

Krzysztof Gradkowski

Instytut Dróg i Mostów

BADANIA GRUNTOWYCH PODŁOŻY NAWIERZCHNI ZBROJONYCH GEOSYNTETYKAMI

Rękopis dostarczono 17.04.2013 r.

Praca jest naukowym opracowaniem przeprowadzonych własnych badań laboratoryjnych i poligonowych w zakresie identyfikacji własności gruntów wzmacnianych i zbrojonych geosyntetykami (geotekstyliami i geofibry), jako modeli gruntowych podłoża nawierzchni dróg tak samochodowych jak i szynowych. Analizy prowadzonych badań i testów w różnych ośrodkach badawczych, pozwoliły na uformowanie kierunku własnych badań i testów pomiarowych nad zastosowaniami geosyntetyków w ulepszeniach i wzmacnianiu gruntowych podłoża nawierzchni dróg lądowych. W badaniach przedstawionych w pracy skoncentrowano się na określeniu zakresu ulepszenia i efektu wzmocnienia gruntowego podłoża nawierzchni dróg lądowych poprzez zastosowanie dwóch różnych rodzajów geosyntetyków. Sprawozdawczą i skróconą formę uzyskiwanych wyników sukcesywnie prowadzonych badań, zawierają wymienione w bibliografii recenzowane publikacje autora. Pierwsza część rozprawy obejmuje badania laboratoryjne próbek modelowych planarnego zbrojenia podłoża gruntowych nawierzchni drogowych, w której analizowane wyniki pomiarów pozwoliły na określenie liczby i form warstw zbrojenia geotekstylnego. Kolejna część pracy przedstawia badania wykonane na poligonowym modelu podłoża nawierzchni drogowej, które zmierzały do określenia efektu wzmocnienia zbrojeniem jednowarstwowym. Charakterystyki jakościowe fibrogruntów oraz porównania właściwości gruntów i fibrogruntów o różnej zawartości i kształcie geofibrów, a także potencjalnych zastosowań fibrogruntów w podłożach nawierzchni drogowych zawarte są w dalszych częściach pracy obejmujących także własne badania. Wyniki badań pozwoliły na sformułowanie zasad stosowania geosyntetyków w podłożach nawierzchni dróg lądowych jako oryginalnego wkładu autora w rozwój tej dziedziny budownictwa komunikacyjnego. Pełne zastosowania techniczne rozwiązań konstrukcyjnych opracowanych na podstawie przeprowadzonych testów i badań, wymagają praktycznej weryfikacji. Techniczny i praktyczny sposób wzmocnień podłoża nawierzchni dróg lądowych jest przedmiotem opracowania patentowego autora przedstawionym w części wnioskowej pracy.

Słowa kluczowe: zbrojenie gruntów, podłoża nawierzchni dróg lądowych.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SYMBOLI

CBR	– kalifornijski wskaźnik nośności
$C_U (U)$	– wskaźnik jednorodności uziarnienia
C_C	– wskaźnik krzywizny gruntu
D	– średnica lub szerokość płyty obciążającej grunt
d_{10}	– wielkość ziaren gruntu, które wraz z mniejszymi stanowią 10% masy gruntu
d_{30}	– wielkość ziaren gruntu, które wraz z mniejszymi stanowią 30% masy gruntu
d_{60}	– wielkość ziaren gruntu, które wraz z mniejszymi stanowią 60% masy gruntu
E	– moduł sprężystości Younga
E_o	– moduł odkształcenia
E_1	– pierwotny moduł odkształcenia
E_2	– wtórny moduł odkształcenia
E_d	– dynamiczny moduł odkształcenia
F_w	– siła rozciągająca zbrojenie geotekstylne
h_{war}	– grubość warstwy
H_N	– wysokość nasypów
H_W	– wysokość wykopów
I_o	– wskaźnik odkształcenia
I_s	– wskaźnik zagęszczenia
I_R	– współczynnik głębokości zbrojenia podłoża gruntowego
I_f	– współczynnik wzmocnienia (ulepszenia) podłoża gruntowego
R_m	– wytrzymałość na ściskanie materiału
ρ	– gęstość objętościowa gruntu
$w_{noś}$	– wskaźnik nośności gruntu
w_{fg}	– wagowy współczynnik zawartości geofibr
μ	– kąt tarcia pomiędzy gruntem a płaszczyzną geotekstyliów
ν	– współczynnik Poissona
V_N	– objętości nasypów
V_W	– objętości wykopów
V	– objętość transportowanego gruntu
W_p	– wskaźnik piaskowy

WSTĘP

Opracowanie i wskazanie sposobów uzyskiwania wyższej jakości techniczno-użytkowej projektowanych i budowanych odcinków dróg lądowych to zadanie, jakie postawił przed sobą autor publikacji. Przeprowadzenie własnych badań laboratoryjnych i poligonowych w zakresie identyfikacji właściwości gruntów wzmacnianych i zbrojonych geosyntetykami oraz naukowe opracowanie rezultatów badań zbliżyło do uzyskania rozwiązań technicznych. Praca ma charakter monograficzny i jest poświęcona zagadnieniom zbrojenia gruntów podłoża gruntowych. Opracowanie zasad stosowania geosyntetyków w gruntowych podłożach nawierzchni jest oryginalnym wkładem autora w rozwój budownictwa komunikacyjnego. Przedmiotem badań i pomiarów przeprowadzonych w ostatnich kilku latach były przybliżone i testowe modele gruntowych podłoży nawierzchni dróg samochodowych i szynowych.

Technologiczne problemy fundamentowania różnych typów nawierzchni dróg lądowych, obserwowane podczas realizacji różnych odcinków dróg na słabym podłożu gruntowym, skłoniły autora do podjęcia poszukiwań wariantowych sposobów rozwiązań konstrukcji podłoża gruntowych nawierzchni dróg. Uzyskanie wymaganych jakości jezdni i nawierzchni drogowych jest ściśle związane z parametrami jakości konstrukcyjnej podłoża gruntowych nawierzchni, a także odnosi się do określenia odpowiednich kryteriów ocen ekonomicznych dla poszczególnych propozycji rozwiązań technicznych, co do rodzaju i ilości stosowanych materiałów. Analizy założeń i wyników prowadzonych badań i testów w różnych ośrodkach badawczych, umożliwiły ukierunkowanie własnych badań i testów pomiarowych nad zastosowaniami geosyntetyków w ulepszaniu i wzmacnianiu gruntowych podłoży nawierzchni dróg lądowych. Pełen zakres badań i pomiarów przedstawionych w niniejszej pracy obejmował opracowanie sposobów i wskazania zakresu ulepszenia oraz efektu wzmocnienia gruntowego podłoża nawierzchni dróg lądowych poprzez zastosowanie dwóch różnych rodzajów geosyntetyków. Sprawozdawczą i skróconą formę przedstawienia uzyskiwanych wyników z sukcesywnie prowadzonych różnych testów i faz badań, zawierają wymienione w bibliografii recenzowane publikacje autora.

W pierwszej części monografii zostały opisane własne badania laboratoryjne próbek modelowych planarnego zbrojenia gruntowych podłoży nawierzchni drogowych. Analizowane wyniki pomiarów pozwoliły na określenie liczby i form właściwych warstw zbrojenia geotekstylnego w podłożach gruntowych. Podłoża gruntowe nawierzchni dróg samochodowych i szynowych były analizowane pod kątem ich pełnej integracji z budowlami ziemnymi stanowiącymi podstawy budowy wszystkich dróg lądowych. Kolejna część pracy przedstawia badania wykonane na poligonowym modelu gruntowego podłoża nawierzchni drogowej, które zmierzały do określenia efektu wzmocnienia zbrojeniem jednowarstwowym. Badania te prowadzone były w skali poza kameralnej, budowlanego wykonania modelu gruntowego podłoża nawierzchni dróg samochodowych.

Charakterystyki jakościowe fibrogruntów oraz porównania właściwości gruntów i fibrogruntów o różnej zawartości i kształcie geofibr, a także potencjalne możliwości zastosowań fibrogruntów w podłożach gruntowych nawierzchni drogowych, w tym także z własnych badań zawarte są w dalszych częściach pracy. Jest to specyficzny rodzaj wzmocnienia i ulepszenia gruntów podłoża, który w takiej formie nie był dotąd nigdzie stosowany i może być wykorzystany także w posadowieniach różnych obiektów budowlanych. Możliwość bez utylizacyjnego wykorzystania odpadów tworzyw sztucznych w budownictwie drogowym czyni takie rozwiązania proekologicznymi. Dotychczasowe zastosowanie głównie cementu w ulepszaniu podłoża gruntowych nawierzchni może być zastąpione poprzez zastosowanie geotekstylii i geofibr. Problemy opłacalności wielowarstwowego zastosowania geotekstylii jako wzmocnienia i ulepszenia podłoża gruntowych, mogą być definitywnie rozstrzygnięte w etapach realizacyjnych poszczególnych budów. Wnioski końcowe z przeprowadzonych badań dostosowano do utylitarnych zastosowań projektowo wykonawczych.

Pełne zastosowania techniczne rozwiązań konstrukcyjnych wzmocnionych gruntowych podłoża nawierzchni, opracowanych na podstawie przeprowadzonych cykli testów i badań, wymagają praktycznej ich weryfikacji. Zastosowania geotekstylii i geofibr w podłożach nawierzchni dróg spełniają też warunki i wymagania związane z *inter-operacyjnością* eksploatacyjną i technologiczną systemów sieci dróg szynowych i samochodowych akcentowanych obecnie przez aktualne regulacje techniczne krajów członkowskich Unii Europejskiej.

Techniczny sposób wzmocnień podłoża gruntowych nawierzchni dróg lądowych, tak dróg samochodowych jak i szynowych jest przedmiotem opracowania patentu autora, przedstawionym w części końcowej pracy. Zastosowanie tego rozwiązania podłoża gruntowych nawierzchni będzie szczególnie uzasadnione na drogach o niższych klasach techniczno-użytkowych.

1. WZMACNIANIE GEOSYNTETYKAMI PODŁOŻY GRUNTOWYCH NAWIERZCHNI DRÓG LĄDOWYCH

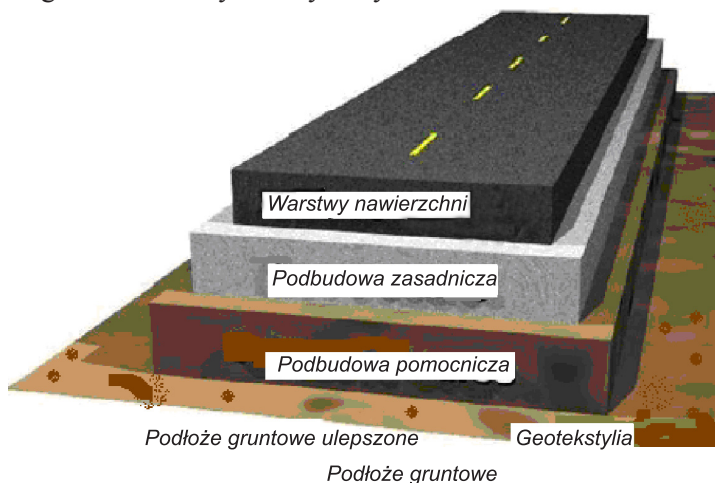
Wśród geosyntetyków stosowanych w budownictwie infrastrukturalnym ogólnie rozróżniamy: geotekstylia jako geotkaniny, geowłókniny, geomaty oraz geomembrany jako wodoszczelne i wodoprzepuszczalne. Oddzielne grupy stanowią geosiatki – płaskie i przestrzenne, georuszty, geofibry – włóknowe i drobnowymiarowe oraz geokompozyty. Geosyntetyki są produkowane w różnych rodzajach i typach, różnymi technikami z tworzyw syntetycznych: polietylenu, polipropylenu, poliamidów, poliestrów itp. Wymagane parametry i właściwości geosyntetyków do poszczególnych rozwiązań zawierają odpowiednie normy techniczne, których znaczna część ma zasięg europejski. Za podstawowe parametry właściwości tech-

nicznych geosyntetyków uważa się długotrwałą i doraźną wytrzymałość na rozciąganie oraz tak zwaną gramaturę, czyli masę jednostki powierzchni geosyntetyku. Obecnie producenci geosyntetyków są w stanie wykonać zapotrzebowane rodzaje i ilości według wskazanych parametrów technicznych tych produktów. W ujęciu historycznym geosyntetyki w podłożach gruntowych nawierzchni dróg lądowych samochodowych i szynowych są stosowane dopiero od kilkudziesięciu lat.

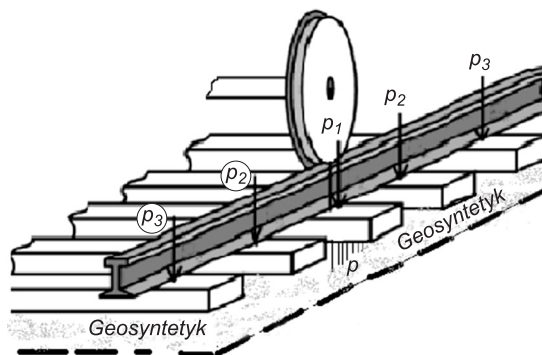
Zastosowanie geosyntetyków wywodzi się jednak z wielowiekowej tradycji budowy szlaków i dróg z użyciem ścinanych gałęzi, pni drzew, faszyny, słomy, liści palmowych i kaktusowych. Z czasem zaczęto stosować zużyte konopne i sizalowe liny okrętowe oraz odpady przemysłu włókienniczego. Były to sposoby wzmocnień dróg gruntowych budowanych na obszarach nizinnych. Popularną formą zastosowań geosyntetyków w budownictwie infrastrukturalnym, a szczególnie w budownictwie komunikacyjnym, jest ich funkcja filtracyjno-separacyjna oraz wzmocnień skarp budowli ziemnych. Opis i określenie zasadniczych pojęć i mechanizmów wzmacniania bądź ulepszania gruntów geosyntetykami nastęrcza pewne trudności. Powszechnie aprobowane mechanizmy i pojęcia zbrojenia betonu nie odpowiadają warunkom stosowania zbrojeń geosyntetycznych w ośrodku gruntowym. Nie występują też zmiany cech fizyczno-mechanicznych samych gruntów, lecz pewna odmiana cech i parametrów gruntów oraz struktur zbrojenia, a w następstwie – w formie zmian cech mechanicznych – całych układów warstw gruntowych. Stosując geosyntetyki w ośrodku gruntowym, nawet w mniej popularnych formach, np. żełe czy geofibry włókniste, każdorazowo mamy do czynienia z ewidentnym wzmocnieniem gruntów, to znaczy z poprawą ich właściwości mechanicznych, analogicznie jak w przypadku żelbetu. Można zatem przyjąć, że wzmocnienie i ulepszenie jakości warstw gruntów geosyntetykami jest w istocie zbrojeniem ośrodku gruntowego, w skali technicznej złożonego ze zbrojonych warstw gruntu. Za charakterystyczne dla wszelkich zbrojeń w ogólności uważa się zwiększenie odporności całej struktury zbrojonego materiału gruntowego na ściskanie i ścinanie. Tak jest też w dotychczas stosowanych sposobach i przykładach stosowania wzmacniania gruntów geosyntetykami. W początkowym okresie zbrojenie, a tym samym wzmacnianie gruntów, stosowano jako podłoża lub nawierzchnie dróg bez utwardzonych powierzchni jezdnych. Oznaczało to radykalną poprawę jakości tych dróg. Takie sposoby zastosowania były też traktowane jako alternatywa do ulepszania gruntów i kruszyw spoiwami oraz innymi istniejącymi formami zbrojenia, np. faszyną, odpadami organicznymi, włókienniczymi i celulozowymi.

