

Andrzej Pawłowski, Daniel Garlikowski, Henryk Orzeszyna, Krzysztof Lejcuś

**MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA
ZBROJENIA ROZPROSZONEGO DO POPRAWY
WŁAŚCIWOŚCI GRUNTÓW**

***POSSIBILITY OF USING FIBRE REINFORCEMENT
TO IMPROVE SOILS PROPERTIES INCLUDING
APPLICATION IN ANTIEROSION PROTECTION***

Streszczenie

W pracy przedstawiono analizy wyników badań gruntów ze zbrojeniem rozproszonym z włókien oraz omówiono możliwości ich zastosowania w inżynierii geotechnicznej oraz inżynierii środowiska. Użycie takiego zbrojenia pozwala na wykonywanie elastycznych budowli ziemnych z zazielenieniem powierzchni zewnętrznych oraz stosunkowo dużą odpornością na nierównomierne osiadania, co pozwala na zastąpienie ciężkich, sztywnych i obcych w krajobrazie konstrukcji betonowych. Poprzez zmieszanie z gruntem włókien syntetycznych, zarówno tych produkowanych specjalnie, jako zbrojenie, jak też innych włókien, np. odzyskanych z odpadów wykładzin lub folii, czasem dodając bardzo niewielką ilość cementu, uzyskuje się wzrost wytrzymałości na ściskanie, także jej wartości rezydualnej. Zbrojenie nie przeszkadza wzrostowi roślin ani infiltracji wody, a zatem kompozyt złożony z gruntu i włókien jest rozwiązaniem przyjaznym środowisku. Wyższa wytrzymałość wpływa pozytywnie na inne parametry gruntu, takie jak odporność na przebicie hydrauliczne i odporność na erozję, jednak brak jest większej ilości informacji na temat tego zakresu zastosowań.

Summary

Analysis of tests on soils with randomly distributed fibre reinforcement and possibilities of its application in geotechnical and environmental engineering were presented in the paper. Using this type of reinforcement it is possible to form flexible earth structures with green surfaces and relatively high resistance on dif-

ferent settlement substituting heavy, rigid and strange in the landscape concrete structures. By mixing synthetic fibers, both specially produced as reinforcement or other ones eg. recovered from waste carpets or foils, with soil and sometimes very small amount of cement, shear strength resistance and its residual value increase is achieved. Reinforcement dose not disturb growth of plants or water infiltration, so the fiber-soil composite is an environmental friendly solution. Higher strength is positively influencing other soil parameters like piping resistance or resistance against erosion, but in this field of application there is much less investigation data.

Key words: soil fiber reinforcement

WSTĘP

W budownictwie ziemnym od dawna stosowane są techniki pozwalające na poprawę właściwości wytrzymałościowych gruntów. Jedną z nich jest zbrojenie gruntu, czyli wprowadzenie do gruntu elementów o dużej wytrzymałości na rozciąganie, które dzięki siłom tarcia współpracują z gruntem, przejmując siły rozciągające. Możliwość stabilizacji słabych gruntów za pomocą dodatkowych elementów wprowadzonych w ich strukturę znana była już w czasach starożytnych [Sarsby 2003]. Technika zbrojenia gruntu jest obecnie szeroko stosowana, szczególnie w konstrukcjach oporowych. Materiały naturalne, które ulegają stopniowej biodegradacji (wyjątkiem są włókna kokosowe charakteryzujące się większą trwałością), zostały współcześnie zastąpione przez elementy metalowe oraz materiały syntetyczne odporne na agresywne działanie różnych związków chemicznych [Dhillon 1999]. Zbrojenie jest stosowane w różnej formie: np. w postaci cięgien z płaskowników metalowych, w postaci syntetycznych georusztów lub geotekstyliów, jako kotwy składające się metalowego cięgna i betonowej otuliny albo w postaci tzw. zbrojenia rozproszonego – krótkich włókien z tworzyw sztucznych, pozyskiwanych niekiedy z materiałów odpadowych. Zbrojenie może mieć postać włókna ciągłego, jak w przypadku unikalnej techniki „texsol” [Jaromiak 1999]. Również naturalne systemy korzeniowe mogą być traktowane jako wzmocnienie podłoża, chociaż po obumarciu rośliny, z uwagi na stopniowy rozkład w gruncie, przestają spełniać tę pożyteczną rolę. Badania nad znaczeniem systemów korzeniowych dla stateczności zboczy stały się punktem wyjścia dla późniejszych analiz gruntu ze zbrojeniem rozproszonym [Chunling 2005].

