

INŻYNIERIA MORSKA *i* GEOTECHNIKA

2
2011



FUNDAMENT – SPECJAL

Spółka z o.o.

80-007 GDAŃSK

ul. Trakt św. Wojciecha 465

tel./fax 58 306-52-51

e-mail: firma@fundament-specjal.pl

Właściwości geotechniczne fibrogruntu jako materiału do ulepszonych podłoży nawierzchni drogowych

Dr inż. Krzysztof Gradkowski

Politechnika Warszawska. Wydział Inżynierii Lądowej

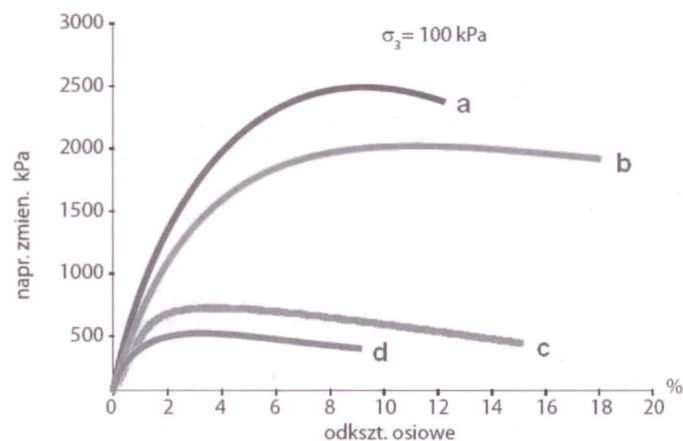
Mianem fibrogruntów określa się mieszanki gruntowe, których jednym ze składników są fibry jako droboelementowy materiał, na ogół sporządzony z tworzyw sztucznych. Specyficzne własności fizyczne fibrów i zastosowania jako komponentu mieszanek z gruntem wyznacza określenie ich jako geofibrów. Pierwsze testy laboratoryjne nad zastosowaniem geofibrów w ulepszaniu i wzmacnianiu gruntów podjęto w Japonii na początku lat osiemdziesiątych ubiegłego stulecia. Jedną z pierwszych publikacji na ten temat z lat osiemdziesiątych ubiegłego stulecia jest praca [5]. Później prowadzono badania laboratoryjne w różnych ośrodkach badawczych Kanady, Chin i Indii. Między innymi były to pierwsze testy w aparacie bezpośredniego ścinania jednego rodzaju piasków zmieszanych z geofibrami, wykonanymi z syntetyków, metalu i pochodzenia naturalnego (włókna kokosowe). Stwierdzono wówczas, że opór ścinania próbek fibrogruntów zależy nie tylko od rodzaju materiału, z którego wykonane są geofibry, ale także od kierunku ich ułożenia w ścinanej próbce, ilościowej zawartości geofibrów, elastyczności poszczególnych rodzajów geofibrów oraz od ich wymiarów określających powierzchnię czynną tarcia w gruncie. Koncepcja zastosowania geofibrów w ulepszaniu jakości gruntów została zaczerpnięta z doświadczeń wytwarzania fibrobetonu. Rodzaj i jakość geofibrów używanych do testów odbiegała jednak znacznie od współczesnych wymagań dla włókien fibrowych do betonu, opisywanych na przykład w normie [17]. Wynika to choćby z braku chemicznych procesów wiązania, które zachodzą w przypadku betonów.

PRZEGLĄD BADAŃ PROWADZONYCH NAD FIBROGRUNTAMI

Znaczące i rozpoznawcze badania laboratoryjne gruntów z różnymi formami geosyntetyków w aparacie trójosiowego ścinania, w tym i fibrogruntów, przedstawiono w publikacjach [10, 11]. W wyniku przeprowadzonych testów uzyskano przekonujące i jednoznaczne rezultaty przedstawione na rys. 1. Wyższa wytrzymałość na ścinanie fibrogruntu od gruntu bez

żadnych zbrojeń i ulepszeń w aparacie trójosiowego ściskania była ewidentna, aczkolwiek dla innych form zbrojenia gruntów geosyntetykami jest znacznie większa.

Badania opisane w pracy [10] były rozwinięciem programu badań opisanego w pracy [11], którego wyniki okazały się na tyle interesujące, że kontynuacja tych badań nad efektem wzmocnień za pomocą różnych form zastosowań geosyntetyków została zapowiedziana w tym ośrodku jako przedmiot badań na dalsze lata. W przedstawionych pracach [10, 11] użyte zostały geofibry elastyczne, poliestrowe długości około 12 mm i szerokości około 2 mm, przy czym w dyskusji wyników tych badań podkreślono, że wymiary geofibrów dostosowane są do wymiarów walcowej próbki w aparacie trójosiowego ściskania o średnicy 38 mm i wysokości 76 mm. Podkreślono zależność jakości fibrogruntów od kształtu i wymiarów geofibrów, uziarnienia gruntu oraz od sposobu mieszania geofibrów z gruntem. Wydajność w polepszeniu relacji naprężenie – odkształcenie jest istotna, lecz szersza interpretacja wyników była ograniczona do specyficznych warunków testu nastawianego na określenie



Rys. 1. Wyniki testu w aparacie trójosiowego ściskania próbek o zawartości różnych form geosyntetyków [10].

a – osiem warstw geotekstyliów, b – grunt w woreczku geotekstylnym, c – fibrogrunt, d – grunt niezbrojony

skuteczności stosowania poszczególnych rodzajów geotekstyliów. W badaniach [11] jako grunt stosowano piasek drobny $\rho = 1,65 \text{ g/cm}^3$, $C_u = 3,6$. Podobne wyniki świadczące o wzmacniającej funkcji geofibrów w gruncie uzyskano w pracy [8]. Odkształcalność próbek fibrogruntu określono w aparacie trójosiowego ściskania i przedstawiono na rys. 2.

W pracy [24] użyto geofibrów włóknistych o długości około 15 mm i przeciętnej średnicy 0,25 mm, mieszając je z piaskiem drobnym o takich samych wymiarach próbek jak określono wyżej. W dalszych badaniach określano także parametry mechaniczne fibrogruntów w formie struktur warstwowych. Stosując obciążenie warstw gruntu ułożonych na sztywnym podłożu płytą o średnicy 30 mm, uzyskano wyniki świadczące o mniejszym osiadaniu od warstw wykonanych z fibrogruntu w stosunku do warstw sporządzonych z tego samego gruntu bez dodatków (rys. 3).

Na podstawie wielu przeprowadzonych doświadczeń stwierdzono także skuteczność stosowania geofibrów jako składnika gruntów ulepszonych spoiwami hydraulicznymi. Zadowalające rezultaty badań uzyskiwano dla mieszanek różnych gruntów i geofibrów z dodatkiem wapna, cementu oraz lokalnie występującymi popiołami lotnymi [1, 7, 12, 23]. W tych przypadkach funkcja zbrojenia geofibrowego była bardzo wyraźna i polep-