Referowane w niniejszej pracy badania własne dotyczą szczególnego sposobu zbrojeń gruntowych podłoża nawierzchni dróg lądowych, w znaczeniu dróg szynowych i dróg samochodowych. Struktura ilości i rodzajów warstw gruntowych podłoża nawierzchni dróg lądowych jest w określony sposób kształtowana. Ogólnym trendem rozwoju nawierzchni dróg lądowych, samochodowych i szynowych jest konstrukcja złożona z wielu warstw materiałów o różnych właściwościach, gdzie większa liczba warstw zapewnia wyższą jakość użytkową nawierzchni dróg lądowych. Plasowanie warstw geosyntetycznych w ogólnych i typowych prze-

krojach dróg lądowych jest realizacją takich właśnie tendencji (rys. 1.1 i 1.2). Rozwój tych tendencji oznacza także stosowanie odpowiednio zmieniających się technologii budowy, konstrukcji sprzętu oraz proporcjonalnie większych kosztów realizacji dróg samochodowych i szynowych.

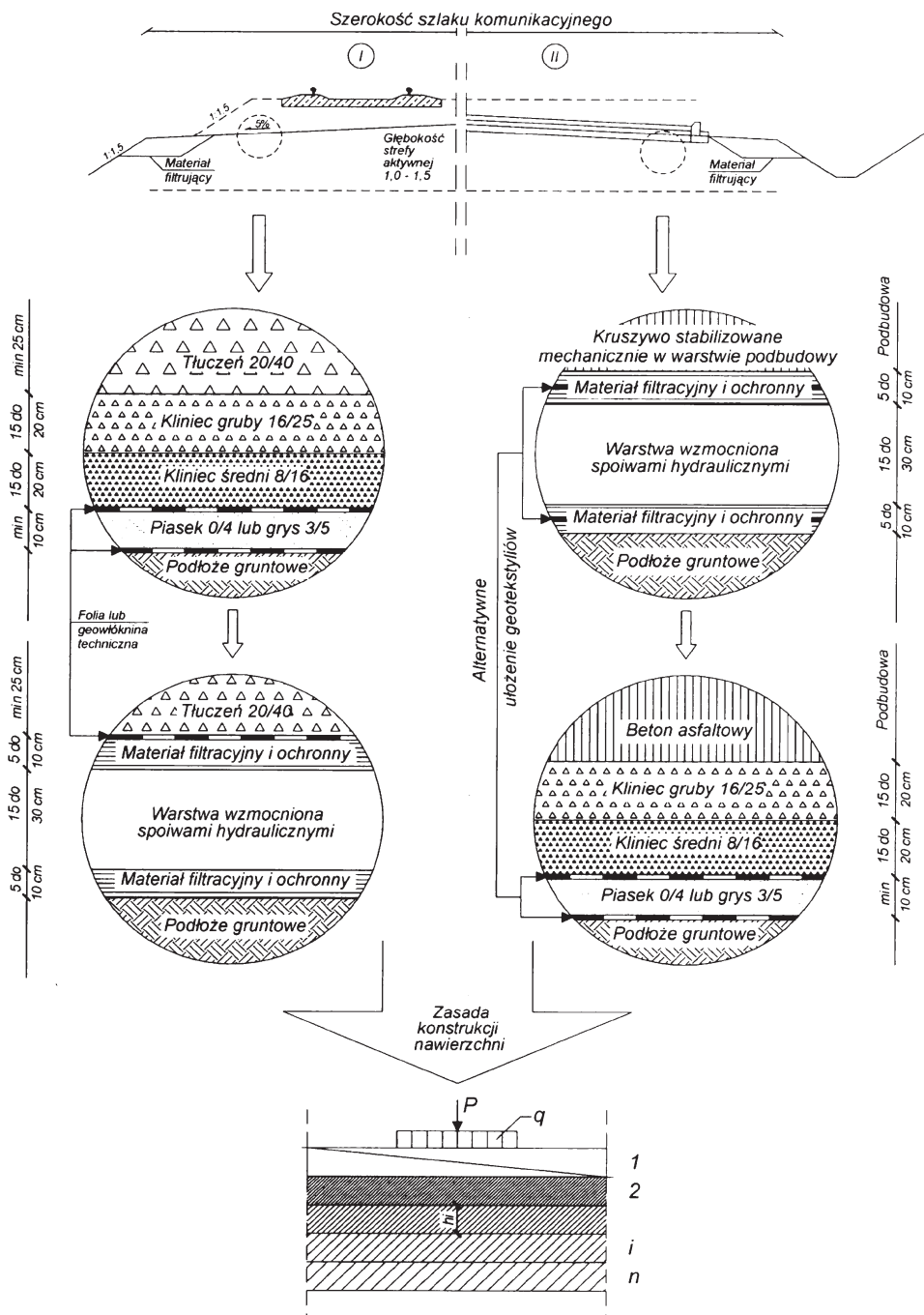


Rys. 1.1. Ogólny zarys położenia geotekstyliów w przekroju nawierzchni drogi



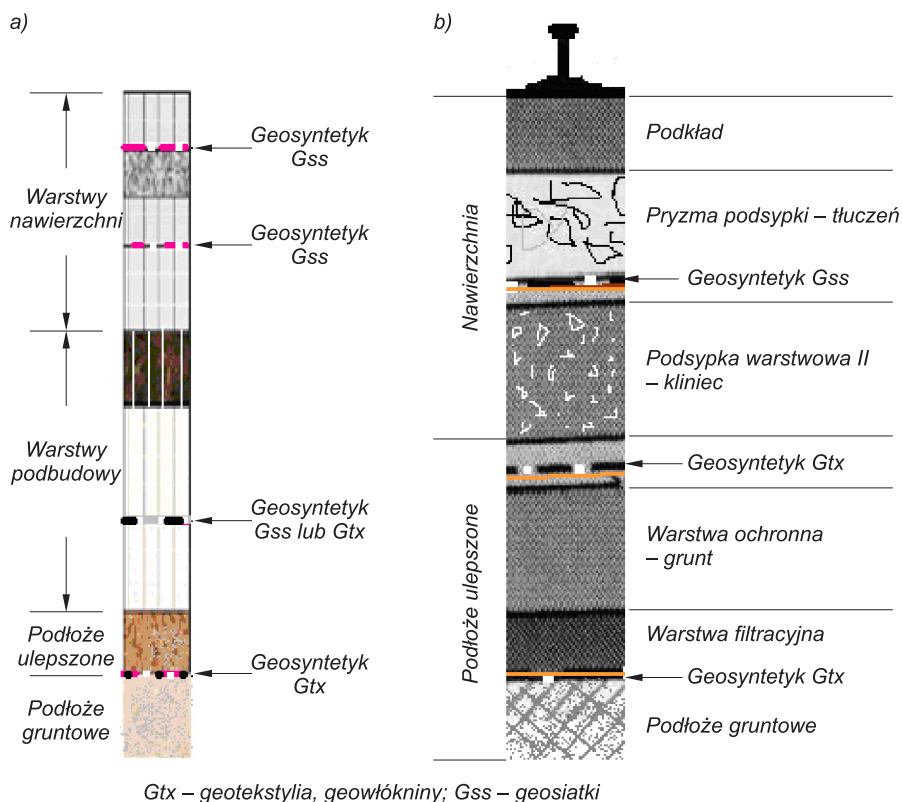
Rys. 1.2. Poglądowy sposób ułożenia geosyntetyku w podłożu drogi szynowej

Schematyczny zakres rozwoju konstrukcji nawierzchni dróg samochodowych i szynowych jako wielowarstwowych ustrojów nośnych, w których stosowano także usytuowanie geosyntetyków na różnych poziomach, przedstawia rysunek 1.3. Tendencję stosowania układów wielu warstw można zaobserwować zarówno w budowie samych nawierzchni dróg lądowych, jak i w podłożach gruntowych nawierzchni, które są w sposób oczywisty zintegrowane z warstwami nawierzchni. Stan i jakość podłoża nawierzchni mają zasadniczy wpływ na jakość użytkową każdej drogi, której część podstawową stanowi nawierzchnia jezdna. W rzeczywistości możemy też stwierdzić, że występuje ten sam rząd wielkości obciążeń zarówno samych nawierzchni jezdnych, jak i podłoża nawierzchni dróg samochodowych i dróg szynowych.



Rys. 1.3. Ogólne schematy zastosowań geosyntetyków w wielowarstwowych układach nawierzchni

Umieszczone na schematach układów warstwowych nawierzchni dróg lądowych położenia warstw geosyntetyków obejmują zarówno geotekstylia w postaci geowłóknin wytwarzanych w różnych technikach dziewiarskich, jak i geosiatek. Problem relacji kosztów technologii wykonawczych dróg i skuteczności konstrukcyjnej w przedstawionych na schemacie na rysunku 1.3 zastosowaniach nie był w wielu wypadkach wyraźnie eksponowany, bowiem pod uwagę nie były brane wielokilometrowe odcinki eksploatowanych dróg samochodowych lub szynowych, na przestrzeni dostatecznie długiego okresu. Eksperymentalne w wielu przypadkach zastosowania niektórych rozwiązań podanych na schemacie rysunku 1.4 miały na celu określenie zachowań i pożądanych parametrów jakości samych geosyntetyków w zależności od ich rodzaju. Zastosowania te służyły jednak w dużym stopniu do popularyzacji tych rozwiązań, a przede wszystkim zebrania przekonujących informacji o lepszej jakości dróg budowanych z wykorzystaniem geosyntetyków w różnych formach. Ponadto z upływem lat zmieniły się też warunki ekonomiki i technologii produkcji materiałów geosyntetycznych.

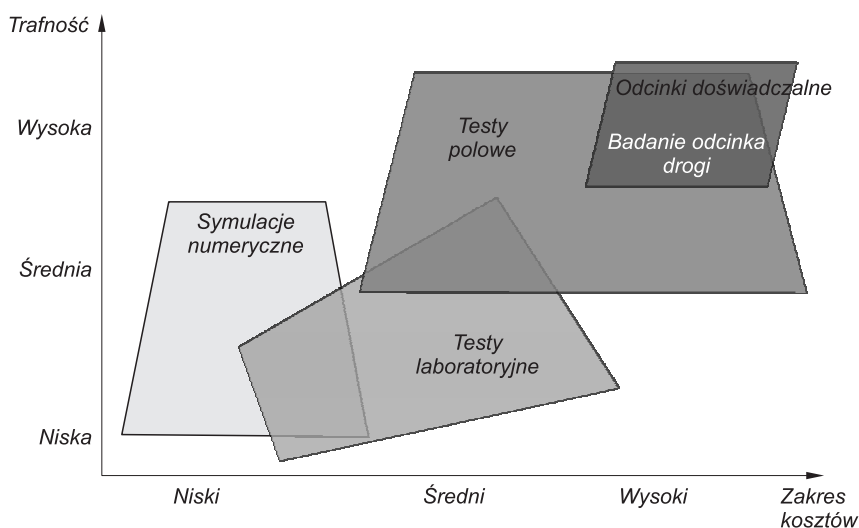


Rys. 1.4. Geosyntetyki w wielowarstwowych układach nawierzchni dróg: a) samochodowych, b) szynowych

W ostatnich latach jako ulepszenia i wzmocnienia struktur warstw mieszanek bitumicznych nawierzchni dróg samochodowych, zwłaszcza gorszych jakościowo, stosuje się geosyntetyki głównie w postaci geosiatki. Ten rodzaj zastosowań geosyntetyków należy jednak w zasadniczy sposób odróżnić od zastosowań w gruncie. Mechanizmy „współpracy” geosyntetyków oraz interakcji są zgoła różne w materiale gruntowym i w warstwach ze składem lepiszcza bitumicznego.

W procesach zastosowań technicznych różnych form konstrukcji podłoża rola doświadczeń wynikających z testów i badań modelowych, doświadczeń i pomiarów w laboratoriach staje się decydująca. Odnosi się to również do zastosowań różnych geosyntetyków. Od kilkudziesięciu lat trwają w tym zakresie intensywne prace w celu doskonalenia i efektywnego zastosowania różnego typu geosyntetyków, szczególnie w budownictwie infrastrukturalnym. Uzyskiwanie nowych danych i parametrów konstrukcji nośnych z zastosowaniem geosyntetyków, podobnie jak i innych nowych materiałów, wymaga również nakładów finansowych. Obecnie najtańsze są obliczenia numeryczne i symulacje komputerowe. Jednak uzyskane w ten sposób informacje o zachowaniu się zmienionej konstrukcji mają również ograniczoną przydatność i względną jakość rozwiązań praktycznych.

Najskuteczniejsze w opisach nowych konstrukcji i tworzeniu wskazań technicznych są bezpośrednie pomiary na zbudowanych odcinkach dróg, stanowiących odcinki doświadczalne. Wymaga to jednak znacznych środków, a wyniki mogą być wykorzystane dopiero w kolejnych fazach nowych budów i wymagają kolejnego łańcucha weryfikacji. Wydaje się zatem, że pomiary laboratoryjne i poligonowe są jedną z najbardziej optymalnych form zbierania doświadczeń i danych o zachowaniu się nowych konstrukcji z użyciem geosyntetyków lub innych materiałów budowlanych. Ogólnie proces ten można zilustrować diagramem (rys. 1.5).



Rys. 1.5. Ogólne zależności ekonomiczne w projektowaniu technicznym dróg

W ogólnym zarysie w zakresie zastosowań geosyntetyków w drogach lądowych można wyodrębnić w ostatnich latach dwa główne kierunki prac badawczo-doświadczalnych:

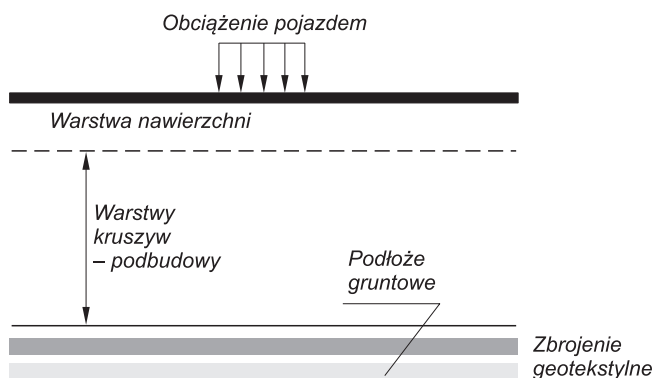
- doświadczenia laboratoryjne oraz testy zastosowań technicznych zmierzające do wykorzystania właściwości fizykomechanicznych geotekstyliów poprzez ułożenie w gruncie i wykorzystywanie ich właściwości jako substytutów warstw gruntów o wyższej jakości oraz jako gruntów ulepszonych, w tym własności filtracyjnych i izolacyjnych [18, 29, 31, 36, 49];
- badania laboratoryjne polegające na weryfikacji i modyfikacji parametrów fizykomechanicznych samych geosyntetyków jako materiału zbrojącego i wzmacniającego, a w mniejszym stopniu filtrującego ośrodek gruntowy [17, 33, 43, 44, 59, 68].