Istnieją liczne normy i wytyczne określające sposób projektowania oraz realizacji konstrukcji ze zbrojeniem w postaci cięgien i elementów powierzchniowych. Natomiast autorzy nie spotkali dotychczas uregulowań normowych w dziedzinie zastosowania zbrojenia rozproszonego w gruntach, chociaż w laboratoriach, a czasem w terenie, prowadzi się wiele badań na ten temat.

Na podstawie uzyskanych wyników badacze proponują szeroki zakres potencjalnych zastosowań zbrojenia rozproszonego [Chunling Li 2005; French 2002; Furumoto i in. 2002]:

- zwiększenie nośności gruntu i jego wytrzymałości trwałej,
- naprawa i zapobieganie lokalnym, płytkim osuwiskom na skarpach,
- stabilizacja warstw przykrywających, np. warstw rekultywacyjnych składowisk,
- stabilizacja podbudowy dróg wykonanej z gruntów spoistych lub nie-spoistych,
- uzupełnienie zbrojenia linearnego lub dwuwymiarowego w konstrukcjach oporowych z gruntu zbrojonego,
- redukcja ilości i rozwartości rys (szczelin) w budowlach ziemnych z gruntów spoistych narażonych na cykliczne zmiany wilgotności (wysychanie/namakanie),
- stabilizacja gruntów ekspansywnych,
- zwiększenie odporności podłoża na obciążenia dynamiczne,
- zwiększenie odporności na erozję i przebicie hydrauliczne.

Zastosowanie zbrojenia rozproszonego, szczególnie w postaci włókien ciągłych, daje możliwości tworzenia konstrukcji bliskich naturze, elastycznych i łatwych do zazielenienia. W przeciwieństwie do ażurowych struktur żelbetowych lub okładzin kamiennych chroniących zbocza przed erozją, skarpy zabezpieczone przy wykorzystaniu opisywanej technologii, przypominając naturalne formacje nie stanowią obcego elementu w krajobrazie, są przepuszczalne, umożliwiają trwały wzrost roślin i przywracają równowagę ekologiczną. Zwykle mniejsza jest również, w stosunku do poprzednich rozwiązań w systemach półzamkniętych (okrywa roślinna na ażurowych powierzchniach betonowych), potrzeba pielęgnacji [Mak 2003].

Aby racjonalnie zaprojektować budowlę ziemną z wykorzystaniem gruntu lub jego substytutu ze zbrojeniem rozproszonym konieczne jest określenie jego właściwości, a szczególnie właściwości wytrzymałościowych. Celem przedstawianej pracy jest dokonanie przeglądu i porównanie wyników badań z różnych ośrodków, z uwzględnieniem badań wykonywanych w Instytucie Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Jest to pierwszy etap przed ewentualnymi zastosowaniami w skali półtechnicznej i późniejszych aplikacji w budownictwie ziemnym. Omawiana technika pozwala na wykorzystanie materiałów odpadowych. Takie próby były już podejmowane, np. w budownictwie drogowym w Stanach Zjednoczonych.

METODYKA BADAŃ

Wykonywane w różnych ośrodkach badania gruntów modyfikowanych poprzez wprowadzenie zbrojenia rozproszonego lub z włókien ciągłych obejmują szeroki wachlarz gruntów spoistych i niespoistych, a nawet mineralnych odpadów przemysłowych, np. popiołów lotnych z węgla kamiennego. Włókna mogą być wytwarzane specjalnie do wykorzystania w charakterze zbrojenia (zwykle były wykorzystywane włókna przeznaczone do badania betonów) albo składać się z elementów wykonanych z pociętych na paski lub rozwłóknionych materiałów odpadowych, np. odpadów z wykładzin dywanowych. Rodzaj włókien wpływa na ilość dozowanego zbrojenia. W przypadku krótkich włókien syntetycznych oraz włókien ciągłych jest to zwykle 0,1 do 0,4% w stosunku do masy gruntu. W przypadku materiałów odpadowych ilość dozowanego zbrojenia może być nawet dziesięciokrotnie wyższa. Podstawowe dane odnośnie rodzajów badanych gruntów i ilości zbrojenia rozproszonego zestawiono w tabeli 1. W warunkach laboratoryjnych modeluje się zbrojenie włóknem ciągłym o długości od kilkunastu milimetrów do nawet 200/300 mm [Akagi i in. 1992].