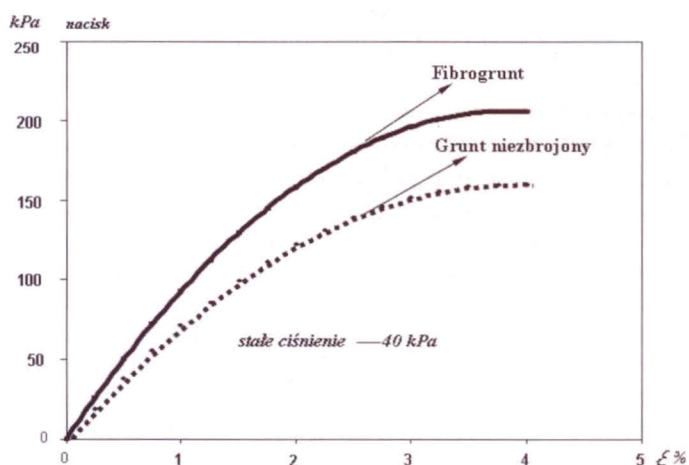
szona o zachodzące w takich mieszkach procesy wiązania spoiwami hydraulicznymi. Zakres możliwych do wzmocnienia rodzajów gruntów był jednak nieco ograniczany przez wymagania przydatności do sporządzania cementogrunów i stabilizacji popiołami lotnymi. Wpływ dodatków różnych spoiw hydraulicznych na własności fibrogruntów może być analizowany odrębnie. W badaniach opisanych w pracy [12] do zmodyfikowanego testu Proctora użyto piasku pylastego, popiołów ze spalania węgla kamiennego oraz geofibrów wykonanych z polipropylenu o długości około 20 mm i włókien sisalu o długości około 80 mm. Stosunek długości włókien do średnicy wynosił około 400, a maksymalny dodatek geofibrów 2% w stosunku do ciężaru suchego piasku. W pracy [1] do badań użyto geofibrów propylenowych o długości około 12 mm, mieszając je jedynie z pyłem ilastym oraz pyłem ilastym i cementem. Przeprowadzono testy porównawcze zagęszczalności próbek oraz w aparacie bezpośredniego ścinania. Według [25] sprawdzano wpływ zbrojenia geofibrami na pęcznienie spoistych gruntów ilastych w edometrach, dodając maksymalnie 0,5% geofibrów w stosunku do ciężaru gruntu. Użyto propylenowych geofibrów o szerokości około 2 mm i długościach od 15 mm do 90 mm. Opracowaniu i stosownym analizom podlegały nie tylko własności samych mieszanek fibrogruntowych, ale także dobór rodzaju i własności geofibrów, w nawiązaniu do lokalnych warunków możliwości ich produkcji. Potwierdzają to zdecydowane wyniki obszernych badań opublikowane w pracy [9]. Laboratoryjne testy fibrogruntów z piaskiem pylastym w aparacie trójosiowego ściskania wykazały wzrost wytrzymałości próbek na ścinanie. W badaniach [9] testowano próbki w warunkach odpływu wody i bez odpływu, z zawartością wagową geofibrów 0,25% i 0,5%, o różnej długości (15 mm, 30 mm i 45 mm), a co za tym idzie – o różnym specyficznym wskaźniku aspektu kształtu a_f , dobieranym także w zależności od uziarnienia gruntu, wynoszącym w tym przypadku od 10 do 20. Zmiany kąta tarcia wewnętrznego, a w następstwie wytrzymałości na ścinanie τ , w zależności od wymiarów geofibrów uwidocznił na rys. 4.

Długość i kształt geofibrów ma również znaczący wpływ na parametry wytrzymałościowe próbek fibrogruntów określane w aparacie trójosiowego ściskania (rys. 5). Wydłużone kształty geofibrów tworzą większą powierzchnię trącą w ośrodku gruntowym, polepszając własności mechaniczne mieszanek fibrogruntowej.

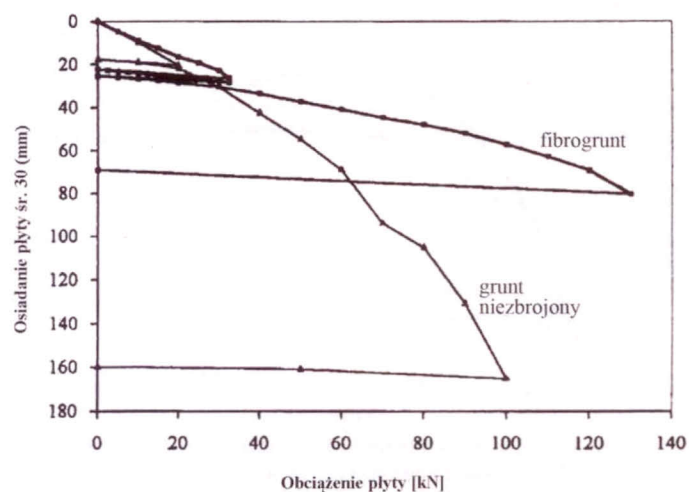
Geofibry użyte w badaniach [9], stanowiące pozostałości po wyprasowaniu oleju palmowego, ulegały biodegradacji i dlatego dokonano zabezpieczeń poprzez powleczenie ich tworzywem syntetycznym, polepszając w ten sposób ich własności fizyczne. Dodatkowo ustalano efekt powlekania geofibrów cienkimi powłokami termoplastycznymi, sterynowo-akrylowymi, zwiększającymi przyczepność tego rodzaju zbrojenia fibrowego w gruncie. Stwierdzono, że geofibry powlekane powodują większą wytrzymałość na ścinanie niż geofibry niepowlekane, (rys. 6 i 7).

Znacznie wzrasta też spójność mieszanek fibrogruntowej z zastosowaniem geofibrów powlekanych tworzywem powodującym „szorstkość” i „szczepność” ścianek elementów geofibrów. Przyrost spójności mieszanek jest największy dla powlekanych geofibrów krótszych niż dla geofibrów dłuższych (rys. 7).

Z badań [9] wynika jednoznacznie, że ten rodzaj fibrogruntu wykazuje ewidentny wzrost parametrów wytrzymałościowych.



Rys. 2. Porównanie odkształcalności próbek gruntu i fibrogruntu [8]

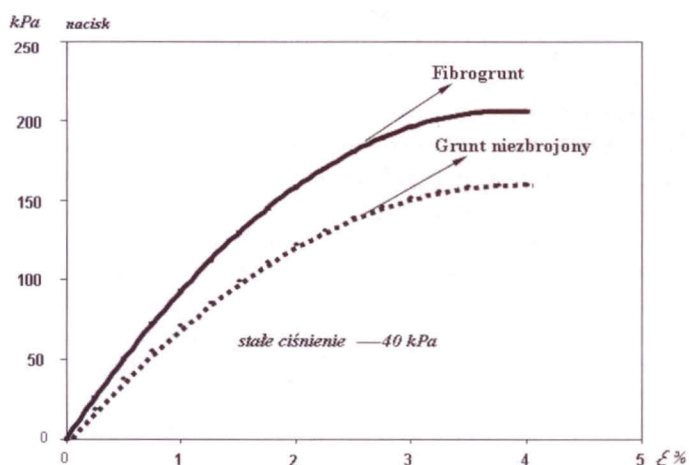


Rys. 3. Osiadania płyty obciążającej warstwy gruntu i fibrogruntu [2]

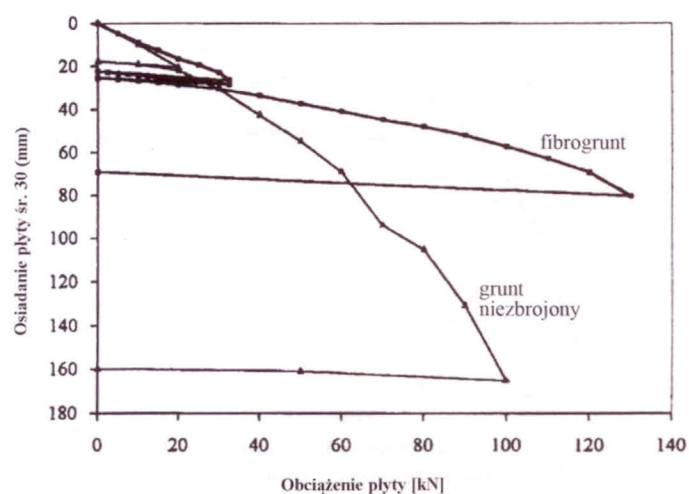
skuteczności stosowania poszczególnych rodzajów geotekstyliów. W badaniach [11] jako grunt stosowano piasek drobny $\rho = 1,65 \text{ g/cm}^3$, $C_u = 3,6$. Podobne wyniki świadczące o wzmacniającej funkcji geofibrów w gruncie uzyskano w pracy [8]. Odkształcalność próbek fibrogruntu określono w aparacie trójosiowego ściskania i przedstawiono na rys. 2.

W pracy [24] użyto geofibrów włóknistych o długości około 15 mm i przeciętnej średnicy 0,25 mm, mieszając je z piaskiem drobnym o takich samych wymiarach próbek jak określono wyżej. W dalszych badaniach określano także parametry mechaniczne fibrogruntów w formie struktur warstwowych. Stosując obciążenie warstw gruntu ułożonych na sztywnym podłożu płytą o średnicy 30 mm, uzyskano wyniki świadczące o mniejszym osiadaniu od warstw wykonanych z fibrogruntu w stosunku do warstw sporządzonych z tego samego gruntu bez dodatków (rys. 3).