W dotychczasowej praktyce inżynierskiej w podłożach nawierzchni dróg samochodowych geosyntetyki w formie geotekstyliów, określane zamiennie przez producentów 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 i mało spoistych o parametrach geotechnicznych zbliżonych do parametrów gruntów przydatnych do ulepszania spoiwami hydraulicznymi. W podłożach nawierzchni drogowej i innych obiektów drogowych geotekstyli w pojedynczym ułożeniu spełniają głównie rolę warstwy filtrującej i drenującej. Znacznie więcej doświadczeń w stosowaniu geosyntetyków zebrano w odniesieniu do gruntów zbrojonych w konstrukcji nasypów, podłoża 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 wobec innych sposobów ulepszeń podłoża nawierzchni drogowych [16, 57].

Zmiany odkształcalności różnych modeli gruntowych warstw podłoża nawierzchni pozwalają na sformułowanie ogólnych wskazań w technicznych sposobach zastosowania geotekstyliów jako jednego ze sposobów, polegającego ogólnie na zwiększeniu ilości warstw poprzez zbrojenie kilkuwarstwowe. Takie formy zastosowania geosyntetyków występują głównie w podłożach nawierzchni, które z różnych przyczyn nie spełniają wymagań określonych warunków technicznych budowy i wymagań normowych.

Według klarownych klasyfikacji, opisanych w pracy Rafalskiego [56], w podstawowym układzie konstrukcyjnym drogi samochodowej rozróżniamy dwie za-

sadnicze części: warstwy nawierzchniowe, złożone także z warstw podbudowy, oraz podłoże, które może posiadać gruntowe warstwy ulepszone lub tylko naturalne. W zakresie i przedmiocie niniejszej pracy zawarte są głównie próby określenia możliwości ulepszenia warstw podłoża nawierzchni drogowej (rys. 1.6). W analogiczny sposób problem ten może być odnoszony do podłoża dróg szynowych, które w myśl obecnie obowiązujących wytycznych i instrukcji budowy powinny być formą warstwy ochronnej. Przykładowy sposób umieszczenia geosyntetyków w przekrojach drogi szynowej według obowiązujących instrukcji Id-3 [76] pokazany jest w dalszych rozdziałach niniejszej pracy. Obecnie do ulepszenia podłoża, w przypadkach konkretnych odcinków dróg tak samochodowych, jak i szynowych, stosuje się ulepszenia gruntów podłoża nawierzchni spoiwami hydraulicznymi, głównie cementem i wapnem. Sposoby te są praktykowane niezależnie od faktu, że obciążenie użytkowe pojazdami dróg szynowych jest prawie dwukrotnie większe od obciążeń w drogach samochodowych, to znaczy 220 kN/oś i 115 kN/oś, a ponadto występuje inny sposób rozłożenia tych nacisków na podłoże i inny charakter wpływów dynamicznych. W związku z tym, w wielowarstwowych strukturach podłoża rusztu torowego drogi szynowej, występujących na kolejach zagranicznych, stosuje się wielopoziomowe sposoby ułożenia warstw kruszyw i geosyntetyków różnych rodzajów.



Rys. 1.6. Lokalizacja strefy wzmacniania podłoża nawierzchni dróg lądowych

Należy zaznaczyć, że funkcja wzmacniająca geosyntetyków we wszystkich przypadkach ułożenia w gruncie jest niewielka i ma charakter wzmocnienia lokalnego pewnej strefy warstw gruntowych lub kruszywa. Strefę bezpośredniego wzmocnienia w gruncie można wyodrębnić tylko drogą pomiarów bezpośrednich, a grubość warstwy wzmocnienia (miąższość) zależy od struktury uziarnienia gruntu, tekstury i rodzaju geotekstyliów oraz charakteru obciążeń zewnętrznych zbrojonego ośrodka gruntowego. Zastosowań technicznych wzmocnienia bądź zbrojenia w podłożach nawierzchni dróg samochodowych można dopatrywać się

w formie redukcji wymaganej grubości warstwy podbudowy kruszywa. Katalog wzmocnień i napraw nawierzchni drogowych przewiduje okoliczność zastosowania geowłókniny drogowej do wzmocnienia, z możliwością zmniejszenia grubości kruszywa od 5 do 10 cm, wykorzystując funkcję zbrojącą geotekstyliów w gruntowym podłożu nawierzchni.

2. ZASADY I ZAŁOŻENIA TECHNICZNE STOSOWANIA GEOSYNTETYCZNYCH ZBROJEŃ GRUNTU

2.1. OGÓLNE ZAŁOŻENIA ZBROJENIA GEOSYNTETYKAMI PODŁOŻY NAWIERZCHNI

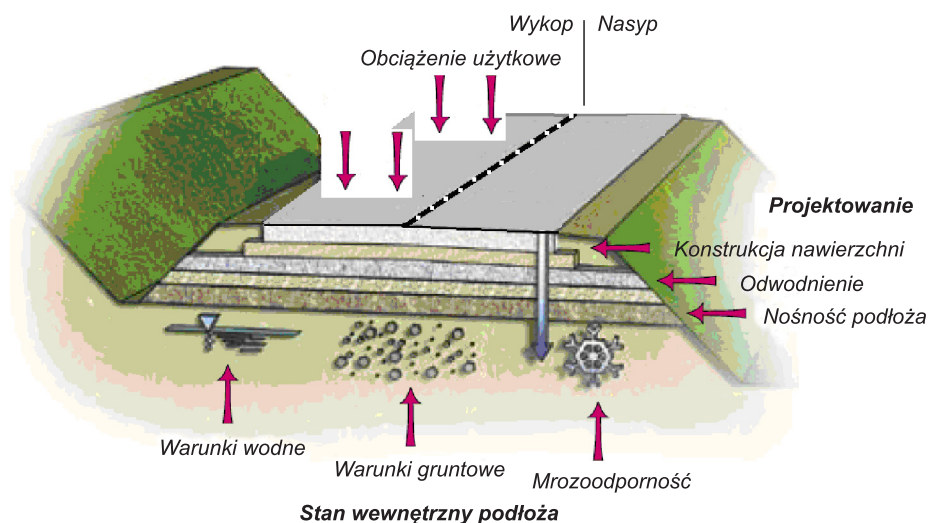
Zagadnienia wzmacniania podłoży nawierzchni drogowych półsztywnych lub podatnych są rzadko przedmiotem analizy. Znacznie więcej uwagi poświęca się możliwościom zbrojenia układu nawierzchni dróg nieutwardzonych (gruntowych). Ten rodzaj wzmocnień podłoży nawierzchni podatnych obejmuje w zasadzie drogi tymczasowe o mniejszym znaczeniu gospodarczym, a jednocześnie niskonakładowe, których trwałość i jakość podnosi się poprzez bezpośrednie zastosowanie geosyntetyków każdego rodzaju. W dążeniu do efektywnego zastosowania geosyntetyków i poniesienia efektywnych nakładów utartym i tradycyjnym schematem postępowania w pierwszej kolejności są próby analitycznego wyznaczenia skuteczności konstrukcyjnej, a następnie techniczne zastosowania i pomiary bezpośrednie. Formułowanie modeli układów warstw o różnych właściwościach fizycznych od wielu lat nastrocza określone problemy. Obszerne analizy tych modeli i uzyskiwane wyniki obliczeń zawarte są w wielu pracach, między innymi [16, 30, 72].

Analizy obliczeń numerycznych różnych modeli wielowarstwowych podłoży gruntowych, w tym również wzmocnionych, były przedmiotem wielu opracowań. W wielu przypadkach modelowanie wzmocnionych podłoży gruntowych jest związane z budową modeli obliczania nawierzchni dróg. Wiadomo też, że pewna część modeli obliczania nawierzchni dróg samochodowych i szynowych jest czysto empiryczna, polegająca na przybliżonych analogach fizyko mechanicznych struktur nawierzchni, uzupełnianych pomiarami rzeczywistych stałych materiałowych. W pracach Dobruckiego, m.in. [16], zawarte są próby analitycznego rozwiązania modelu podłoża nawierzchni, wzmocnionego geosyntetykiem przy pomocy *MES*. Obliczenia te mają większe znaczenie teoretyczne i poznawcze, lecz dużo mniejsze znaczenie w technicznych ustaleniach niezbędnych ilości i grubości warstw nawierzchni i podłoża gruntowego zbrojonego geosyntetykiem. W modelach

sprężystej półprzestrzeni warstwowej poszczególne warstwy są charakteryzowane modułami sprężystości lub sztywności oraz współczynnikami Poissona. W podobny sposób definiowane są gruntowe warstwy podłoża, które ponadto mają nieograniczone wymiary w płaszczyźnie poziomej. Ze względu na takie założenia i ograniczenia modeli, praktycznie w żadnym stopniu nie mogą być analizowane i określane właściwości samych geosyntetyków, w tym i geotekstyliów, których rzeczywiste właściwości fizyczne i mechaniczne radykalnie nie przystają do zakładanych własności teoretycznych. Próby poszukiwania nowych hybrydowych modeli teoretycznych, opisujących interakcje pomiędzy geosyntetykiem a gruntem, są ponawiane z różnym skutkiem i stopniem przybliżenia. Można się spodziewać, że w perspektywie kilku lat zostanie opracowany pewien model analityczny pozwalający na pełne obliczenie wymaganych parametrów ustroju grunt-geosyntetyk. W poszukiwaniach modeli analitycznych ośrodków uwarstwionych należy jednak odróżnić modele wielowarstwowych układów nawierzchni dróg lądowych od wielowarstwowych układów gruntowych. Warstwy różnych rodzajów gruntów o zmiennych właściwościach fizycznych i mechanicznych mają w rezultacie zbliżone parametry opisujące właściwości ośrodka modelowego. Są to na ogół parametry zakładające sprężystą odkształcalność, która jest właściwa materiałom izotropowym, nie zaś materiałom gruntowym.

W projektowaniu i budowie dróg samochodowych i szynowych znaczna część zabiegów technologicznych obejmuje samą konstrukcję nawierzchni. Trwałość i stateczność wielowarstwowych układów nawierzchniowych zależy między innymi od jakości metod obliczania nawierzchni, w tym uwzględniających implementację geosyntetyków w układzie. Niemal dwusetletnia tradycja udoskonalania konstrukcji nawierzchni dróg szynowych spowodowała konieczność selektywnego opisu i obliczeń poszczególnych elementów, z pominięciem analizy całego układu. Analizuje się siły wewnętrzne w szynach, podkładach szynowych i elementach przytwierdzeń. W analizach całych układów nawierzchni nie mniej istotne znaczenie mają względy technologiczne wykonywania warstw z kruszyw, betonowych oraz bitumicznych, jak również technologie ulepszania podłoża gruntowego. Należy podzielić panujący pogląd, że obliczenia wymiarowania nawierzchni drogowej należą do metod złożonych, a jednocześnie przybliżonych. Dzieje się tak zarówno przy uwzględnianiu zastosowania geosyntetyków, jak i bez uwzględniania ich zastosowania. Wynika to z faktu łączenia w zależności funkcyjne różnych rodzajowo parametrów materiałowych, wielkości fizycznych opisu warunków zewnętrznych i struktury obciążeń ruchowych. Od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku w wielu krajach dużą popularnością cieszą się procedury i sposoby obliczania nawierzchni dróg samochodowych zalecane przez *AASHTO* (*The American Association of State Highway and Transportation Officials*). Metoda ta operuje wielowarstwowym układem nawierzchni drogowej i jej podłoża. Wyznaczenie całkowitej grubości warstw i grubości poszczególnych warstw w zależno-

ści od powtarzalnych obciążeń pojazdami opiera się na nomogramowych rozwiązaniach równań empirycznych. W pierwszej dekadzie XXI wieku również w USA opracowano metodę NCHRP (*The National Cooperative Highway Research Program*), określaną jako mechanistyczno-doświadczalną, *M-E*. Metoda ta obejmuje ulepszenie warunków projektowania nawierzchni drogowych w zakresie redukcji kosztów utrzymania, wpływu charakterystyk systemu odwodnienia, sezonowych zmian atmosferycznych oraz środków zapobiegawczych stanom awaryjnym. Jest to metoda iteracyjna, polegająca na kolejnych porównaniach przybliżeń parametrów przyjętych do projektowania nawierzchni z parametrami opisów rzeczywistych warunków zewnętrznych pracy nawierzchni drogowej. Metoda ta z założenia jest przystosowana do uwzględnienia określonych zbrojeń geosyntetycznych w warstwach nawierzchni (rys. 2.1).

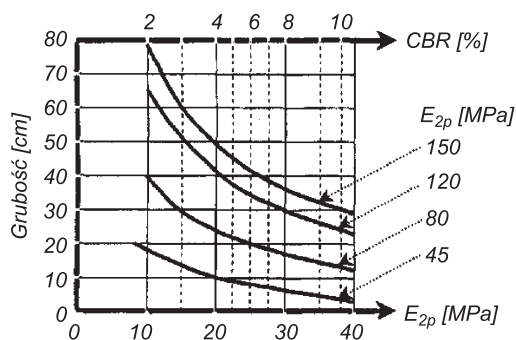


Rys. 2.1. Ogół czynników zewnętrznych uwzględnianych w projektowaniu nawierzchni dróg

Pewne analogie do budowy wielowarstwowych podłoży nawierzchni dróg szynowych i samochodowych można odnaleźć w analizach zawartych w pracy [22]. Praca ta wyjaśnia, że wzmocnienie słabego podłoża samochodowych nawierzchni ulepszonych i nieulepszonych jest wymagane, gdy moduł wtórny odkształcenia podłoża E_2 jest mniejszy od wartości wymaganej przez odpowiednie przepisy. Na przykład, według niemieckich wytycznych, minimalna wartość modułu E_2 na powierzchni podłoża wynosi 45 MN/m^2 . Podłoże można wzmocnić przez wymianę gruntu albo przez użycie zbrojenia geosyntetycznego. Zgodnie z wytycznymi zawartymi w pracy Instytutu Badawczego Dróg i Mostów [22] zastosowanie warstwy geosyntetycznej jako wzmocnienia podłoża jest zalecane, jeżeli jego moduł E_2 jest mniejszy od 30 MN/m^2 , a grubość warstwy potrzebnej

wymiany gruntu byłaby nadmierna (w przypadku wartości modułu większej niż 30 MN/m^2 użycie geosyntetyku jest mało efektywne). W takim wypadku, aby zachować projektowaną niweletę i grubości warstw konstrukcji nawierzchni, należy usunąć górną warstwę słabego gruntu i po wyrównaniu powierzchni ułożyć materiał geosyntetyczny. Zalecane jest użycie geosyntetyków o sztywności co najmniej zapewniającej przy rozciąganiu siłą 10 kN/m , wydłużenie $< 3\%$ (w każdym kierunku). Potrzebne wzmocnienie oraz grubość układanej na nim warstwy podbudowy pomocniczej z kruszywa są określane w projekcie nawierzchni, lecz powinna ona wynosić co najmniej 30 cm . Grubość warstw nawierzchni musi też spełniać wymagania związane z głębokością przemarzania.

