

dr inż. Aleksander Duda¹⁾
ORCID: 0000-0002-5549-3098

Nośność na wyciąganie geosiatki zbrojeniowej z prętów GFRP – wpływ średnicy prętów i rodzaju gruntu

Pull-out capacity of reinforcing geogrid from GFRP bars – influence of bar diameter and soil type

DOI: 10.15199/33.2023.09.12

Streszczenie. Celem badań przedstawionych w artykule była ocena oporu na wyciąganie prętów z gruntu w odniesieniu do typowych materiałów przewidzianych do zbrojenia gruntu – geosyntetyków. W badaniach wyznaczono współczynnik interakcji grunt – pręty GFRP. Siatka z prętów GFRP pozwala zwiększyć zdolność do klinowania się gruntu w odniesieniu do geosyntetyków.

Słowa kluczowe: pręty GFRP; zbrojenie gruntu; wzmocnienie podłoża; nośność na wyciąganie; monitoring światłowodowy.

Abstract. The aim of the ongoing research is to evaluate the load capacity for pull-out rods out of the soil in relation to typical materials intended for soil reinforcement – geosynthetics. In the tests, the soil-GFRP interaction coefficient was determined. The GFRP rod mesh allows to increase the wedging capacity of the soil in relation to geosynthetics.

Keywords: GFRP rebars; reinforced soil; subgrade reinforcement; pull-out capacity; fiber-optic monitoring.

Pręty kompozytowe z włókien szklanych GFRP od lat z powodzeniem znajdują zastosowanie jako materiał do zbrojenia betonu. Głównym powodem wypierania stali zbrojeniowej przez pręty GFRP w wybranych obszarach budownictwa są ich unikatowe właściwości, tj. duża odporność na korozję oraz zmienne warunki środowiska, mały ciężar objętościowy i duża wytrzymałość na rozciąganie [1]. Podobnie w geotechnice poszukuje się rozwiązań, w których materiał do zbrojenia gruntu będzie z nim dobrze współpracował (poprawa klinowania się kruszywa), zapewniając odpowiednią trwałość (odporność na niekorzystne środowisko, odporność na uszkodzenia przy wbudowaniu) oraz nośność i sztywność. Typowymi materiałami stosowanymi do wzmocnienia i zbrojenia gruntu są geosyntetyki, najczęściej wiotkie i cienkie materiały wykonane z polimerów, których budowa i właściwości zależą od przeznaczenia do konkretnego zastosowania na budowie [2]. Przedmiotem badań omówionych w artykule jest ocena interakcji prętów GFRP z materiałem gruntowym w badaniach nośności na wyciąganie.

Materiały

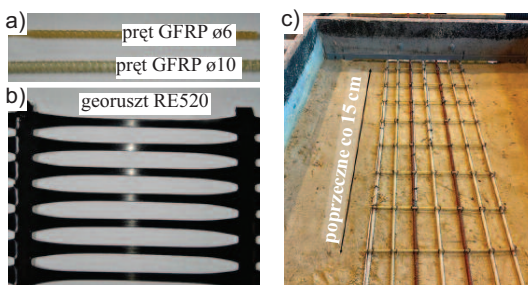
Badaniom poddano pręty GFRP o średnicy 6 i 10 mm (fotografia 1a) oraz jednokierunkowy georuszt (fotografia 1b), w którym liczba żeber przypadających na 1 m wynosi 44. Pręty GFRP w formie siatki pokazano na fotografii 1c. W badaniach niszczących, przeprowadzonych zgodnie z normmi [3, 4], określono podstawowe parametry wytrzymałościowe badanych materiałów (tabele 1 i 2).

Do badania wytrzymałości na wyciąganie przewidziano **grunt zasypowy niespoisty** w formie piasków średnich (piasek naturalny kopany), przydatny po uzdatnieniu (np. stabilizacja spoiwami hydraulicznymi) oraz **grunt spoisty** w formie pyłów i pyłów piaszczystych. Grunt zasypowy przewidziany do badań był o naturalnej wilgotności

pobranej ze złoża lub podłoża gruntowego. Podstawowe parametry gruntów zasypowych oznaczone wcześniej w badaniach laboratoryjnych wg [5 ÷ 13] przedstawiono w tabelach 3 i 4.