Na podstawie wielu przeprowadzonych doświadczeń stwierdzono także skuteczność stosowania geofibrów jako składnika gruntów ulepszonych spoiwami hydraulicznymi. Zadowalające rezultaty badań uzyskiwano dla mieszanek różnych gruntów i geofibrów z dodatkiem wapna, cementu oraz lokalnie występującymi popiołami lotnymi [1, 7, 12, 23]. W tych przypadkach funkcja zbrojenia geofibrowego była bardzo wyraźna i polep-



Rys. 2. Porównanie odkształcalności próbek gruntu i fibrogruntu [8]



Rys. 3. Osiadania płyty obciążającej warstwy gruntu i fibrogruntu [2]

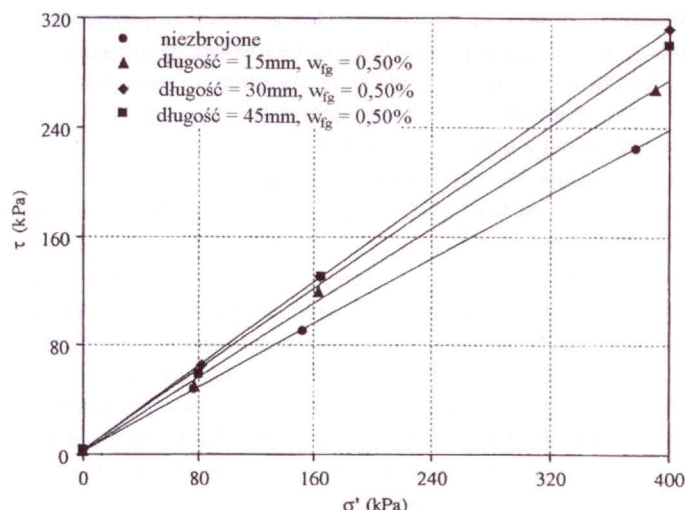
szona o zachodzące w takich mieszkankach procesy wiązania spoiwami hydraulicznymi. Zakres możliwych do wzmocnienia rodzajów gruntów był jednak nieco ograniczany przez wymagania przydatności do sporządzania cementogrunty i stabilizacji popiołami lotnymi. Wpływ dodatków różnych spoiw hydraulicznych na własności fibrogruntów może być analizowany odrębnie. W badaniach opisanych w pracy [12] do zmodyfikowanego testu Proctora użyto piasku pylastego, popiołów ze spalania węgla kamiennego oraz geofibrów wykonanych z polipropylenu o długości około 20 mm i włókien sisalu o długości około 80 mm. Stosunek długości włókien do średnicy wynosił około 400, a maksymalny dodatek geofibrów 2% w stosunku do ciężaru suchego piasku. W pracy [1] do badań użyto geofibrów propylenowych o długości około 12 mm, mieszając je jedynie z pyłem ilastym oraz pyłem ilastym i cementem. Przeprowadzono testy porównawcze zagęszczalności próbek oraz w aparacie bezpośredniego ścinania. Według [25] sprawdzano wpływ zbrojenia geofibrami na pęcznienie spoistych gruntów ilastych w edometrach, dodając maksymalnie 0,5% geofibrów w stosunku do ciężaru gruntu. Użyto propylenowych geofibrów o szerokości około 2 mm i długościach od 15 mm do 90 mm. Opracowaniu i stosownym analizom podlegały nie tylko własności samych mieszanek fibrogruntowych, ale także dobór rodzaju i własności geofibrów, w nawiązaniu do lokalnych warunków możliwości ich produkcji. Potwierdzają to zdecydowane wyniki obszernych badań opublikowane w pracy [9]. Laboratoryjne testy fibrogruntów z piaskiem pylastym w aparacie trójosiowego ściskania wykazały wzrost wytrzymałości próbek na ścinanie. W badaniach [9] testowano próbki w warunkach odpływu wody i bez odpływu, z zawartością wagową geofibrów 0,25% i 0,5%, o różnej długości (15 mm, 30 mm i 45 mm), a co za tym idzie – o różnym specyficznym wskaźniku aspektu kształtu a_f , dobieranym także w zależności od uziarnienia gruntu, wynoszącym w tym przypadku od 10 do 20. Zmiany kąta tarcia wewnętrznego, a w następstwie wytrzymałości na ścinanie τ , w zależności od wymiarów geofibrów uwidoczniono na rys. 4.

Długość i kształt geofibrów ma również znaczący wpływ na parametry wytrzymałościowe próbek fibrogruntów określane w aparacie trójosiowego ściskania (rys. 5). Wydłużone kształty geofibrów tworzą większą powierzchnię trącą w ośrodku gruntowym, polepszając własności mechaniczne mieszanek fibrogruntowej.

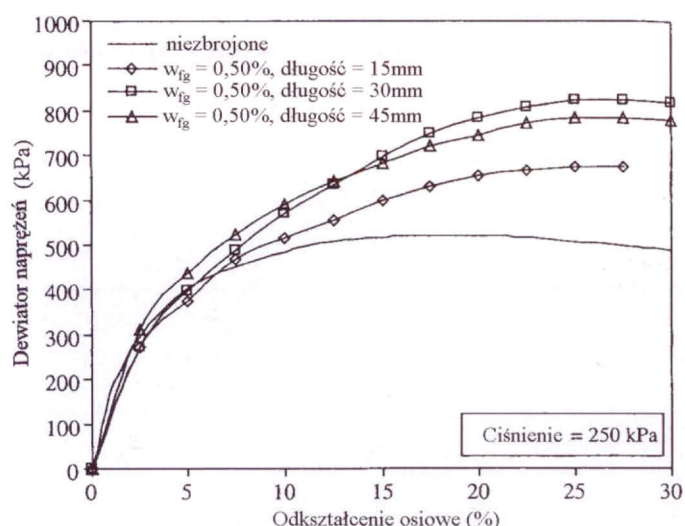
Geofibry użyte w badaniach [9], stanowiące pozostałości po wyprasowaniu oleju palmowego, ulegały biodegradacji i dlatego dokonano zabezpieczeń poprzez powleczenie ich tworzywem syntetycznym, polepszając w ten sposób ich własności fizyczne. Dodatkowo ustalano efekt powlekania geofibrów cienkimi powłokami termoplastycznymi, sterynowo-akrylowymi, zwiększającymi przyczepność tego rodzaju zbrojenia fibrowego w gruncie. Stwierdzono, że geofibry powlekane powodują większą wytrzymałość na ścinanie niż geofibry niepowlekane, (rys. 6 i 7).

Znacznie wzrasta też spójność mieszanek fibrogruntowej z zastosowaniem geofibrów powlekanych tworzywem powodującym „szorstkość” i „szczepność” ścianek elementów geofibrów. Przyrost spójności mieszanek jest największy dla powlekanych geofibrów krótszych niż dla geofibrów dłuższych (rys. 7).

Z badań [9] wynika jednoznacznie, że ten rodzaj fibrogruntu wykazuje ewidentny wzrost parametrów wytrzymałościowych.



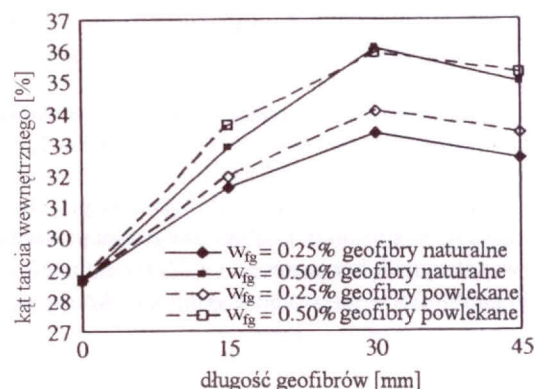
Rys. 4. Naprężenia ścinające w próbkach mieszanek gruntowych zbrojonych geofibrami o różnej długości [9].



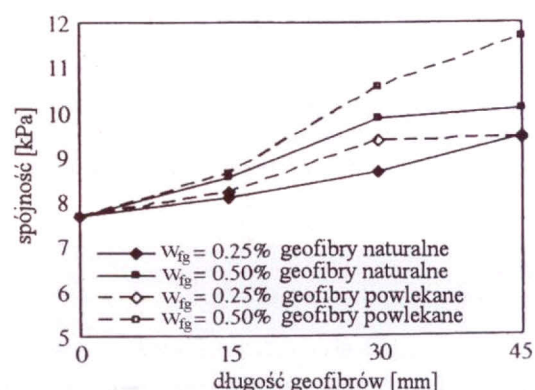
Rys. 5. Krzywe naprężenia-odkształcenia z badań w aparacie trójosiowego ściskania z geofibrami powlekanyymi [9]

Wnioski te odnoszą się wyłącznie do gruntów, dla których można określić zarówno kąt tarcia wewnętrznego, jak i spójność, czyli są co najmniej gruntami mało spoistymi. Do takich gruntów należą bardzo często w warunkach krajowych piaski podłoża rodzimego, czyli piaski niekopalniane. Fakt ten argumentuje dodatkowo celowość zbrojenia takich gruntów geofibrami, zamiast ich wymiany na piaski o dobrych parametrach wytrzymałościowych. Zbrojenie piasku pylastego 0,5% dodatkiem powlekanych geofibrów o długości 30 mm powoduje 25%-owy wzrost kąta tarcia wewnętrznego i 35%-owy wzrost spójności w warunkach bez odpływu wody.