Geosyntetyki do warstw rozdzielająco-wzmacniających dobiera się zwykle metodami uproszczonymi. Różne zalecenia zawierają liczne publikacje i poradniki producentów geosyntetyków. Dobór materiałów uwzględnia rozmaite kryteria: wytrzymałości (wskaźnik CBR) lub odkształcalności (moduł odkształcenia E_o lub wtórny moduł odkształcenia E_2) podłoża pod materiałem geosyntetycznym, rodzaju, uziarnienia i odkształcalności warstwy nasypu nad geosyntetykiem, a także warunki obciążenia użytkowego od pojazdów w czasie budowy, dopuszczalnej głębokości koleiny itp. Praca [22] wprowadza też nomogram (rys. 2.2) do wymiarowania potrzebnej grubości warstwy kruszywa układanej ponad geosyntetykiem w przypadku, gdy wytrzymałość powierzchni podłoża jest niewystarczająca ($E_{2p} < 45 \text{ MPa}$). Grubość kruszywa określana jest w zależności od wtórnego modułu odkształcalności E_{2p} na powierzchni gruntu pod geosyntetykiem lub wartości wskaźnika CBR oraz wtórnego modułu odkształcalności E_{2g} warstwy kruszywa ponad geosyntetykiem.

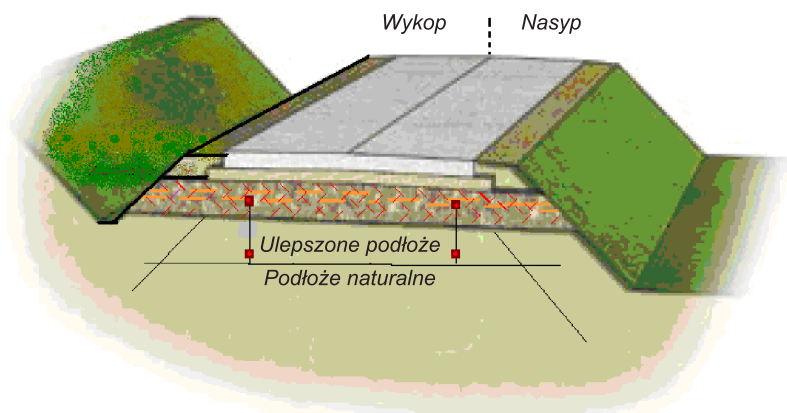


Rys. 2.2. Grubość warstwy kruszywa ponad geosyntetykiem – wg [22]

Koncepcją ogólną i celem prowadzonych prac badawczych w okresie ostatniej dekady jest opracowanie lepszego i stabilniejszego układu konstrukcyjnego nawierzchni dróg samochodowych bądź szynowych, głównie poprzez wzmocnienie i stabilizację podłoża gruntowego nawierzchni (rys. 2.3). Podejmowane są stara-

nia takiej ekspozycji właściwości warstw gruntowych, zbrojonych geosyntetykami, aby wskazać na możliwość wyboru i wariantowych sposobów wzmocnienia podłoża nawierzchni.

Stosowane ulepszenia i stabilizacja własności gruntów cementem nie zawsze jest jedynym i uzasadnionym ekonomicznie rozwiązaniem. Lokalne warunki budowy gruntowego podłoża nawierzchni mogą wskazywać na możliwość zastosowania ulepszeń złożonych z kilku metod i zwiększenia nośności podłoża nawierzchni. Mogą one dotyczyć często krótkich odcinków budowanych lub modernizowanych dróg tak samochodowych, jak i szynowych. Zasadniczą rolę w tym zakresie odgrywa rachunek kosztów materiałów budowlanych, który jest łatwiejszy do przeprowadzenia przez wykonawców inwestycji drogowych. Niemniej przedstawienie wariantowych rozwiązań technicznych w projektach budowy otwiera drogę do tego rodzaju rozwiązań.



Rys. 2.3. Planarne zbrojenie podłoża nawierzchni dróg samochodowych

Głównym dążeniem projektantów i wykonawców dróg jako budowli jest jednak zachowanie i zapewnienie stateczności oraz bezpieczeństwa konstrukcji podstawowej części drogi, jaką jest nawierzchnia, której elementami użytkowymi są jezdnie. Jest to również zgodne z kierunkiem regulacji normowych zawartych w *Eurokodzie 7*, przewidującym konieczność stworzenia w każdym z krajów członkowskich UE systemu norm, jako załączników *EC7*, przeznaczonych do projektowania konstrukcji zawierających geosyntetyki. System ten ma być oparty na metodzie stanów granicznych, będzie uściślał metody wymiarowania i wskazywał cząstkowe współczynniki bezpieczeństwa dla poszczególnych typów konstrukcji. Szczegółową analizę założeń do nowego systemu normalizacji zawierają prace [68, 77], które wskazują jednocześnie na właściwość istniejących wytycznych budowy oraz instrukcji, jako ważnego i bieżącego elementu regulacyjnego systemu krajowego. Stąd też wykorzystywanie i zestawianie obecnego poziomu

wiedzy o współpracy ośrodka gruntowego z wynikami kolejnych badań w tym zakresie jest całkowicie uzasadnione.

We wczesnych pracach Bonapartego i Girounda [7], podejmujących próby opisu zjawiska podwyższonej nośności warstw gruntowych wyposażonych we wkładki geosyntetyków, podawano, że jest to wynik oporu tarcia gruntu i geotekstyliów, według zależności:

$$T_h = 2 f \sigma_v l = 2 \operatorname{tg} \mu \sigma_v l \quad (2.1)$$

gdzie: T_h – pozioma siła oporu tarcia geotekstyliów [kN/m],
 $f = \operatorname{tg} \mu$ – współczynnik tarcia,
 μ – kąt tarcia pomiędzy gruntem a geotekstyliami,
 σ_v – naprężenie pionowe na poziomie wkładki geotekstylnej [kN/m²],
 l – długość obciążenia wkładki geotekstyliów [m].

W pracach krajowych instytutów badawczych [22, 77] znajdują się elementy analiz i sposobów, które mogą być bezpośrednio przydatne do analizy zagadnienia zbrojenia gruntów na powierzchniach warstw nośnych i w tzw. planarnym układzie zbrojenia. Podobnie jest w pracy Sawickiego [62], obejmującej szczegółowe analizy rozkładu sił w zbrojeniu geosyntetykami zboczy i skarp budowli ziemnych. Według [77] można ustalić, że współczynnik tarcia ma istotne znaczenie w przypadku zbrojenia gruntu oraz materiałów układanych na skarpach. Wartości tarcia między gruntem a materiałem można badać w specjalnych aparatach skrzynkowych (normy prEN ISO 12957-1:1997 oraz prEN ISO 12957-2:1997). W szczególnych przypadkach badane jest tarcie po innych rodzajach materiałów stosowanych w budowie. Współczynnik tarcia między gruntem „zasyпки” a materiałem geosyntetycznym jest zwykle w granicach:

- po geowłókninach i geotkaninach $f = (0,6 \text{ do } 0,7) \operatorname{tg} \varphi_z$,
- po geosiatkach i georusztach $f = (0,8 \text{ do } 1,0) \operatorname{tg} \varphi_z$,

gdzie φ_z – kąt tarcia wewnętrznego materiału zasyпки.

W gruntach spoistych można uwzględnić też wpływ przyczepności (adhezji). W przypadku braku danych doświadczalnych zaleca się przyjmować minimalną wartość współczynnika tarcia geosyntetyku po gruncie $f_{\min} = 0,5 \operatorname{tg} \varphi_z$, a po powierzchni innego geosyntetyku $f_{\min} = 0,2$.

W instrukcji ITB [77] ogólny schemat skarpy zbrojonej geosyntetykiem, przedstawiony na rysunku 2.4, jest analizowany według przypadku schematu na rysunku 2.5.

W przypadku analizowania schematów opisanych w pracy [77] oraz przedstawionych przez Sobolewskiego [68] za istotne należy uznać określenie granicznych relacji sił rozciągających (wyciągających) do wytrzymałości na zrywanie stosowanych geotekstyliów. Dostosowanie własności mechanicznych geosyntetyków do warunków stawianych elementom zbrojenia jest również bardzo ważne.

Wytrzymałość obliczeniowa zbrojenia na wyciąganie T_d ustala się na podstawie równania:

$$T_d = 2\sigma_{k, \text{sr}} L_B \frac{\mu_k}{\gamma_\varphi} \quad (2.2)$$

gdzie: T_d – wytrzymałość obliczeniowa zbrojenia na wyciąganie,

$\sigma_{k, \text{sr}}$ – średnia wartość naprężeń pionowych w poziomie zbrojenia w strefie zakotwienia,

L_B – długość kotwiąca wkładki,

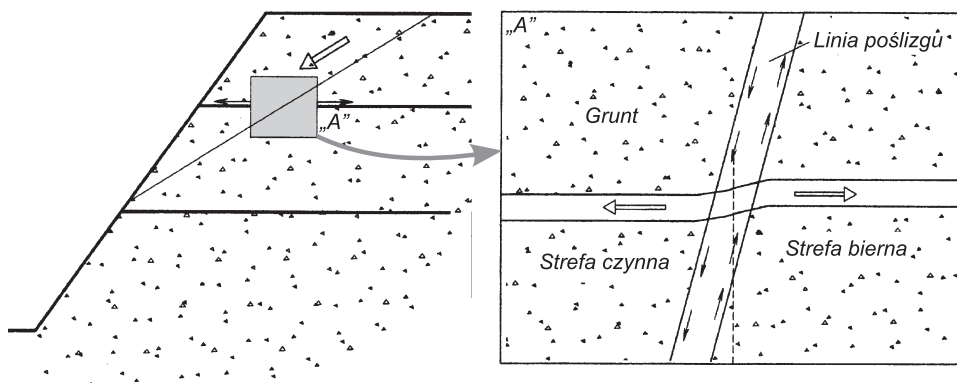
γ_φ – cząstkowy współczynnik bezpieczeństwa dla tarcia wewnętrznego gruntu,

μ_k – wartość charakterystyczna współczynnika tarcia grunt-zbrojenie, wyrażona wzorem:

$$\mu_k = a_\varphi \operatorname{tg}(\varphi_k)$$

przy czym: a_φ – wskaźnik zazębienia się gruntu ze zbrojeniem dla wyciągania,

φ_k – charakterystyczny kąt tarcia wewnętrznego gruntu.

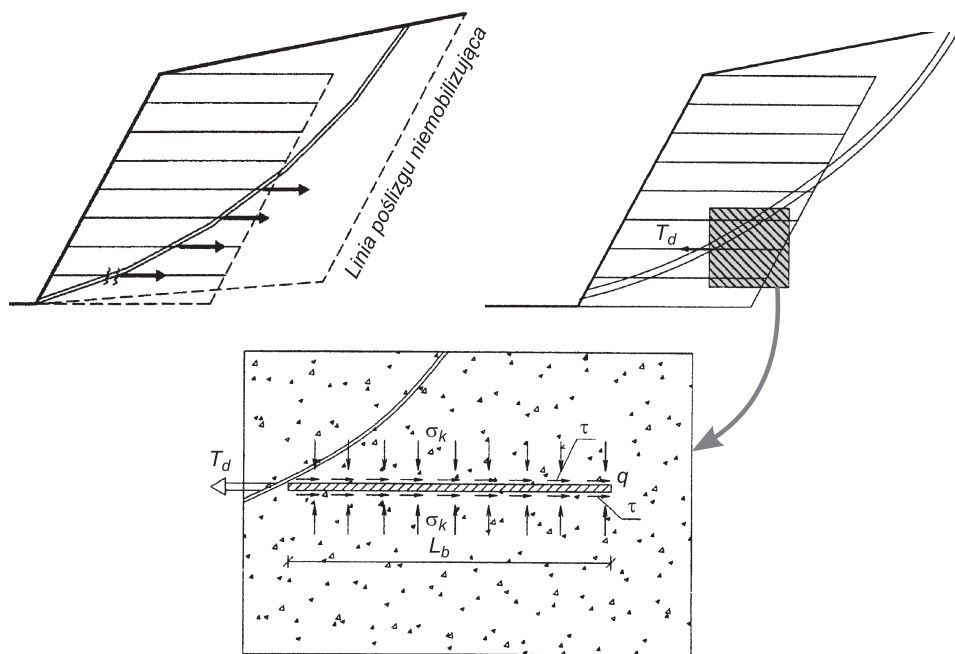


Rys. 2.4. Położenie zbrojenia w klinie odłamu skarpy – wg [77]

W analizach pracy [68] proponuje się zatem wprowadzenie dodatkowego współczynnika przybliżającego zakres zazębienia się gruntu ze zbrojeniem a_φ . Ten sposób uściślenia ma większe znaczenie dla określenia układu „grunt podłoża-geosiatka”. W przypadku geowłóknin używanych w podłożach nawierzchni dróg istotne znaczenie ma tarcie bezpośrednie bez oporów dodatkowych.

W podłożach nawierzchni dróg, gdzie wymagane są na ogół grunty piaszczyste, „opór zbrojenia na wyciąganie”, główne znaczenie ma jedynie tarcie i adhezja gruntu do powierzchni geowłókniny. W znaczeniu odmian i rodzajów geosyntetyków jako zbrojenia występują geotekstyli lub geosiatki oraz georuszty, które stanowią zupełnie odmienny rodzaj wzmocnień budowli ziemnych. Te dwa rodzaje geosyntetyków wbudowanych w warstwy gruntowe różnią się znacznie samym

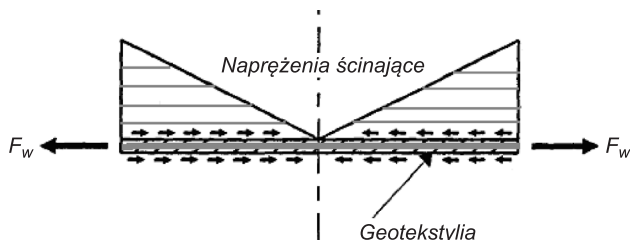
mechanizmem współpracy z gruntem, przy czym geosiatki uważa się za zbrojenie skuteczniejsze. Występują też różnice w cenach materiałów i kosztach technologii zbrojenia gruntów geotekstyliami i geosiatkami. Separacyjna funkcja geosiatek jest w pewnym stopniu ograniczona w porównaniu z geotekstylami. Jednocześnie funkcja zbrojenia wzmacniającego geosiatek jest zdecydowanie korzystniejsza. Podobnie jest też z właściwościami filtracyjnymi tych rodzajów materiałów, gdzie pełną skuteczność otrzymujemy tylko w przypadku specjalnych form filtrujących. Technologie zbrojenia gruntów z zastosowaniem geosiatek uważane są za znacznie kosztowniejsze od zastosowania geotekstyliów. Opór tarcia powierzchni geotekstyla-grunt, mobilizowany przez naprężenia ścinające będące skutkiem siły F_w inicjującej „wyciąganie”, w przypadku stosowania geosiatek jest niejako zastępowany przez opory ścinania warstwy gruntu między żebrami, ścinania na żebrach i oporu żeber geosiatki. Jak wskazują przeprowadzone doświadczenia, opór geosiatki przy wyciąganiu może być nawet trzykrotnie wyższy od oporu analogicznego układu warstw gruntowych przy zastosowaniu geotekstyliów. W oczywisty sposób zależy też od zawartości frakcji grubych (ziaren) w gruntach warstwy zbrojonej geosyntetykiem.



