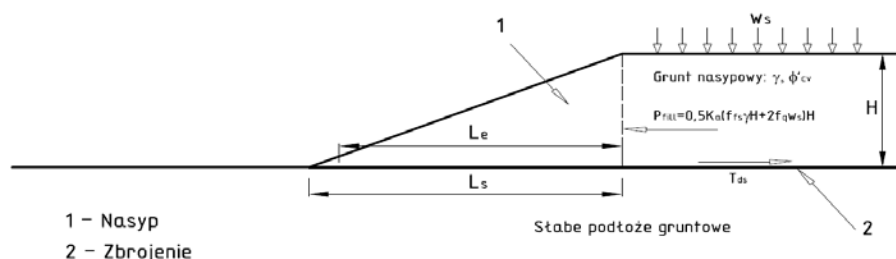
h - średnia wysokość nasypu nad zbrojeniem na długości L_e [m],

$f_{rt}, a', \phi'_{cv}, f_{ms}$ - j.w.

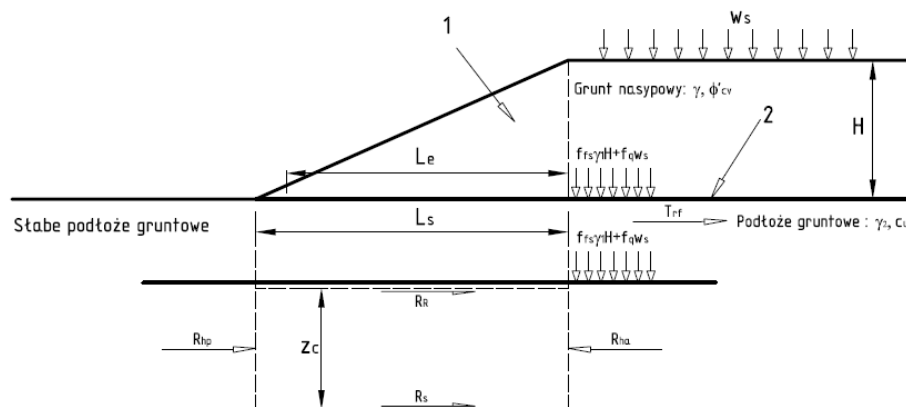
Wyparcie gruntu spod podstawy

Aby zapobiec wystąpieniu wyparcia podłoża gruntowego spod nasypu (rys. 5), przemieszczenie podłoża poza obręb nasypu powinno zostać ograniczone przez opory tarcia (boczne „skrępowanie”) na wystarczająco dużej powierzchni spodniej strony zbrojenia. Powinny zostać spełnione dwa warunki:

- wytrzymałość na ścinanie na dolnej powierzchni zbrojenia powinna być wy-



4. Stateczność na poślizg gruntu nasypu po powierzchni zbrojenia, [1]



5. Analiza wyparcia gruntu spod podstawy nasypu, [1]

starczająca by przeciwdziałać bocznym obciążeniom wywołanym w podłożu gruntowym;

- zbrojenie podstawy powinno mieć wystarczającą wytrzymałość na rozciąganie aby przenieść obciążenia rozciągające wywołane przez naprężenia ścinające przekazywane z podłoża gruntowego.

Aby zapobiec wyparciu podłoża (rys. 5a) powinien być spełniony warunek (9).

$$R_{ha} \leq R_{hp} + R_s + R_R \quad [kN/mb] \quad (9)$$

gdzie:

R_{na} - siła pozioma powodująca wyparcie podłoża [kN/mb],

R_{hp} - siła pozioma związana z odporem gruntu w podłożu [kN/mb],

R_s - siła pozioma związana z wytrzymałością podłoża gruntowego na ścinanie na głębokości z_c [kN/mb],

R_R - siła pozioma związana z wytrzymałością podłoża gruntowego na ścinanie na dolnej powierzchni zbrojenia [kN/mb].

W celu wyznaczenia minimalnej długości podstawy skarpy L_s potrzebnej do przeciwdziałania wyparciu należy przeprowadzić obliczenia dla różnych wartości miąższości słabego podłoża z_c . Zakłada się maksymalną głębokość z_c równą podwojonej wysokości nasypu.

W analizie wykorzystuje się parametry gruntowe w warunkach bez odpływu. Jeżeli słaba warstwa w podłożu gruntowym ma ograniczoną miąższość, a wartość wy-

trzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu nie zmienia się wraz z głębokością, minimalną potrzebną długość podstawy skarpy L_s , można wyznaczyć z warunku (10).

$$L_s \geq \frac{(f_{fs} \gamma_1 H + f_q w_s - \frac{4c_u}{(1+a'_{bc})}) z_c}{f_{ms}} \quad [m] \quad (10)$$

gdzie:

f_{fs} - częściowy współczynnik bezpieczeństwa ciężaru gruntu [-],

f_q - częściowy współczynnik bezpieczeństwa obciążeń zewnętrznych [-],

g - ciężar gruntu zasypowego [kN/m³],

H - maksymalna wysokość nasypu [m],

w_s - obciążenie użytkowe korony nasypu [kN/m²],

c_u - wytrzymałość na ścinanie słabego podłoża gruntowego w warunkach bez odpływu [kN/m²],

f_{ms} - częściowy współczynnik bezpieczeństwa stosowany do c_u [-],

z_c - miąższość słabego podłoża gruntowego [m],

a'_{bc} - współczynnik współpracy grunt/zbrojenie ze względu na c_u [-].

Nieco inna zależność występuje dla podłoża gruntowego, którego wytrzymałość na ścinanie rośnie liniowo wraz z głębokością, gdy minimalny współczynnik bezpieczeństwa jest powiązany z krytyczną głębokością z_c .

