

Marek KULCZYKOWSKI, Urszula BOGDANOWICZ
Instytut Budownictwa Wodnego PAN

WPLYW ROZSTAWU WARSTW ZBROJENIA NA NOŚNOŚĆ I SPOSÓB ZNISZCZENIA ŚCIANY OPOROWEJ Z GRUNTU ZBROJONEGO - BADANIA DOŚWIADCZALNE

Streszczenie. W pracy opisano badania modelowe pionowej ściany oporowej z gruntu zbrojonego, wykonane w celu rozpoznania wpływu ilości warstw zbrojenia na nośność i sposób zniszczenia konstrukcji obciążonej fundamentem pasmowym. Przeprowadzono 5 serii doświadczeń z modelami o jednakowej wysokości i ilości zbrojenia, natomiast ze zróżnicowanymi odstępami między warstwami zbrojenia. Nie stwierdzono istotnego wpływu ilości warstw gruntu i zbrojenia na nośność graniczną, mechanizm zniszczenia i wysokość bryły odłamu.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE EFFECTS OF REINFORCEMENT SPACING ON CRITICAL LOAD AND FAILURE MODE IN REINFORCED SOIL RETAINING WALL

Summary. The paper presents the model tests performed on the vertical reinforced soil (RS) retaining wall. The purpose of these experiments was to investigate the effects of the number of reinforcement spacing on the critical load and failure mechanism of RS structure loaded with strip footing. Five series of tests were performed. Each model wall had the same height and was reinforced with the same amount of reinforcement distributed with the different reinforcement spacing. It was shown, that the distance between the spacing had no significant effect on critical load, failure mechanism and the height of failure zone.

1. Wstęp

W konstrukcjach z gruntu zbrojonego stosuje się zróżnicowane pionowe odstępy pomiędzy warstwami zbrojenia, w zależności od przyjętej technologii wykonania. W klasycznych konstrukcjach z gruntu wzmocnionego geowłókninami lub geosiatkami wysokości warstw gruntu nie przekraczają zazwyczaj 0,5 m. Natomiast w konstrukcjach gwoździowanych,

zbrojonych prętami stalowymi, odległości pomiędzy gwoździami wynoszą od 0,75 m do 3 m. Pomimo tak dużych różnic w odstępach warstw zbrojenia, w obu powyższych przypadkach przy projektowaniu stosuje się często podobne metody obliczeniowe.

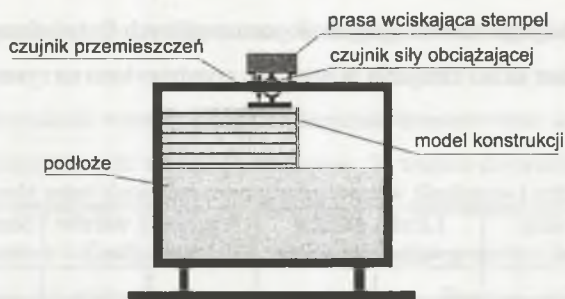
Większość informacji w literaturze światowej o odstępach między warstwami zbrojenia dostarczają zalecenia projektowe. Różne poradniki, normy i wytyczne do projektowania [4, 3, 1, 6] podają, bez szczególnego uzasadnienia, rekomendowane (0,5 m) oraz maksymalne (1,0 m) wartości tego parametru. Nieliczne prace naukowe poświęcone tej problematyce przedstawiają, niekiedy całkowicie zróżnicowane, wyniki analiz numerycznych. Przykładowo [7] stwierdzają, że optymalna liczba warstw zależy od geometrii konstrukcji. [2] uważają, że wysokość warstw gruntu nie ma wpływu na stateczność konstrukcji. Natomiast [5] twierdzą, że odstępy między warstwami zbrojenia mają istotny wpływ na mechanizm zniszczenia i sugerują weryfikację stosowanych obecnie metod projektowania.