Rys. 2.5. Sytuowanie zbrojenia względem potencjalnej linii poślizgu w skarpie – wg [77]

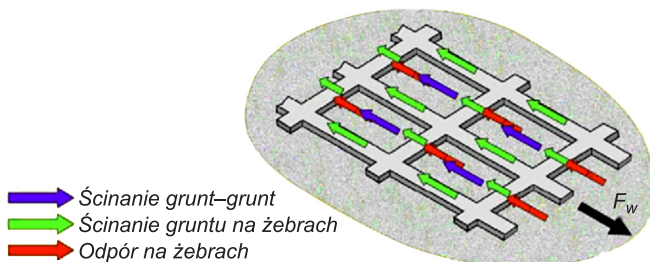
Zbrojenie warstw gruntów geosyntetykami wykonuje się najczęściej przy użyciu geotekstyliów (geowłóknin) lub odpowiednich geosiatek. Dodatkowym efektem w mechanizmie współpracy zbrojenia z gruntem jest tzw. efekt zako-

twienia. W przypadku geotekstyliów jest to efekt oporu tarcia początkowego (startowego), który jest większy w wyniku czynnej siły rozciągającej geotekstylię (rys. 2.6).



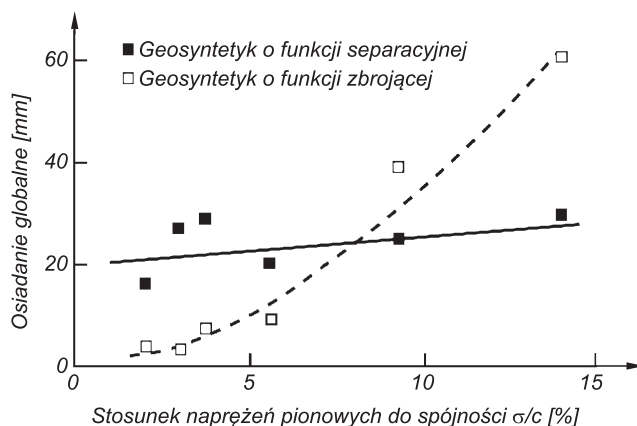
Rys. 2.6. Opór tarcia geowłóknina–grunt w przypadku dwustronnie czynnej siły wyciągającej F_w

W takim samym układzie sił efekt zakotwienia dla geosiatek jest większy. W miejsce tarcia działają siły oporu ścinania samego gruntu, siły oporu na powierzchniach czołowych oczek siatki i opór ścinania gruntu przez oczka (żebra) siatki (rys. 2.7). Siły oporu zakotwienia geosiatek w gruncie, w przypadkach ogólnych zastosowań, są wielokrotnie większe niż siły oporu zakotwienia geotekstyliów, zwłaszcza w warunkach znacznej spójności gruntu.



Rys. 2.7. Opór zakotwienia geosiatek w gruncie przy działaniu jednostronnej siły wyciągającej F_w

Dowodzą tego uogólnienia wyników pomiarów prowadzonych w połowie ubiegłego stulecia w Japonii (rys. 2.8). Znaczenie oporu zakotwienia w przypadkach zbrojenia warstw gruntowych podłoża nawierzchni jest znacznie mniejsze ze względu na fakt minimalnych poziomych przemieszczeń i sił poziomych działających na warstwę zbrojenia. Udział tych sił, związany głównie z tarciem, nie jest decydujący w zachowaniu stateczności wielowarstwowego układu różnych gruntów [66, 67]. Podstawowym miernikiem stateczności takiego układu jest jego kontrolowana odkształcalność, która nie zawsze musi być sprężysta. Niemniej przy zbrojeniach skarp budowli ziemnych geosyntetykami w niektórych przypadkach kształt potencjalnej płaszczyzny poślizgu oraz opór zakotwienia geosyntetyku mogą mieć decydujące znaczenie dla stabilności całego układu zbocza.

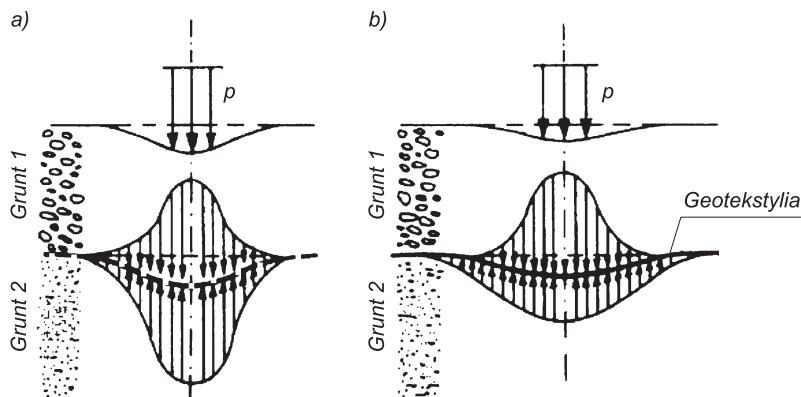


Rys. 2.8. Osiedlenie globalne gruntu uwarstwionego geosyntetykami – wg [66]

Niewątpliwa zaleta geosiatek stosowanych w zbrojeniach zboczy i skarp jest w pewnym sensie neutralizowana przez osłabienie funkcji separacyjnej geosiatek. Funkcja oddzielająca warstwy gruntów lub kruszyw o różnych własnościach ma istotniejsze znaczenie w przypadkach zbrojenia podłoża nawierzchni dróg lądowych. Poziome, czyli planarne ułożenie zbrojenia z pewnością zwiększa stateczność podłoża. Problematyczne jest jednak, w jakim stopniu to następuje. Poza tym technologie wytwarzania geosiatek są kosztowniejsze niż produkcja tkanych lub prasowanych geowłóknin. Stosowanie geosiatek i geowłóknin jest porównywalne ilościowo dla danego przypadku budowli, lecz różni się poziomem kosztów materiałowych. Wydaje się jednak, że podstawowym kryterium zastosowania tych odmian geosyntetyku jest uzyskanie oczekiwanego efektu wzmocnienia konstrukcji danej budowli ziemnej, rozumianej również jako budowa podłoża nawierzchni dróg szynowych bądź samochodowych.

2.2. MECHANIZMY INTERAKCJI ZBROJENIA I GRUNTU PODŁOŻA NAWIERZCHNI DRÓG SAMOCHODOWYCH

U podstaw wszelkich analiz opisujących mechanizm zbrojenia i wzmocniania warstw gruntowych jest ogólny opis (dokonany w Japonii w drugiej połowie XX wieku) zachowania się pod wpływem nacisku sił równomiernie rozłożonych dwóch różnych jakościowo warstw gruntów. W wyniku prostych doświadczeń stwierdzono, że jeśli układ dwóch warstw gruntów – z których górna jest sztywniejsza, czyli „mocniejsza” w pewnym zakresie obciążeń, a druga bardziej odkształcalna – przedzielony będzie matą z włókien palmowych, to globalne osiadanie względne powierzchni nacisku będzie znacznie mniejsze niż dla takiego samego układu bez przedzielenia obu warstw gruntu matą (rys. 2.9).

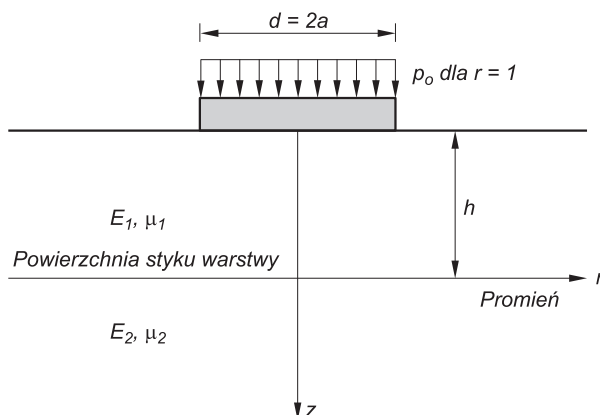


Rys. 2.9. Zarys poglądowy odkształcenia powierzchni styku dwóch warstw różnych gruntów: a) bez wzmocnienia, b) ze wzmocnieniem

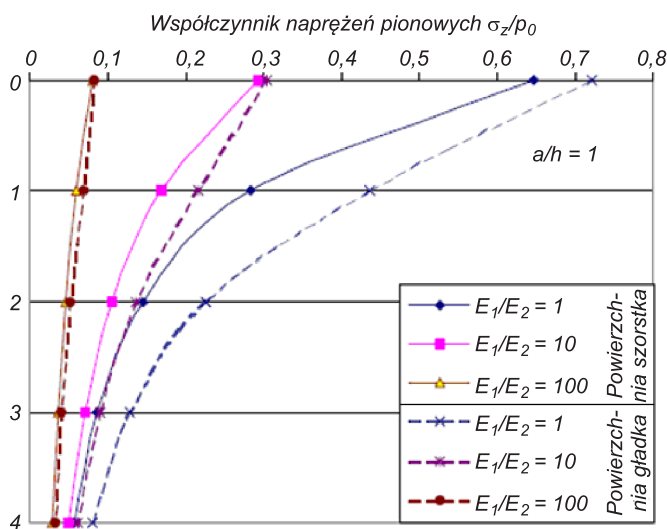
Problem ten jest też obecnie analizowany dla sposobu fundamentowania bezpośredniego obiektów budowlanych [21], a zatem dla kilkukrotnie większych nacisków statycznych fundamentów ławowych i stopowych obiektów kubaturowych lub mostowych. Polega on np. na próbach znalezienia opisu analitycznego posadowienia fundamentu ławowego oraz wyznaczenia wymaganej grubości mocniejszej warstwy podsypki kruszywa zalegającej na gruncie słabszej warstwy, np. na warstwie łu. Zewnętrzna różnica osiadań dla dwóch różnych układów warstw oznacza inny zakres dystrybucji sił wewnętrznych wywołanych naciskiem w poszczególnych warstwach, w tym i w warstwie geotekstylnej. Zbliżone zadanie do zadania posadowienia fundamentu ławowego na podłożu w postaci sprężystego układu dwuwarstwowego bez warstwy zbrojącej, według schematu z rysunku 2.10, zostało rozwiązane analitycznie i przedstawione w pracy [32]. Oczywiście jest, że dwuwarstwowy model półprzestrzeni sprężystej jest dużym uproszczeniem warunków rzeczywistych. Niemniej przykład ten został przytoczony ze względu na znaczną zbieżność kształtu i zakresu osiadań powierzchni obciążenia z wieloma innymi pomiarami modeli fizycznych.

Właściwości warstw gruntowych opisują parametry: moduły sprężystości E i współczynniki Poissona μ , a zadanie rozwiązano, w układzie płaskim jako wycinek obciążenia kołowo-symetrycznego. Założono też, że powierzchnia styku między warstwami jest szorstka i wywołuje tarcie lub jest gładka i nie wywołuje tarcia. Tego rodzaju model analityczny jest bardzo odległym przybliżeniem rzeczywistych warunków układu warstw gruntowych. Niemniej rozwiązania zawarte na wykresie (rys. 2.11) odpowiadają w przybliżeniu zakresowi odkształcenia według doświadczeń japońskich.

Rozwiązanie wskazuje, że dla różnych proporcji modułów sprężystości warstw E_1/E_2 , przy szorstkim styku powierzchni, następuje mniejszy zakres odkształceń mierzony stosunkiem d/h .



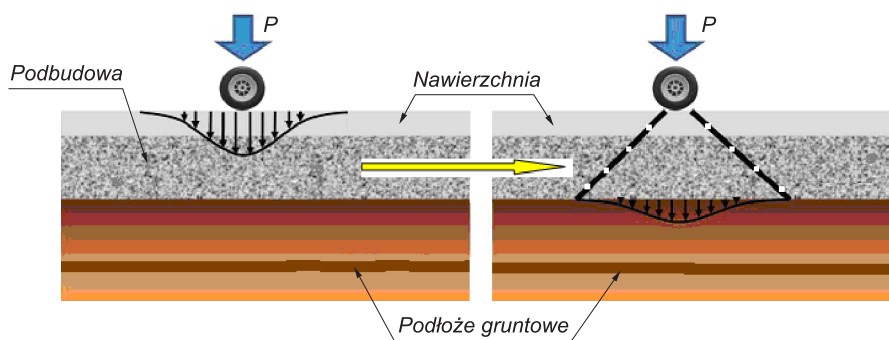
Rys. 2.10. Schemat płaskiego układu dwuwarstwowego – wg [32]



Rys. 2.11. Wykresy rozwiązań zadania – wg schematu [32]

Okoliczność ta pozwoliła na określenie ogólnych wymagań co do jakości geosyntetyków przeznaczonych do zbrojenia gruntów. Ogólne założenia zbrojenia układów uwarstwionych gruntów, wynikające ze schematu na rysunku, zostały przedłożone do analiz jakości zbrojenia warstw nawierzchni i podłoża nawierzchni dróg lądowych. W analizach opisujących mechanizm pracy zbrojenia warstw kruszyw i gruntów nawierzchni w ogólności, w tym i zbrojenia geosyntetycznego, wykorzystywane są najczęściej metody obliczania nawierzchni drogowych, które w znacznej części są aproksymacjami bezpośrednich wyników pomiarów i doświadczeń laboratoryjnych bądź poligonowych.

W analizach mechanicznych nawierzchni dróg szynowych zagadnienia podłoża gruntowego są oddzielane od obliczeń mechanicznych właściwości rusztu torowego i pryzmy podsypki tłuczniowej. We wszystkich przypadkach analiz wielowarstwowych układów nawierzchni komunikacyjnych podstawową formą obciążenia w schematach rozdziałów sił wewnętrznych w warstwach podłoży są obciążenia pionowe, pochodzące od poruszających się pojazdów. Kolejne etapy przybliżeń tych opisów sprowadzają się do analiz wpływu obciążeń cyklicznych i zmęczeniowych parametrów materiałów warstw. W obliczeniach podłoży nawierzchni z ewentualnym zbrojeniem, wpływy dynamiczne uderzeń i prędkości poruszających się pojazdów są na ogół drugoplanowe. Za ogólną charakterystykę mechanicznego układu warstw nawierzchni drogowych i gruntowego podłoża zbrojonego można też uznać kolejny poziomy rozkład naprężeń, pokazane na rysunku 2.12, według pracy Zornberga i Gupty [80].



Rys. 2.12. Ogólny rozkład odkształceń w warstwach nawierzchni – wg [80]

Z rysunku 2.12 nie wynikają zakresy ilościowe poszczególnych rodzajów sił, a jedynie proporcje podziału sił wewnętrznych dla przypadków podłoży zbrojonych geosyntetykami w znaczeniu ogólnym. Taki sposób przedstawienia pozwala na identyfikację wpływu zbrojenia geosyntetycznego w kolejnych fazach przejmowania obciążeń zewnętrznych. Geosyntetyk w postaci ogólnej, jako siatka lub geotekstylia w warstwach kruszyw i gruntów podłoży, redukuje zakres ścinania i wypierania warstw kruszyw położonych ponad zbrojeniem w przekroju nawierzchni (rys. 2.13) i mobilizuje opór tarcia w powierzchniach styku warstw.