Siłę rozciągającą T_{rf} wywołaną w zbrojeniu podstawy związaną z naprężeniami ścinającymi można określić z wzoru (11).

$$T_{rf} = \frac{a'bc_{uo}L_e}{f_{ms}} \quad [\text{kN}/\text{mb}] \quad (11)$$

gdzie:

L_e - wymagana długość zakotwienia zbrojenia [m], (rys. 5),

c_{uo} - wytrzymałość na ścinanie podłoża gruntowego w warunkach bez odpływu na spodniej stronie zbrojenia [kN/m^2],

f_{ms} - częściowy współczynnik bezpieczeństwa stosowany do c_u [-].

Stateczność ogólna

Dla nasypów posadowionych na warstwie słabego gruntu o dużej miąższości, należy przeanalizować stateczność ogólną, w celu sprawdzenia czy nie wystąpią głębokie powierzchnie poślizgu i poślizg całego masywu.

Stateczność wzdłuż nasypu

Podczas budowy różnice w wysokości nasypu na jego długości powinny być ograniczone do minimum. Wskazane jest wykonanie zbrojenia podstawy, w taki sposób aby zapewnić odpowiedni stopień stateczności w kierunku wzdłużnym, i na krańcach nasypu. Potrzebna siła w zbrojeniu powinna zostać określona według procedur opisanych powyżej, biorąc pod uwagę możliwe różnice wysokości nasypu podczas budowy.

Dopuszczalne odkształcenia zbrojenia

Odkształcenia zbrojenia nie powinny przekroczyć zdefiniowanych wartości wynikających z warunków stanu granicznego użyteczności (rys. 2). Jako podstawowe kryterium przyjmuje się, że maksymalne odkształcenie e_{max} w zbrojeniu podstawy nie powinno przekraczać 5 % dla zastosowania krótkoterminowego oraz od 5 do 10 % dla zastosowań długoterminowych.

Maksymalna siła rozciągająca w zbrojeniu

Wynikowa maksymalna siła rozciągająca T_r na którą wymiaruje się zbrojenie, powinna być większa od:

- maksymalnej siły rozciągającej potrzebnej do zapewnienia stateczności na obrót T_{rd} lub
- sumy maksymalnej siły rozciągającej potrzebnej do zapewnienia stateczności na poślizg w nasypie T_{ds} i maksymalnej siły rozciągającej potrzebnej do zapewnienia stateczności ze względu na wyparcie gruntu spod podstawy nasypu T_{rp} czyli: $T_r = T_{ro}$ lub $T_r = T_{ds} + T_{rp}$ - większa wartość jest decydująca.

Dodatkowo, w celu spełnienia warunku stanu granicznej nośności związanego z zerwaniem zbrojenia, powinien być spełniony warunek (12).

$$\frac{T_D}{f_n} > T_r \quad [\text{kN}/\text{mb}] \quad (12)$$

gdzie:

T_D - projektowa wartość wytrzymałości zbrojenia [kN/mb],

f_n - częściowy współczynnik bezpieczeństwa związany z ekonomicznymi konsekwencjami wystąpienia zniszczenia [-].

Projektowa wytrzymałość zbrojenia geosyntetycznego

W celu określenia projektowej wytrzymałości zbrojenia dla stanu granicznej nośności T_D należy zredukować wartość charakterystyczną zbrojenia T_B według wzoru (13).

$$T_D = \frac{T_B}{f_m} \quad [\text{kN}/\text{mb}] \quad (13)$$

W stanie granicznym nośności, wytrzymałość T_B przyjmuje się równą wytrzymałości na zerwanie w wyniku pełzania w określonym czasie oraz temperaturze T_{CR} według wzoru (14).

$$T_B = T_{CR} = \frac{T_{char}}{RF_{CR}} \quad [\text{kN}/\text{mb}] \quad (14)$$

gdzie:

T_{char} - charakterystyczna krótkoterminowa wytrzymałość [kN/mb],

RF_{CR} - współczynnik redukcyjny uwzględniający pełzanie [-].

W stanie granicznym użyteczności, wytrzymałość T_B przyjmuje się równą wytrzymałości T_{CS} ; jest to maksymalne obciążenie rozciągające w zbrojeniu, które nie wywołuje w okresie użytkowania przekroczenia odkształceń określonych warunkami stanu granicznego użyteczności konstrukcji.

Projektową wartość wytrzymałości zbrojenia dla stanu granicznego użyteczności oblicza się według wzoru (15).

$$T_D = \frac{T_{CS}}{f_m} \quad [\text{kN}/\text{mb}] \quad (15)$$

Wszystkie częściowe współczynniki redukcyjne oraz globalny współczynnik bezpieczeństwa powinny być określone zgodnie z metodami przedstawionymi w PD ISO/TR 20432 [8].

$$f_m = RF_{ID} \cdot RF_W \cdot RF_{CH} \cdot f_s \quad [-] \quad (16)$$

gdzie:

f_m - materiałowy współczynnik bezpieczeństwa [-],

RF_{ID} - współczynnik redukcyjny uwzględniający uszkodzenia podczas wbudowywania [-],

RF_W - współczynnik redukcyjny uwzględniający starzenie się w warunkach atmosferycznych [-],

RF_{CH} - współczynnik redukcyjny uwzględniający oddziaływania chemiczne [-],

f_s - współczynnik bezpieczeństwa uwzględniający ekstrapolację danych [-].

Projektowanie wzmocnienia nasypu według zaleceń EBGeo 2010 [6]

Analiza stateczności

Zgodnie z niemieckimi zaleceniami EBGeo, podczas projektowania konstrukcji nasypu na słabym podłożu należy sprawdzić stateczność wzdłuż różnych potencjalnych powierzchni poślizgu, które:

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

Obliczenia należy wykonać dla stanu: początkowego, końcowego oraz kolejnych etapów wznoszenia nasypu.

