Magazyn ABUTTOSTRADOUrvelamed. TEUTOSTRADU V

201

Budownictwo drogowo-mostowe

Właściwości reologi<mark>czne</mark> samozagęszczalnej mieszanki betonowej

Optymalizacja gęstości upakowania kruszywa

PKP COLOO SERVICE

Dokąd zmierza branża?

dr inż. Krzysztof Gradkowski, Politechnika Warszawska

Badania nad strukturami planarnego zbrojenia geotekstyliami gruntowych podłoży nawierzchni dróg

W procesach zastosowań technicznych różnych form geosyntetyków rola doświadczeń wynikających z testów i badań modelowych, doświadczeń i pomiarów w laboratoriach staje się decydująca. Od kilkudziesięciu lat trwają w tym zakresie intensywne prace w celu udoskonalenia i efektywnego zastosowania różnego typu geosyntetyków, szczególnie w budownictwie infrastrukturalnym.

W ogólnym zarysie można wyodrębnić w ostatnich dwóch latach dwa główne kierunki prac badawczych;

- doświadczenia laboratoryjne oraz testy zastosowań technicznych, zmierzające do wykorzystania własności fizykomechanicznych geotekstyliów instalowanych w gruntach i wykorzystywania ich własności jako substytuty warstw gruntów o wyższej jakości, w tym własności filtracyjnych i izolacyjnych (1, 4, 7, 8),
- badania laboratoryjne polegające na weryfikacji i ulepszaniu parametrów fizykomechanicznych samych geosyntetyków jako materiału zbrojącego i filtrującego ośrodek gruntowy (12, 13).

W dotychczasowej praktyce inżynierskiej w podłożach nawierzchni dróg samochodowych geosyntetyki w formie geotekstyliów, określane zamiennie jako geowłókniny, są stosowane przede wszystkim jako warstwy izolujące i separujące dwa rodzaje warstw gruntów lub kruszyw. W ogólnych założeniach sposoby wzmocnień i zbrojeń geosyntetykami dotyczą głównie gruntów piaszczystych w stanach sypkich i mało spoistych, o zbliżonych parametrach geotechnicznych, podobnych do parametrów gruntów przeznaczonych do ulepszania spoiwami hydraulicznymi. W podłożach nawierzchni drogowej i innych obiektów drogowych geotekstylia w pojedynczym ułożeniu spełniają głównie funkcję warstwy filtrującej i drenującej. Znacznie więcej doświadczeń w stosowaniu geosyntetyków zebrano w zakresie gruntów zbrojonych w konstrukcji nasypów, podłoży nasypów z "materacami", przyczółków obiektów mostowych, stromych skarp budowli ziemnych i ścian oporowych, a także niektórych form drenaży. Tylko w pewnych przypadkach, na przykład w niektórych metodach obliczeniowych stateczności skarp, można uwzględnić bezpośrednio fakt zastosowania geotekstyliów. Sposoby planarnego, czyli poziomego, ułożenia zbrojenia geotekstyliów w warstwach gruntowych podłoża nawierzchni mogą być jednoznacznie rozpoznane jedynie na podstawie pomiarów takich zastosowań w pełnej skali technicznej. Pozwoli to stwierdzić, na ile rozwiązania takie są alternatywne w stosunku do innych sposobów ulepszeń podłoża nawierzchni drogowych (1, 10). Zmiany odkształcalności różnych modeli gruntowych warstw podłoży nawierzchni pozwalają na wskazanie technicznego sposobu zastosowania geotekstyliów jako zbrojenia kilkuwarstwowego. Rozwiązanie to nie zostało jeszcze zweryfikowane w praktyce wykonawczej. W praktyce podstawowym parametrem efektu wzmocnienia pod-

Summary

In the processes of technical applications of various forms of geosynthetics, the role of the experience from the tests and model tests, experiments and laboratory measurements, is of crucial importance. For decades, there have been intensive works to refine and use more effectively various types of geosynthetics, especially in infrastructural construction.