Opór wypierania warstw oraz siły tarcia powstające na styku powierzchni geosyntetyku z gruntem będą zależęły od składowych poziomych reakcji w gruncie, opisywanych zależnością Rankina (2.3), podaną również w pracy [6]:

$$\sigma_z = \frac{\gamma z + q}{1 - \left[\frac{K_c (\gamma_k z + 3q)}{3(\gamma_k z + q)} \right] (z/L)^2} \quad (2.3)$$

gdzie: σ_z – naprężenie pionowe na głębokości z w warstwie zbrojonej wzdłuż osi obciążenia [kN/m^2],

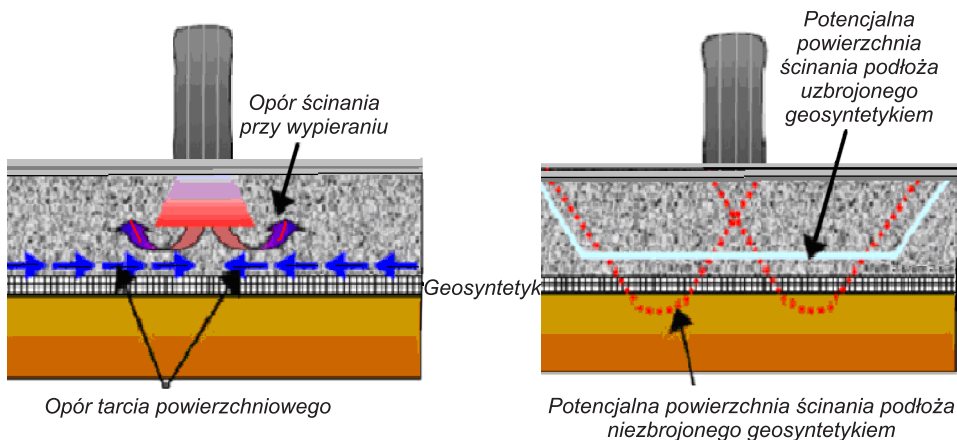
γ – ciężar właściwy gruntu zbrojonego [kN/m^3],

q – równomierne, pasmowe obciążenie powierzchni warstwy gruntu zbrojonego [kN/m^2],

K_c – współczynnik tarcia czynnego wypieranego z podłoża obciążenia,

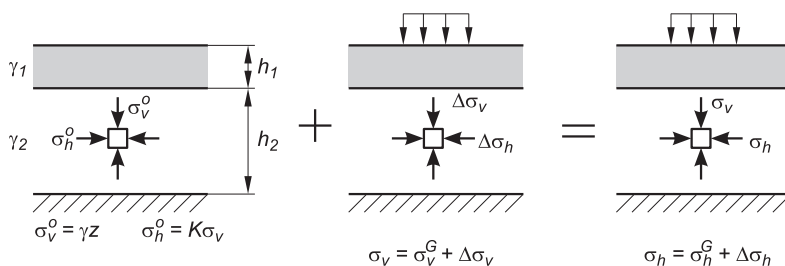
γ_k – ciężar właściwy wypieranej gruntowej warstwy zbrojonej [kN/m^3],

L – długość rozciąganego zbrojenia geosyntetycznego [m].



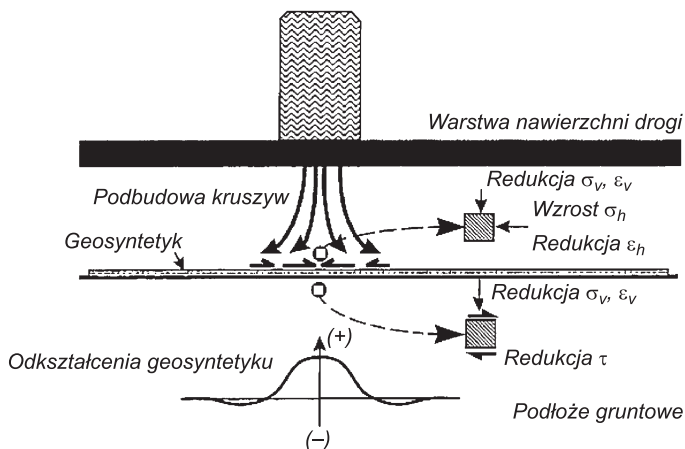
Rys. 2.13. Zakres sił tarcia i oporu wypierania w układzie nawierzchniowym drogi

Przekroczenie pionowych naprężeń dopuszczalnych skutkuje utratą stateczności gruntowej warstwy podłoża i całkowitym wparciem gruntu ponad graniczną powierzchnię górną. Ponieważ naprężenia pionowe zależą głównie od zakresu obciążenia powierzchni, przy stosunkowo małych grubościach słabszej warstwy, czyli z , to w rzeczywistości mamy do czynienia z pewnym potencjalnie czynnym rozparciem bocznym pod wpływem równomiernych obciążeń zewnętrznych. Opór ścinania przy wypieraniu, dla stosunkowo cienkich warstw podłoża nawierzchni, według prezentacji na rysunku 2.13, jest wyłącznie mobilizowany przez obciążenie przekazywane przez nawierzchnię, którego przyrosty mogą być superponowane (wg rys. 2.14) i jest ono na ogół cykliczne.



Rys. 2.14. Przyrosty naprężeń wywołanych obciążeniami nawierzchni drogi – wg [6]

W mechanizmie współpracy zbrojenia geosyntetycznego z gruntem warstwy podłoża nawierzchni istotną rolę odgrywa opór tarcia gruntu o geosyntetyk. Tarcie jest wywołane naprężeniami stycznymi τ do powierzchni ewentualnego ułożenia geosyntetyku (rys. 2.15).



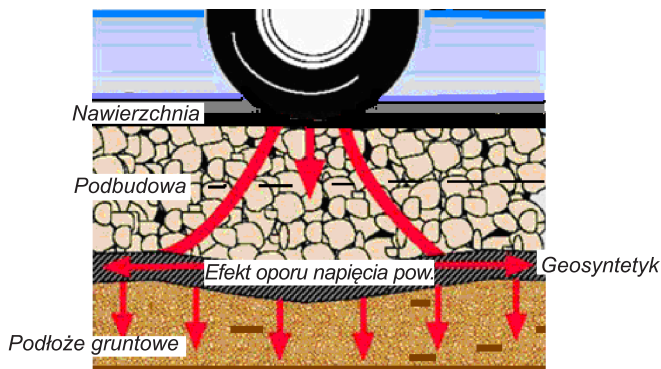
Rys. 2.15. Ogólny stan naprężeń i odkształceń w podłożu nawierzchni drogowej – wg [6] i [50]

Opór tarcia w mniejszym stopniu zależy od siły rozciągającej lub „wyciągającej” geosyntetyk, a w większym stopniu od stanu zawilgocenia powierzchni geosyntetyku i uziarnienia zbrojonej warstwy gruntu podłoża. Można przyjąć, że dla tej samej grubości warstw gruntowych i wyłącznie pionowych obciążeń zakres oporu tarcia jest znacznie mniejszy w podłożach nawierzchni niż w zbrojeniach skarp.

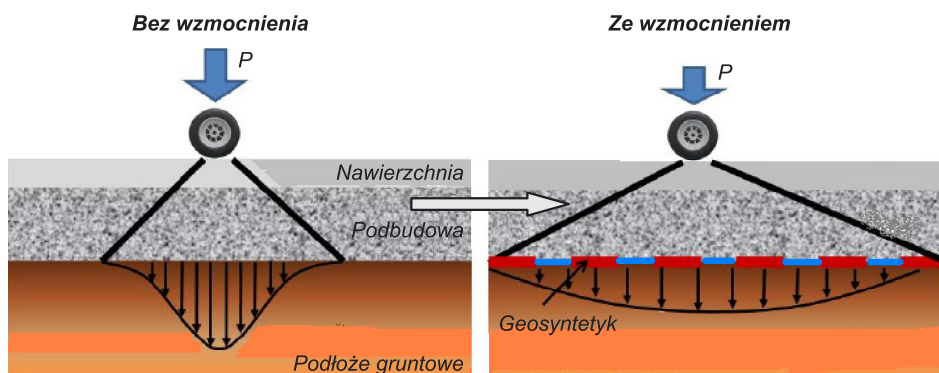
Tarcie geosyntetyku o grunt odgrywa zasadniczą rolę w stateczności stromych skarp budowli ziemnych o dużych wysokościach. Wpływ tego rodzaju sił tarcia zawiera wzór (2.3). Pełny zakres oddziaływania mechanicznego geosyntetyku zbrojącego warstwę gruntu zawiera się również w jakości i sprężystości struktury samego produktu geosyntetycznego. Największymi zaletami odznaczają się geotekstyli, jako geowłókniny tkane warstwowo. Pewien niewielki zakres sił wewnętrznego wzmocnienia warstwy podłoża podlega redystrybucji w postaci napięcia powierzchniowego. W pracach [32], [50] i [80] określany jest jako „efekt membranowy”. Jest to składowa poziomych sił reakcji płaszczyzny zbrojenia geosyntetycznego wzmacniająca siły oporu tarcia. Efekt tego mechanizmu wzmocnienia jest bardziej widoczny w podłożach nawierzchni dróg nieutwardzonych. Funkcja zbrojenia geosyntetycznego i zakres wzmocnienia poprzez „efekt membranowy”, przy większych deformacjach warstwy nawierzchniowej z kruszywa, staje się wyraźniejsza (rys. 2.16).

Sumując wzmacniające działanie zbrojenia geosyntetycznego w podłożu nawierzchni, można określić, że w grunтовой warstwie podłoża nawierzchni po-

łożonej ponad warstwę zbrojenia geosyntetycznego następuje redukcja naprężeń poziomych i stycznych do płaszczyzny zbrojenia, a tym samym ograniczenie odkształceń poziomych warstwy podłoża nawierzchni. Jednocześnie w warstwie geosyntetyku następuje wzrost naprężeń podłużnych, które rekompensują zmniejszoną odkształcalność warstwy podłoża nawierzchni. W rzeczywistych warunkach technicznych wpływ poszczególnych elementów mechanizmu na rozkład sił wewnętrznych w podłożu nawierzchni staje się wyraźniejszy wobec obciążeń użytkowych drogi (rys. 2.17) i może być traktowany jako sumaryczny.

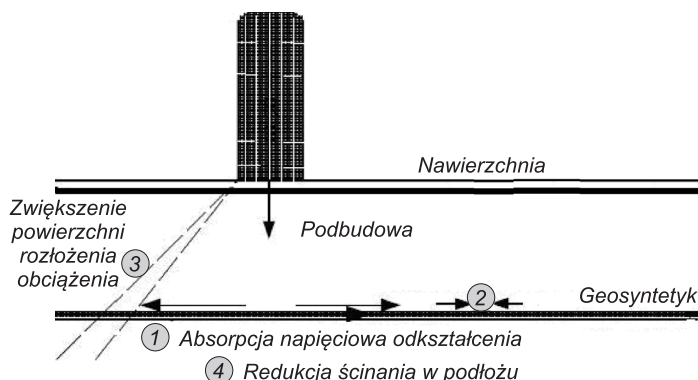


Rys. 2.16. Mechanizm efektu membrany – wg [80]



Rys. 2.17. Rozkład naprężeń na płaszczyźnie podłoża gruntowego nawierzchni

Następuje wówczas pewien rodzaj interferencji poszczególnych czynników wpływających na sumaryczny efekt wzmocnienia całego układu konstrukcyjnego nawierzchni drogowej. W zakresie technicznym konstrukcji nawierzchni dróg i podłoża nawierzchni dróg samochodowych określone wyżej mechanizmy współpracy zbrojenia geosyntetycznego z warstwą podłoża nawierzchni obciążenia wywołują efekty oddziaływania określone schematycznie na rysunku 2.18.



Rys. 2.18. Specyfikacja efektów oddziaływania w zbrojonym podłożu nawierzchni dróg samochodowych

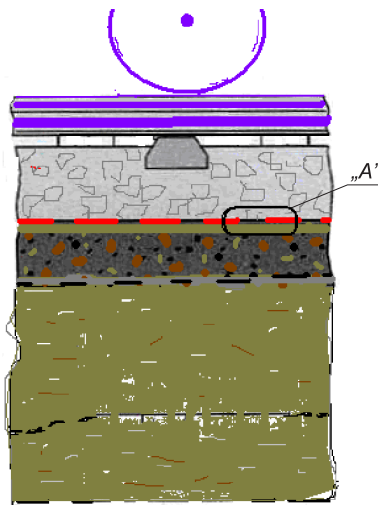
Stan ten jest konsekwencją określonej dystrybucji sił wewnętrznych w podłożu nawierzchni dróg samochodowych i szynowych, również jako fizyczne następstwo zbrojenia podłoża geosyntetykami. Należy również zauważyć, że wymieniane w poszczególnych źródłach efekty wzmocnienia, wynikające ze zbrojenia geosyntetycznego są w znacznej mierze hipotetycznymi. Wyizolowany pomiar poszczególnych wpływów jest praktycznie bardzo trudny.

2.3. SPECYFIKA ZBROJENIA PODŁOŻY PODKLADÓW DRÓG SZYNOWYCH

Zasadnicze różnice w układzie konstrukcyjnym nawierzchni dróg samochodowych i nawierzchni dróg szynowych nie wpływają radykalnie na mechanikę pracy gruntowego podłoża tych nawierzchni. W obu przypadkach nawierzchnie te są układami wielowarstwowymi o zróżnicowanych, zwłaszcza w strefach jezdnych, własnościach materiałowych tych warstw. Prawie dwukrotnie większe obciążenia osiowe nawierzchni dróg szynowych są w znacznym stopniu redukowane i wyrównywane przez sam ruszt torowy. W układach nawierzchni, a zwłaszcza gruntowych podłoży dróg szynowych, mamy do czynienia z nieco innymi mechanizmami tzw. współpracy geosyntetycznego zbrojenia z materiałem warstw, w których jest umieszczone.

Pośród wielu opracowań wskazujących na różne układy i sposoby stosowania geosyntetyków w przekrojach dróg szynowych należy zwrócić uwagę na prace Ajdukiewicza i Kłóska [1, 34, 35]. Przedstawiono tam układy z wykorzystaniem geosyntetyków w integracji z wszystkimi elementami podłoża podkładów i w różnych systemach konstrukcji nawierzchni. Obecnie najczęściej zalecanym rozwiązaniem technicznym do stosowania w drogach szynowych jest układ w przekroju

pokazanym na rysunku 2.19. Układ ten uważany jest za korzystniejszy konstrukcyjnie także ze względu na koszty materiałowe i technologie budowy. Stosowany jest głównie w ramach standardów modernizowanych lub budowanych linii dróg szynowych dużych prędkości.



Rys. 2.19. Położenie geosyntetyku w podłożu drogi szynowej podsypki dwuwarstwowej

Ze względu na wskazania instrukcji technicznych utrzymania podtorza kolejowego, w tym Id-3 [76], zakładających również zastosowania geosyntetyków w przekrojach dróg szynowych, pod uwagę brane są równoczesne zastosowania podstawowych form geotekstyliów, to znaczy geowłóknin i geosiatek, jako konstrukcyjnie efektywne zbrojenia układu podłoża rusztu torowego (rys. 2.20).

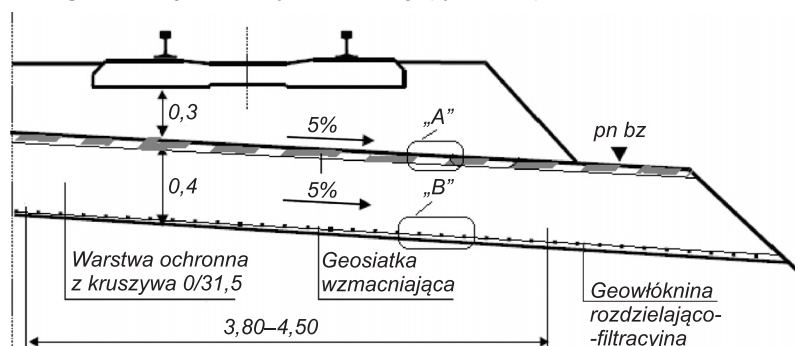


Rys. 2.20. Rodzaje geosyntetyków stosowanych w drogach szynowych: geosiatka, geomata, geowłóknina

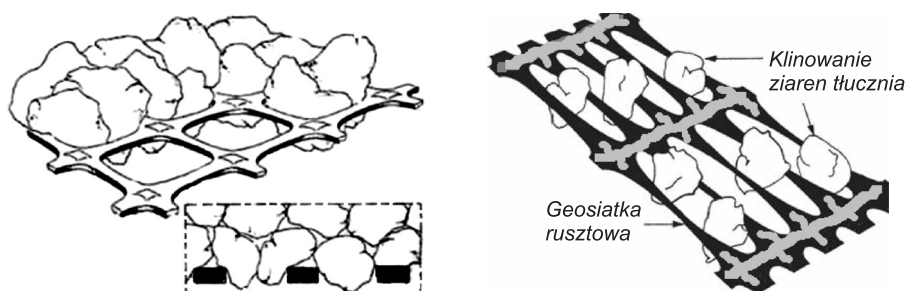
Współczesne rozwiązania konstrukcyjne przekroju drogi szynowej, nowo budowanej lub modernizowanej, powinny obejmować co najmniej dwa poziomy ułożenia geosyntetyków, na przykład według rysunku 2.21.