Z przeglądu przytoczonych badań i doświadczeń oraz prac [4, 21, 24] wynika, że do wszelkiego rodzaju prób używano bardzo szerokiego zakresu gruntów. Były to grunty piaszczyste, średnio spoiste, niekiedy i spoiste. O doborze gruntów do mieszanek decydowały potencjalne możliwości zastosowania mieszanek fibrogruntowych, a także przydatność do jednoczesnego zastosowania w mieszanekach spoiw hydraulicznych w postaci cementu i popiołów lotnych. Na ogół stosowano zasadę doboru odpowiedniego rodzaju geofibrów do danego rodzaju gruntu.



Rys. 6. Wpływ długości i zawartości geofibrów na kąt tarcia wewnętrznego fi-brogruntów [9]



Rys. 7. Wpływ długości geofibrów, ich zawartości na spójność fibrogruntów [9]

Ogólnie jednak zasadniczy wpływ na skład mieszanek fibrogruntowych mają możliwości lokalne.

Różnorodność geofibrów używanych w testowych badaniach laboratoryjnych pozwala na sformułowanie następujących uwag:

- 1) geofibry wykonane są głównie z tworzyw syntetycznych, polipropylenu, polichlorku winylu, poliestrów i elastycznych, nierozkładalnych odpadów poprodukcyjnych, a także w mniejszym zakresie występują geofibry metalowe i szalowe (włókna roślin tropikalnych), o wydłużonych kształtach regularnych i nieregularnych w formie włókien i makrowłókien oraz drobnych elementów;
- 2) stosowane są zmienne i różne wymiary pojedynczych elementów geofibrów od włókniстых o średnicy 0,2 mm i długości 100 mm do drobnych elementów płaskich o średnicy lub szerokości 1 mm do 3 mm i długościach do 80 mm;
- 3) geofibry włókniyste są stosowane jako dodatki dla gruntów mało spoistych i z dodatkami spoiw hydraulicznych (cement, popioły), zaś geofibry drobnoelementowe stosowane są do gruntów sypkich o dobrych własnościach mieszania i zagęszczania;
- 4) w mieszanekach fibrogruntowych ze spoiwami hydraulicznymi stosuje się odpowiednie proporcje w stosunku do wagi gruntu piaszczystego mało spoistego, a współczynnik zawartości (koncentracji) geofibrów, stanowiący procentową zawartość geofibrów, określa się jako:

$$w_{gf} = \frac{W_f}{W_{fg}} \cdot 100(\%) \quad (1)$$

gdzie;

w_{gf} – wagowy współczynnik zawartości geofibrów w mieszance [%],

W_f – ciężar geofibrów w zadanej próbce mieszanki [G/cm³],

W_{fg} – ciężar próbki fibrogruntu [G/cm³];

- 5) w zestawieniach mieszanek fibrogruntowych stosuje się proporcje w stosunku do objętości gruntu piaszczystego, a współczynnik koncentracji, czyli procentowej zawartości geofibrów w mieszance z gruntem, określa się jako:

$$v_{gf} = \frac{V_f}{V_{fg}} \cdot 100(\%) \quad (2)$$

gdzie;

v_{gf} – objętościowy współczynnik koncentracji geofibrów w mieszance [%],

V_f – objętość geofibrów w zadanej próbce mieszanki [cm³],

V_{fg} – objętość próbki fibrogruntu [cm³];

- 6) charakterystykę kształtu i wymiarów geometrycznych geofibrów opisuje się w wielu pracach jako wskaźnik aspektu uziarnienia gruntu a_f i jest on określany jako stosunek wymiaru długości l do największego wymiaru szerokości b lub średnicy d pojedynczego elementu, czyli:

$$a_f = \frac{l}{b} \quad (3)$$

gdzie;

a_f – wskaźnik kształtu geofibrów [-],

l – przeciętna długość geofibrów [mm],

b – największy wymiar szerokości lub średnicy geofibrów [mm].

Selekcja i dobór wymiarów geometrycznych geofibrów powinien uwzględniać wskaźnik aspektu uziarnienia gruntu a_f . Oznacza to, że im wyższa jest zawartość frakcji pylistych w danym gruncie piaszczystym, tym elementy geofibrów powinny być cieńsze i dłuższe. Dotychczas w różnych badaniach z użyciem fibrogruntów stosowano $a_f < 10, 15, 30, 45, 60, 100, 200, 400$. Można też zauważyć, że dla $a_f < 30$ stosuje się proporcje w stosunku do objętości gruntu, określając v_{gf} według wzoru (2), a dla $a_f > 30$ proporcje w stosunku do ciężaru gruntu, określając w_{gf} według wzoru (1). W testach laboratoryjnych wymiary geofibrów na ogół dostosowane są do dominujących frakcji gruntów, rodzaju pozostałych komponentów mieszanek oraz do wymiarów badanych próbek fibrogruntów. W mieszanekach geofibrów z gruntem i cementem oraz geofibrów z gruntem i popiołem lotnym stosuje się na ogół fibry syntetyczne włókniste, $a_f < 30 - 50$, o nieco zbliżonych wymaganiach podanych w normie [17]. Niemniej wymiary samych geofibrów dobierano w kontekście przewidywanych konkretnych zastosowań technicznych i możliwości uzyskania poszczególnych rodzajów geofibrów w warunkach lokalnych.

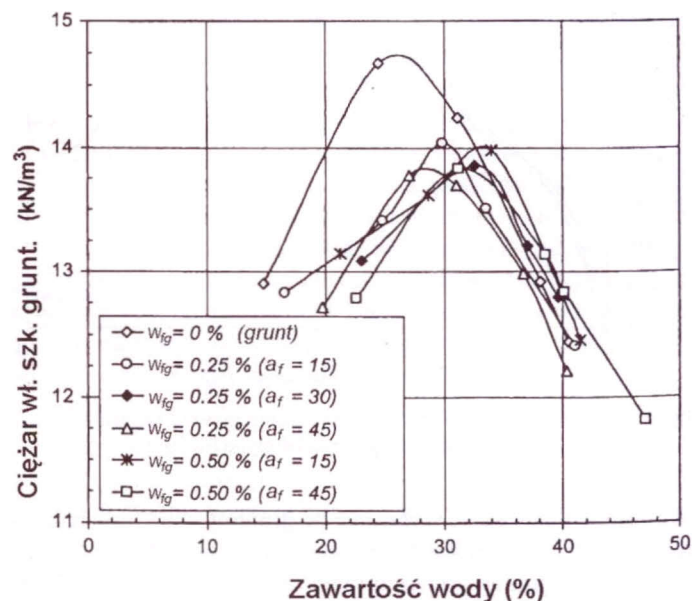
WŁASNE BADANIA I TESTY OZNACZENIA PARAMETRÓW FIBROGRUNTÓW

Program własnych badań laboratoryjnych podjęto pod kątem potencjalnego zastosowania fibrogruntów do wzmocnień gruntowych podłoża nawierzchni dróg samochodowych i szynowych. W tym kierunku prowadzone badania opisano w pracach [7, 19, 20]. Potencjalne zastosowania wynikały zarówno z doboru odpowiednich gruntów, jak i możliwości pozyskania odpowiednich geofibrów jako składnika mieszanek. Pewnym

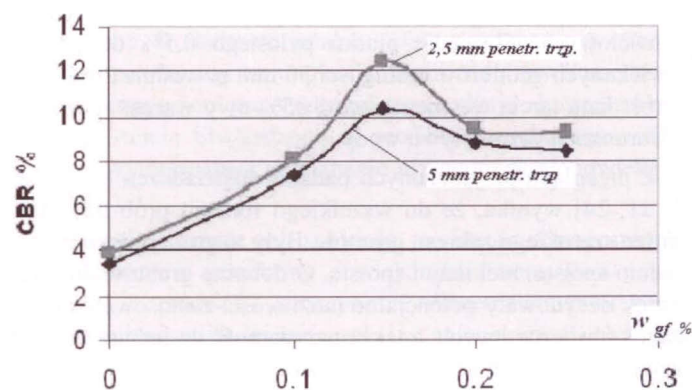
wskazaniem przy opracowaniu założeń własnego programu badań były nie tylko przewidywane zastosowania mieszanek fibrogruntowych, ale i wyniki wykonywanych typowych badań gruntów podłoża nawierzchni drogowych, gdzie podstawowe znaczenie mają parametry zagęszczenia, odkształcalności i nośności gruntów. W tym kierunku prowadzono też badania opisane w pracy [2], na podstawie których można przytoczyć wykresy przedstawione na rys. 8.