Powyższa sprzeczność wyników oraz brak prac eksperymentalnych stał się motywem dla podjęcia badań nad tą problematyką w IBW PAN. Ich celem było rozpoznanie wpływu ilości warstw zbrojenia na nośność graniczną i sposób zniszczenia pionowej ściany oporowej z gruntu zbrojonego obciążonej fundamentem pasmowym. Poniżej przedstawiono wyniki badań doświadczalnych wykonanych z modelami o jednakowej wysokości, wzmocnionymi zbrojeniem o identycznej całkowitej powierzchni przekroju poprzecznego, natomiast o odmiennych odstępach pomiędzy warstwami zbrojenia.

2. Stanowisko badawcze oraz parametry gruntu i zbrojenia

Badania doświadczalne przeprowadzono w stanowisku badawczym w kształcie skrzyni prostopadłościowej o wymiarach 66 cm x 50 cm x 26 cm (rys. 1). Front stanowiska był przeszkłony szybą o grubości 2 cm, co umożliwiało obserwację i rejestrację deformacji konstrukcji w trakcie doświadczenia.

Do wykonania konstrukcji doświadczalnych użyto suchego piasku kwarcowego (tzw. piasku Lubiatowo) o ciężarze objętościowym $\gamma=17 \text{ kN/m}^3$, kącie tarcia wewnętrznego $\phi=31,3^\circ$ oraz spójności $c=0 \text{ kN/m}^2$, określonego jako drobny, równoziarnisty, sypki, suchy i bardzo dobrze zagęszczony.



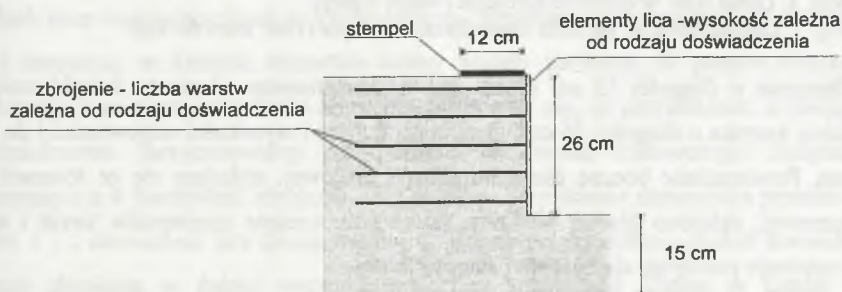
Rys. 1. Stanowisko badawcze

Fig. 1. Testing box

Do doświadczeń użyto typowej folii aluminiowej o grubości $18 \mu\text{m}$ i masie powierzchniowej wynoszącej 29 g/m^2 . Wytrzymałość folii na rozciąganie wyznaczona w zrywarcie, na 10 próbkach o szerokości 5 cm i długości 2 cm, równała się $37,2 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$, zaś średnie maksymalne odkształcenie folii przy zerwaniu ε_{max} wynosiło 0,3%.

3. Modele doświadczalne oraz sposób przygotowania eksperymentu

Modele eksperymentalne miały wysokość 26 cm i zbudowane były z warstw gruntu przedzielonych warstwami zbrojenia (rys.2). W każdej warstwie zbrojenia stanowiły trzy paski folii aluminiowej przymocowane do kartonowego elementu ścianki czołowej.



Rys. 2. Model eksperymentalny

Fig. 2. Experimental model

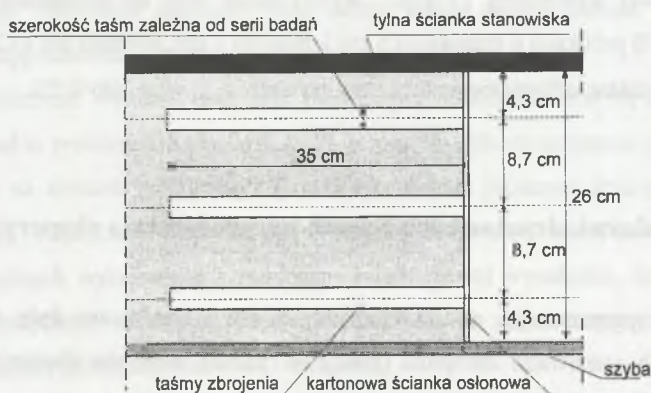
We wszystkich modelach zastosowano zbrojenie o jednakowej, całkowitej powierzchni przekroju poprzecznego wynoszącej $9,1 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. Przeprowadzono 5 serii badań wykonując w każdej po 2 lub 3 doświadczenia. We wszystkich seriach w konstrukcji zastosowano różną ilość warstw zbrojenia, co wiązało się z odmienną wysokością warstw gruntu oraz zróżnicowaną szerokością użytych taśm zbrojenia. Liczbę i wysokość warstw gruntu oraz