W tym układzie uwagę zwraca szczególne znaczenie oporu zakotwienia zbrojących geosiatek z pryzmą podsypki tłuczniowej. Ziarna tłucznia zaklinowa-

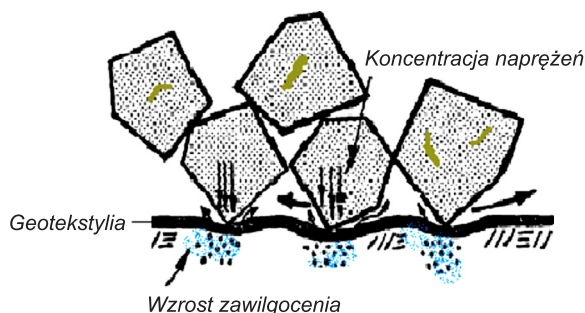
ne w oczkach siatek tworzą strukturę, która powoduje zwiększenie tarcia o powierzchnię gruntowej warstwy ochronnej (rys. 2.22).



Rys. 2.21. Warianty możliwych ułożeń geosyntetyków jako geotekstyliów „B” i geosiatek „A”



Rys. 2.22. Mechanizm klinowania się tłucznia w różnych geosiatek poziomu „A”

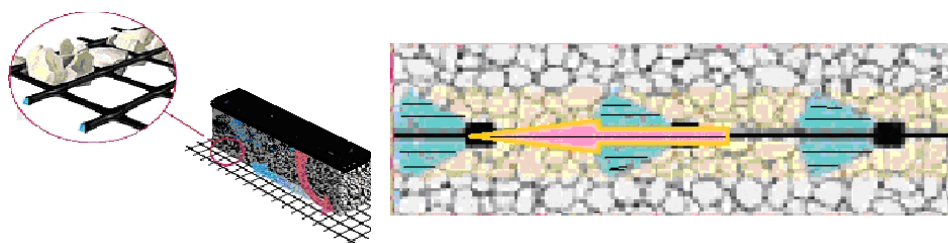


Rys. 2.23. Niekorzystny efekt przy usytuowaniu geosyntetyków w położeniu „A”

Stan ten jest dodatkowo stabilizowany i wzmacniany przez vibracje tak eksploatacyjne, jak i technologii zagęszczenia podsypki. Zastosowanie w tym samym miejscu geotekstyliów (geowłókniny) powoduje najczęściej jej uszkodzenie, a tym samym utratę wymaganych własności mechanicznych i filtracyjnych. Przebiccia geotekstyliów przez ziarna tłucznia następują zwłaszcza w warunkach

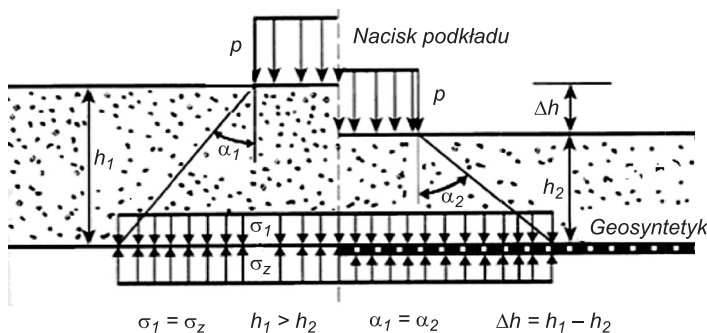
znacznego zawilgocenia górnych warstw torowiska (rys. 2.23). Zjawisko to praktycznie pozbawia sensu stosowanie geotekstyliów bezpośrednio na styku z podsypką tłuczniową, bowiem redukuje całkowicie ich funkcje wzmacniające wobec braku jednorodnej (z obu stron) warstwy gruntu. Stosowanie warstw geowłókniny jako warstwy separującej pryzmę podsypki od podłoża torowiska staje się zatem mało efektywne.

W przypadkach stosowania wielowarstwowej pryzmy podsypki z kruszyw zbrojenie międzywarstwowe geosiatki wywołuje dodatkowy efekt zakotwienia, który objawia się w pewnej strefie grubości pryzmy (rys. 2.24).



Rys. 2.24. Strefa pola zakotwienia geosiatki w podsypce tłuczniowej

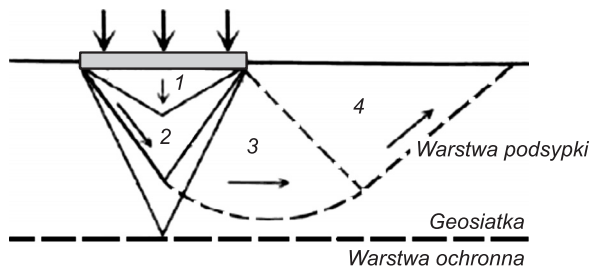
W zakresie innych efektów mechanizmu współpracy zbrojenia z warstwami nawierzchni podłoża dróg szynowych można czynić założenia, że występują one w analogiczny sposób jak w podłożach dróg samochodowych. Założenia techniczne, z których wynika możliwość zmniejszenia grubości pryzmy podsypki w przekroju drogi szynowej, są interpretowane w ten sposób, że konieczność zachowania stałej i wymaganej normami grubości pryzmy podsypki i zastosowanie zbrojenia podłoża nawierzchni prowadzi do stałego i istotnego wzmocnienia układu podłoża podkładów (rys. 2.25).



Rys. 2.25. Założenia zmiany rozkładu sił w podłożu podkładu z zastosowaniem geosyntetyków

Zatem analogia wzmocnienia zbrojeniem geosyntetycznym podłoża dróg samochodowych traktowana jest jako niezbędnie wykorzystana rezerwa konstrukcyjna w podłożach dróg szynowych. Zakładając czteroobszarowy stan prze-

mieszczanej warstwy podsypki zbrojonej w strefie styku z warstwą ochronną, obciążonej naciskiem podkładu (wg rys. 2.26), można przyjąć, że w przypadku maksymalnych obciążeń podkładu występują jedynie stany oznaczone na rysunku jako obszar 1 i obszar 2.



Rys. 2.26. Schemat granicznego obciążenia podkładu

Przez zachowanie stałej i wymaganej normami technicznymi grubości podsypki, przy jednoczesnym stosowaniu pod warstwą podsypki geosiatek, uzyskujemy większą stateczność podłoża podkładów ze strefą kotwienia geosiatki. Zmiany w zakresie rozkładu sił rozporu bocznego warstw kruszyw modelujących pryzmy kruszywa podsypki z zastosowaniem wkładek geosyntetyków, podane w pracy [71], są mniejsze. Można zatem przypuszczać, że efekt zakotwienia geosiatek w kruszywach, w przypadku dróg szynowych ze zbrojonym podłożem rusztu torowego, ma istotne znaczenie.

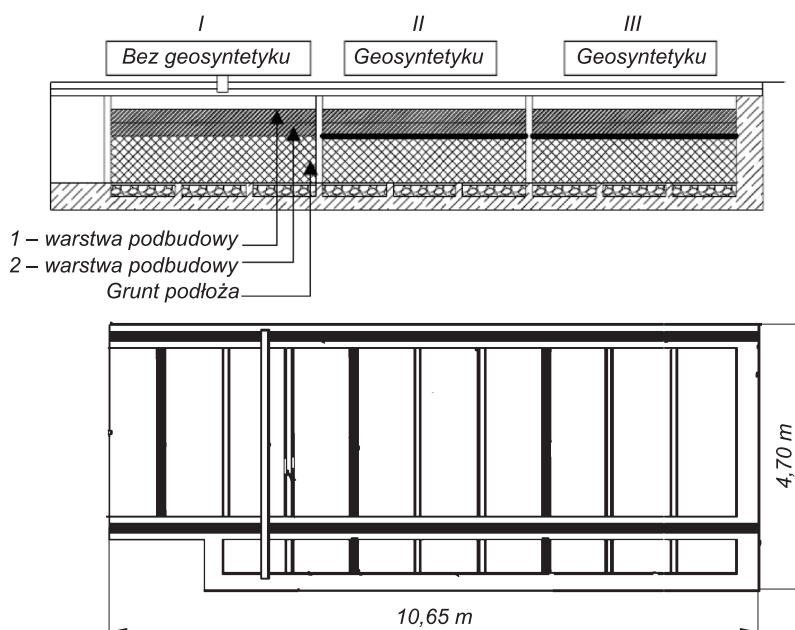
3. MODELOWANIE PODŁOŻY GRUNTOWYCH ZBROJONYCH GEOSYNTETYKAMI

Opracowanie zasad stosowania zbrojenia geosyntetykami podłoży gruntowych nawierzchni dróg lądowych tak samochodowych, jak i szynowych, wymaga także (i przede wszystkim) realizacji wielu testów i badań w skalach laboratoryjnych. Odpowiednie analizy uzyskiwanych w ten sposób wyników pomiarów różnych wariantów modeli podłoża gruntowego, różnych sposobów ich umiejscowienia oraz ustalenia parametrycznych kryteriów oceny skuteczności konstrukcyjnej zbrojeń stanowią istotny materiał porównawczy i programowy do dalszych poszukiwań. Zakres ocen jakościowych poszczególnych rozwiązań zależy również od wymiarów i skali kameralnych stanowisk modeli pomiaru bezpośredniego.

Największą skuteczność w ocenie poszczególnych rozwiązań mają doświadczalne odcinki poszczególnych rodzajów dróg z wielowariantowymi sposobami zbrojeń podłoży nawierzchni. Budowa odcinków doświadczalnych dróg jest

jednak bardzo kosztowna, a obserwacje i pomiary w tym zakresie powinny być rozłożone na wiele lat. Doświadczenia prowadzone w halach ośrodków badawczych znacznie redukują te koszty. W analizach eksperymentalnych, dotyczących gruntów podłoży wzmocnionych i zbrojonych geosyntetykami, należy zwrócić szczególną uwagę na badania przeprowadzone w Geotechnicznym Laboratorium Testów Polowych (*GLTF*) czeskiego instytutu badawczego (*CDV*) opisane w pracach Pospisila i Zdenki, np. [51]. W ogólnej koncepcji i założeniach są one zbliżone do badań przeprowadzonych w wiedeńskim ośrodku badawczym w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia, opisanych w pracy autora [23].

Skala stanowiska pomiarowego i zakres programu badawczego w istotnym stopniu legitymuje wyniki tych badań do różnych ocen i wniosków, nie tylko w zakresie opisu efektu zbrojenia podłoży nawierzchni dróg lądowych. Wyniki tych badań są również cytowane i związane z badaniami [21] poszukującymi właściwej jakości i grubości warstw gruntów słabych pod różnego typu fundamentami obiektów budowlanych. Są to zarówno fundamenty obiektów mostowych, jak i stopy słupów hal przemysłowych, gdzie zachodzi konieczność wzmocnienia słabych i ściśliwych warstw podłoża gruntowego. Wymiary stanowiska oraz możliwość stosowania różnorodnych kategorii obciążeń zewnętrznych przybliżały warunki pracy różnych rodzajów fundamentów obiektów mostowych. Pospisil i Zdenka [51] prowadzili wieloletnie badania na specjalnie skonstruowanym stanowisku pomiarowym w hali instytutu badawczego (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Pojemnik wymiennego wypełnienia warstwami gruntowymi w Czechach – wg [51]

Betonowy, zagłębiony pojemnik o wymiarach ok. $10 \times 4 \times 2$ m był przystosowany do pomiarów i zachowań różnych struktur wypełnień podłoża gruntowych. Konstrukcja betonowego pojemnika i ogólny zakres badań zawierały pewne analogie do badań prowadzonych w latach osiemdziesiątych w Wien-Arsenal, opisywanych w pracy [23]. Pojemnik miał trzy sekcje po ok. 3 m, oddzielone od siebie pionowymi ściankami. W przypadku badań nad różnymi rodzajami geosyntetyków można było testować dwa ich rodzaje jednocześnie w poszczególnych sekcjach, przy zmierzanych rodzajach i stanach warstw. Przebadano sześć różnych rodzajów geosyntetyków zarówno geosiatek, jak i geotekstyliów, w postaci geowłóknin. Pierwsze dwie serie badań i testów przeprowadzono dla podłoża gruntowego o module wtórnego odkształcenia gruntu $E_{v2} = 5$ MPa, zaś pozostałe trzy serie – dla podłoża gruntowego o module wtórnego odkształcenia gruntu podłoża $E_{v2} = 15$ MPa. Wykonywano dwie warstwy pokrywające różne rodzaje geosyntetyków o łącznej grubości do 30 i 40 cm i modułach odkształcenia wtórnego odpowiadających modułom gruntowego podłoża. Różne wartości modułów odkształcenia wtórnego w warstwach osiągnięto między innymi poprzez zmiany wilgotności gruntu.

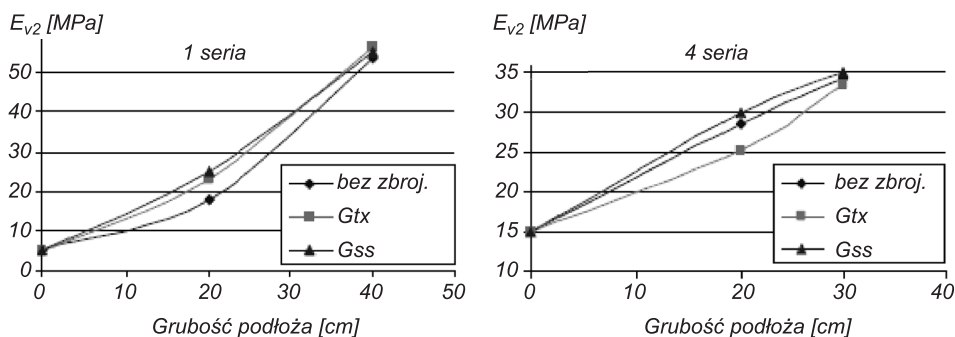
Tabela 3.1. – wg [51]

Seria	Moduł odkształcenia podłoża E_{v2} [MPa]	Przedział pomiarowy według rysunku	Symbol testowanego geosyntetyku	Podbudowa			
				1 warstwa		1 + 2 warstwa	
				gr. [cm]	E_{v2} [MPa]	gr. [cm]	E_{v2} [MPa]
1	5	I	Bez zbrojenia geosynt.	20	17,90	40	53,66
		II	Gtx		23,20		56,51
		III	Gss		24,90		55,41
2	5	I	Gss1	15	11,30	30	22,06
		II	Gtx1		9,94		17,43
		III	Bez zbrojenia geosynt.		10,11		18,18
3	15	I	Gss2	20	27,18	30	34,82
		II	Gss3		29,79		37,06
		III	Bez zbrojenia geosynt.		28,43		38,53
4	15	I	Gtx	20	25,17	30	33,28
		II	Gss		29,79		34,86
		III	Bez zbrojenia geosynt.		28,43		34,20
5	15	I	Gss	20	25,94	30	35,19
		II	Gss1		27,87		35,54
		III	Bez zbrojenia geosynt.		29,26		37,74

Oznaczono: Gtx, Gtx1 – rodzaje geotekstyliów; Gss, Gss1, Gss2, Gss3 – rodzaje geosiatek.