Pod uwagę wzięto też wyniki oznaczeń wskaźnika CBR według pracy [8], w których określono zależność wskaźnika CBR od koncentracji geofibrów w mieszance w_{gf} , dla penetracji trzpienia 2,5 mm i 5 mm (rys. 9). W przeprowadzonych testach własnych stosowano również różne głębokości penetracji trzpienia aparatu, koncentrując się na wynikach oznaczenia zagłębienia 5 mm. W założonym programie badań podjęto próby określenia właściwości mieszanek gruntu piaszczystego z geofibrami wykonanymi w warunkach laboratoryjnych z pociętych różnych pojemników z tworzyw sztucznych.

Próby rozpoczęto wykonując badania zmian wilgotności optymalnej według testu Proctora według normy [15]. Niektóre z wyników tych badań zamieszczono w pracy [6]. Próbkę mie-



Rys. 8. Testy Proctora dla różnych rodzajów mieszanek [2]



Rys. 9. Zależność wskaźnika CBR od koncentracji geofibrów w_{gf} [8]

szanek fibrogruntowych sporządzono dla różnych stopni koncentracji geofibrów v_{gf} (według wzoru (2)) zmieszanych z gruntem piaszczystym, występującym w przeciętnych warunkach w podłożach gruntowych budowli.

Jako materiał podstawowy mieszanki do badań laboratoryjnych przyjęto piasek średnioziarnisty, którego właściwości określono według normy [14]: gęstość objętościowa $\rho = 1,81 \text{ g/cm}^3$, zawartość frakcji $f_i = 0\%$, $f_{\pi} < 1\%$, $f_p \approx 98\%$, $f_z = 0\%$, wskaźnik różnoziarnistości $C_u \approx 5$. Geofibry sporządzono z zużytych pociętych pojemników i taśm z tworzyw polipropylenowych i polichlorku winylu o podłużnych, płaskich, nieregularnych kształtach zbliżonych do prostokąta, o największym wymiarze 25 mm, a najmniejszym 2 mm i wskaźniku aspektu uziarnienia gruntu $a_f \approx 10$ do 12. Strukturę przygotowanych geofibrów, ich kształt i wymiary przedstawiono na rys. 10. Można przyjąć, że przygotowane geofibry były wykonane z surowców wtórnych, z różnorodnych tworzyw syntetycznych produktów o różnym przeznaczeniu użytkowym (butelki, pojemniki, pasy).

Użyte geofibry wytworzono w taki sposób, aby ich wymiary były pewnym kompromisem pomiędzy wymiarami fibrów włóknistych a fibrami uzyskiwanymi z odpadów lub wtórnych

produktów z tworzyw poliwinylowych i poliestrowych, nie stawiając szczególnych wymagań co do jakości samych tworzyw syntetycznych. Tworzywa te w zasadzie nie mogłyby stanowić surowca wtórnego do produkcji innych wyrobów z tworzyw sztucznych ze względu na wielokrotne powtarzanie tego procesu i stosowanie różnych składów ich wypełniaczy. W efekcie mogą być jedynie użyte jako uboczne formy zastosowań lub jako odpady poprodukcyjne. Jest to założenie pozwalające na znaczną opłacalność takiego potencjalnego i możliwego sposobu wzmocnienia oraz ulepszenia parametrów nośności warstw podłoży gruntowych, które miało też miejsce w większości omówionych prac.

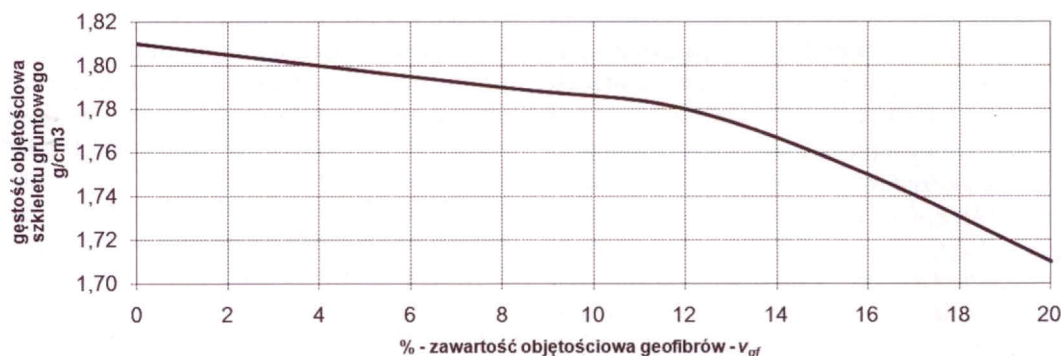
Sporządzono próbki mieszanek fibrogruntowych z objętościową zawartością $v_{gf} = 8, 12, 16$ i 20% geofibrów w mieszance. Strukturę sporządzonej mieszanki fibrogruntowej w stanie luźnym i zagęszczonym przedstawiono na rys. 11. Na próbkach wykonano badania Proctora w wersji zmodyfikowanej według [15], określając maksymalne gęstości objętościowe szkieletu gruntowego ρ_{ds} i wilgotności optymalne w_{opt} dla różnej zawartości objętościowej geofibrów. Uzyskane wyniki oznaczeń przedstawiono bezpośrednio na rys. 12 i 13.



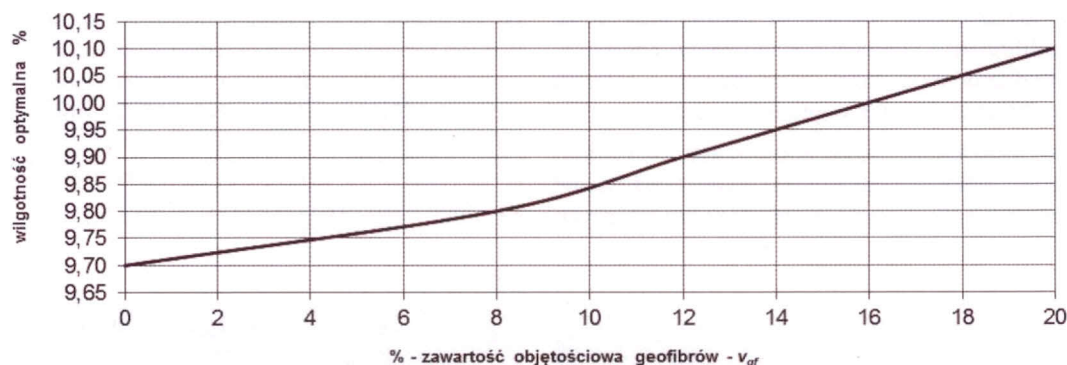
Rys. 10. Struktura i wymiary geofibrów



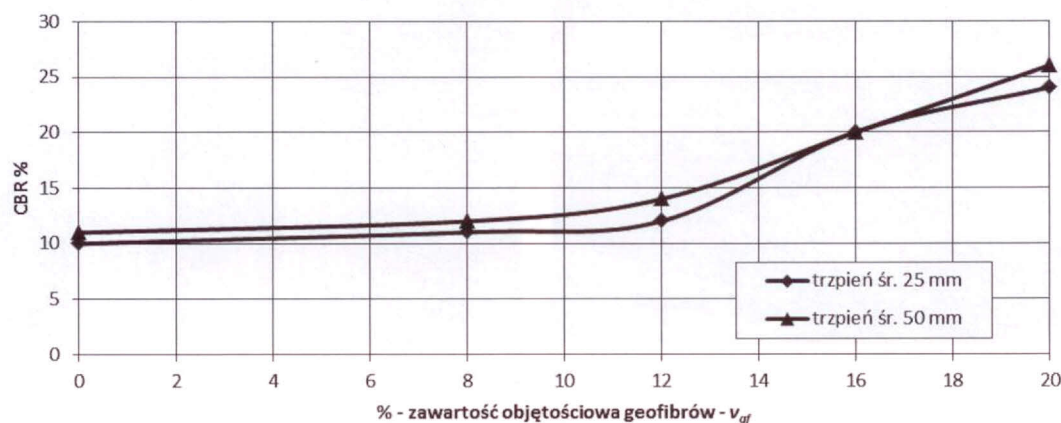
Rys. 11. Struktura przygotowanego fibrogruntu