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

- projektowa (obliczeniowa) wytrzymałość zbrojenia $R_{B,d}$ (stan graniczny STR),
- projektowa (obliczeniowa) wartość oporu zbrojenia na wyciąganie z gruntu zasypowego z lewej ($R_{AL,d}$) lub z prawej ($R_{AR,d}$) strony od rozpatrywanej linii poślizgu (stan graniczny GEO),
- projektowa (obliczeniowa) wartość oporu tarcia na górnej powierzchni geosyntetyku $R_{O,d}$ na prawo od rozpatrywanej linii poślizgu (stan graniczny STR).

Konstrukcję uznajemy za bezpieczną ze względu na możliwość utraty stateczności ogólnej, jeżeli spełniony jest warunek (17), dla wszystkich potencjalnych powierzchni zniszczenia z uwzględnieniem oddziaływań utrzymujących i destabilizujących:

$$E_d \leq R_d + \min(R_{B,d}; R_{AL,d}; R_{AR,d}; R_{O,d}) \quad [\text{kN}/\text{mb}] \quad (17)$$

Analizę stateczności ogólnej wzdłuż kołowych powierzchni poślizgu zaleca się przeprowadzać zgodnie z DIN 4084 dla stanu granicznej nośności podłoża (GEO). W przypadku strukturalnie i/lub geologicznie zdefiniowanej powierzchni poślizgu (np. głębiej zlokalizowanych cienkich warstw z bardzo małą wytrzymałością na ścinanie), stateczność należy analizować stosując łamane powierzchnie zniszczenia.

Analiza stateczności na poślizg

W analizie stateczności na poślizg powierzchni styku pomiędzy geosyntetykiem a nasypem i podłożem stanowią uprzywilejowane powierzchnie zniszczenia (rysunek 6). Stateczność na poślizg jest zachowana, je-

żeli spełnione są warunki (18) i (19).

$$E_{ah,d} \leq R_{O,d} \quad [\text{kN/mb}] \quad (18)$$

$$E_{ah,d} \leq R_{U,d} + \min(R_{B,d}; R_{A,d}) \quad [\text{kN/mb}] \quad (19)$$

gdzie:

$E_{ah,d}$ - obliczeniowa wartość składowej po-

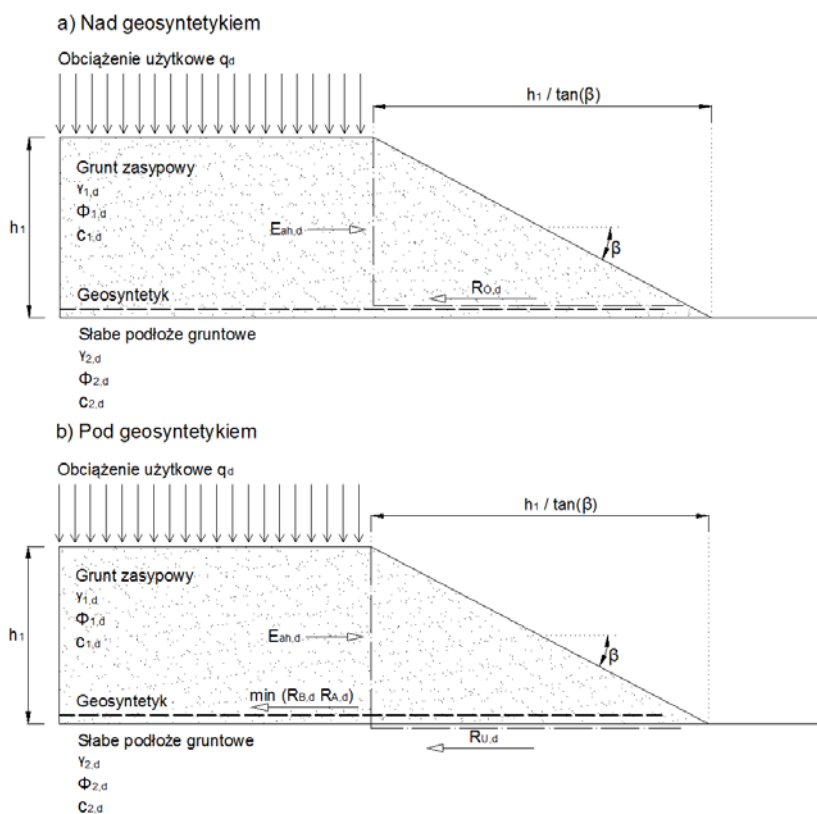
ziomej parcia czynnego [kN/mb],

$R_{O,d}$ - obliczeniowa wartość oporu tarcia pomiędzy gruntem zasypowym a górną powierzchnią geosyntetyku [kN/mb],

