

SAFETY FACTORS IN LIGHT RETAINING CONSTRUCTION DESIGN

WSPÓLCZYNNIKI BEZPIECZENSTWA W PROJEKTOWANIU LEKKICH KONSTRUKCJI OPOROWYCH

Andrzej Surowiecki*

ABSTRACT

There were discussed the problems with design of reinforced earth retaining wall, taking into consideration the literature and design practice. There were presented in the different authorities recommended values of safety factors, towards to danger of slide reinforcement-soil medium, deting the length of anchor.

Key words: light retaining walls, safety factors

WPROWADZENIE

Omówiono problematykę bezpieczeństwa przy wymiarowaniu konstrukcji oporowych z gruntu zbrojonego o pionowej ścianie, biorąc pod uwagę literaturę krajową, zagraniczną, praktykę projektowania oraz własne doświadczenia [1-6].

W przypadku wymiarowania wewnętrznego, zwrócono uwagę na współczynnik bezpieczeństwa dotyczący zerwania wkładek, występujący we wzorze do obliczenia dopuszczalnej siły rozciągającej. Rozpatrując zewnętrzne wymiarowanie, czyli kontrolę stateczności konstrukcji oporowej, obowiązują klasyczne zagadnienia mechaniki gruntów (osiadanie, wypieranie gruntu podłoża, stateczność ze względu na poślizg), jednak pożądane jest uwzględnienie cech szczególnych konstrukcji z gruntu zbrojonego, takich jak np. elastyczność w pewnych granicach. Wykonano przykład liczbowy wymiarowania, biorąc za podstawę własny model laboratoryjny. Rozpatrzono dwa rodzaje wkładek zbrojenia w formie taśm: o gładkiej powierzchni i ukształtowane przestrzennie. Dla wkładek drugiego rodzaju określono zwiększenie

* dr hab. inż. Andrzej Surowiecki, prof. nadzw. UP: Wrocław University of Environmental and Life Sciences;
Department of Building, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław, Poland, e-mail:
andrzej.surowiecki@up.wroc.pl

efektywności pracy po zainstalowaniu elementów oporowych. Przyrost efektywności uwzględniono wprowadzając tzw. siłę eksploatacyjną i w związku z tym obliczono mniejszą wartość współczynnika bezpieczeństwa na rozerwanie. Wykazano w ten sposób możliwość poprawy ekonomiki projektowania konstrukcji oporowych z gruntu zbrojonego na zasadzie doboru odpowiedniego typu zbrojenia.

1 WSPÓŁCZYNNIK PEWNOŚCI PRZY WYMIAROWANIU WEWNĘTRZNYM

Siłę rozciągającą $T_{r,z}^w$ w poziomej warstwie zbrojenia na głębokości z można obliczyć z równania równowagi lokalnej dla pojedynczego elementu modułowej ściany osłonowej [1, 2, 4, 5, 6]:

$$T_r^w = \sigma_h e_z = K_a \sigma_v e_z = K_a q_z e_z \quad (1)$$

gdzie: σ_h - naprężenie poziome; $e_z = H (n_{w,a})^{-1}$ - rozstaw pionowy warstw zbrojenia; H - wysokość masywu; $n_{w,a}$ - liczba warstw zbrojenia; $K_a = \operatorname{tg}^2 (45^\circ - 0,5 \varphi)$ - przyjmowana w rozwiązaniach klasycznych wartość współczynnika czynnego parcia; φ - kąt tarcia wewnętrznego zasypki gruntowej; q_z - jednostkowy nacisk pionowy zasypki gruntowej w poziomie rozpatrywanej warstwy zbrojenia (pionowe naprężenie główne σ_v).

Na jedną wkładkę (np. taśmę) w warstwie na głębokości z działa siła rozciągająca:

$$T_{r,z} = T_{r,z}^w (n_a^w)^{-1} \quad (2)$$

gdzie: n_a^w - liczba wkładek na 1 m bieżący warstwy zbrojenia, mierzony wzdłuż ściany osłonowej; indeks z oznacza zagłębienie taśmy zbrojenia w masywie.