łoża nawierzchni drogowej jest uzyskanie wymaganych modułów odkształcenia E_1 i E_2 , czyli z polowego pomiaru typu VSS przy wymaganym wskaźniku zagęszczenia I_s .

Celem przeprowadzanych badań i testów laboratoryjnych było uzupełnienie i sprawdzenie niektórych tez i wniosków zawartych w pracy (2). Wyniki pomiarów modelowych warstw odkształcalności gruntów wzmacnianych geotekstyliami stworzyły przesłanki do dalszych kierunków badań i testów, jednak nie rozstrzygnęły całkowicie o pełnym zastosowaniu tego rodzaju zbrojenia gruntów w podłożach nawierzchni drogowych.

Założenia i program badań laboratoryjnych

W kontekście sformułowania odpowiedniego programu badań laboratoryjnych na szczególną uwagę zasługują badania zreferowane w pracy (6). Na sztywną, kwadratową płytę stalową było przekazywane obciążenie statyczne za pomocą układu hydraulicznego. Odpowiadający schemat układu zbrojenia podłoża gruntowego warstwami geosyntetyków stanowiących geotekstylia różnych gramatur prezentuje rys. 1. Grunt modelu podłoża wypełniający pojemnik metalowy o pojemności ok. 0,5 m³ stanowił jeden rodzaj piasku, $\rho = 1,56$ g/cm³; był on wielokrotnie napełniany i jednolicie zagęszczany przy zmiennej liczbie warstw zbrojenia geotekstylnego. Pomierzone wielkości fizyczne osiadań i naprężeń na poszczególnych wykresach wyników są odniesione do jednostek bezwymiarowych, czyli *u/B, h/B, b/B i d_r/B*. Dodatkowo stosunek *d_r/B* określono jako współczynnik głębokości ulepszenia i zbrojenia podłoża gruntowego – *I_R*. Przy czym:



gdzie;

$$d_r = u + (N-1) b$$
 [1]

- d, całkowita głębokość strefy zbrojenia warstwami geotekstyliów (mm),
- u głębokość ułożenia pierwszej warstwy geotekstyliów (mm),
- N liczba warstw geotekstyliów (-),
- h odległości ułożenia poszczególnych warstw geotekstyliów (mm),
- b szerokość ułożenia warstw geotekstyliów (mm),
- B wymiar kwadratowej płyty naciskowej (mm)

Różnice w zakresach osiadań (przedstawione na rys. 2) wyraźnie wskazują na wzmacniającą funkcję trzech i czterech warstw geotekstyliów w stosunku do osiadań gruntu niezbrojonego.

Znacznie mniej wyraźne są różnice w osiadaniach układów o tej samej liczbie warstw geotekstyliów o gramaturach 139 g/m² i 220 g/m². Z wykresu na rys. 2 wynika też, że efekt wzmocnienia mierzony zakresem osiadania układu podłoża pod naciskiem może być zwiększony poprzez stosowanie geotekstylii o wyższych gramaturach. Zdefiniowano też miarę efektu i skuteczności zbrojenia geotekstyliami, określoną współczynnikiem wzmocnienia (zbrojenia, ulepszenia) podłoża gruntowego jako:

$$I_r = q_r/q_0$$
 [2]

gdzie

I₁ - współczynnik wzmocnienia (ulepszenia) podłoża (-),

- q_r nacisk na podłoże zbrojone geotekstyliami dla zadanego osiadania (kN/cm²),
- q₀ nacisk na podłoże niezbrojone geotekstyliami dla uzyskania tego samego osiadania (kN/cm²),

s - zmierzone osiadanie (mm).

Zakres zmian tego współczynnika w zależności od osiadań i obciążenia płyty przedstawia rys. 2. Z wykresu tego wynika, że dwukrotne wzmocnienie układu z trzema warstwami geotekstyliów uzyskujemy przy wywołaniu dziesięcioprocentowego wzrostu osiadań, zaś cztery warstwy geotekstyliów przy tym samym zakresie osiadania wskazują na wzmocnienie tylko 1,8. Warto też zwrócić uwagę, że zdefiniowane wzorem [1] głębokość strefy zbrojenia i współczynnik wzmocnienia [2] mogą mieć odniesienia w projektowaniu technicznym.