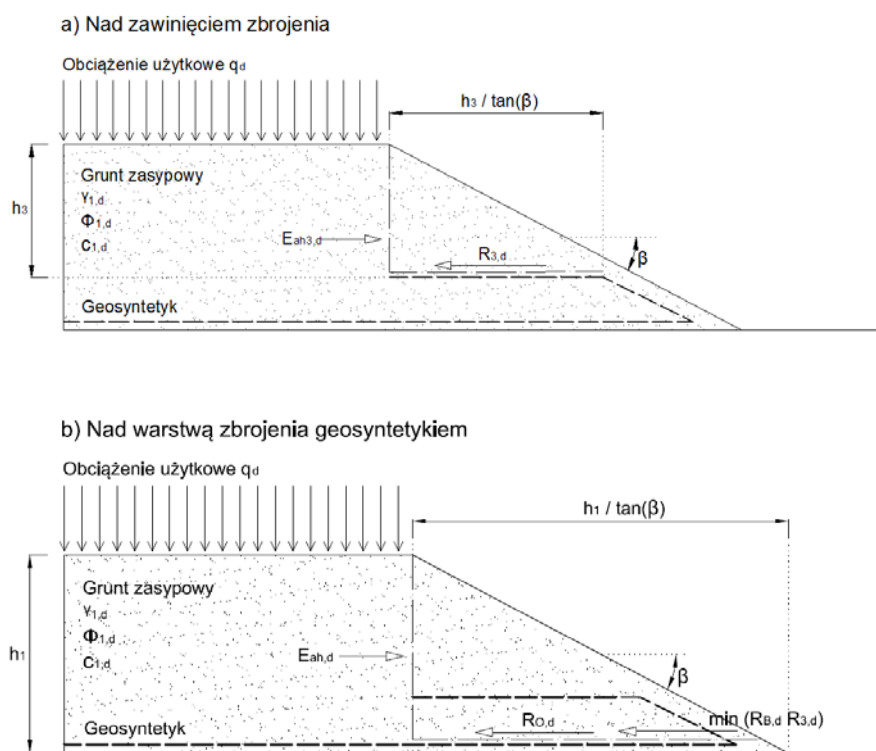
$R_{U,d}$ - obliczeniowa wartość oporu tarcia pomiędzy dolną powierzchnią geosyntetyku a podłożem [kN/mb],

$R_{B,d}$ - obliczeniowa wytrzymałość zbrojenia (STR) [kN/mb],

$R_{A,d}$ - obliczeniowa wartość oporu na wyciągnięcie zbrojenia z gruntu (GEO) [kN/mb].



6. Analiza stateczności na poślizg nasypu, [6]



7. Analiza stateczności na poślizg nasypu z zastosowaniem zawinięcia zbrojenia, [6]

W przypadku gdy opór tarcia $R_{O,d}$ jest niewystarczający, stateczność na poślizg można zwiększyć przez „zawinięcie” warstwy zbrojenia geosyntetycznego w nasypie. W takim przypadku, należy sprawdzić stateczność na przesuw części nasypu znajdującej się powyżej wywinęcia zbrojenia (rys. 7a), jak również nad warstwą zbrojenia zasadniczego (rys. 7b). Oprócz warunku (19) powinny być spełnione również warunki (20) i (21).

$$E_{ah3,d} \leq R_{3,d} \quad [\text{kN/mb}] \quad (20)$$

$$E_{ah,d} \leq R_{O,d} + \min(R_{3,d}; R_{B,d}) \quad [\text{kN/mb}] \quad (21)$$

gdzie:

$E_{ah,d}$ - obliczeniowa wartość składowej poziomej parcia czynnego gruntu dla nasypu o wysokości h_1 [kN/mb],

$E_{ah3,d}$ - obliczeniowa wartość składowej poziomej parcia czynnego gruntu dla wysokości h_3 równej różnicy wysokości całkowitej oraz miąższości „zawinięcia” [kN/mb],

$R_{3,d}$ - obliczeniowa wartość oporu tarcia między materiałem zasypowym a górną powierzchnią geosyntetyku dla długości $h_3 / \tan \beta$ [kN/mb],

$R_{O,d}, R_{B,d}$ - j.w.

Oddziaływania

Parcie od ciężaru gruntu i obciążeń użytkowych korony nasypu wyznacza się zgodnie z EC7, stosując odpowiednie częściowe współczynniki bezpieczeństwa do oddziaływań w stanie granicznym GEO.

Opory

Projektową (obliczeniową) wartość oporu tarcia między zasypem a geosyntetykiem $R_{O,d}$ określa się ze wzoru (22).

$$R_{O,d} = 0,5 \cdot \gamma_{1,d} \cdot \left(\frac{h_1}{\tan \beta} \right) \cdot h_1 \cdot f_{1g,d}$$

[kN/mb] (22)

gdzie:

β - kąt nachylenia skarpy (rys. 7) [°],

h_1 - całkowita wysokość nasypu [m],

$\gamma_{1,d}$ - obliczeniowa wartość ciężaru objętościowego gruntu zasypowego ($\gamma_{1,d} = \gamma_{1,k}$) [kN/m³].

$f_{1g,d}$ - charakterystyczna wartość współczynnika tarcia między gruntem zasypowym a geosyntetykiem ($\tan\phi_d = \tan\phi_k / \gamma_\phi$) [-].

Projektową wartość siły tarcia na górnej powierzchni geosyntetyku w przypadku 'zawinięcia'

$R_{3,d}$ wyznacza się analogicznie (wzór (22)) uwzględniając wysokość h_3 (rys. 7a).

Przy określaniu wytrzymałości na ścinanie między geosyntetykiem a podłożem gruntowym należy rozróżnić dwa stany: początkowy i końcowy.

W stanie początkowym:

$$R_{U,d} = c_{u2,d} \cdot \frac{h_1}{\tan\beta} \quad [\text{kN/mb}] \quad (23)$$

W stanie końcowym:

$$R_{U,d} = c_{2,d} \cdot \frac{h_1}{\tan\beta} + 0,5 \cdot \gamma_{1,d} \cdot \frac{h_1}{\tan\beta} \cdot h_1 \cdot f_{2g,d} \quad [\text{kN/mb}] \quad (24)$$

gdzie:

$c_{u2,d}$ - obliczeniowa wartość wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu ($c_{u2,d} = c_{u2,k} / \gamma_{cu}$) [kN/m²],

$c'_{2,d}$ - obliczeniowa wartość wytrzymałości na ścinanie w warunkach z odpływem ($c'_{2,d} = c'_{2,k} / \gamma_c$) [kN/m²],

$f_{2g,d}$ - obliczeniowa wartość współczynnika tarcia pomiędzy geosyntetykiem a gruntem w podłożu ($\tan\phi_d = \tan\phi_k / \gamma_\phi$) [-].