Stanowisko badawcze

Badanie oporu na wyciąganie danego materiału zbrojącego z gruntu przeprowadzono w wielkowymiarowym stanowisku badawczym, specjalnie zaprojektowanym i zbudowanym w hali **Wydziałowego Laboratorium Badań Konstrukcji Politechniki Rzeszowskiej** (rysunek 1), które składało się z samonośnej sztywnej skrzyni drewnianej, układu obciążenia/wymuszenia badanej próbki, układu pomiarowego i obciążenia pionowego w formie balastu. Układ obciążenia stanowiły stalowe elementy oporowe zakotwione w podłożu siłowej oraz siłownik poziomy generujący siłę do 40 kN. Do siłownika przykręcane były odpowiednie głowice mocujące pręty GFRP – typ 1 (fotografia 2a) lub georuszty – typ 2 (fotografia 2b). Obciążenie pionowe stanowiska badawczego stanowi warstwa gruntu nad materiałem badawczym (pręty GFRP lub georuszty) oraz betonowe płyty o wymiarach 1,50 × 1,20 × 0,15 m.



Fot. 1 Materiały do badań: a) pręty kompozytowe GFRP; b) georuszt; c) pręty GFRP w formie siatki

Photo 1. Test materials: a) GFRP composite bars; b) geogrid; c) GFRP bars in the form of a grid

¹⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Inżynierii Środowiska i Architektury; aduda@prz.edu.pl

Maksymalny poziom tego obciążenia to 8 płyt, wynikający z oszacowania oporu na wyciąganie oraz możliwości technicznych poziomego siłownika.

Metody badań

Badania nośności na wyciąganie z gruntu zostały przeprowadzone zgodnie z normą [14]. W przypadku ma-

teriału zasypowego z piasku zastosowano zagęszczenie ubijakiem mechanicznym, a w przypadku gruntu spoiстого nie stosowano zagęszczenia ze względu na uzyskanie zbyt dużego oporu podczas wstępnych badań testowych. W trakcie badań wyciągania pobierano próbki gruntu w celu kontroli warunków wilgotnościowych oraz

możliwości regulowania poziomu wilgotności. W przypadku badań materiału zasypowego niespoistego średnia wilgotność gruntu wynosiła 9,00% z odchyleniem standardowym 0,89% (wilgotność optymalna tego gruntu to 6,65%; maksymalnie 7,50%), a materiału zasypowego spoiстого 17,49% z odchyleniem standardowym 1,05% (wilgotność optymalna tego gruntu to 10,25%; maksymalnie 11,70%). Otrzymane wyniki wilgotności podczas badania wskazują na inżynierski zapas parametrów geotechnicznych do projektowania.

Do badań przygotowano osiem próbek georusztów oraz trzy próbki prętów GFRP. Próbki georusztów miały szerokość 0,5 m (21 – 22 żebra) i długość ok. 2,5 m, a ich długość zakotwienia w skrzyni badawczej wynosiła 1,5 m, natomiast odległość między skrzynią a urządzeniem wyciągającym ok. 0,5 m. Cztery próbki georusztu były przygotowane do badań z materiałem zasypowym niespoistym, a pozostałe cztery – z materiałem zasypowym spoiстым.

Ze względu na nieliniową charakterystykę wytrzymałości materiału georusztu pojedyncza próbka została wykorzystana do jednego poziomu obciążenia normalnego. Próbki badawcze geosiatek z prętów GFRP były wykorzystywane ponownie w przypadku innych poziomów naprężenia normalnego. Pręty poprzeczne GFRP umieszczono w stałych rozstawach co 0,15 m i łączono je z prętami podłużnymi opaskami lub drutami wiązkowymi. Badania tak zaplanowano, aby maksymalnie wykorzystać możliwości urządzenia wyciągającego (siła do 40 kN), nie doprowadzić do zerwania próbek badawczych (dotyczy georusztów – mała wytrzymałość na rozciąganie) oraz uzyskać przemieszczenie poziome podczas wyciągania próbki wynoszące 100 mm (uzyskanie poślizgu). Łącznie wykonano dwadzieścia sześć prób wyciągania próbek badawczych z gruntu, po trzynaście w przypadku gruntu spoiстого i niespoistego. W tabeli 5 i 6 przedstawiono ogólną charakterystykę poszczególnych prób wyciągania z gruntu.