Rys. 12. Zmiany ciężaru szkieletu gruntowego dla różnych zawartości geofibrów



Rys. 13. Zmiany wilgotności optymalnej fibrogruntu dla różnych zawartości geofibrów

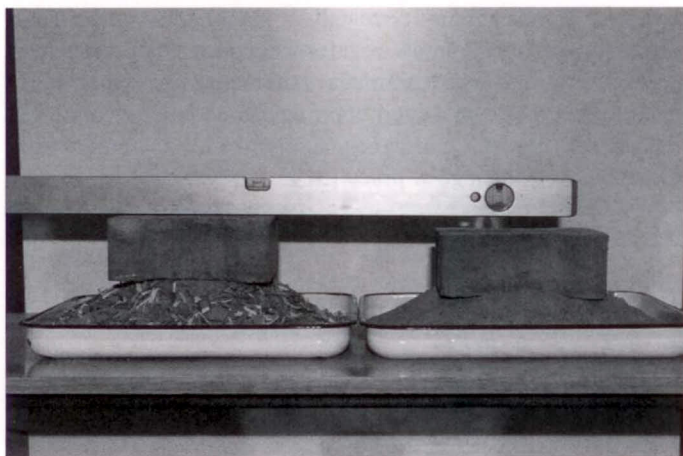


Rys. 14. Kalifornijski wskaźnik nośności (CBR) dla różnych zawartości geofibrów

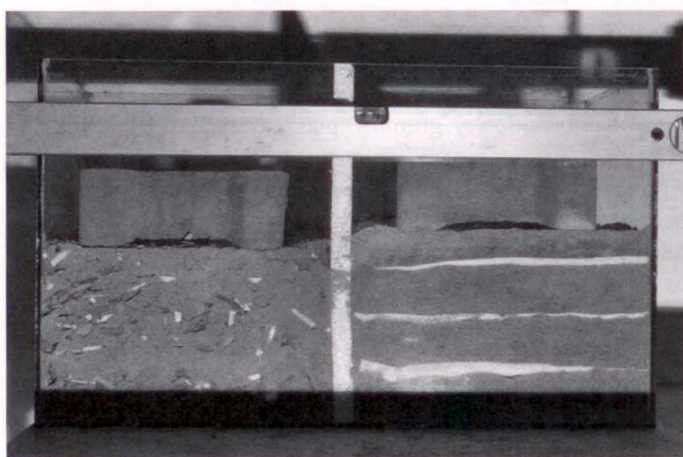
Na rys. 14 przedstawiono wyniki oznaczeń wskaźnika CBR. Z wykresów wynika, że pełną przydatność do budowy podłoża nawierzchni komunikacyjnych dla danego rodzaju gruntu uzyskujemy już przy 14% objętościowej zawartości geofibrów w gruncie. Występują też pewne analogie wyników do wyników testów przedstawionych na rys. 9. Wyniki oznaczeń CBR wskazują też polepszającą się mrozoodporność mieszanek fibrogruntowych, co ma istotne znaczenie dla sugerowanego zastosowania w gruntowych podłożach nawierzchni dróg.

W celu uwypuklenia i właściwej ekspozycji właściwości wzmacniających i funkcji zbrojącej geofibrów przeprowadzono także testy demonstracyjne. Wykonano fotografie tych testów, które ilustrują efekty wzmocnienia warstw podłoża gruntowego geofibrami w porównaniu do samego gruntu oraz trzema war-

stwami geotekstyliów o gramaturze 250 g/cm² (rys. 15 i rys. 16). Fotografie te są jedynie demonstracją skutków wzmocnień i zbrojenia gruntów zarówno geotekstyliami, jak i geofibrami. Porównano ogólną odkształcalność zastosowania samego gruntu piaszczystego oraz gruntu zmieszanego z geofibrami, jak też zbrojonego warstwami geotekstyliów. Przed wykonaniem testów porównawczych (rys. 15) przygotowano jednakową ilość piasku średnioziarnistego o $\rho = 1,65$ g/cm³, objętości około 3,8 dm³ i z wysokości około 1 m zrzucono kostkę betonową o masie około 5 kg, wyrównując spłaszczone przyzmy samego gruntu, fibrogruntu i gruntu zbrojonego warstwami geotekstyliów. Ten rodzaj demonstracji ma zalety nie tylko dydaktyczne, ale również popularyzujące te sposoby wzmocnień i zbrojenia podłoża nawierzchni dróg.



Rys. 15. Demonstracja mniejszej podatności fibrogruntów na osiadanie



Rys. 16. Demonstracja różnych osiadań podłoża gruntowego przez różne formy geosyntetyków

Podobnie wykonano fotografię przedstawioną na rys. 16 dla objętości około 6 dm³ tego samego gruntu umieszczonego w prostokątnym, dwudzielnym pojemniku szklanym. Po zrzuceniu kostki betonowej z wysokości około 1 m, wyrównano zdeformowane powierzchnie gruntu. Widoczne różnice osiadań ilustrują zmiany własności nośnych poszczególnych warstw i w ogólnym zarysie korespondują z wynikami pokazanymi na wykresach na rys. 2 i 3.

Bezpośrednie wyniki testów laboratoryjnych mieszanek fibrogruntowych, przedstawione na rys. 12, 13 i 14, wskazują na istotne ulepszenie własności fizycznych i mechanicznych fibrogruntów w stosunku do samych gruntów. Szczególnie należy zwrócić uwagę na wymienione niżej okoliczności.

1. Redukcja gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_{ds} wraz ze wzrostem zawartości geofibrów w gruncie rokuje wzrost zdolności zagęszczania fibrogruntów jako warstwy ulepszonego gruntu, skutecznie wzmacniającej podłoże gruntowe.
2. Wzrost w_{opt} proporcjonalnie do objętościowej zawartości geofibrów pozwala na stosowanie technologii zagęszczania warstw fibrogruntów także w warunkach umiarkowanych opadów atmosferycznych, co w przypadku większości gruntów nieulepszanych jest bardzo trudne.

3. Bezpośredni przyrost CBR wraz ze wzrostem objętościową zawartości geofibrów jednoznacznie wskazuje na polepszenie nośności, filtracji i mrozoodporności warstwy podłoża gruntowego wykonanej z fibrogruntów.

MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA FIBROGRUNTÓW W PODŁOŻACH NAWIERZCHNI DROGOWYCH

Wzmacniająca funkcja geofibrów z tworzyw syntetycznych w warstwach gruntów piaszczystych została potwierdzona w pracach doświadczalnych [1, 9, 11, 21]. Przeprowadzone testy laboratoryjne i oznaczenie niektórych parametrów fizycznych fibrogruntów kwalifikują je i potwierdzają jako skuteczny sposób wzmacniania i stabilizacji piaszczystych gruntów podłoży nawierzchni drogowych, a także gruntowych podłoży fundamentów budynków i innych budowli. Wykonane testy laboratoryjne parametrów charakterystycznych dla fibrogruntów wskazują na ich przydatność do wzmocnień gruntowych podłoży nawierzchni drogowych. Istnieje też wiele przykładów bezpośrednich zastosowań fibrogruntów w podłożach nawierzchni drogowych, także relacjonujących wyniki obserwacji i testów pomiarów polowych [13, 18, 19, 20]. Zastosowanie tego rodzaju wzmocnień i stabilizacji właściwości gruntów w warstwach podłoży nie jest oparte na ścisłych algorytmach obliczeń projektowych nośności wzmocnionych podłoży nawierzchni, bowiem algorytmy takie są niezwykle skomplikowane i dotyczą jedynie pewnych form modeli podłoża gruntowego. Zastosowanie techniczne może być oparte tylko na pewnych kalkulacjach wstępnych i na przekonaniach inżynierów projektantów do tego rodzaju rozwiązań jako skutecznych i ekonomicznych. Podstawowym wymaganiem jakościowym dla gruntowego podłoża nawierzchni drogowej jest uzyskanie odpowiedniej wartości wtórnego modułu odkształcenia E_2 lub wskaźnik odkształcenia I_o określanego jako stosunek modułu odkształcenia wtórnego E_2 do modułu odkształcenia pierwotnego E_1 . Podobnie jak dla mieszanek gruntowych ze spoiwami hydraulicznymi istotne znaczenie w uzyskaniu korzystniejszych parametrów nośności warstw fibrogruntowych ma proces zagęszczenia. Wykorzystanie właściwości gruntów ulepszonych jako fibrogruntów może mieć pełne zastosowanie techniczne jako wykonywane warstwy wzmocnione podłoża nawierzchni dróg w rozumieniu nawierzchni dróg kołowych i nawierzchni szynowych. Sugestie w tym zakresie zawarte są między innymi w pracy [20].