$\beta, h_1, \gamma_{1,d}$ - j.w.

Charakterystyczna wartość oporu na wyciąganie zbrojenia zależy od naprężenia ścinającego w gruncie, zmobilizowanego na powierzchni zbrojenia, według wzoru (25).

$$R_{A,k} = \sigma_{yk} \cdot L_A \cdot f_{2g,k} \cdot n \quad [\text{kN/mb}] \quad (25)$$

gdzie:

n - liczba powierzchni tarcia [-],

σ_{yk} - charakterystyczna wartość składowej normalnej naprężenia [kN],

L_A - długość zakotwienia zbrojenia poza powierzchnią zniszczenia [m],

$f_{sg,k}$ - charakterystyczna wartość współczynnika tarcia między gruntem zasypowym a zbrojeniem; dobór tego współczynnika opisano szczegółowo w [5], [6] i [10] [-].

Projektową (obliczeniową) wartość oporu na wyciąganie zbrojenia w stanie granicznym podłoża (GEO) $R_{A,d}$ określa się ze wzoru (26).

$$R_{A,d} = \frac{R_{A,k}}{\gamma_B} \quad [\text{kN/mb}] \quad (26)$$

gdzie:

$R_{A,k}$ - charakterystyczna wartość oporu na wyciąganie zbrojenia [kN/mb],

γ_B - częściowy współczynnik bezpieczeństwa

stwa ze względu na opór zbrojenia odkształcalnego na wyciąganie (wg DIN 1054) [-].

Projektową wartość oporu na wyciąganie zbrojenia w stanie granicznym konstrukcji (STR) $R_{A,d}$ określa się ze wzoru (27).

$$R_{A,d} = \frac{R_{A,k}}{\gamma_G} \quad [\text{kN/mb}] \quad (27)$$

gdzie:

γ_{GL} - częściowy współczynnik bezpieczeństwa ze względu na wytrzymałość na poślizg (wg DIN 1054) [-].

Wytrzymałość geosyntetyku wyznacza się ją na podstawie krzywej obciążenie-odkształcenie z badań geosyntetyku na rozciąganie.

Charakterystyczną wartość wytrzymałości długoterminowej $R_{B,k}$ oblicza się ze wzoru (28).

$$R_{B,k} = \frac{R_{B,k0}}{(A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5)} \quad [\text{kN/mb}] \quad (28)$$

gdzie:

$R_{B,k0}$ - charakterystyczna wartość wytrzymałości krótkoterminowej geosyntetyku na rozciąganie [kN/mb],

A_1 - współczynnik redukcyjny uwzględniający odkształcenie podczas pelzania oraz zniszczenie przy pelzaniu [-],

A_2 - współczynnik redukcyjny uwzględniający uszkodzenia geosyntetyku podczas transportu, układania oraz zagęszczania gruntu [-],

A_3 - współczynnik redukcyjny uwzględniający wpływ połączeń [-],

A_4 - współczynnik redukcyjny uwzględniający wpływ środowiska [-],

A_5 - współczynnik redukcyjny uwzględniający oddziaływania dynamiczne [-].

Projektową wartość wytrzymałości długoterminowej $R_{B,d}$ oblicza się ze wzoru (29).

$$R_{B,d} = \frac{R_{B,k}}{\gamma_M} \quad [\text{kN/mb}] \quad (29)$$

gdzie:

$R_{B,k}$ - charakterystyczna wartość wytrzymałości długoterminowej geosyntetyku [kN/mb],

γ_M - częściowy współczynnik bezpieczeństwa materiałowego dla konstrukcji z gruntu zbrojonego elementami odkształcalnymi [-].

Analiza stateczności ze względu na wyparcie

Zjawisko wyparcia gruntu może wystąpić w przypadku nienośnego podłoża o ograniczonej miąższości, w trakcie wykonywania konstrukcji nasypu, w szczególności w stanie początkowym kiedy grunt jest bardzo słaby (rys. 8). Wymaga to analizy stanu granicznego podłoża (GEO). Uwzględniając wytrzymałość gruntu na ścinanie w warunkach bez odpływu, należy wziąć pod uwagę oddziaływania na bryłę gruntu wynikające z możliwości przechylenia się nasypu (wzór (30)).

$$E_{ah4,d} = \gamma_G \cdot (\gamma_{1,k} \cdot h_1 \cdot h_4 + 0,5 \cdot \gamma_{2,k} \cdot h_4^2 - 2 \cdot c_{u2,k} \cdot h_4) \quad [\text{kN/mb}] \quad (30)$$

gdzie:

$E_{ah4,d}$ - obliczeniowa wartość parcia gruntu, określona na podstawie wytrzymałości gruntu na ścinanie w warunkach bez odpływu [kN/mb],

h_1 - całkowita wysokość nasypu [m],

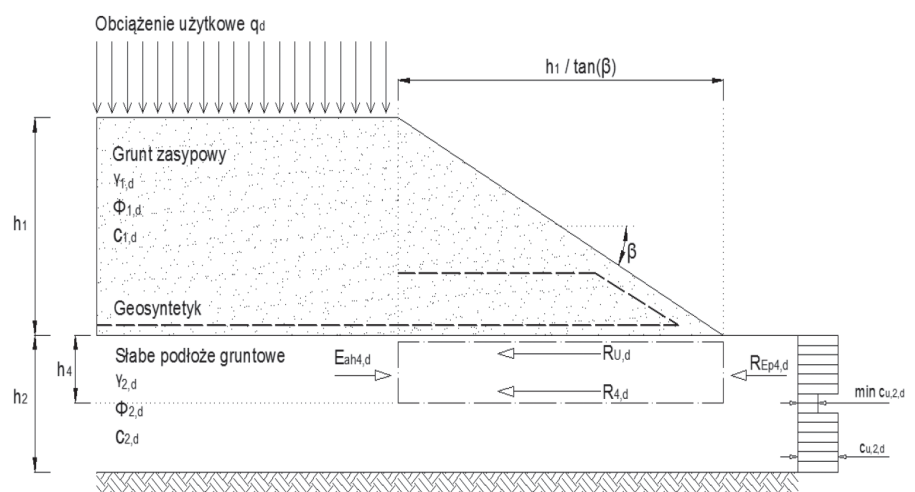
h_4 - wysokość rozpatrywanej bryły wypieranego gruntu ($h_4 < h_2$), (w podłożu jednorodnym wysokość h_4 równa jest h_2) [m],

$\gamma_{1,k}$ - charakterystyczna wartość ciężaru objętościowego gruntu zasypowego [kN/m³],

$\gamma_{2,k}$ - charakterystyczna wartość ciężaru objętościowego podłoża gruntowego [kN/m³],

$c_{u2,k}$ - charakterystyczna wartość wytrzymałości podłoża na ścinanie w warunkach bez odpływu [kN/m²],

γ_G - częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla stałych oddziaływań w stanie gra-



8. Wyparcie gruntu spod podstawy, [6]

nicznym podłoża (GEO) [-].

W analizie należy uwzględnić poniższe oddziaływania utrzymujące (opory) (rys. 8):

- odpór gruntu na wypieraną bryłę (w warunkach bez odpływu) (wzór (31));

$$R_{Ep4,d} = 0,5 \cdot \gamma_{2d} \cdot h_4^2 + 2 \cdot c_{u2,d} \cdot h_4$$

[kN/mb] (31)

- charakterystyczną wartość oporu tarcia na dolnej powierzchni geosyntetyku $R_{U,d}$ (wzory (23) i (24));
- charakterystyczną wartość oporu tarcia w podłożu na dolnej powierzchni bryły wypieranego gruntu (wzór (32)).

$$R_{4,d} = c_{u2,d} \cdot L = c_{u2,d} \cdot \frac{h_1}{\tan\beta}$$

[kN/mb] (32)

gdzie:

β - kąt nachylenia skarpy nasypu [°],

h_1 - całkowita wysokość nasypu [m],

h_4 - wysokość rozpatrywanej bryły wypieranego gruntu ($h_4 < h_2$) [m],

$\gamma_{1,d}$ - obliczeniowa wartość ciężaru objętościowego gruntu zasypowego ($\gamma_{1,d} = \gamma_{1,k}$) [kN/m³],

$\gamma_{2,d}$ - obliczeniowa wartość ciężaru objętościowego gruntu w podłożu ($\gamma_{2,d} = \gamma_{2,k}$) [kN/m³],

$c_{u2,d}$ - obliczeniowa wartość wytrzymałości na ścinanie gruntu w podłożu w warunkach bez odpływu ($c_{u2,d} = c_{u2,k} / \gamma_{cu}$) [kN/m²].

Warunki stateczności na wyparcie gruntu dane są nierównościami (33) i (34).

$$E_{ah4,d} \leq R_{Ep4,d} + R_{U,d} + R_{4,d}$$

[kN/mb] (33)

$$R_{U,d} \leq \min(R_{B,d}; R_{A,d})$$

[kN/mb] (34)

Analiza nośności granicznej podłoża

Według zaleceń EBGeo w przypadku nasypów posadowionych na gruncie o małej wytrzymałością na ścinanie, nośność podłoża według normy DIN 4017 powinna zawsze być analizowana z uwzględnieniem zaleceń norm DIN 1054 i DIN 4084. Zwykle decydującym jest warunek analizy stateczności ogólnej, a nie nośność podłoża gruntowego.

Porównanie zaleceń

Porównując szczegółowo zapisy normy BS 8006 i wytycznych EBGeo, w zakresie projektowania zbrojenia geosyntetycznego podstawy nasypu na słabym podłożu gruntowym (patrz [10]), główna różnica między zaleceniami ujawnia się podczas doboru zbrojenia, a dokładnie: sposobu oszacowania maksymalnej wartości siły rozciągającej w zbrojeniu. W BS 8006 jest to: $T_r = T_{ro}$ lub $T_r = T_{ds} + T_{rf}$, gdzie większa wartość jest decydują-

ca. Zapis ten uwzględnia najniekorzystniejszy przypadek czyli wystąpienie obu mechanizmów utraty stateczności jednocześnie. Natomiast w wytycznych niemieckich decydującą wartością siły rozciągającej w zbrojeniu jest maksymalna wartość otrzymana w wyniku przeprowadzenia analizy poszczególnych stanów granicznych.

Kolejne różnice pojawiają się przy określeniu wartości przyczepności zbrojenia. Wytyczne niemieckie zalecają przyjmowanie współczynnika tarcia o wartości $0,5 \tan(\varphi')$ (jako wartość minimalną) [6] natomiast angielskie $a' \tan(\varphi'_c)$ [1], gdzie wartość a' nie została dokładnie sprecyzowana. Wiadomo jednak, że należy przyjąć wartość mniejszą bądź równą jedności. W tym przypadku, norma angielska pozostawia dowolność wyboru wartości projektantowi, który w zależności od rodzaju wyrobu i dostępnych danych może przyjąć odpowiednią wartość współczynnika.