Założeniem przeprowadzenia bezpośrednich pomiarów w laboratorium było ustalenie takich prób, które możliwie blisko oddawałyby specyfikę pracy gruntowego podłoża nawierzchni drogowej. Założono też, że pewnym ogólnym przybliżeniem tej specyfiki sposobu zbrojenia podłoża będą pomiary odkształcalności próbek dla różnych wariantów ułożenia warstw geotekstyliów w warunkach pomiaru enometrycznego, to znaczy przy obciążeniu jednoosiowym bez możliwości odkształcenia bocznego, czyli objętościowego, próbki. Ogólne przybliżenie modelowe pracy pod-







Rys. 3. Wyodrębnienie próbek do pomiaru uwarstwionych struktur podłoża nawierzchni drogowej

łoża nawierzchni wynika również z wysokości próbek, która z kolei zależy od grubości warstw ulepszonego podłoża nawierzchni (rys. 3). W tym celu przygotowano formy próbek do wypełnienia różnymi strukturami uwarstwienia jednego typu gruntu piaszczystego o znanych parametrach fizycznych.

Grunt stanowił piasek średnioziarnisty, $\rho = 1,78 \text{ G/cm}^3$, o stałej wilgotności w_n = 5% i C_{U} = 5. Formy walcowe wykonano z nieodkształcalnych odcinków rur o wysokości H = 25 cm i średnicy wewnętrznej Φ = 10 cm, czyli współczynniku proporcjonalności kształtu próbek równym 2,5 (rys. 4, str. 54). Do badań użyto popularnie stosowanej w drogownictwie geowłókniny o gramaturze 200 g/m². W sześciu formach próbek (rys. 5, str. 54) wykonano cztery serie wypełnień gruntem o różnej strukturze uwarstwienia geowłókniną poszczególnych próbek. W poszczególnych seriach A, B, C i D zmienne były zarówno liczba warstw geowłókniny N, jak i odległości między warstwami geowłókniny u. W każdej serii wykonano próbkę porównawczą wypełnioną wyłącznie gruntem. W seriach C i D zastosowano geowłókninę w podwójnym ułożeniu, uzyskując w ten sposób gramaturę 400 g/m². W nawiązaniu do przedstawionych badań (6) analogiczny współczynnik ulepszenia i zbrojenia podłoża I_{R} według wzoru [2] można określić jako zmienny w poszczególnych próbkach serii i zależny od liczby warstw zbrojenia N oraz odległości między warstwami geowłókniny u, pokazanych na rys. 4 (str. 54).

Pomiary odkształcalności próbek o różnych strukturach zbrojeń

Bezpośrednich pomiarów odkształcalności przygotowanych serii próbek dokonano na maszynie wytrzymałościowej typu Instron 5567 w Katedrze Inżynierii Materiałów Budowlanych PW (rys. 6, str. 54).