Obciążenie próbek badawczych w jednym cyklu obciążeniowym przebiegało w trzech etapach: **I etap** – przy-

Tabela 1. Wyniki badań materiałowych prętów GFRP wraz z deklarowanymi przez producenta

Table 1. The results of material tests of GFRP bars along with those declared by producers

Rodzaj pręta GFRP	Średnica wewnętrzna pręta [mm]		Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]		Moduł Younga [GPa]	
	deklarowana	uzyskana w badaniach	deklarowana	uzyskana w badaniach	deklarowany	uzyskany w badaniach
Pręt $\phi 6$	6 ± 0,3	5,89 ± 0,18	≥ 1100	1098,92 ± 34,41	50 ± 5	50,18 ± 2,15
Pręt $\phi 10$	10 ± 0,5	9,69 ± 0,22		1121,74 ± 20,65		52,91 ± 2,60

Tabela 2. Zestawienie wyników badań materiałowych georusztów RE520 wraz z deklarowanymi przez producenta

Table 2. Summary of the results of material tests of RE520 geogrids along with those declared by the producers

Material	Wytrzymałość na rozciąganie [kN/m]		Wydłużenie przy zerwaniu [%]	
	deklarowana	uzyskana w badaniach (*)	deklarowane	uzyskane w badaniach
Georuszt RE520	57 ± 4,2	45,5 ± 0,5	11 ± 3	13,4 ± 0,1

(*) otrzymano materiał do badań jako pozostałości z budowy (nie nowy)

Tabela 3. Zestawienie uśrednionych parametrów geotechnicznych gruntu gruboziarnistego (niespoistego) o naturalnej wilgotności

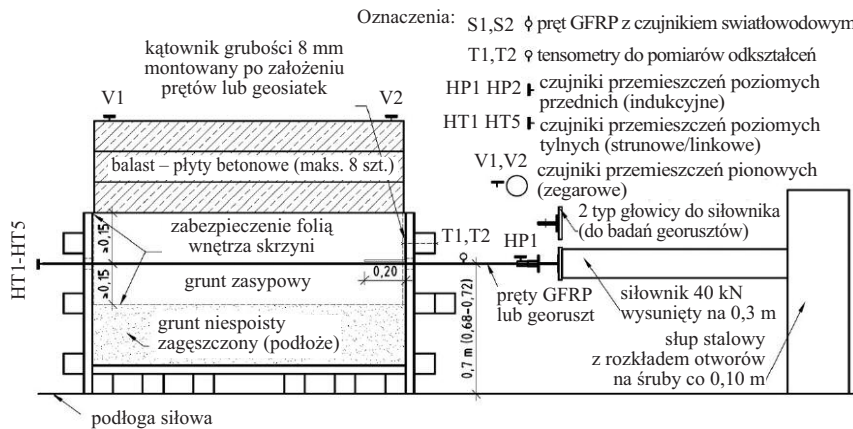
Table 3. Summary of averaged geotechnical parameters of coarse-grained (non-cohesive) soil with natural humidity

Parametr	Wartość
Wilgotność naturalna w_n [%]	7,49
Gęstość objętościowa ρ [t/m ³]	1,53
Wskaźnik różnoziarnistości U [-]	3,11
Rodzaj gruntu, klasyfikacja	MSa (piasek średni); równoziarnisty/ jednofrakcyjny
Stopień zagęszczenia I_D [%]	39,69
Klasyfikacja	stan średnio-zagęszczony
Współczynnik filtracji k_{10} [m/s]	7,36E-05
Klasyfikacja	grunt o średniej wodoprzepuszczalności
Wilgotność optymalna w_{opt} [%]	6,65
Edometryczny moduł ścisłości pierwotnej E_{oed} [MPa]: 12,5 – 25 kPa	5,717
25–50 kPa	4,355
Edometryczny moduł ścisłości wtórnej E_{ed} [MPa]: 12,5 – 25 kPa	15,763
25 – 50 kPa	9,212
Parametry (całkowite) wytrzymałościowe: kąt tarcia wewnętrznego ϕ [°]	32,6
spójność c [kPa]	0

Tabela 4. Zestawienie uśrednionych parametrów geotechnicznych gruntu drobnoziarnistego (spoiстого) o naturalnej wilgotności

Table 4. Summary of averaged geotechnical parameters of fine soil (cohesive) with natural humidity