Pewnym mankamentem wytycznych angielskich jest brak wzorów do obliczeń w przypadku rozważania warunków z odpływem. Może wynikać to z faktu, iż ideą wzmocnienia podstawy nasypów posadowianych na słabym podłożu gruntowym jest zapewnienie stateczności konstrukcji głównie na czas konsolidacji podłoża.

Stateczność lokalna

Analiza stateczności lokalnej polega na sprawdzeniu czy nachylenie skarpy jest mniejsze od wartości tangensa kąta tarcia wewnętrznego gruntu, z którego formowany jest nasyp. Wymóg analizy stateczności lokalnej obecny jest w zaleceniach angielskich BS 8006:2010 (wzór (1)), natomiast w wytycznych niemieckich EBGeo warunek ten nie jest wyraźnie sformułowany. Jednakże, w paragrafie dotyczącym analizy stateczności, zapisano, iż ważne jest aby sprawdzić stateczność wzdłuż wszelkich krytycznych powierzchni zniszczenia, również tych zlokalizowanych wewnątrz nasypu i nie przecinających warstw zbrojenia.

Stateczność na obrót

W wytycznych angielskich BS 8006:2010 zaleca się przeanalizowanie stateczności na obrót oraz stateczności ogólnej (rys. 1b i e). Różnica polega na zasięgu kołowej powierzchni poślizgu, wzdłuż których dochodzi do utraty stateczności. W pierwszym przypadku (obróć) powierzchnia przechodzi przez konstrukcję nasypu oraz podłoże gruntowe. W warunku stateczności ogólnej zakłada się, że konstrukcja nasypu zachowuje się jak monolit, który w całości ześlizguje

się po powierzchni zniszczenia przechodzącej w podłożu gruntowym. Taki rozdział stateczności wydaje się zbędny. Wiadomo, że należy rozpatrywać wszystkie potencjalne powierzchnie poślizgu w ramach sprawdzenia warunków stateczności ogólnej, tak jak jest to praktykowane w zaleceniach niemieckich. Dodatkowo w wytycznych EBGeo podano sposób sprawdzenia stateczności globalnej dla złożonych mechanizmów zniszczenia - wzdłuż powierzchni łamanej, w przypadku strukturalnie i/lub geologicznie zdefiniowanej powierzchni poślizgu.

Stateczność na poślizg

Główną różnicą w analizie stateczności na poślizg nasypu posadowionego na słabym podłożu gruntowym jest brak w normie angielskiej konieczności sprawdzenia możliwości wystąpienia poślizgu na dolnej powierzchni zbrojenia. Ma to uzasadnienie praktyczne, ponieważ aby mogło dojść do wystąpienia takiego mechanizmu, zbrojenie musiałoby najpierw ulec przerwaniu.

Również w przypadku analizowania poślizgu na górnej powierzchni zbrojenia zauważalne są różnice między wytycznymi. Dotyczą one sposobu określania siły utrzymujących. Według normy angielskiej siła w zbrojeniu jest równa co do wartości sile wynikającej z parcia czynnego od gruntu zasypowego (i obciążenia użytkowego), na bazie którego określa się długość zakotwienia zbrojenia, niezbędną do wygenerowania tarcia, które przeniesie siłę od parcia na zbrojenie (wzór (7)).

W zaleceniach niemieckich oddziaływaniem utrzymującym są również opory tarcia. Jednakże, w przypadku sprawdzania poślizgu bezpośrednio pod zbrojeniem (w płaszczyźnie: dolna powierzchnia geosyntetyku - podłoże) pod uwagę bierze się sumę siły tarcia na dolnej powierzchni zbrojenia i siły dodatkowej od zbrojenia (wytrzymałości na rozciąganie zbrojenia lub opór zbrojenia na wyciąganie, decyduje mniejsza wartość). Jednak jeżeli siła tarcia jest większa od oddziaływania destabilizującego (parcia czynnego) siły dodatkowe są pomijane przy doborze geosyntetyku jako zbrojenia. Jeżeli siła tarcia na powierzchni zbrojenia R_{Od} jest większa bądź równa parciu czynnemu, to generowana siła rozciągająca w geosyntetyku ma wartość równą parciu czynnemu, tak jak to zapisano w BS 8006:2010.

Wyparcie gruntu w podstawie

W analizie wyparcia (wyciśnięcia) bryły gruntu słabego podłoża spod podstawy nasypu zauważalne są pewne niejasności dotyczą-

ce dokładnego określania siły w zbrojeniu, zarówno $R_{U,d}$ (EBGEO, wzory: (23),(24)) jak i T_{rf} (BS 8006, wzór (11)). W obu zaleceniach warunek równowagi bryły został zapisany podobnie:

$$\text{EBGEO(33): } E_{ah4,d} \leq R_{Ep4,d} + R_{U,d} + R_{4,d}$$

$$\text{BS 8006 (9): } R_{ha} \leq R_{hp} + R_S + R_R$$

gdzie:

$E_{ah4,d}$ i R_{ha} odnoszą się do parcia na bryłę gruntu,

$R_{Ep4,d}$ i R_{hp} określają odpór za bryłą wypieranego gruntu,

$R_{4,d}$ i R_S związane są z siłą tarcia na dolnej powierzchni gruntu,

$R_{U,d}$ i R_R (ma bezpośredni wpływ na T_{rf}) związane są z siłą tarcia na powierzchni styku geosyntetyku z bryłą wypieranego gruntu.