Zbrojenie z krótkich włókien jest mieszane z materiałem gruntowym suchym lub przy stopniowym dodawaniu wody, szczególnie w przypadku gruntów spoistych. Do aplikacji w terenie można wykorzystać mieszacz rotacyjny – maszynę standardowo używaną do stabilizacji gruntów wapnem. W przypadku włókien ciągłych, podobnie jak w zastosowaniach praktycznych, konieczne jest zastosowanie ciągłego dozowania zbrojenia i specjalistycznego sprzętu.

Niemal we wszystkich programach materiał bez zbrojenia i ze zbrojeniem poddawany był badaniu w aparacie Proctora. Właściwości wytrzymałościowe określano w aparacie bezpośredniego ścinania, w badaniu ściskania jednoosiowego lub w aparacie trójosiowego ściskania albo poprzez wyznaczenie współczynnika CBR (California Bearing Ratio – kalifornijski wskaźnik nośności).

Poza badaniami wytrzymałości na ścinanie prowadzone są badania innych cech ściśle związanych z potencjalnymi zastosowaniami zbrojenia rozproszonego, np. wpływ zbrojenia na współczynniki filtracji w przypadku zastosowań w mineralnych uszczelnieniach składowisk, odporność na przebicie hydrauliczne, odporność erozyjną na działanie deszczów nawalnych, odporność na rozmakanie itp. Zwykle stosowana jest standardowa metodyka badań taka sama, jak dla gruntów naturalnych, która jest dobrze opracowana i szczegółowo uregulowana przez normy. W przypadku stosowania materiałów mających zdolności wiążące (popiół lotny, cement) bada się również przyrost wytrzymałości i zmianę innych parametrów, na które wpływa proces wiązania. Ponieważ nie ma jasnych poglądów co do optymalnej ilości i rodzaju włókien zbrojenia, badania obejmują często określenie wpływu ilości i rodzaju zbrojenia oraz jego długości na charakterystykę wytrzymałościową i inne cechy, ważne dla ewentualnych aplikacji.

Tabela 1. Przykładowe programy badań gruntów naturalnych i antropogenicznych ze zbrojeniem rozproszonym**Table 1.** Examples of tests programs for natural and anthropogenic soils reinforced with randomly distributed reinforcement

Rodzaj gruntu Soil type	Rodzaj zbrojenia Reinforcement type	Ilość zbrojenia Quantity of reinforcement	Rodzaj badań* Type of tests*	Źródło informacji Source of information
Popiół lotny (pył piaszczysty)	Włókna gładkie fibrylowane L = 19 mm i 34 mm	0,3%	ABS	Wolańska 2004
	Włókna czepliwe L = 12 i 19 mm			
Popiół lotny	Włókna polipropylenowe L = 20 mm	4 kg/m ³	ABS	Giri, Sent- Hil 2004
Popiół lotny + piasek		4 kg/m ³		
Popiół lotny + piasek + cement		4 – 6 kg/m ³		
Glina	Paski folii (PE) 2,5x30x x0,16 mm 5x30x0,16 mm	0,32 %	ABS	Musiąła 2003
Piasek (zakres uziarnienia d = 3–9 mm, U = d ₆₀ /d ₁₀ =2) z dodatkiem cementu	Wiązka 30 włókien syntetycznych l = 300 mm w próbce Ø 50, h = 100 mm	9 m	ATS, SJ odporność na erozję	Akagi i in. 1992
H (black cotton soil)	Pasma wycięte z geo-tkaniny g = 0,5 mm, l = 12,5 mm lub 25 mm; włókno szklane Ø 0,1 mm l = 25 lub 50 mm	1–3 %	ABS, CBR	Gosavia i in. 2004
Piasek rzeczny równo- miernie uziarniony	Włókna poliestrowe Ø=0,45 µm, l=64 mm	0,1–0,4 %	Przebicie hydra- uliczne	Furumoto i in. 2002
Popiół lotny ze zbior- ników osadowych	Włókna poliestrowe L = 30 mm	0,1–0,4 %	ABS, SJ, CBR	Kumar i in. 1999
Piasek pylasty				
Piasek równomiernie uziarniony U = 1,56	Fibrylowane (nacinane wzdłużnie) włókna poliprop- ylenowe L = 25 mm	0,1–0,3 %	ABS, CBR	Nataraj, Mcmanis, 1997
H		0,1–0,3%		