Aby zbrojenie nie uległo zerwaniu, siła rozciągająca wkładkę $T_{r,z}$ powinna być mniejsza od wytrzymałości wkładki na rozciąganie $T_{r,r}$, albo nie większa od siły rozciągającej dopuszczalnej we wkładce $T_{r,d}$. Można więc napisać zależność:

$$T_{r,z} < T_{r,r} = b_a g_a \sigma_{a,r} \quad \text{albo} \quad T_{r,z} \leq T_{r,d} = b_a g_a \sigma_{a,r} (S_r)^{-1} \quad (3)$$

gdzie: b_a - szerokość taśmy zbrojenia; g_a - grubość taśmy; $\sigma_{a,r}$ - wytrzymałość na zrywanie wkładki [MPa]; S_r - współczynnik bezpieczeństwa na zrywanie.

Polska Norma [5, 6] podaje warunki do spełnienia dla każdego poziomu zbrojenia, w celu zachowania stanu równowagi lokalnej. W praktyce projektowania ścian oporowych z gruntu zbrojonego przyjmuje się [2] współczynnik pewności dla wkładek ze stali zwykłej $S_r = 3,15$; dla stali galwanizowanej 2,25.

Długość odcinka zbrojenia w strefie kotwienia składa się z elementów: $l_a = l_{a,p} + l_{a,k}$, gdzie $l_{a,p}$ jest długością w strefie aktywnej, $l_{a,k}$ jest odcinkiem strefy kotwienia. Długość l_a jest czynnikiem determinującym sposób zniszczenia masywu. Minimalną

długość wkładki zawarta w strefie kotwienia $l_{a,k}^m$ można obliczyć [2, 4, 6] opierając się na założeniu, że siła przyczepności wkładki do ośrodka gruntowego $T_{r,k,z}$ powinna być równa sile $T_{r,r}$ zrywającej wkładkę. Wtedy siła przyczepności:

$$T_{r,k,z} = \int 2 b_a f_t \sigma_v dy = T_{r,r} = b_a g_a \sigma_{a,r} \quad (4)$$

gdzie: f_t - współczynnik tarcia grunt-zbrojenie; pozostałe oznaczenia jak poprzednio.

Zwykle stosuje się $l_a \geq 0,8 H$, można więc założyć z przybliżeniem równomierny rozkład naprężeń normalnych wzdłuż zbrojenia: $\sigma_v = \gamma_0 z$. Wtedy nośność zakotwienia:

$$T_{r,k,z} = 2 b_a l_{a,k}^m f_t \gamma_0 z \quad (5)$$

Przyjmując współczynnik pewności ze względu na poślizg $S_p = 2,0$ otrzymuje się po przekształceniach długość odcinka kotwienia:

$$l_{a,k} = S_p g_a \sigma_{a,r} (2 f_t \gamma_0 z)^{-1} = g_a \sigma_{a,r} (f_t \gamma_0 z)^{-1} \quad (6)$$

Zaleca się [2] przyjmowanie wartości $S_p \geq 2$ dla wkładek ze stali galwanizowanej. Polska Norma [5, 6] przewiduje sprawdzenie niebezpieczeństwa poślizgu zbrojenia w gruncie przy użyciu warunku:

$$T_{r,max} \leq m_l 2 b f_t \Sigma \sigma_l L_l \quad (7)$$

w którym: b - szerokość wkładki; f_t - współczynnik tarcia zbrojenie-grunt; L_l - obliczeniowa długość zbrojenia w strefie oporu; σ_l - pionowe składowe naprężenia od obciążeń (ciężar gruntu, obciążenie naziomu); $m_l = 0,75$ - współczynnik korekcyjny.