szerokości taśm zbrojenia zastosowanych w poszczególnych doświadczeniach zamieszczono w tablicy 1, natomiast układ zbrojenia w warstwie przedstawiono na rysunku 3.

Tablica 1

Liczba i wysokość warstw gruntu oraz szerokość taśm zbrojenia

Numer serii badań	Liczba warstw gruntu i zbrojenia	Wysokość warstw gruntu [cm]	Szerokość taśm zbrojenia [cm]
1	13	2	1,3
2	5	5,2	3,4
3	4	6,5	4,2
4	3	8,6	5,6
5	2	13	8,4



Rys. 3. Układ taśm w warstwie zbrojenia (widok z góry)

Fig. 3. Displacement of the belts in reinforcement layer (view from the top)

Zbrojenie o długości 35 cm mocowano do kartonowego elementu ścianki czołowej, w kształcie korytka o długości 26 cm, głębokości 0,5 cm i wysokości odpowiedniej do warstwy gruntu. Powierzchnie boczne elementu ścianki czołowej, stykające się ze ścianami skrzyni pomiarowej, oklejono gładką włókniną, która jednocześnie zmniejszała tarcie i stanowiła uszczelnienie pomiędzy elementem i stanowiskiem.

Podczas budowy modelu na wstępie usypywano warstwę piasku o miąższości 15 cm, stanowiącą podłoże konstrukcji. Grunt nasypywano ręcznie przez sito z wysokości ok. 100 cm, przez co otrzymywano równomiernie zagęszczony ośrodek o stałym ciężarze objętościowym 17 kN/m^3 . Następnie montowano tymczasową ściankę podporową, przy której ustawiano kartonowe elementy lica z przymocowanymi taśmami zbrojenia. Po nasypianiu warstwy gruntu piasek wyrównywano i układano taśmy. Położenie zbrojenia zaznaczano przy szybie stanowiska warstewką zabarwionego na czarno piasku o takich parametrach, jak

pozostały ośrodek gruntowy. Pozwalało to na obserwację deformacji konstrukcji w trakcie eksperymentu.