Pomiar modułów odkształcenia dokonywany jest na wykonanej warstwie gruntowej podłoża. Wymagany poziom stopnia odkształcenia I_o można uzyskać tylko przy zachowaniu odpowiedniego wskaźnika zagęszczenia $I_s \geq 1$, a zatem przy odpowiednich ρ_{ds} i w_{opt} . Wskaźnik zagęszczenia, określany także dla wykonanej warstwy gruntu podłoża nawierzchni, oznaczmy jako:

$$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}} \quad (4)$$

gdzie;

I_s – wskaźnik zagęszczenia [–],

ρ_d – gęstość objętościowa szkieletu gruntu warstwy nasypowej [g/cm³],

ρ_{ds} – maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntu zagęszczonego przy wilgotności optymalnej w_{opt} wyznaczona w aparacie Proctora, według normy [8].

Relacje między parametrami nośności warstw gruntowych, a co za tym idzie zagęszczalności tych warstw, wynikające tylko

z pomiaru polowego i laboratoryjnego, nie są opisane analitycznie i mogą być każdorazowo określane jedynie empirycznie. Wynika z nich jednak, że dla danego rodzaju gruntu warstwy nośnej, o grubości około 50 cm podłoża nawierzchni, zmiany ρ_{ds} i jego wilgotności optymalnych w_{opt} mają istotne znaczenie. Podobne wnioski ustalono w pracy [23], pośrednio wskazując na:

$$I_s \Rightarrow f(\rho_{ds}, w_{opt}) \text{ i } I_o \Rightarrow f(I_s, CBR) \quad (5)$$

Stąd też w testach laboratoryjnych określania właściwości i pomiaru niektórych parametrów geotechnicznych mieszanek gruntu i geofibrów jako potencjalnej gruntu warstwy nośnej podłoża nawierzchni drogowej przyjęto ρ_{ds} i w_{opt} określane według normy [15] oraz parametr bezpośredni, kalifornijski wskaźnik nośności CBR , określany według normy [16].

Przy zestawianiu mieszanek fibrogruntów, gdzie stosowane są drobnoelementowe geofibry, nie zachodzą procesy wiązań chemicznych, ani zmiany strukturalnej spójności. Podstawowy mechanizm zmian właściwości fizycznych mieszanek w stosunku do samego gruntu to siły tarcia między ziarnami mieszanki. Fibrogrunty nie należą do grupy materiałów kompozytowych, których cechą są procesy wiązania chemicznego, a są jedynie mieszanką, której jednym z komponentów są geofibry. Z punktu widzenia technologicznego mieszanie gruntu z drobnoelementowymi geofibrami jest tak zwanym doziarnieniem gruntów piaszczystych i polega na podobnym procesie jak wykonywanie gruntowych mieszanek o uziarnieniu optymalnym. Zmiana uziarnienia mieszanki jest powodowana zmianą proporcji poszczególnych frakcji w mieszance i wynika ze wskazań normy [14]:

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (6)$$

gdzie;

C_U – wskaźnik uziarnienia mieszanki fibrogruntuowej [–],

d_{10} – średnica oczek sita, przez które przechodzi 10% gruntu [mm],

d_{60} – średnica oczek sita, przez które przechodzi 60% gruntu [mm].

Podobnie jak dla mieszanek gruntowych ze spoiwami hydraulicznymi, istotne znaczenie w uzyskaniu korzystniejszych parametrów nośności warstw gruntowych ma proces zagęszczania. Zmiana własności zagęszczania dla fibrogruntów wynika także z miary kształtu krzywej uziarnienia w stosunku do gruntu bez mieszania z geofibrami. Parametrem kształtu krzywej przesiewu gruntu określającym jego zdolność do zagęszczenia według normy [14] jest:

$$C_C = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (7)$$

gdzie;

C_C – wskaźnik krzywizny krzywej uziarnienia [–],

d_{10} – średnica oczek sita, przez które przechodzi 10% gruntu [mm],

d_{30} – średnica oczek sita, przez które przechodzi 30% gruntu [mm],

d_{60} – średnica oczek sita, przez które przechodzi 60% gruntu [mm].

Dla krzywej przesiewu samego gruntu i fibrogruntu można zauważyć, że na przykład przy 20% dodatku geofibrów uzyskujemy zwiększenie średnicy oczek sita d_{60} , przez które przechodzi 60% masy całej próbki gruntu, co przy niezmiennych średnicach sit d_{30} i d_{10} plasuje fibrogrunty w grupie lepiej zagęszczalnych niż te same grunty bez dodania geofibrów, niezależnie od tego, że zmiana ta będzie o tyle nieznaczna, że w obu przypadkach wskaźnik krzywizny uziarnienia będzie $C_C \approx 2$.

Oczywiste jest, że jeżeli odnotujemy w przeprowadzonych testach laboratoryjnych wzrost zawartości frakcji $f_p > 2$ mm,

to jest to wynik zmiany pozostałych parametrów właściwości piaszczystych fibrogruntów w zależności od wzrostu zawartości geofibrów w mieszance. Zmiana uziarnienia mieszanek fibrogruntowych w konsekwencji doprowadza do polepszenia właściwości filtracyjnych mieszanek, co wynika też z warunku filtru Terzaghiiego, podanego w pracy [3].

$$\frac{d_{85}}{d_{15}} \geq 2,5 \quad (8)$$

gdzie;

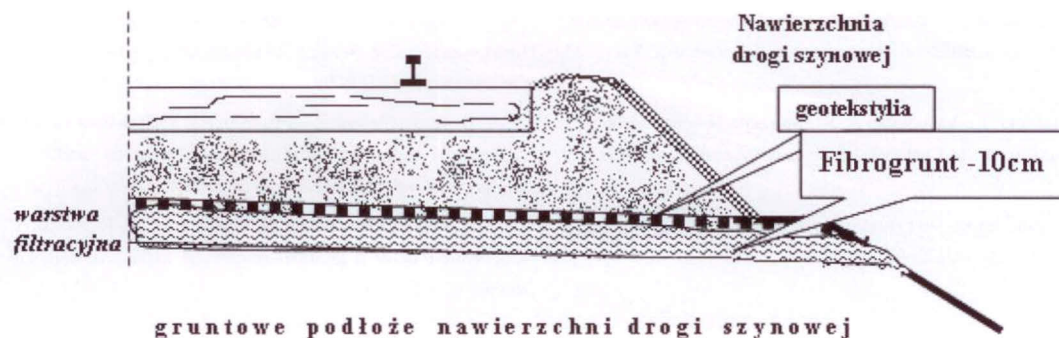
d_{15} – średnica oczek sita, przez które przechodzi 15% gruntu [mm],

d_{85} – średnica oczek sita, przez które przechodzi 85% gruntu [mm].