*Skróty w kolumnie „Rodzaj badań”: **ABS** – aparat bezpośredniego ścinania; **SJ** - ściskanie jednoosiowe; **ATS** – aparat trójosiowego ściskania; **CBR** – kalifornijski wskaźnik nośności

* Abbreviations in the column „Type of tests”: **ABS** – direct shear tests; **SJ** – unconfined compression tests; **ATS** – triaxial compression tests; **CBR** – California Bearing Ratio

Do badań w laboratorium macierzystej jednostki autorów, które realizowano w ramach pracy dyplomowej [Wolańska 2004], zostało wybrane zbrojenie z włókien polipropylenowych fibrylowanych (nacinane wzdłużnie) długości 19 lub 34 mm oraz z mikrowłókien polipropylenowych o długościach 12 i 19 mm stosowanych standardowo do betonów w połączeniu z popiołem lotnym z węgla

kamiennego ze składowiska Elektrociepłowni Czechnica w Siechnicy (fot. 1). Wszystkie badania cech fizycznych oraz wytrzymałościowych (m.in. wyznaczenie gęstości objętościowej, badanie Proctora, badania w aparacie bezpośredniego ścinania dla wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,95$) były wykonywane dla 0,3% wagowej zawartości zbrojenia, co jak wynika ze studiów dostępnej literatury zbliżone jest do ilości optymalnej i daje łatwość porównań z innymi badaniami.



Fotografia 1. Popiół lotny z dwoma rodzajami zbrojenia: z lewej cienkie włókna polipropylenowe (średnica ok. 118 μm); z prawej włókna polipropylenowe, cięte i fibrylowane (średnica ok. 100 μm)

Photo 1. Fly ash with two types of reinforcement: left polypropylene fibers (diameter ca. 118 μm), right cut and fibrillated polypropylene fibers (diameter ca. 100 μm)

WYNIKI I DYSKUSJA

Analizie poddano wyniki badań wykonanych w macierzystej jednostce, w których sprawdzano wpływ długości zbrojenia na właściwości popiołów lotnych z węgla kamiennego oraz badań wykonanych za granicą. Przegląd literatury pokazuje, że najczęściej publikacji jest poświęconych wpływowi zbrojenia rozproszonego na parametry wytrzymałościowe wzmocnianego gruntu. Z gruntem zwykle mieszane są cienkie włókna polipropylenowe, które są produkowane na skalę przemysłową (przede wszystkim jako zbrojenie do betonów) i jak wynika z licznych badań, wymagają dozowania w podobnych ilościach, tj. 0,1–0,4% wagowych. Ułatwia to porównywanie wyników prac prowadzonych w różnych ośrodkach.

Grunty naturalne i antropogeniczne zawierające włókna syntetyczne rozmieszczony w sposób losowy wykazują przyrost wytrzymałości, głównie wskutek wzrostu kohezji, chociaż niekiedy obserwowany jest również wzrost kąta tarcia wewnętrznego. Wzmocniony przez włókna materiał gruntowy charaktery-