Rys. 4. Zasada sporządzania serii warstwowych struktur próbek



Rys. 7. Jednoosiowe obciążenie wypełnionej próbki oraz ekran rejestratora



Rys. 9. Układ zbrojenia geotekstylnego próbek w serii A





Maszyna wytrzymałościowa jest wyposażona w rejestrator cyfrowy i monitor obrazu graficznego pomiaru odkształceń i sił obciążających (rys. 7). Ustalenia zakresu i skali obciążeń i przemieszczeń dokonano na pojedynczej próbce zerowej, wypełnionej samym gruntem zageszczonym warstwowo w sposób przyjęty dla wszystkich próbek. Przed rozpoczęciem rejestracji przemieszczeń, w celu ujednolicenia warunków pomiaru bezpośredniego i maksymalnego wyeliminowania różnic w zageszczeniu wypełnień gruntowych, każdą z próbek poddano obciążeniu wstępnemu 100 kPa. Po wykonaniu i rejestracji cyfrowej pomiarów z pełnego zestawienia zapisu cyfrowego pomierzonych wielkości przemieszczeń i sił nacisku tłoka wyodrębniono zapisy przemieszczeń pionowych dla nacisków o przyroście 0,1 MPa, podając je w tabelach dla każdej serii. Dla skróconych zapisów cyfrowych wyników pomiarów sporządzono wykresy przemieszczeń pionowych poszczególnych próbek w seriach A, B, C i D. W ogólnym ujęciu pomierzono podatność na odkształcenia p badanego materiału próbki, odpowiadającą ogólnej formule:



Rys. 10. Obraz graficzny zbioru zarejestrowanych wyników pomiaru w serii A

$$\boldsymbol{p}_o = \frac{\Delta \boldsymbol{\sigma}}{\Delta \boldsymbol{\varepsilon}}$$
[3]

gdzie;

 $\Delta \sigma$ – przyrost naprężenia ciskającego [kPa]; $\Delta \varepsilon$ – przyrost odkształcenia pionowego [mm].

W zadanym przypadku, przy stałej powierzchni nacisku na próbkę walcową, współczynnik podatności p można określić również jako:

$$p = \frac{\Delta P}{\Delta H} = tg\alpha \Rightarrow \text{constans} \Rightarrow \text{moduł podatności próbki}$$
 [4]

gdzie:

 ΔP – przyrost siły obciążającej [kN]; ΔH – zmiana wysokości próbki [mm]; α – kąt nachylenia stycznych w przedziale.

Wyniki każdej z serii poddano aproksymacji w ten sposób, że określono przedział proporcjonalności (maksymalnej stałości przyrostów) podatności według formuły [4], stosując zasadę przedstawioną na rys. 8. Procedury te powtórzono czterokrotnie, to znaczy dla każdej serii próbek oddzielnie, przedstawiając kolejne wykresy.

Naprężenie ściskające (MPa)	ODKSZTAŁCENIE PRZY ŚCISKANIU (MPa)							
	Рковка 1	Рковка 2	Рковка З	Рковка 4	Рковка 5	Рковка 6		
0,10	0,85	0,51	0,52	0,52	1,14	1,41		
0,20	1,18	0,99	1,08	1,08	2,04	2,36		
0,30	1,44	1,37	1,52	1,52	2,74	3,06		
0,40	1,67	1,71	1,88	1,88	3,33	3,62		
0,50	1,88	2,02	2,20	2,20	3,85	4,11		
0,60	2,08	2,31	2,49	2,49	4,31	4,54		
0,70	2,27	2,59	2,76	2,76	4,74	4,92		
0,80	2,46	2,86	3,02	3,02	5,13	5,28		
0,90	2,64	3,13	3,26	3,26	5,50	5,62		
1,00	2,81	3,38	3,50	3,50	5,85	5,94		

Vapreženie ściskające [kPa]

800



Rys. 13. Przedział dla modułu podatności próbek, seria A





Podsumowanie wyników badań i wnioski

Po analizie pełnych zapisów cyfrowych pomiarów odkształceń uzyskano moduły podatności poszczególnych próbek w poszczególnych seriach, uzyskując współczynniki podatności dla próbek zbrojonych warstwami geotekstyliów p_{zbr} i próbek porównawczych wypełnionych samym gruntem – *p*. Pełne zestawienie uzyskanych wyników pozwala na wnioskowanie porównawcze z ograniczonym stopniem uogólnień.