2 MOŻLIWOŚCI REDUKCJI WSPÓŁCZYNNIKA BEZPIECZEŃSTWA

Wykonano wymiarowanie konstrukcji oporowej o pionowej ścianie z gruntu zbrojonego taśmami (masyw gruntowy- piasek gruboziarnisty), w oparciu o wyniki badań odkształceń poziomych i pionowych modelu konstrukcji w skali laboratoryjnej, obciążonego własnym ciężarem i pasmowym [4-6]. Wkładki rozmieszczono w poziomych warstwach o rozstawie pionowym $e_z = 0,195$ m. Przyjmując wkładki stalowe ($\sigma_{a,r} = 250$ MPa) o powierzchniach bez karbów, grubości $g_a = 0,001$ m i szerokości $b_a = 0,024$ m oraz $0,012$ m, obliczono siłę dopuszczalną przejmowaną przez jedną wkładkę, która przy współczynniku bezpieczeństwa $S_r = 3,15$ wynosi: $1,9$ kN dla $b_a = 0,024$ m oraz $0,95$ kN gdy $b_a = 0,012$ m. Potrzebną liczbę wkładek na 1 m warstwy obliczono z warunku (tablica 1):

$$n_a^w T_{r,d} = P_{y,z}^w \quad (8)$$

w którym: $P_{y,z}^w$ - ciśnienie poziome masywu w warstwie zbrojenia na głębokości z .

Tablica 1. Liczba wkładek stalowych n_a^w o powierzchniach bez karbów w warstwie zbrojenia dla masywu luźno nasypanego (I) i wstępnie zagęszczonego (II) [4-6]

Głębokość i nr warstwy zbrojenia z_k, m	I				II				
	n_a^w ze wzoru (12) dla b_a, m		przyjęte n_a^w		n_a^w ze wzoru (12) dla b_a, m		przyjęte n_a^w		
	0,024	0,012	0,024	0,012	0,024	0,012	0,024	0,012	
$z_1 = 0,095$	1,81	3,63	2	4	1,16	2,31	2	3	
$z_2 = 0,290$	3,44	6,88	4	7	2,67	5,36	3	6	
$z_3 = 0,485$	3,83	7,65	4	8	3,30	6,61	4	7	
$z_4 = 0,680$	3,12	6,24	4	7	2,22	4,44	3	5	
$z_5 = 0,875$	2,50	5,01	3	5	1,52	3,04	2	3	
$z_6 = 1,070$	2,43	4,86	3	5	1,17	2,34	2	3	
Całkowita liczba wkładek w masywie wynosi ($n_{a,c}$):			20	36	$(n_{a,c})$:			16	27

Jeżeli we wkładkach zostaną zastosowane elementy oporowe kształtujące przestrzennie zbrojenie, spowodują one zwiększenie efektywności zbrojenia. W badanym modelu konstrukcji oporowej z gruntu zbrojonego [4-6] zwiększenie efektywności wynosi (ze względu na redukcję ciśnienia poziomego): w masywie luźno nasypanym $\alpha_0 = 51\%$ oraz we wstępnie zagęszczonym $\alpha_0 = 99,1\%$. Przyrost efektywności pracy zbrojenia uwzględniono wprowadzając tzw. siłę eksploatacyjną. Wtedy otrzymuje się dla pojedynczej wkładki o szerokości $b_a = 0,024 m$:

- dla gruntu luźno sypanego $T_{r,d}^{\#} = 1,9 kN \cdot 0,51 + 1,9 kN = 2,87 kN$,

- dla masywu wstępnie zagęszczonego $T_{r,d}^{\#} = 1,9 kN \cdot 0,99 + 1,9 kN = 3,78 kN$.