zuje się rezydualną wytrzymałością na ścinanie bliską wytrzymałości maksymalnej – następuje wyraźna poprawa współczynnika kruchości (*brittleness factor*), a w przypadku gruntu spoistego jest on znacznie bardziej odporny na pojawianie się rys i szczelin spowodowanych deformacją lub wysychaniem. Przykładowe efekty poprawy parametrów wytrzymałościowych przedstawiono w tabeli 2 oraz na wykresach (rys. 1 i 2). Na osobnych rysunkach (rys. 3 i 4) pokazano wpływ długości włókien badanego zbrojenia na kąt tarcia wewnętrznego i kohezję. Jak wynika z rysunku 1 i tabeli 2 rodzaj gruntu ma bardzo istotne znaczenie nie tylko dla bezwzględnego przyrostu wytrzymałości na ścinanie, ale także dla przebiegu procesu zniszczenia. W przypadku piasku pylastego wskutek zastosowania zbrojenia rozproszonego wraz z ilością dodanych włókien zwiększał się przede wszystkim kąt tarcia wewnętrznego, w przypadku popiołu lotnego i piasku zaobserwowano wzrost zarówno kąta tarcia wewnętrznego, jak i kohezji, chociaż w badaniach popiołu lotnego ze składowiska elektrociepłowni Siechnica stwierdzono zmniejszenie się wartości kohezji w stosunku do materiału bez zbrojenia, a w przypadku mikrowłókien o długości 19 mm brak efektu wzmocnienia także w odniesieniu do kąta tarcia wewnętrznego. Szczególnie duże przyrosty wartości obu parametrów wytrzymałościowych gruntu przyniosło dodanie zbrojenia do łu – uzyskane efekty były znacznie większe niż w przypadku pozostałych gruntów.

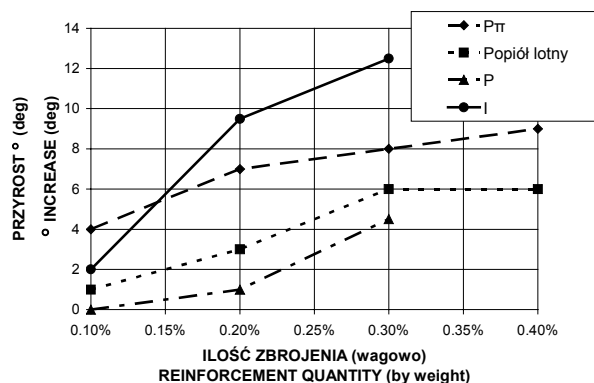
Tabela 2. Przyrost wartości parametrów wytrzymałościowych różnych rodzajów gruntów naturalnych i antropogenicznych zbrojonych krótkimi włóknami polipropylenowymi
Table 2. Strength parameters values increase of different natural and anthropogenic soils with short polypropylene fiber reinforcements

Rodzaj gruntu Type of soil	Piasek pylasty Silty sand		Popiół lotny Fly ash		Piasek U = 1,56 Sand U = 1,56		Ił Clay	
	$\Phi = 32^\circ$ $c = 15 \text{ kPa}$		$\Phi = 37^\circ$ $c = 16 \text{ kPa}$		$\Phi = 33,5^\circ$ $c = 0 \text{ kPa}$		$\Phi = 19,5^\circ$ $c = 88 \text{ kPa}$	
Ilość zbrojenia Reinforcement quantity	$\Delta\Phi$	Δc	$\Delta\Phi$	Δc	$\Delta\Phi$	Δc	$\Delta\Phi c$	Δc
	deg	kPa	deg	kPa	deg	kPa	deg	kPa
0,1 %	4	1	1	6	0,4	3	2	14
0,2 %	7	1	3	9	1	9	9,5	31,5
0,3 %	8	2	6	10	4,5	9,6	12,5	38,5
0,4 %	9	2	6	11				
Źródło	Kumar i in. 1999				Nataraj i in. 1997			

Jako zbrojenie można wykorzystywać inne materiały, także odpadowe. Podejmowano badania nad zastosowaniem włókna szklanego [Gosavi i in. 2004], pasków i włókien syntetycznych z odpadów wykładzin lub folii itp. [Scott 2003, Musiała 2003]. Zwykle wymagane jest wówczas dozowanie niekiedy nawet 10-krotnie większych ilości zbrojenia. Zdarza się, że niestandardowe zbrojenie nie spełnia oczekiwań. Na przykład wiotkie zbrojenie z folii, nawet po starannym wymieszaniu, nie zawsze układa się równomiernie i dopiero celowe ustawienie pasków prostopadłe do powierzchni ścinania przynosi widoczne efekty [Musiała 2003].