Parametr	Wartość
Wilgotność naturalna w_n [%]	11,38
Gęstość objętościowa ρ [t/m ³]	1,79
Zawartość części organicznych I_{om} [%]	2,7
Klasyfikacja	grunt niskoorganiczny – pył, pył piaszczysty
Konsystencja gruntu:	
– granica plastyczności w_p [%]	17,94
– granica płynności w_L [%]	28,23
– wskaźnik plastyczności I_p [%]	10,29
– wskaźnik konsystencji I_c [-]	1,34
– klasyfikacja	konsystencja zwrta
– stopień plastyczności I_L [-]	-0,63
– klasyfikacja	konsystencja zwrta, stan zwrty/półzwrty
Wilgotność optymalna w_{opt} [%]	10,25
Edometryczny moduł ścisłości pierwotnej E_{oed} [MPa]: 12,5 – 25 kPa	5,107
25 – 50 kPa	5,194
Edometryczny moduł ścisłości wtórnej E_{ed} [MPa]: 12,5 – 25 kPa	15,998
25 – 50 kPa	9,36
Parametry (całkowite) wytrzymałościowe: kąt tarcia wewnętrznego ϕ [°]	33,21
spójność c [kPa]	17



Rys. 1. Indywidualnie zaprojektowane stanowisko badawcze do badań oporu na wyciąganie prętów GFRP i georusztów

Fig. 1. Individually designed test stand for testing the pull-out resistance of GFRP bars and geogrids

rost obciążenia wyciągającego próbkę; **II etap** – zatrzymanie przemieszczenia; **III etap** – odciążenie próbki.

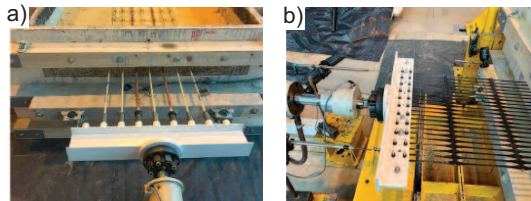
W etapie przyrostu obciążenia wyciągającego próbkę, obciążenie przykładane jest przez stały przyrost przemieszczenia (2 mm/min) do momentu widocznego spadku siły wyciągającej (poślizg) lub gdy przemieszczenie próbki przekroczy 100 mm, co stanowi ok. 8% przemieszczenia długości całej próbki badawczej. W większości prób kontynuowano

Tabela 5. Zestawienie liczby prób wyciągania w przypadku materiału zasypowego z piasku wraz z układem prętów i obciążeniem

Table 5. Summary of the number of pull attempts for sand backfill material along with the bar arrangement and load

Numer próby	Materiał zasypowy	Próbka badawcza	D ¹⁾ [mm]	L ²⁾ [mm]	σ ³⁾ [-]
1	piasek	pręt GFRP	10	75	G+2P
2	piasek	pręt GFRP	10	75	G+4P
3	piasek	pręt GFRP	10	75	G+6P
4	piasek	pręt GFRP	10	150	G+2P
5	piasek	pręt GFRP	10	150	G+4P
6	piasek	pręt GFRP	10	150	G+6P
7	piasek	pręt GFRP	6	75	G+2P
8	piasek	pręt GFRP	6	75	G+4P
9	piasek	pręt GFRP	6	75	G+6P
10*	piasek	georuszt	-	-	G+1P
11*	piasek	georuszt	-	-	G+2P
12*	piasek	georuszt	-	-	G+3P
13*	piasek	georuszt	-	-	G+6P

¹⁾ średnica prętów GFRP [mm]; ²⁾ rozstaw prętów GFRP [mm]; ³⁾ napężenie normalne wg tabeli 7; (*) odmiennie poziomy obciążenia w próbce nr 10, 11, 12 w przypadku piasku i pyłu wynikają ze sposobu zagęszczania próbek i zdolności do klinowania się danego materiału



Fot. 2. Stanowisko badawcze przed zasypaniem i obciążeniem: a) głowica do wyciągania prętów; b) głowica do wyciągania georusztów

Photo 2. Test stand before backfilling and loading: a) bars extraction head; b) head for extracting geogrids

wyciąganie próbki po przekroczeniu przemieszczenia o wartość 100 mm, aż do osiągnięcia stabilizacji siły wyciągającej. Podczas badania przeprowadzono pomiary:

Tabela 6. Zestawienie liczby prób wyciągania w przypadku materiału zasypowego z pyłu wraz z układem prętów i obciążeniem

Table 6. Summary of the number of pull attempts for silt backfill material along with the arrangement of the bars and the load

Numer próby	Materiał zasypowy	Próbka badawcza	D ¹⁾ [mm]	L ²⁾ [mm]	σ ³⁾ [-]
1	pył	pręt GFRP	10	75	G+2P
2	pył	pręt GFRP	10	75	G+4P
3	pył	pręt GFRP	10	75	G+6P
4	pył	pręt GFRP	10	150	G+2P
5	pył	pręt GFRP	10	150	G+4P
6	pył	pręt GFRP	10	150	G+6P
7	pył	pręt GFRP	6	75	G+2P
8	pył	pręt GFRP	6	75	G+4P
9	pył	pręt GFRP	6	75	G+6P
10*	pył	georuszt	-	-	G+2P
11*	pył	georuszt	-	-	G+5P
12*	pył	georuszt	-	-	G+8P