Zestawienie wyników i przedstawione na wykresach wyniki bezpośredniego pomiaru podatności próbek poszczególnych serii (tab. 5, str. 57) oraz zestawienie graficzne tych wyników (rys. 33, str. 57) mają istotne znaczenie dla ustalenia właściwego sposobu wzmocnienia geotekstyliami podłoża nawierzchni drogowej zbrojonego planarnie. Pozwalają na sformułowanie wniosków bezpośrednio wynikających z przeprowadzonych pomiarów i ważnych dla dokonanych ogólnych założeń modelowych:

- Wzrastająca liczba warstw geotekstyliów we wszystkich próbkach powoduje wzrost podatności próbek na odkształcalność w tym samym zakresie obciążeń, przy czym największą podatność obserwuje się dla pięciu i siedmiu warstw geotekstyliów.
- Relatywnie stałą odkształcalność próbek uzyskuje się przy 3 i 4 warstwach geotekstyliów, dla modelowych próbek "wyciętych" z podłoża nawierzchni drogowej są 3 i 4 warstwy, dla których uzyskujemy relatywnie zmniejszoną podatność na odkształcenie.
- Zmniejszenie odległości pomiędzy warstwami geotekstyliów (seria B i C), czyli grubości warstw gruntu pomiędzy warstwami geotekstyliów, zwiększa podatność próbek modelowych na ich odkształcalność.
- 4. Zwiększona gramatura warstwy geotekstyliów uzyskiwana przez podwójne ułożenie warstw o gramaturze 200 g/cm² w seriach C i D nie powoduje znacznego wzrostu podatności próbek na odkształcenie pionowe.

Bezpośrednie wnioski z testów laboratoryjnych w istocie nie stanowią weryfikacyjnych pomiarów *in situ*, ale pozwalają nawiązać do konkluzji pracy (2) i wskazać na praktyczne zalecenia planarnego zbrojenia podłoża nawierzchni drogowych. Zalecenia te mogą być przydatne w projektowaniu technicznym dróg i, uogólniając, można je sprowadzić do następujących stwierdzeń:

- W gruntowych podłożach nawierzchni drogowych należy stosować nie mniej niż dwie i nie więcej niż cztery warstwy geotekstyliów o gramaturach 200-400 g/m². Większa liczba warstw nie przynosi znaczącego efektu wzmocnienia podłoża, natomiast w istotny sposób zwiększa koszt materiałów takiego rozwiązania, które przestają być konkurencyjne dla zastosowania spoiw hydraulicznych lub bezpośredniej wymiany warstwy gruntu.
- Wielowarstwowe wzmocnienie geotekstyliami podłoża nawierzchni dróg nie wymaga geowłóknin o wyższej gramaturze i podwyższonych parametrach technicznych. Istotny efekt wzmocnienia uzyskuje się przez zastosowanie co najmniej dwóch warstw. Jedna warstwa geowłókniny nie powoduje znaczącego efektu wzmocnienia podłoża gruntowego.
- Istotne znaczenie ma grubość warstw gruntu znajdująca się pomiędzy sąsiednimi warstwami geotekstyliów. Według sugestii zawartych w pracy (6) i niektórych pomiarów zawartych w pracy (2) grubość ta uzależniona jest między innymi od uziarnienia gruntu podłoża C_v . Większa średnica 60% frakcji piasku w gruncie podłoża, czyli $\uparrow d_{60}$ powoduje możliwość zwiększenia grubości warstwy między warstwami geotekstyliów, która w przeciętnych rodzajach gruntów piaszczystych wynosi od 5 cm do 10 cm.

Wnioski powyższe są w znacznym stopniu zbieżne z wnioskami opracowanymi na podstawie wyników doświadczeń poligonowych relacjonowanych w pracach (2, 5, 6), bowiem badania podatności i odkształcalności na poletkach doświadczalnych pozwoliły ustalić między innymi to, że grubość warstwy pokrywającej gruntem D