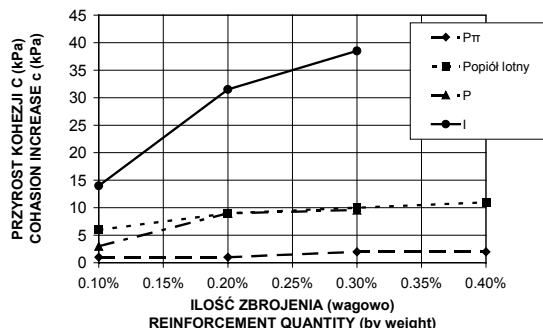
Inne cechy gruntu ze zbrojeniem rozproszonym mogą ulec nieznaczniemu pogorszeniu, przy czym autorzy często różnią się w ocenie wpływu zbrojenia, np. na zagęszczalność gruntu, wilgotność optymalną, współczynnik filtracji, wskazując albo na korzystne, albo na niekorzystne zmiany tych parametrów. W badaniach popiołu lotnego z Elektrociepłowni Czechnica w aparacie Proctora zauważono, że zbrojenie zmniejszało maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego ($\rho_{ds} = 1,22 \text{ t/m}^3$ dla popiołu lotnego, $\rho_{ds} = 1,14\text{--}1,19 \text{ t/m}^3$ dla popiołu ze zbrojeniem) i zwiększało wilgotność optymalną o 5–10%, co może być związane z częściowym zatrzymywaniem wody przez włókna.

Inne badania, także w zakresie odporności na przebicie hydrauliczne i erozję wskazują na znaczący pozytywny efekt wzmocnienia gruntu [Furumoto i in. 2002; Akagi i in. 1992]. Niewielki, oprócz zbrojenia piasku włóknem ciągłym, dodatek cementu – ok. 0,7% – wpływa na znaczny wzrost odporności na działanie deszczów nawalnych, nie powodując przy tym redukcji wysokiego współczynnika filtracji i pozwalając na porost traw.

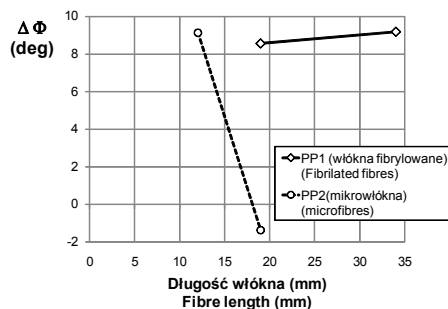


Rysunek 1. Przyrost wartości kąta tarcia wewnętrzznego w zależności od ilości zbrojenia i rodzaju gruntu

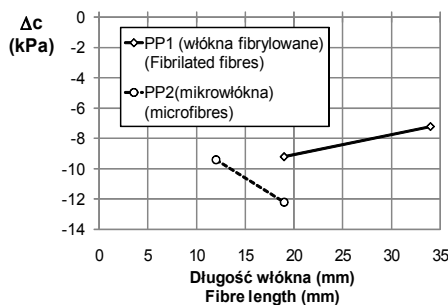
Figure 1. Angle of internal friction increase as a function of reinforcement quantity and type of soil



Rysunek 2. Przyrost kohezji w zależności od ilości zbrojenia i rodzaju gruntu
Figure 2. Cohesion increase as a function of reinforcement quantity and type of soil



Rysunek 3. Przyrost wartości kąta tarcia wewnętrznego popiołu lotnego w zależności od rodzaju i długości włókien zbrojenia
Figure 3. Angle of fly ash internal friction increase as a function of fibre reinforcement length and type



Rysunek 4. Przyrost kohezji popiołu lotnego w zależności od rodzaju i długości włókien zbrojenia
Figure 4. Fly ash cohesion increase as a function of reinforcement fibre reinforcement length and type

WNIOSKI

Badania prowadzone przez różne ośrodki wskazują, że zastosowanie zbrojenia rozproszonego, którego ilość waha się zwykle w granicach 0,1–0,4 % (w przypadku syntetycznych pasków pochodzących z odpadów folii lub innych materiałów włóknistych), ilość ta może być nawet 10-krotnie większa) wpływa korzystnie na charakterystykę wytrzymałościową gruntu, zwiększając kąt tarcia wewnętrznego i kohezję oraz wartość trwałej wytrzymałości na ścinanie. Maksymalna wartość wytrzymałości jest uzyskiwana przy większych odkształceniach względnych niż w przypadku gruntu bez zbrojenia. Optymalną długość, ilość i rodzaj włókien należy dobierać w zależności od rodzaju gruntu. Zastosowanie krótkich włókien syntetycznych, jako zbrojenia, może utrudniać zagęszczanie i zwiększać wilgotność optymalną. Stabilizacja cząstek gruntu dzięki zastosowaniu zbrojenia pozwala na wykorzystanie tej techniki w celu zwiększenia odporności na przebicie hydrauliczne oraz na erozję. Konstrukcja jest elastyczna i odporna na różnice osiadań podłoża.