¹⁾ średnica prętów GFRP [mm]; ²⁾ rozstaw prętów GFRP [mm]; ³⁾ napężenie normalne wg tabeli 8; (*) odmiennie poziomy obciążenia w próbce nr 10, 11, 12 w przypadku piasku i pyłu wynikają ze sposobu zagęszczania próbek i zdolności do klinowania się danego materiału

- przemieszczenia tłka siłownika poziomego – pomiar ciągle z wykorzystaniem czujnika indukcyjnego o zakresie pomiarowym 0 ÷ 400 mm wbudowanego w siłownik;

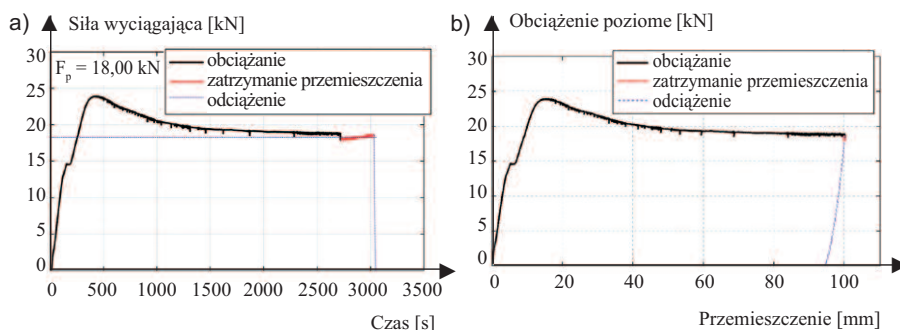
- siły przekazywanej z tłka na próbkę – pomiar ciągle wbudowanym czujnikiem siły o zakresie pomiarowym 0 ÷ 40 kN;

- odcztań w prętach kompozytowych przez tensometry elektrooporowe mocowane w dwóch miejscach (krawędzie zewnętrzne) pomiędzy urządzeniem wyciągającym a skrzynią zasypową z gruntem oraz przez monitoring światłowodowy (pręt GFRP z wbudowanym w rdzeniu światłowodem);

- przemieszczenia poziome w pięciu punktach na długości zakotwienia próbki w gruncie – czujniki indukcyjne żyłkowe zamocowane do prętów poprzecznych łączących pręty podłużne GFRP (co 0,3 m/co drugi pręt poprzeczny). Rejestracja wszystkich wyników pomiarów odbywała się automatycznie z częstotliwością nie mniejszą niż 0,5 Hz. Dane pomiarowe były zbierane za pomocą systemu akwizycji HBM typu Spider.

Wyniki badań

Trwała siła wyciągająca. W cyklu obciążenia realizowanym w etapie I nastąpiła deformacja postaciowa i wyciągnięcie materiału próbki z materiału zasypowego do momentu uzyskania poślizgu. Poślizg w chwili doraźnej uznany jest za moment widocznego spadku siły wyciągającej lub gdy przemieszczenie próbki przekroczy 100 mm (siła przy tym poziomie wyciągnięcia próbki z gruntu). W związku z tym, że normowa prędkość wyciągania próbki jest znacznie większa niż początkowa prędkość inicjacji przemieszczenia gruntu wzdłuż zbrojenia w warunkach rzeczywistych, przyjęto bezpiecznie parametr opisany jako trwała siła wyciągająca – wielkość siły wyciągającej, gdy dochodzi do poślizgu przy bardzo małej prędkości wyciągania (np. ok. 0,1 mm/min). Uznano, że trwała siła wyciągająca równa jest w przybliżeniu wartości siły wyciągającej na końcu drugiego etapu badań, czyli podczas jej stabilizacji (rysunek 2). Procedurę określania trwałej siły wyciągającej zaadaptowano z eksperymentalnych badań wytrzymałości na ścinanie



Rys. 2. Etapy obciążenia próbek: obciążanie; utrzymanie obciążenia (zatrzymanie przemieszczenia/wyciągania próbki); odciążenie próbki. Próbkę nr 7 – pręty GFRP w rozstawie 75 mm wyciągane z piasku. Obciążenie grunt + 2 płyty betonowe: a) zależność siły od czasu; b) zależność siły od przemieszczenia poziomego