Naprężenie ściskające (MPa)	ODKSZTAŁCENIE PRZY ŚCISKANIU (MPa)							
	Рко́вка 1	Рковка 2	Рковка З	Рковка 4	Рковка 5	Рковка 6		
0,10	0,84	0,40	1,24	1,24	1,84	4,81		
0,20	1,27	0,89	2,27	2,27	3,22	7,19		
0,30	1,58	1,36	3,06	3,06	4,28	8,97		
0,40	1,84	1,77	3,71	3,71	5,15	10,36		
0,50	2,06	2,14	4,27	4,27	5,90	11,60		
0,60	2,27	2,49	4,77	4,77	6,57	12,57		
0,70	2,47	2,82	5,21	5,21	7,16	13,46		
0,80	2,66	3,12	5,63	5,63	7,70	14,26		
0,90	2,84	3,41	6,00	6,00	8,20	15,00		
1,00	3,02	3,69	6,36	6,36	8,68	15,63		

k w





Rys. 17. Odkształcalność próbek w przedziałach co 100 kPa, seria B



NAPRĘŻENIE ŚCISKAJĄCE	ODKSZTAŁCENIE PRZY ŚCISKANIU (MPa)							
(MPa)	Рко́вка 1	Рковка 2	Рковка 3	Рковка 4	Рковка 5	Рковка 6		
0,10	0,67	0,36	0,43	0,43	1,07	1,43		
0,20	1,10	0,79	0,89	0,89	1,76	2,33		
0,30	1,44	1,18	1,27	1,27	2,32	2,99		
0,40	1,71	1,53	1,60	1,60	2,79	3,54		
0,50	1,95	1,84	1,91	1,91	3,22	4,03		
0,60	2,17	2,13	2,18	2,18	3,60	4,46		
0,70	2,38	2,40	2,44	2,44	3,95	4,87		
0,80	2,58	2,67	2,68	2,68	4,27	5,24		
0,90	2,78	2,92	2,92	2,92	4,57	5,59		
1,00	2,97	3,17	3,14	3,14	4,86	5,92		

Tab. 3. Zestawienie wyników przemieszczeń pionowych próbek w przedziałach 0,10 MPa (C)



Rys. 21. Układ zbrojenia geotekstylnego próbek w serii C













Rys. 15. Układ zbrojenia geotekstylnego próbek w serii B



Próbki 2010-06-25 Rys. 16. Obraz graficzny zbioru zarejestrowanych wyników pomiaru w serii B



Rys. 19. Przedział dla modułu podatności próbek, seria B



Rys. 20. Moduły podatności próbek, seria B



Rys. 23. Odkształcalność próbek w przedziałach co 100 kPa, seria C



Rys. 26. Moduły podatności próbek, seria C









co 100 kPa, seria D



Rys. 30. Zakresy zmienności współczynnika odkształcalności próbek, seria D



geowłókninę redukuje odkształcalność całego układu gruntowych warstw podłoża. Pozwalają też na bezpośrednie zastosowanie techniczne wzmocnienia podłoży gruntowych kilkoma warstwami geowłóknin w podłożu nawierzchni budowanych dróg samochodowych z odpowiednim współczynnikiem pewności i skuteczności wzmocnienia. Z przeprowadzonych doświadczeń wynika również, że sposób wzmacniania podłoża poprzez planarne ułożenie geotekstyliów może być stosowany w podłożach innych budowli niż nawierzchnie dróg samochodowych lub szynowych. Mogą to być na przykład wzmocnienia podłoży ław i stóp fundamentowych obiektów mostowych i kubaturowych.

Można też zwrócić uwagę na aspekt ekonomiczny tego sposobu wzmocnień. W przypadku gruntów piaszczystych polepszenie ich własności nośnych cementem (stabilizacja) może być znacznie droższe dopiero wówczas, gdy planarne zbrojenie podłoża gruntowego będzie wykonane pięcioma lub więcej warstwami geotekstyliów. Porównując materiałowe koszty jednostkowe wykonanych podłoży nawierzchni, należy stwierdzić, że rozwiązanie z trzema lub czterema warstwami geotekstyliów, w zależności od ich gramatur, może być tańsze niż zastosowanie cementu dla wytypowanych do ulepszenia rodzajów gruntów. Pewne optimum kosztów wzmocnienia gruntów **>**