W tablicy 2 przedstawiono obliczoną liczbę tych wkładek w poszczególnych warstwach zbrojenia masywu. Z porównania tych wyników z odpowiednimi wynikami w tablicy 1 widać, że ilość zbrojenia zmniejszyła się o 30% w przypadku (I) i o około 36% w przypadku (II). W ten sposób, odpowiednio zwiększając opór na wyciąganie zbrojenia z gruntu można osiągnąć minimum potrzebnej liczby wkładek. W związku ze zwiększeniem się siły rozciągającej $T_{r,d}$ we wkładce po zainstalowaniu elementów oporowych ulega automatycznie zmniejszeniu współczynnik bezpieczeństwa na rozerwanie przyjęty dla wkładek bez karbów (dla stali bez powłoki antykorozyjnej przyjęto $S_r = 3,15$). Wtedy współczynnik ten wynosi (wzór 3):

- w masywie luźno sypanym: $S_r = b_a g_a \sigma_{a,r} (T_{r,d})^{-1} = 0,024 \cdot 0,001 \cdot 25 \cdot 10^4 \cdot (2,87)^{-1} = 2,09$;

- we wstępnie zagęszczonym: $S_r = b_a g_a \sigma_{a,r} (T_{r,d})^{-1} = 0,024 \cdot 0,001 \cdot 25 \cdot 10^4 (3,78)^{-1} = 1,58$.

Tablica 2. Niezbędna liczba wkładek stalowych o szerokości $b_a = 0,024$ m z karami, przypadających na 1m długości warstwy zbrojenia dla masywu z gruntu luźno sypanego (I) i wstępnie zagęszczonego (II) [4-6]

Głębokość i nr warstwy zbrojenia $z_k, \text{ m}$	n_a^w ze wzoru (12)		n_a^w przyjęte	
	I	II	I	II
$z_1 = 0,095$	1,20	0,58	2	1
$z_2 = 0,290$	2,28	1,35	3	2
$z_3 = 0,485$	2,53	1,66	3	2
$z_4 = 0,680$	2,06	1,12	2	2
$z_5 = 0,875$	1,66	0,76	2	1
$z_6 = 1,070$	1,61	0,59	2	1
Całkowita liczba wkładek $n_{a,c}$			14	9

Zmniejszone współczynniki bezpieczeństwa na rozerwanie są obliczone przy założeniu (dla trzech stosowanych w badaniach sposobów zbrojenia A, B i C; A - 9 wkładek w poziomej warstwie; B - 6 oraz C - 4 sztuki) średniego wzrostu efektywności pracy wkładek α_0 wskutek zainstalowania na ich powierzchni karmów ($\alpha_0 = 51$ % w gruncie luźno nasypanym i 99,1 % we wstępnie zagęszczonym). Wzrost efektywności pracy zbrojenia α spowodowany karami można też obliczyć oddzielnie dla każdego z trzech wariantów zbrojenia A, B, C sposobem identycznym, którym obliczono α_0 . Wtedy otrzymuje się:

a) w masywie luźno sypanym:

- dla $n_a^w = 9$: $\alpha_9 = 37,2$ % oraz zwiększona rozciągająca siła eksploatacyjna we wkładce $T_{r,d} = 1,9 \cdot 0,372 + 1,9 = 2,61$ kN; dla $n_a^w = 6$: $\alpha_6 = 55,2$ % oraz $T_{r,d} = 2,95$ kN; dla $n_a^w = 4$: $\alpha_6 = 69,3$ % oraz $T_{r,d} = 3,22$ kN,

b) w masywie wstępnie zagęszczonym:

- dla $n_a^w = 9$: $\alpha_9 = 118,3$ % oraz $T_{r,d} = 1,9 \cdot 1,18 + 1,9 = 4,15$ kN; dla $n_a^w = 6$: $\alpha_6 = 109,1$ % oraz $T_{r,d} = 3,97$ kN; dla $n_a^w = 4$: $\alpha_6 = 79,1$ % oraz $T_{r,d} = 3,40$ kN.