Fig. 2. Stages of specimen loading: loading; holding the load (stopping the displacement/pulling of the specimen); unloading the specimen. Specimen No. 7 – GFRP bars with a spacing of 75 mm pulled out of the sand. Ground load + 2 concrete slabs: a) force versus time; b) the dependence of the force on the horizontal displacement

pakietów opon [16] Na rysunku 2a zaznaczono niebieską poziomą linią wartość trwałej siły wyciągającej (18,0 kN), która jest wykorzystywana do określenia zależności interakcji prętów z gruntem. Przyjmuje ona mniejszą wartość niż maksymalna siła wyciągająca osiągnięta podczas badania (23,8 kN). Na rysunku 2b pokazano zależność przemieszczenia tłoka od siły wyciągającej.

Współczynnik interakcji gruntu ze zbrojeniem. Znając siłę wyciągającą w przypadku różnego naprężenia normalnego zastosowano procedurę podaną w [17], określającą opór zbrojenia w gruncie na wyciąganie:

$$P_r = R_{a,k} = \sigma_n \cdot L_A \cdot F_{sg,k} \cdot n \quad (1)$$

gdzie:

- P_r – trwała siła wyciągająca na 1 m szerokości próbki;
- L_A – długość zakotwienia próbki badawczej [m];
- n – liczba płaszczyzn tarcia wzdłuż materiału;
- $F_{sg,k}$ – charakterystyczna wartość średnia współczynnika tarcia między gruntem zasypowym a warstwą zbrojenia; $F_{sg,k} = \lambda \cdot \tan \varphi_k$
- λ – współczynnik interakcji gruntu ze zbrojeniem; $\tan \varphi_k$ – tangens charakterystycznego kąta tarcia wewnętrznego gruntu (założono stałą wartość jak dla gruntu naturalnego).

W przypadku materiałów geosyntezytycznych przyjmowane są zwykle dwie płaszczyzny tarcia wzdłuż materiału, ale gdy dotyczy to siatki z prętów GFRP o dużych oczkach, przyjęcie tego parametru nie jest tak oczywiste. Wstępnie, przy obliczeniach dotyczących geosiatek z prętów GFRP, przyjęto liczbę płaszczyzn tarcia jak w przypadku geosyntetyków. Współczynnik interakcji domyślnie przyjmuje wartości od 0

(brak tarcia) do 1 (pełna mobilizacja tarcia). W przypadku otrzymania większych wartości współczynnika tarcia niż 1 oznacza to występowanie złożonego stanu naprężenia związanego z tarcie gruntu oraz klinowaniem się kruszywa między powierzchniami bocznymi zbrojenia. Przewiduje się, że przestrzenna budowa siatek z prętów GFRP będzie zwiększać efekt klinowania przez pokonanie parcia biernego w gruncie. W tabelach 7 i 8 przedstawiono wyniki zbiorcze współczynnika interakcji gruntu z materiałem zbrojącym.

Wyniki badania wyciągania w przypadku prętów GFRP (próbki 1 ÷ 9) charakteryzują się większym współczynnikiem interakcji λ niż w przypadku georusztów (próbki 10 ÷ 12). Wszystkie wyznaczone współczynniki interakcji materiału zasypowego z piasków są

większe od jedności, co potwierdza znaczny udział klinowania się kruszywa w całkowitej nośności na wyciąganie. Z badań w pyłach niezagęszczonych wynika, że współczynniki interakcji w przypadku prętów GFRP zbliżone są do jedności, a georusztów do ok. 0,45. Zaobserwowano nieznaczne zmniejszenie współczynnika interakcji w różnych układach prętów podłużnych, co zasadniczo potwierdza tezę, że nośność na wyciąganie luźnych, niepołączonych poprzecznie prętów jest dużo mniejsza niż prętów połączonych w siatki, a głównie zależy od gęstości rozmieszczenia prętów poprzecznych. Zaobserwowano też nieznaczne zmniejszenie współczynnika interakcji w przypadku większego naprężenia normalnego (poza kilkoma próbami pyłów), co może sugerować stabilizację współczynnika interakcji przy pewnym poziomie obciążenia normalnego.

Średnie wartości współczynników interakcji zbrojenia w przypadku piasków są następujące:

- średnia przy poziomie obciążenia normalnego 10,08 kPa – 2,266 ± 0,066;
- średnia przy poziomie obciążenia normalnego 16,82 kPa – 2,127 ± 0,084;
- średnia przy poziomie obciążenia normalnego 23,55 kPa – 1,771 ± 0,101;
- średnia z wszystkich wyników prętów GFRP – 2,055 ± 0,225;
- średnia z wszystkich wyników georusztów – 1,496 ± 0,219.