NAPRĘŻENIE ŚCISKAJĄCE	Odkształcenie przy ściskaniu (MPa)							
(MPa)	Рковка 1	Рковка 2	Рковка 3	Рковка 4	Рковка 5	Рковка 6		
0,10	0,92	0,55	0,71	0,71	0,99	3,01		
0,20	1,36	1,10	1,49	1,49	2,08	4,69		
0,30	1,70	1,55	2,12	2,12	2,97	5,92		
0,40	2,00	1,93	2,65	2,65	3,73	6,91		
0,50	2,26	2,28	3,11	3,11	4,39	7,77		
0,60	2,51	2,59	3,52	3,52	5,00	8,51		
0,70	2,75	2,89	3,91	3,91	5,54	9,18		
0,80	2,98	3,18	4,25	4,25	6,05	9,80		
0,90	3,21	3,45	4,59	4,59	6,52	10,37		
1,00	3,43	3,72	4,89	4,89	6,96	10,90		

Tab. 4. Zestawienie wyników przemieszczeń pionowych próbek w przedziałach 0,10 Mpa. (D)







NR PRÓBKI W SERII	1	2	3	4	5	6				
LICZBA WARSTW GEOTEKSTYLIÓW	0	1	2	3	5	7				
WSP. PODATNOŚCI	р	P _{zbr}								
	SERIA A									
Wsp. PODATNOŚCI	0,525	0,357	0,358	0,369	0,235	0,255				
STOSUNEK Pzbr/p	1	0,680	0,681	0,703	0,448	0,486				
Marshe Real	SERIA B									
WSP. PODATNOŚCI	0,504	0,306	0,225	0,222	0,167	0,113				
STOSUNEK path	1	0,607	0,446	0,440	0,331	0,224				
	11.10	SER	IA C	-						
WSP. PODATNOŚCI	0,473	0,364	0,392	0,386	0,285	0,248				
STOSUNEK path	1	0,769	0,829	0,816	0,602	0,524				
SERIA D										
Wsp. PODATNOŚCI	0,418	0,333	0,254	0,262	0,181	0,148				
STOSUNEK p _{zbr} /p	.1	0,797	0,608	0,627	0,433	0,354				

Tab. 5. Zbiorcze zestawienie wyników pomiarów odkształcalności próbek



Fot. 1. Efekt kilkuwarstwowego zbrojenia geotekstylian podłoża gruntowego w pryzmach





Fot. 2. Efekt zbrojenia warstwowego podłoża gruntowego w pojemniku dwudzielnym





Fot. 3. Demonstracja mniejszej podatności pryzm fibrogrun tów na osiadanie



Fot. 6. Porównawcza demonstracja osiadań różnie zbro jonych podłoży

Fot. 4. Różnica osiadań podłoża gruntowego dla różnych formy zbrojenia geosyntetycznego

Fot. 5. Różnice osiadań podłoża gruntowego dla różnych formy zbrojenia geosyntetycznego

podłoża drogi w konkretnych, lokalnych warunkach gruntowych można uzyskać jednak dopiero po przeanalizowaniu alternatywnego zastosowania dwóch lub trzech warstw geotekstyliów, zamiast zastosowania spoiwa hydraulicznego, na ogół cementu. konują do technicznego zastosowania zbrojeń kilkoma warstwami geotekstyliów. Normowe zagęszczenie technologiczne gruntów podłoży nawierzchni drogowych będzie dodatkowym efektem wzmacniającym i ulepszającym w poszczególnych układach.