Brak zewnętrznych elementów konstrukcyjnych pozwala na wzrost roślin, dzięki czemu powierzchnia budowli stanowi naturalny element w krajobrazie. Przy zastosowaniu włókna ciągłego możliwe jest uzyskiwanie bardzo stromych, prawie pionowych „zielonych” ścian, pełniących taką samą rolę jak konstrukcje oporowe wykonywane z materiałów tradycyjnych.

BIBLIOGRAFIA

- Akagi T., Ishida T., Okawara S. *An improvement in continuous yarn reinforced sand*. Proc. of the Int. Symposium on earth reinforcement practice, Fukuoka/Kyushu, November 1992, A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield/, 1992, s. 3–8.
- Chunling Li. *Mechanical Response Of Fiber-Reinforced Soil*. Dissertation. University of Texas at Austin, 2005, s. 1–212.
- Dhilon G. S. *Fibre reinforced soil*. Science Tribune, Chandigarh, February 25, 1999.
- French S. *The Use of Plastic Waste in Highway Construction*. Project Technovation Civil Engineering Materials, 2 March, 2002, 1–9.
- Furumoto K., Miki H., Tsuneoka N., Obata T. *Model test on the piping resistance of short fibre reinforced soil and its application to river levee*. Geosynthetics – 7th ICG – Delmas, Gourc & Girard (eds), 2002, s. 1241–1244.
- Giri P., Senthil K. *Use of Sand and Fibre to Modify Shear Strength Parameter of Fly Ash*. Int. e-Conference on Modern Trends in Foundation Engineering, Geotechnical Challenges and Solutions, January 26-30, Indian Institute of Technology, Madras, India, 2004.
- Gosavi M., Patil K. A., Mittal S., Saran S. *Improvement of Properties of Black cotton Soil Sub-grade through synthetic reinforcement*. IE(I) Journal CV, Vol 84, February, 2004, s. 257–262.
- Jaromiak A. *Lekkie konstrukcje oporowe*. WKiŁ, Warszawa 1999, s. 1–328.
- Kumar R., Kanaujia V. K., Chandra D. *Engineering Behaviour of Fibre-Reinforced Pond Ash and Silty Sand*. Geosynthetics International, Vol. 6, No 6, 1999, s. 509–518.

- Mak, N S C Technical Presentation at the Seminar on Green Slope technique organized by the Environmental Division of the Hong Kong Institution of Engineers, on 26 August, 2003, wg: Yim K. P. Sustainability considerations in the design of slope works, 2004.
- Musiąła Ł. Wpływ zbrojenia rozproszonego z odpadów folii na parametry wytrzymałościowe gruntu, praca dyplomowa., Instytut Inżynierii Środowiska Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 2003, maszynopis.
- Nataraj M. S., Mcmanis K. L. *Strength and Deformation Properties of Soils Reinforced with Fibrilated Fibers*. Geosynthetics International, Vol 4, No 1, 1997, 65–79.
- Sarsby R. W *Time Dependent Behaviour Of Embankment Reinforced With Limited Life Geotextiles*. Proceedings of The RICS Foundation Construction and Building Research Conference September, The RICS Foundation, London 2003, s. 456–469.
- Wolańska O. *Parametry wytrzymałościowe popiołów lotnych z węgla kamiennego ze zbrojeniem rozproszonym*. Instytut Inżynierii Środowiska Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 2004, praca dyplomowa, maszynopis.
- Yim K. P. sustainability considerations in the design of slope works 2004, <http://www.archsd.gov.hk/english/reports/c3120.pdf>, 1–16.

Dr inż. Andrzej Pawłowski,
Dr inż. Daniel Garlikowski,
Dr inż. Henryk Orzeszyna,
Dr Krzysztof Lejcuś
Instytut Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu
pl. Grunwaldzki 24
50-363 Wrocław
mail:pawlowski@iis.ar.wroc.pl

Recenzent: *Prof. dr hab. Jerzy Kowalski*