Średnie wartości współczynników interakcji zbrojenia w przypadku pyłów prezentują się następująco:

Tabela 7. Określenie współczynnika interakcji zbrojenia z gruntem w przypadku materiału zasypowego z piasków

Table 7. Determination of the reinforcement-soil interaction coefficient for the case sand backfill material

Nr próbki	F_p [kN]	P_r [kN/m]	Szerokość próbki b [m]	Długość zakotwienia L_A [m]	Naprężenie normalne σ_n [kPa]	$\tan \varphi_k$	Współczynnik interakcji λ
1	18,79	39,15	0,48	1,32	10,08	0,625	2,353
2	29,85	62,19	0,48	1,32	16,82	0,625	2,241
3	35,55	74,06	0,48	1,32	23,55	0,625	1,906
4	17,50	36,46	0,48	1,32	10,08	0,625	2,191
5	27,97	58,27	0,48	1,32	16,82	0,625	2,100
6	30,99	64,56	0,48	1,32	23,55	0,625	1,662
7	18,00	37,50	0,48	1,32	10,08	0,625	2,254
8	27,18	56,63	0,48	1,32	16,82	0,625	2,041
9	32,55	67,81	0,48	1,32	23,55	0,625	1,745
10	10,00	20,00	0,5	1,32	6,72	0,625	1,805
11	11,35	22,70	0,5	1,32	10,08	0,625	1,364
12	14,63	29,26	0,5	1,32	13,45	0,625	1,318

Tabela 8. Określenie współczynnika interakcji zbrojenia z gruntem w przypadku materiału zasypowego z pyłów niezagęszczonych

Table 8. Determination of the reinforcement-soil interaction coefficient for the case backfill material from uncompacted silt

Nr próbki	F_p [kN]	P_r [kN/m]	Szerokość próbki b [m]	Długość zakotwienia L_A [m]	Napężenie normalne σ_n [kPa]	$\tan \phi_k$	Współczynnik interakcji λ
1	8,80	18,33	0,48	1,32	10,08	0,577	1,194
2	11,45	23,85	0,48	1,32	16,82	0,577	0,931
3	14,44	30,08	0,48	1,32	23,55	0,577	0,839
4	8,41	17,52	0,48	1,32	10,08	0,577	1,141
5	10,66	22,21	0,48	1,32	16,82	0,577	0,867
6	16,48	34,33	0,48	1,32	23,55	0,577	0,957
7	8,37	17,44	0,48	1,32	10,08	0,577	1,135
8	11,21	23,35	0,48	1,32	16,82	0,577	0,912
9	14,82	30,88	0,48	1,32	23,55	0,577	0,861
10	3,82	7,64	0,5	1,32	10,08	0,577	0,497
11	6,46	12,92	0,5	1,32	20,18	0,577	0,420
12	10,1	20,20	0,5	1,32	30,28	0,577	0,438

- średnia przy poziomie obciążenia normalnego 10,08 kPa – $1,157 \pm 0,026$;
- średnia przy poziomie obciążenia normalnego 16,82 kPa – $0,903 \pm 0,027$;
- średnia przy poziomie obciążenia normalnego 23,55 kPa – $0,885 \pm 0,051$;
- średnia z wszystkich wyników prętów GFRP – $0,982 \pm 0,129$;
- średnia z wszystkich wyników georusztów – $0,452 \pm 0,033$.

Wnioski

Z badań oporu na wyciąganie wynika ją następujące wnioski:

- analiza wyciągania układu prętów z gruntu zasypowego wykazała zadowalającą wartość współczynnika interakcji (tarcia) pomiędzy prętami GFRP a materiałem zasypowym. W przypadku gruntu niespoistego współczynnik interakcji wynosił ok. 2,0, a gruntu spoistego – ok. 1,0. Należy zaznaczyć, że wartości współczynnika interakcji wyznaczono w przypadku układu z prętami poprzecznymi;
- dzięki prętom poprzecznym, oprócz tarcia między prętami a gruntem, występuje opór gruntu, który zwiększa efekt klinowania się kruszywa;
- zwykle w gruntach niespoistych współczynnik interakcji ze zbrojeniem przyjmuje wartości z przedziału 0,5 – 1,0 (pełna współpraca). Wskazuje to, że w inżynierskich rozwiązaniach projektowych można stosować pełną mobilizację tarcia między siatkami GFRP a gruntem, przez co długość zakotwienia zbrojenia będzie mniejsza. Wstęp-

nie oszacowano, że przekłada się to na mniejszą o ok. 20% długość wbudowanych materiałów z prętów GFRP w stosunku do rozwiązań typowych dla geosyntetyków;