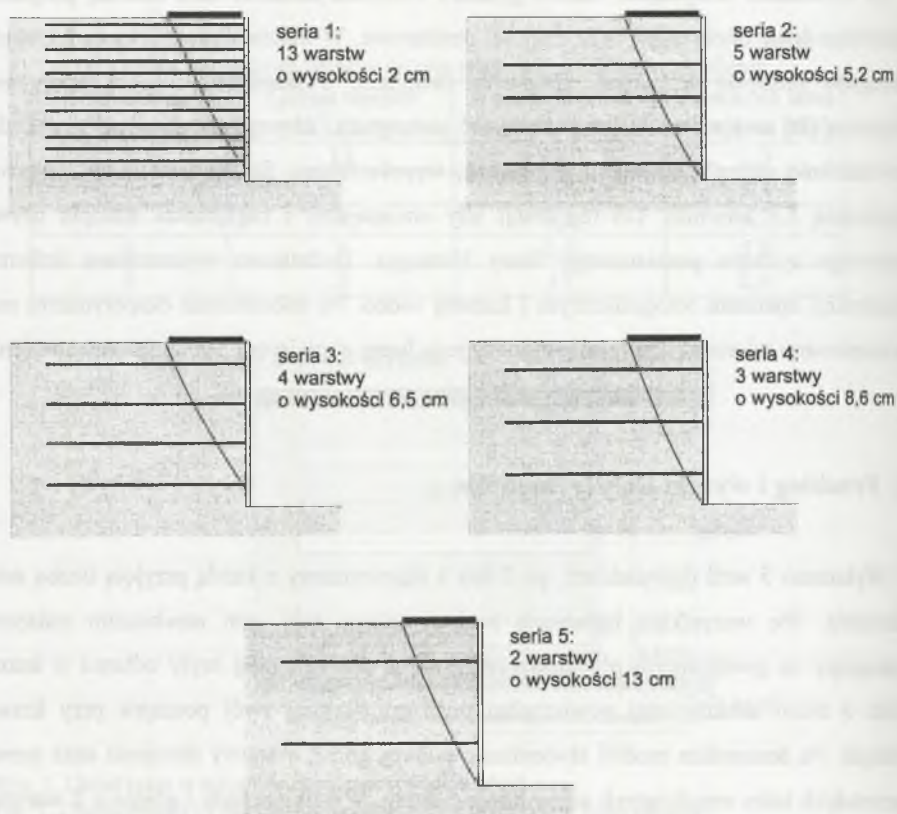
Po wykonaniu wszystkich warstw gruntu i zbrojenia demontowano ściankę podporową, ustawiano prasę obciążającą oraz czujniki pomiarowe. W trakcie doświadczenia konstrukcję obciążano pionowo sztywnym, stalowym stemplem, o szerokości 12 cm, który swoją długością (26 cm) wypełniał całą szerokość stanowiska. Aby zminimalizować tarcie, dolną powierzchnię stempla, na styku z gruntem, wypolerowano. Stempel wciskano pionowo z prędkością 3,3 mm/min. Do rejestracji siły obciążającej i zagłębienia stempla używano cyfrowego systemu pomiarowego firmy Hottinger. Dodatkowo rejestrowano deformację konstrukcji aparatem fotograficznym i kamerą wideo. Po zakończeniu eksperymentu model demontowano mierząc odległości pomiędzy jego licem a miejscem zerwania taśm zbrojenia.

4. Przebieg i wyniki eksperymentów

Wykonano 5 serii doświadczeń, po 2 lub 3 eksperymenty z każdą przyjętą liczbą warstw zbrojenia. We wszystkich badaniach zaobserwowano taki sam mechanizm zniszczenia polegający na gwałtownym przemieszczeniu się w dół jednolitej bryły odłamu w kształcie klina o nieco zaokrąglonej powierzchni poślizgu, mającej swój początek przy krawędzi stempla. Po demontażu modeli stwierdzono poślizg górnej warstwy zbrojenia oraz zerwanie pozostałych taśm znajdujących się w klinie odłamu. Wyjątkiem były badania z 2 warstwami gruntu i zbrojenia, w których wszystkie taśmy zostały zerwane. W prawie wszystkich doświadczeniach miejsca przerwania zbrojenia pokrywały się, w przybliżeniu, z zasięgiem strefy zniszczenia zarejestrowanej przy szybie stanowiska badawczego. Jedynie w eksperymentach z 4 warstwami zbrojenia linia poślizgu przy ścianie stanowiska przechodziła pomiędzy 1 i 2 elementem lica (licząc od dołu). Jednak po demontażu modeli stwierdzono przerwanie zbrojenia w dolnej warstwie przy licu konstrukcji. Zatem w każdej serii doświadczeń strefa zniszczenia obejmowała prawie całą wysokość konstrukcji, a wysokości klina odłamu i nachylenie powierzchni poślizgu nie zależały od ilości warstw gruntu i zbrojenia.

Na rysunku 4 przedstawiono strefy zniszczenia w poszczególnych seriach doświadczeń określone na podstawie analizy miejsc zerwania zbrojenia oraz linii poślizgu zarejestrowanej przy szybie stanowiska. Natomiast średnie wyniki nośności granicznej wysokości klina

odłamu oraz zagłębienia stempla w chwili zniszczenia, otrzymane w trakcie badań, przedstawiono w tablicy 2.