Należy jednak rozważyć, czy zostaną wygenerowane maksymalne wartości wszystkich sił utrzymujących, czy też każda z nich ma w bilansie równowagi jakiś procentowy udział. Warto, przeanalizować sposób obliczania wartości sił $R_{U,d}$ i R_R z zależności:

$$\text{EBGEO: } E_{ah4,d} - (R_{Ep4,d} + R_{4,d}) \leq R_{U,d}$$

$$\text{BS 8006: } R_{ha} - (R_{hp} + R_S) \leq R_R$$

Powyższe wzory pozwalają na znaczne zmniejszenie wartości sił rozciągających, ze względu na które dobierany jest geosyntetyk zbrojący. Związane jest to z warunkiem równowagi sił działających na bryłę wypieranego gruntu oraz poprawnym określeniem siły $R_{U,d}$ (EBGEO) jak i T_{rf} (BS 8006) z bilansu tych sił.

Analizując różnice między zaleceniami niemieckimi i angielskimi, w procedurach obliczeniowych stateczności nasypu na wyparcie, główna z nich dotyczy uwzględnianej w obliczeniach miąższości słabego podłoża gruntowego. W wytycznych EBGEO nie podano szczególnych ograniczeń dotyczących miąższości. Jedyną dodatkową informacją dotyczy przewarstwień o niższej wytrzymałości na ścinanie, które rozpoznano w badaniach polowych. W przypadku podłoża jednorodnego, miąższość słabej strefy w gruncie należy przyjmować do spągu warstwy słabej zalegającej w podłożu gruntowym. Natomiast w normie BS 8006, ograniczono miąższość warstwy słabej do podwójnej wysokości nasypu, w przypadku gdy wytrzymałości na ścinanie nie zmienia się wraz z głębokością. W przypadku liniowego wzrostu wytrzymałości na ścinanie wraz z głębokością, głębokość krytyczną określa się z odpowiedniej zależności [1].

Nośność podłoża

Według zaleceń EBGEO nośność podłoża powinna być obliczana wg norm

DIN 4017 i DIN 1054 (dotyczącej nasypów posadowionych na gruncie o słabej wytrzymałości na ścinanie). Nasyp jest traktowany jako kwazi-monolit, a sprawdzenie nośności powinno zostać przeprowadzone, w szczególności kiedy słaby grunt ma małą miąższość. Jednakże warunkiem krytycznym zwykle jest analiza globalnego zniszczenia a nie nośność podłoża.

W wytycznych BS 8006:2010 nie ma żadnej informacji na temat sposobu obliczania nośności podłoża gruntowego. Prawdopodobnie założono, że projektant bez dodatkowych wskázówek skorzysta w tym zakresie z normy EC7-1.

Podsumowanie

Podsumowując, Autorzy chcą dobitnie podkreślić (co wspomniano już we wstępie), że w Polsce napotyka się na brak wytycznych krajowych (zgodnych z nowymi normami geotechnicznymi, m.in.[9]) dotyczących projektowania konstrukcji ziemnych z zastosowaniem geosyntetyków. Wypełnienie tej luki mogą stanowić niemieckie zalecenia EBGEO 2010 [6] lub brytyjska norma BS 8006:2010 [1]. Po dogłębnej analizie obu tych opracowań, w zakresie projektowania zbrojenia geosyntetycznego w podstawie nasypu posadowionego na słabym podłożu gruntowym, dostrzeżono w tych wytycznych pewne nieścisłości, które niekiedy mogą skutkować błędami projektowymi, prowadzącymi m.in. do przewymiarowania wzmocnienia.

Zdaniem Autorów, podstawową wadą obu wytycznych jest problem z dokładnym oszacowaniem siły rozciągającej w zbrojeniu niezbędnej do zapewnienia stateczności na wyparcie gruntu spod podstawy nasypu.

Zastosowanie odpowiedniego zbrojenia geosyntetycznego w podstawie nasypu posadowionego na słabym podłożu gruntowym poprawia jego stateczność. Należy jednak pamiętać, że parametry słabego podłoża oraz proces jego konsolidacji mają wpływ na wymaganą wytrzymałość na rozciąganie zastosowanego wyrobu geotekstylnego lub pokrewnego. Proces konsolidacji podłoża gruntowego powoduje poprawę wytrzymałości gruntu w podstawie nasypu, w wyniku czego w całym okresie użytkowania nasypu nie jest potrzebna tak duża wytrzymałość zbrojenia jak w okresie wznoszenia budowli i konsolidacji słabego podłoża. ◀

Materiały źródłowe

- [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] DIN 4084. Baugrund. Geländebruchberechnungen
- [4] DIN 4017. Baugrund. Berechnung des Grundbruchwiderstands von Flachgründungen
- [5] Duszyńska A., Szypulski P. Wymiarowanie wzmocnienia geosyntetycznego podstawy nasypu na słabym podłożu. IMiG 2/2012, str. 215-223.
- [6] EBGEO. Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements, Ernst W. & Sohn Verlag, 2011.
- [7] IBIDIIM. Wytyczne wzmocnienia podłoża gruntowego w budownictwie drogowym. Warszawa 2002.
- [8] PD ISO/TR 20432 Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement
- [9] PN-EN 1997-1 Projektowanie geotechniczne. Część 1. Zalecenia ogólne.
- [10] Szypulski P. Projektowanie nasypów posadowionych na słabym podłożu gruntowym z zastosowaniem geosyntetyków. Praca dyplomowa magisterska (promotor: Duszyńska A.), Politechnika Gdańska, 2013.
- [11] Wysokiński L., Kotlicki W. Projektowanie konstrukcji oporowych, stromych skarp i nasypów z gruntu zbrojonego. Seria Instrukcje, Wytyczne, Poradniki ITB nr 429/2007. Warszawa.