- układy prętów GFRP mogą być kształtowane przez projektanta w dowolny sposób w zależności od działających obciążeń, przy czym za nośność na rozciąganie układu odpowiadają pręty podłużne, a za nośność na wyciąganie układu – pręty poprzeczne;

- w ramach badań zaproponowano procedurę określania parametrów inżynierskich strefy kontaktu między zbrojeniem a gruntem, opisanych jako trwała siła wyciągająca, a nie tylko doraźny opór na wyciąganie opisany w [15];

- w badaniach pozytywnie zweryfikowano monitoring stanu konstrukcji przez analizę odkształceń pomiarami światłowodowymi, pozwalając na wczesne wykrycie zjawisk niebezpiecznych w projektowanych konstrukcjach, szczególnie dotyczących wykonywania nasypów na podłożach słabonośnych oraz w terenie zagrożonym ruchami masowymi (osuwiska, strome skarpy, wysokie nasypy);

- maksymalne odkształcenie prętów podczas badań, w zależności od średnicy i siły wyciągającej, było niewielkie i wynosiło $1,0 \div 4,5\%$ w przypadku badań dotyczących piasku, co przekłada się na pełne wykorzystanie nośności w stanie granicznym nośności i użyteczności. W przypadku wiotkich materiałów geo-

syntetycznych w konstrukcjach z gruntu zbrojonego, ich nośność na zrywanie i wyciąganie jest ograniczana zwykle do siły przy wydłużeniu od 2% dla przyczółków mostów do 5% – konstrukcji oporowych stanowiących podparcie dróg.

Fotografie: Autor

Literatura

- [1] Jarek B, Kubik A. Zastosowanie prętów zbrojeniowych z włókna szklanego (GFRP) w budownictwie. Przegląd Budowlany. 2015; 12: 21 – 26.
- [2] Kiernasowska A. Geosyntetyki w budownictwie – podział, funkcje i charakterystyka. Autostrady. 2022; 5: 55 – 59.
- [3] ISO 10406-1:2015 Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – Test methods – Part 1: FRP bars and grids.
- [4] PN-EN ISO 10319:2015 Geosyntetyki. Badanie wytrzymałości na rozciąganie metodą szerokich próbek.
- [5] PN-EN ISO 14688-1:2018. Rozpoznanie i badania geotechniczne – Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów – Część 1: Oznaczenie i opis.
- [6] PN-EN ISO 14688-2:2018. Rozpoznanie i badania geotechniczne – Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów – Część 2: Zasady klasyfikowania.
- [7] PN-EN ISO 17892-1:2015. Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 1: Oznaczenie wilgotności naturalnej.
- [8] PN-EN ISO 17892-2:2015. Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 2: Oznaczenie gęstości objętościowej.
- [9] PN-EN ISO 17892-4:2017. Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 4: Badanie uziarnienia gruntów.
- [10] PN-EN ISO 17892-5:2017. Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 5: Badanie edometryczne gruntów.
- [11] PN-EN ISO 17892-11:2019. Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 11: Badania filtracji.
- [12] PN-EN ISO 17892-12:2018. Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 12: Oznaczenie granic płynności i plastyczności.
- [13] PN-B-04481:1988. Grunty budowlane – Badania próbek gruntu.
- [14] PN-EN 13738:2006. Geotekstyli i wyroby pokrewne. Wyznaczenie oporu na wyciąganie z gruntu.
- [15] Duda A, Sobala D, Siwowski T. Badania wytrzymałości na ścinanie geokompozytów wykonanych z pakietów sprasowanych zużytych opon i materiału zasypowego. Acta Sci. Pol. Architectura. 2017; DOI: 10.22630/ASPA. 2017.16.3.01.
- [16] The German Geotechnical Society, Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements – EB-GEO, 2st Edition, Munich, Germany. 2012; DOI: <https://doi.org/10.1002/9783433600931>.

Badania zostały zrealizowane w ramach grantu pt. „System wzmacniania podłoża prętami kompozytowymi GFRP wraz z monitoringiem światłowodowym”, finansowanego przez Podkarpackie Centrum Innowacji (PCI), wniosek N2_056, umowa nr 47/PRZ/1/DG/PCI/2020.

Przyjęto do druku: 18.08.2023 r.