Rys. 4. Strefy zniszczenia
Fig. 4. Failure zones

Tablica 2

Liczba i wysokość warstw gruntu oraz szerokość taśm zbrojenia zastosowanych w poszczególnych doświadczeniach

Numer serii badań	Liczba warstw gruntu i zbrojenia	Siła maksymalna [kN]	Zagłębienie stempla [mm]	Wysokość strefy zniszczenia [cm]
1	13	0,614	5,1	24
2	5	0,661	5,8	26
3	4	0,609	5,8	23
4	3	0,630	6,3	26
5	2	0,756	8,2	26

Nośność graniczna konstrukcji była podobna we wszystkich eksperymentach z wyjątkiem serii badań z dwoma warstwami gruntu i zbrojenia. W tym przypadku większa wartość

obciążenia granicznego była prawdopodobnie spowodowana brakiem poślizgu górnych warstw zbrojenia, który występował w pozostałych eksperymentach. Natomiast zagłębienie stempla w chwili zniszczenia malało wraz ze wzrostem ilości warstw gruntu i zbrojenia.

5. Wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników badań, przy uwzględnieniu warunków brzegowych przeprowadzonych doświadczeń (lico segmentowe, długie zbrojenie o małej odkształcalności), można przedstawić następujące wnioski:

- liczba warstw zbrojenia nie wpływa na nośność graniczną konstrukcji. Większa nośność konstrukcji pomierzona w serii badań z dwoma warstwami była prawdopodobnie spowodowana brakiem poślizgu górnych warstw zbrojenia, który występował w pozostałych eksperymentach,
- liczba warstw zbrojenia w konstrukcji nie wpływa na mechanizm zniszczenia. W każdym doświadczeniu zniszczenie polegało na gwałtownym przemieszczeniu się w dół jednolitej bryły odłamu po nieco zaokrąglonej powierzchni poślizgu, mającej swój początek przy krawędzi stempla,
- liczba warstw zbrojenia w konstrukcji nie wpływa na kształt i wysokość strefy zniszczenia. W każdym doświadczeniu strefa zniszczenia, o kształcie zbliżonym do trójkątnego klina, obejmowała prawie całą wysokość konstrukcji,
- liczba warstw zbrojenia wpływa na wartość zagłębienia stempla w chwili zniszczenia. Zagłębienie stempla przy maksymalnej wartości obciążenia konstrukcji było największe w przypadku dwóch warstw zbrojenia i malało wraz ze wzrostem ilości warstw gruntu i zbrojenia w konstrukcji.

LITERATURA

1. British Standard BS 8006: Strengthened reinforced soils and other fills, BSI, London 1995.
2. Ho S.K., Rowe R.K.: Effect of wall geometry on the behaviour of reinforced soil walls, Geotextiles and Geomembranes Int. Jnl 17, 1996, p. 521-541.

3. Jewell R.A.: Soil reinforcement with geotextiles, CIRIA, London 1996.
4. Jones C.J.R.P.: Earth reinforcement soil structures, Telford, London 1996.
5. Leshchinsky D., Vulova C.: Numerical investigation on the effects of geosynthetic spacing on failure mechanisms in MSE block walls, *Geosynthetics International* 8, 4, 2001, p. 343-365.
6. Polyfelt: Design of reinforced soil slopes and walls with Polyfelt Rock PEC, Technical Information, Polyfelt Ges.m.b.H., 1997.
7. Sabhahit N., Basudhar P.K., Madhav M. R.: A generalized procedure for the optimum design of nailed soil slopes, *Int. Jnl for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 19, 1995, p. 437-452.

Recenzent: Dr hab. inż. Adam BOLT, prof. PG

Abstract

The paper describes laboratory tests performed on models of reinforced soil retaining walls with different reinforcement spacing. The purpose of these experiments was to investigate the effects of the number of reinforcement spacing on the critical load and failure mechanism of RS structures. Each model wall had the same height and was reinforced with the same amount of reinforcement. Therefore various widths of reinforcement strips were used in models with different spacing. All walls were loaded at their crest using the smooth rigid footing. Five series of tests were performed. It was shown that the number of reinforcement spacing had no significant effect on critical load, failure mechanism and the height of the failure zone.