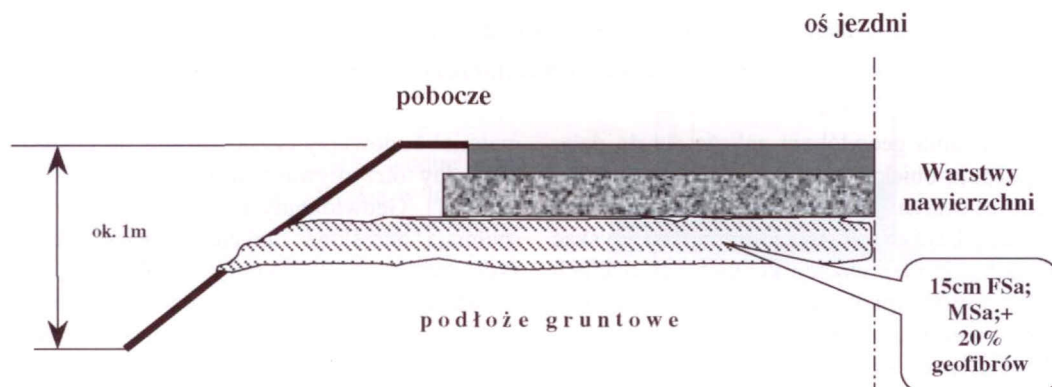
Fakt ten upoważnia do sugestii możliwości bezpośredniego zastosowania warstw fibrogruntowych jako warstw filtracyjnych w podłożach nawierzchni dróg szynowych (rys. 17). Ponadto mieszanki fibrogruntowe cechuje $C_U < 10$, co stwarza większą gwarancję eliminacji sufozji warstw filtracyjnych przy spływie po jej pochyleniu.

Schemat pokazany na rys. 18 jest sposobem wzmocnienia podłoża nawierzchni drogi samochodowej, który pozwala na wykorzystanie w budowie gruntu podłoża nawierzchni drogi samochodowej gruntów piaszczystych o gorszych parametrach jakościowych. Zbliżone co do zasady rozwiązanie z powodzeniem stosowano w pracy [19]. Grunty o dostatecznej jakości, możliwe do pozyskania w obrębie budowy danego odcinka drogi, są szczególnie pożądane. Jeżeli parametry gruntu eliminują go z bezpośredniego wbudowania w podłoże nawierzchni drogowej, można ulepszyć ten grunt geofibrami. Ma to istotny wpływ na pełny koszt realizacji drogi.

Stosowanie tego rodzaju rozwiązania jako warstwy wzmocnionej podłoża nawierzchni drogi wydaje się również konkurencyjne w stosunku do każdej innej formy wzmocniania takiej warstwy spoiwami hydraulicznymi. Wynika to również z faktu, że geofibry można pozyskać z różnych odpadów i wtórnego obrotu wyrobów z tworzyw syntetycznych, które nie ulegają biodegradacji. Jak wiadomo, utylizacja tych odpadów (np. opakowań typu PET) jest trudna i kosztowna. Nawet kilkusetletnia odporność na rozkład takich odpadów staje się w tym przypadku wadą bardzo użyteczną. Do przygotowania geofibrów można też stosować zniszczone geosiatki i geotekstylia lub ich zdeklasowane partie, nie odpowiadające właściwościom założonym w procesie produkcji. Wzmocnienie gruntu podłoża nawierzchni drogowych poprzez zastosowanie tak pozyskanych geofibrów jest z całą pewnością tańsze od wzmocnienia gruntów spoiwami hydraulicznymi i może mieć także zastosowanie w podłożach nawierzchni dróg szynowych oraz w podłożach budynków i budowli inżynierskich. Pełną i dokładną analizę kosztów można przeprowadzić tylko dla konkretnego przypadku zastosowania geofibrów. W tym znaczeniu zastosowanie tworzyw syntetycznych można uważać za proekologiczne, zaś sposób ich pozyskania do tych celów należy do procesu recyklingu produktów z tworzyw syntetycznych. Na kanwie przedstawionych rozważań można wskazać, że konkretne zastosowanie techniczne fibrogruntów (na przykład według schematów na rys. 17 lub 18) musi polegać na tym, że dla wytypowanej grupy gruntów piaszczystych, występujących lokalnie oraz możliwości pozyskania danego rodzaju geofibrów należałoby w pierwszej kolejności ściśle dobrać współczynnik koncentracji geofibrów v_{gf} lub w_{gf} w zależności ich współczynnika kształtu a_f i charakterystyki uziarnienia gruntu C_U i C_C . Szczegółowe wymagania odnośnie



Rys. 17. Wzmocnienie gruntowego podłoża nawierzchni drogi szynowej warstwą fibrogruntu



Rys. 18. Wzmocnienie gruntowego podłoża nawierzchni drogowej warstwą fibrogruntu

do nośności lub filtracji warstw fibrogruntów powinny wynikać z danego projektu technicznego zamierzonej realizacji odcinków dróg lądowych.

LITERATURA

1. Chaosheng Tang, Bin Shi, Wei Gao, Fengjun Chen, Yi Cai: Strength and mechanical behaviour of short polypropylene fibre reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25, 2007.
2. Consoli N. C., Casagrande M. D. T., Pritto P. D. M., Thome A.: Plate load test on fiber-reinforced soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE, October 2003.
3. Crossman M., Sequera D. S., Allsop W.: R&D Technical Report FD 2409, London, May 2003.
4. Diambra A., Ibrahim E., Muir Wood D., Russell A. R.: Fibre reinforced sands: Experiments and modelling. *Geotextiles and Geomembranes*, 28, 2010.
5. Gray, D. H., Ohashi, H.: Mechanics of fiber reinforcement in sand. *Journal of Geotechnical Engineering – ASCE* 109(3), 1983.
6. Gradkowski K.: Badania nad własnościami geotechnicznymi fibrogruntów. Materiały seminarium słowacko-polsko-rosyjskiego. Moskwa 2010.
7. Gupta R. D., Jved Alam, Mohd. Ahmadullah Farooqi: Effect on CBR and other geotechnical properties of fly ash mixed with lime and non-woven geofibres. *Science Direct* www, 2009.
8. El-Ghaffar A. K. A. M.: Behaviour of subgrade soil reinforced with polypropylene fibers. *SinceDirect* www, 2009.
9. Fauziah Ahmad, Farshid Bateni, Mastura Azmi.: Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres. *Geotextiles and Geomembranes*, 28, 2010.
10. Mandhavi Latha, Vidya S. Murthy: Effects of reinforcement form on the behavior of geosynthetic reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 25 (2007).
11. Madhavi Latha, Vidya S. Murthy: Investigations on sand reinforced with different geosynthetics. *Geotechnical Testing Journal*, Vol.29, No. 6., November 2006.
12. Mahipal Singh Chauhan, Satyendra Mitkal, Bijayananda Mohanty: Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre. *Geotextiles and Geomembranes* 26, 2008.
13. Masami Fukuoka, Shigeru Tani & Tsuneo Yamashita: Stability of retaining wall reinforced by continuous fibers during earthquakes. *Proceedings of the 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*. The Hague, Netherlands 1990.
14. PN EN ISO 14688-1,2 Badania geotechniczne. Oznaczenia i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczenia i opis. Część 2: Zasady klasyfikowania.
15. PN EN 13286-2: 2004 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 2. Metody oznaczania laboratoryjnej gęstości i wilgotności. Metoda Proctora.
16. PN EN 13286-47:2004 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 47. Metoda badania wskaźnika CBR, wskaźnika nośności natychmiastowej i spęcznienia liniowego.
17. PN-EN 14889-2: Włókna do betonu. Część 2: Włókna polimerowe. Definicje, wymagania i zgodność.
18. Rupal Mehta: Polypropylene fibres reinforce soil at green verges or overflow car parks. *Materials World Magazine*, 01 Mar 2006.
19. Santoni R. L., Tingle J. S., Webster S. L.: Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127, 2001.

20. Santoni R. L., Webster S. L.: Airfields and roads construction using fiber stabilization of sands. *Journal of Transportation Engineering*, Vol -127, 2001.

21. Sivakumar Babu G. L., Vasudevan A. K., Sumanta Haldar.: Numerical simulation of fiber-reinforced sand behaviour. *Geotextiles and Geomembranes* 26, 2008.

22. Shukla S. K. i inni: Improved expressions for field values of compaction test parameters. *Geotechnique* 59, (2009), No. 10.

23. Sung-Sik Park: Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand. *Geotextiles and Geomembranes* 27, 2009.

24. Temel Yetimoglu, Muge Inanir, Orhan Esat Inanir: A study on bearing capacity of randomly distributed fiber-reinforced sand fills overlying soft clay. *Geotextiles and Geomembranes* 23, 2005.

25. Viswanadham B. V. S, Phanikumar B. R., Rahul V. Mukherjee: Swelling behaviour of a geofiber-reinforced expansive soil. *Geotextiles and Geomembranes* 27. 2009.