Współczynniki bezpieczeństwa S_r wynoszą odpowiednio dla powyższych sił:

a) w masywie luźno nasypanym: dla $n_a^w = 9$: $S_r = b_a g_a \sigma_{a,r} (T_{r,d})^{-1} = 0,024 \cdot 0,001 \cdot 25 \cdot 10^4 (2,61)^{-1} = 2,29$; dla $n_a^w = 6$: $S_r = 2,03$ oraz dla $n_a^w = 4$: $S_r = 1,86$;

b) w masywie wstępnie zagęszczonym: dla $n_a^w = 9$: $S_r = 1,45$; dla $n_a^w = 6$: $S_r = 1,51$ oraz dla $n_a^w = 4$: $S_r = 1,76$.

3 WSPÓŁCZYNNIKI BEZPIECZEŃSTWA PRZY WYMIAROWANIU ZEWNĘTRZNYM

Wymiarowanie zewnętrzne, jest sprawdzeniem stateczności konstrukcji oporowej z gruntu zbrojonego [2]. Dopuszczalne obciążenie podłoża oblicza się ze wzoru [2]:

$$Q_k < Q_{dop} = (b_{obl} - 2 e_n) q_{dop} \quad (9)$$

w którym: $Q_k = \gamma_k l_a H$ - ciężar konstrukcji z gruntu zbrojonego (γ_k - ciężar objętościowy masywu z gruntu zbrojonego; l_a - długość wkładek; H - wysokość konstrukcji; $e_n = 0,17 K_a H^2 (l_a)^{-1}$ - mimośród wypadkowej sił działających na konstrukcję oporową; q_{dop} - dopuszczalny nacisk jednostkowy na podłoże przy obciążeniu mimośrodowym, przyjmując współczynnik pewności 2,0.

Warunek stateczności obiektu ze względu na przesunięcie poziome przy założeniu współczynnika bezpieczeństwa o wartości 1,5 [2]:

$$1,5 (0,5 K_a H^2 \gamma_k) \leq c l_a + Q_k \operatorname{tg} \varphi_p \quad (10)$$

gdzie: lewa strona jest poziomym parciem masywu gruntowego na konstrukcję; prawa strona stanowi siłę utrzymującą poziomą pochodzącą od masy konstrukcji; c - spójność gruntu; φ_p - kąt tarcia między ośrodkiem gruntowym a dolną płaszczyzną konstrukcji z gruntu zbrojonego. Wzory powyższe dotyczą konstrukcji o nieobciążonym naziomie. Obciążenie naziomu należy uwzględniać jak przy obliczaniu klasycznych konstrukcji oporowych.

4 PROJEKTOWANIE METODĄ STANÓW GRANICZNYCH

Zasady projektowania podaje norma francuska [3], która wymaga sprawdzenia stateczności: zewnętrznej (z uwagi na poślizg wzdłuż podstawy i nośność podłoża), wewnętrznej (ze względu na siły rozciągające we wkładkach i kotwienie wkładek) oraz ogólnej, biorąc pod uwagę osuwisko wzdłuż potencjalnych powierzchni poślizgu, na skutek ścinania.

W normie tej proponowane są współczynniki:

1) w odniesieniu do stateczności wewnętrznej:

- współczynnik metody $\gamma_{F3} = 1,0-1,125$ o wartości zależnej od kombinacji obciążeń (kombinacja standardowa albo wyjątkowa);

- częściowy współczynnik bezpieczeństwa $\gamma_{m\varphi}$ stosowany do kąta tarcia wewnętrznego masywu zbrojonego (w przypadku standardowej kombinacji obciążeń $\gamma_{m\varphi} = 1,2$ w przypadku wyjątkowej $\gamma_{m\varphi} = 1,1$);

- częściowy współczynnik bezpieczeństwa γ_{mc} stosowany do efektywnej spójności masywu (w przypadku standardowej kombinacji obciążeń $\gamma_{mc} = 1,65$ dla wyjątkowej $\gamma_{mc} = 1,5$);

- częściowy współczynnik bezpieczeństwa nośności podłoża pod masywem $\gamma_{mq} = 1,5$;

2) odnośnie stateczności wewnętrznej:

- współczynnik metody $\gamma_{F3} = 1,0-1,125$ o wartości zależnej od kombinacji obciążeń (kombinacja standardowa albo wyjątkowa);
 - częściowy współczynnik bezpieczeństwa γ_{mt} ze względu na zerwanie zbrojenia, przyjmowany 1,5 dla konstrukcji standardowych oraz 1,65 dla szczególnych;
 - częściowy współczynnik bezpieczeństwa kotwienia zbrojenia γ_{mf} , przyjmowany 1,2 dla konstrukcji standardowych oraz 1,3 dla szczególnych;
 - częściowy współczynnik bezpieczeństwa γ_{mp} dotyczący wytrzymałości obudowy, przyjmowany 1,65 dla obudowy betonowej oraz 1,5 dla metalowej;
- 3) dotyczące stateczności ogólnej:
- współczynnik metody $\gamma_{F3} = 1,125$ niezależnie od kombinacji obciążeń;
 - częściowe współczynniki bezpieczeństwa γ_{mt} , γ_{mp} , γ_{mf} o wartościach w zakresie 1,2-1,65, zależnie od kombinacji obciążeń standardowej lub wyjątkowej;
- 4) częściowe współczynniki bezpieczeństwa γ_m stosowane przy oszacowaniu osiadań masywu zbrojonego, w zależności m.in. od parcia zasypki gruntowej na ścianę z gruntu zbrojonego i charakteru obciążenia.

PODSUMOWANIE

Omówiono problematykę bezpieczeństwa w projektowaniu konstrukcji oporowych z gruntu zbrojonego, skupiając uwagę na rodzajach i celowości stosowania współczynników bezpieczeństwa. Istotnym z punktu widzenia ekonomiki podejściem jest metoda stanów granicznych, której zasady podano w normie [3], proponując zastosowanie szczególnych współczynników bezpieczeństwa, nazywanych częściowymi oraz współczynników w metody.

Problem wartości współczynników bezpieczeństwa poruszono na podstawie wyników własnych badań, wykonanych na fizycznym modelu konstrukcji oporowej ze zbrojeniem poziomymi warstwami, stosując wkładki w formie taśm o powierzchni gładkiej i z elementami oporowymi. Wykazano, że po zastosowaniu wkładek z elementami oporowymi istnieje możliwość zmniejszenia wartości współczynnika bezpieczeństwa na rozerwanie w związku z wprowadzeniem dla tych wkładek siły eksploatacyjnej, większej od dopuszczalnej siły rozciągającej. Redukcję współczynnika obliczono dla różnych liczb wkładek w pojedynczej warstwie zbrojenia i wynosi ona przeciętnie: w modelu masywu z piasku luźno nasypanego ok. 34 %; w modelu masywu z ośrodka wstępnie zagęszczonego ok. 50 %.

LITERATURA

- [1] CLAYTON C.R.J., MILITITSKY J., WOODS R.J.; Earth Pressure and Earth Retaining Structures. Blackie Acad. & Professional. An Im Print of Chapman & Hall. London-New York, 1996
- [2] JAROMINIAK A.; Lekkie konstrukcje oporowe, WKiŁ Warszawa, 2003
- [3] NFP 94-200. Renforcement des sols par inclusions. Ouvrages en sols rapportes renforces par armatures ou nappes peu extensibles et souples. Dimensionnement

- [4] SUROWIECKI A.; Laboruntersuchungen von mechanischen Eigenschaften bewehrter lockerer Bodenschichten, Bautechnik, Jg. 71, H. 11, 1994, s. 707-711
- [5] SUROWIECKI A.; Analiza doświadczalna efektywności zbrojenia nasypów z gruntu zbrojonego, Drogownictwo Nr 2, 2001, s. 58-62
- [6] SUROWIECKI A.; Badania modelowe współpracy składników kompozytowych w pionowej ścianie oporowej z gruntu zbrojonego. Inżynieria i Budownictwo, PZliTB, Rok LX, Nr 10, 2004, s. 527-530.

Článok recenzoval:
doc. Ing. Ladislav Novák, PhD.