Testy poglądowe struktur podłoży gruntowych zbrojonych geosyntetykami

W celu ekspozycji i podkreślenia właściwości wzmacniających i funkcji zbrojącej różnych form geosyntetyków, geotekstyliów i geofibrów przeprowadzono testy demonstracyjne. W warunkach laboratoryjnych wykonano ekspozycje obrazujące ogólne zasady planarnego wzmacniania gruntów geotekstyliami i warstw fibroguntowych. Własności fibrogruntów zostały szczegółowo opisane w pracy (3). Sporządzono układy różnych struktur zbrojeń podłoża gruntowego wynikające z i nawiązujące do ogólnych wniosków z przeprowadzonych aktualnie badań laboratoryjnych i poligonowych referowanych w pracy (2). Różne układy podłoża gruntowego wykonano, używając jednego rodzaju gruntu - piasku średnioziarnistego o ρ = 1,65 g/cm³ w stanie niezagęszczonym o tej samej wilgotności, usypanym luźno w kuwetach (około 3,8 dcm3) lub w prostopadłościennym pojemniku szklanym (około 6 dcm3). Z wysokości około 1 m zrzucano kostkę betonową o masie ok. 5 kg, wyrównując pryzmy samego gruntu i gruntu zbrojonego. Wykonano fotografie testów, które ilustrują efekty wzmocnienia warstw podłoża gruntowego z warstwami geotekstyliów o gramaturze 250 g/cm² oraz geofibrami, w porównaniu do samego gruntu. Fotografie te sa jedynie demonstracją efektów wzmocnień i zbrojenia podłoża i nie stanowią obrazu stanowiska pomiarowego.

Testy demonstrujące efekty zbrojenia gruntowych warstw podłoża geosyntetykami różnych rodzajów mają zalety nie tylko dydaktyczne, ale również popularyzujące i wskazujące na takie sposoby wzmocnień i zbrojenia podłoży nawierzchni dróg. Wyraźne różnice osiadań pomiędzy poszczególnymi strukturami, które mogą być zastosowane w gruntowym podłożu nawierzchni dróg, prze-

Piśmiennictwo

- Dobrucki D.: Nośność podłoża gruntowego wzmocnionego geosyntetykami. "Drogownictwo", nr 11/2010.
- Gradkowski K.: Efekt wzmocnień geotekstyliami gruntowego podłoża nawierzchni dróg. Badania doświadczalne. "Drogi i Mosty", nr 4/2008.
- Gradkowski K.: Właściwości geotechniczne fibrogruntu jako materiału ulepszonych podłoży nawierzchni. "Inżynieria Morska i Geotechnika", nr 2/2011.
- Hang M.X., Javadi A.A., Min X.: Triaxial tests of sand reinforced with 3D inclusions. "Geotextiles and Geomembranes", 24 (2006).
- Hufenus R., Rueegger R., Banjac R., Mayor P., Springman S.M., Bronnimann R.: Full-scale field tests on geosynthetic reinforced unpaved roads on soft subgrade. "Geotextiles and Geomembranes", 24 (2006).
- Madhavi Latha G., Amit Somwanshi: *Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand.* "Geotextiles and Geomembranes", 27 (2009).
- Moghadas Tafreshi S.N., Dawson A.R.: Behaviour of footings on reinforced sand subjected to repeated loading - Comparing use of 3D and planar geotextile. "Geotextiles and Geomembranes", 28 (2010).
- Noorzad R., Mimoradi S.H.: Laboratory evaluation of the behavior of geotextile reinforced clay. "Geotextiles and Geomembranes", 28 (2010).
- Palmira E.M.: Soil-geosynthetic interaction: Modeling and analysis. "Geotextiles and Geomembranes", 27 (2009).
- Rafalski L.: Podloże nawierzchni drogowej. "Inżynieria Morska i Geotechnika", nr 3/2009.
- Racana N., Gorves R., Grediac M.: Mechanical behaviour of soil enforced by geocells. Blaise Pascal University Publications, 2002.
- Sobolewski J.: Wymiarowanie zbrojeń geosyntetycznych w konstrukcjach z gruntu zbrojonego zgodnie z przepisami eurokodu 7. "Drogi i Mosty", 2/2010.
- Tafreshi M.S.N., Dawson A.R.: Comparison of bearing capacity of strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement. "Geotextiles and Geomembranes" 28 (2010).