Wykonano pięć serii ciągłego pomiaru modułu wtórnego odkształcenia dla różnych struktur wypełnienia warstwami gruntu z różnymi typami geosyntetyków. Struktury wypełnień poszczególnych przedziałów i uzyskiwane wyniki modułów odkształcenia odpowiadają opisom zawartym w tabeli 3.1. W tabeli pominięto testy technicznego skalowania modelowych struktur wypełnień i prób aparatury rejestrującej.

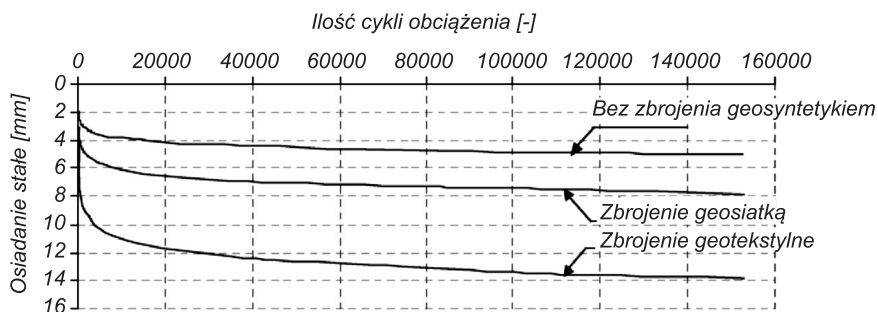
Uzyskiwane wyniki odkształcalności poszczególnych układów w seriach odniesiono i porównano z wynikami odkształcalności dla wypełnień bez zbrojeń geosyntetycznych, zakładając w ten sposób metodologię porównawczą oceny wyników pomiarów bezpośrednich. Wykresy zmian modułów odkształcenia dla przykładowych serii pomiarowych podano na rysunku 3.2. Można zauważyć, że radykalne zmiany rzędu wartości modułu odkształcenia nie są powodowane głównie rodzajami stosowanych geosyntetyków. Zbliżona odkształcalność podłoża jest podobna zarówno dla użytych geosiatek, jak i dla geotekstyliów w odmianach geowłóknin. Większy wpływ na odkształcalność podłoża wywiera grubość gruntowych warstw podłoża oraz sposób ułożenia warstw geosyntetyków między sobą. Uwagi te są istotne, wynikają bowiem z testów prowadzonych w pojemnikach o znacznych gabarytach, zbliżonych do rzeczywistych wymiarów i proporcji gruntowych podłoża pewnych fragmentów dróg. Niemniej zostały przeprowadzone w warunkach izolacji od wpływu czynników zewnętrznych.



Rys. 3.2. Odkształcalność w zależności od grubości warstwy gruntowej podłoża – wg [51]

W dyskusji na temat wyników uzyskanych w badaniach [51] podkreślono, że znaczące efekty wzmocnienia geosyntetykiem (1 i 2 seria) uzyskuje się na słabym i bardzo słabym podłożu o niewielkich zakresach modułów odkształcenia (5 i 15 MPa). W pozostałych seriach, gdzie podłoże było mocniejsze, czyli mniej odkształcalne, efekt wzmocnień był mniej wyraźny. Są to ważne wnioski, które wzięto pod uwagę przy formułowaniu założeń do własnych badań prezentowanych dalej. Ponadto, jak wskazują wykresy na rysunku 3.2, skuteczność wzmacniania przez poszczególne typy geotekstyliów różniących się w sposób istotny gramaturą [g/m^2] jest niewielka. Pomimo że moduł wtórnego odkształcenia jest podstawowo-

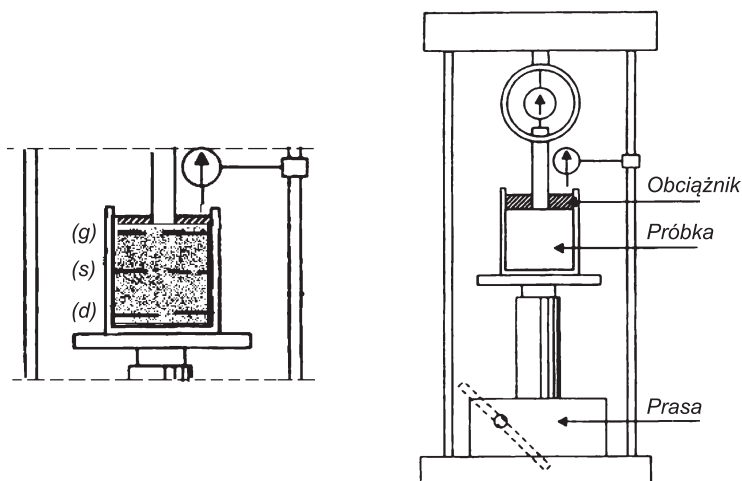
wym parametrem nośności podłoża przy budowie i modernizacji komunikacyjnych budowli ziemnych w wielu krajach europejskich, to uzyskane wyniki pomiarów uznano za niewystarczające do odpowiedzi na postawione pytanie o skuteczności wzmocnień warstw gruntowych różnymi geosyntetykami. W dalszej kolejności wykonano pomiary modułu odkształceń pod obciążeniem cyklicznym, określając również stałe osiadanie analogicznych struktur wypełnień, jak w seriach testu statycznego (rys. 3.3). Z wykresów tych wypływa dość oczywisty wniosek, że najbardziej podatne na stałe osiadania są struktury gruntowe uwarstwione geotekstylia-
mi, w mniejszym zaś stopniu – uwarstwione geosiatkami.



Rys. 3.3. Osiadanie podłoża przy obciążeniu cyklicznym – wg [51]

Do wniosków ogólnych z przeprowadzonych badań należy zaliczyć stwierdzenia, że występuje ewidentny wpływ wzmocnienia podłoża gruntowego poprzez zbrojenie geosyntetykami, niezależnie od ich rodzaju (geotekstylia czy geosiatki), lecz tylko w ograniczonych grubościach warstwy. W danym przypadku wpływ ten jest szczególnie widoczny do głębokości 20 cm warstwy podłoża gruntowego, a w dużo mniejszym stopniu do głębokości 40 cm. W pracy [45] przedstawiono program testów, określający oznaczenie wskaźnika nośności gruntów *CBR* próbek o standardowych wymiarach przewidzianych w normie [54]. Wprawdzie skala modelu podłoża nie jest duża, niemniej w badaniach tych operowano głównie odpowiednim parametrem oceny jakości zbrojenia. Jest to powszechnie oznaczany wskaźnik nośności gruntów stosowanych w drogownictwie, uzyskiwany na próbkach w teście laboratoryjnym (rys. 3.4). Norma [54] definiuje wskaźnik nośności *CBR* jako procentowy stosunek nacisku, jaki jest potrzebny do wciśnięcia walcowego trzpienia w badaną próbkę na określonej głębokości do nacisku potrzebnego do wciśnięcia trzpienia na taką samą głębokość w próbkę standardową.

W cytowanej pracy [45] stosowano modyfikacje polegające na różnych wariantach ułożenia trzech warstw geotekstyliów (geowłóknin) parami na różnych poziomach wysokości próbki, oznaczając je jako [g] – górna, bezpośrednio przy trzpieniu aparatu *CBR*, [s] – usytuowana w środku wysokości próbki i [d] – dolna, czyli przy dnie pojemnika próbki.

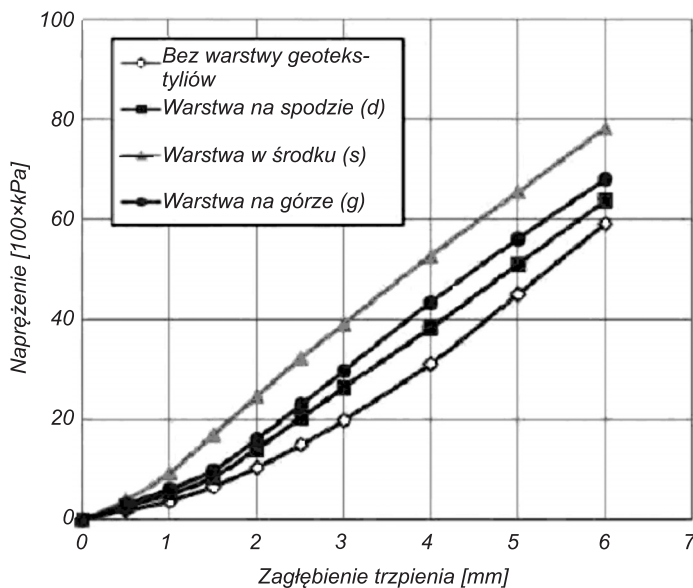


Rys. 3.4. Schemat usytuowania warstw geotekstyliów w próbce i stanowisko z aparatem CBR – wg [45]

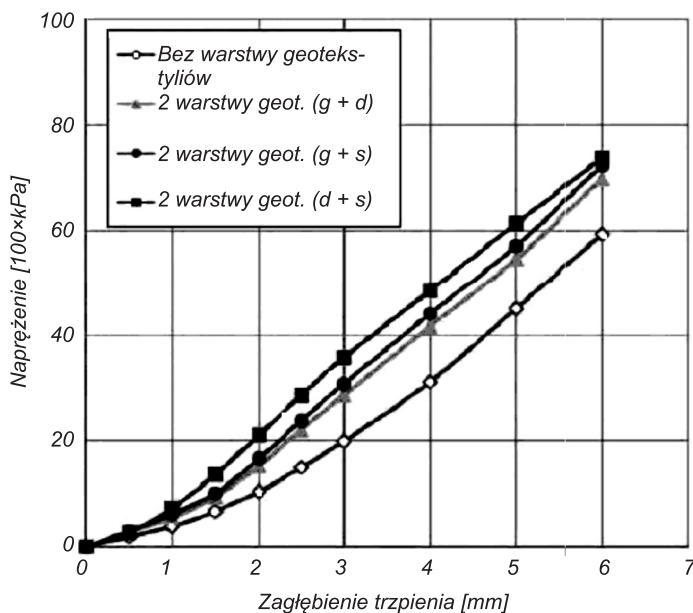
Stosując jeden rodzaj próbki gruntu wypełniającego dla różnych wariantów wypełnień, dokonywano rejestracji zagłębienia powierzchni trzpienia i odpowiadającego im naprężenia. Wszystkie pomiary zagłębień trzpienia odnoszono do próbek samego gruntu, bez żadnych wkładek zbrojenia. W ten sposób można było ustalić efekt usytuowania geotekstyliów w warstwie gruntu o grubości odpowiadającej wysokości pojemnika próbki.

Sposoby położenia elementów zbrojenia są szczególnie ważne dla warstw gruntów stanowiących ulepszone podłoże nawierzchni, bowiem rzutują na samą technologię wykonania i kolejność prowadzenia robót. Z wykresu przedstawionego na rysunku 3.5 jednoznacznie wynika, że tam, gdzie zastosowano pojedyncze zbrojenie (przekładki) geotekstylne, największa odporność gruntu na wciskanie trzpienia aparatu występuje wtedy, gdy zbrojenie geotekstylne znajduje się w połowie wysokości próbki. Odpowiada to położeniu zbrojenia geotekstynego w środku grubości zbrojonej warstwy ulepszanego podłoża w układzie rzeczywistym. Najmniejsze siły nacisku trzpienia aparatu CBR, wywołujące ten sam zakres zagłębienia ze zbrojeniem geotekstynym, powstają wówczas, gdy warstwa ta znajduje się w dolnej strefie wysokości próbki.

Najmniej skuteczne zbrojenie jest wówczas, gdy zbrojenie geotekstylne znajduje się w strefie dna pojemnika. W przypadku ułożenia dwóch warstw geotekstyliów jednocześnie w różnych poziomach próbki, najskuteczniejsze okazały się warstwy dolne i środkowe, a najmniej skuteczne okazało się również ułożenie warstw górnej i dolnej (rys. 3.6).



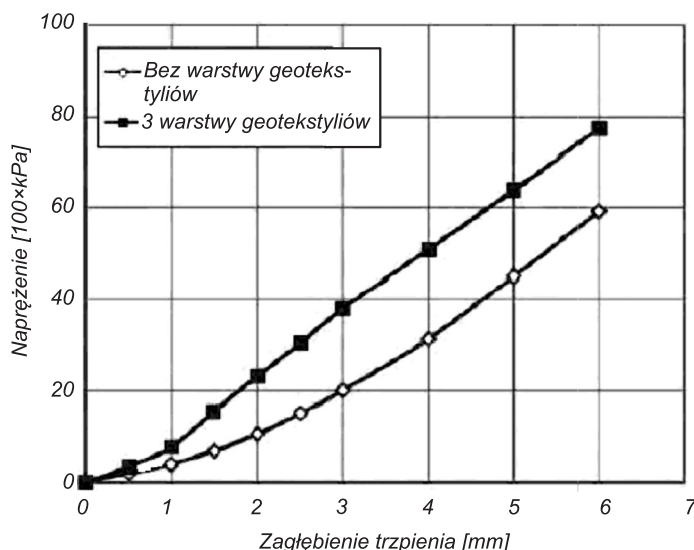
Rys. 3.5. Zależność nacisku od zagłębienia trzpienia – wg [45]



Rys. 3.6. Zależność nacisku od zagłębienia trzpienia przy ułożeniu dwóch warstw geosyntetyku w próbce – wg [45]

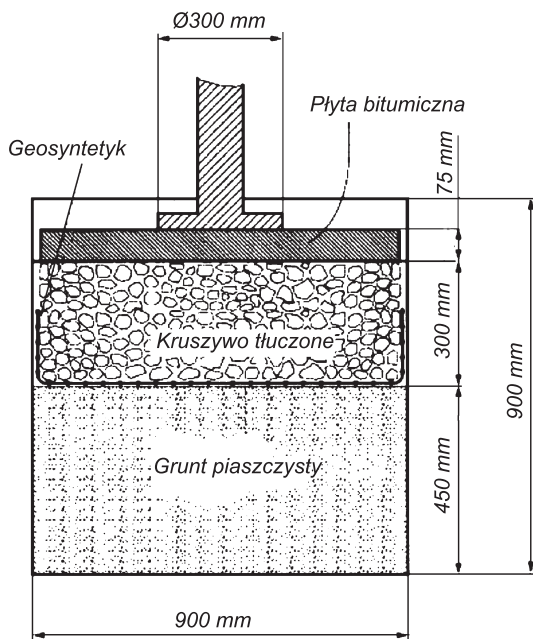
W przypadku ułożenia trzech warstw równocześnie (rys. 3.7) otrzymujemy znacząco skuteczny efekt zbrojenia w stosunku do próbek niezbrojonych, lecz nie

wprost proporcjonalny do liczby warstw w próbce. Potwierdzają to testy laboratoryjne na próbkach relatywnie małych objętości zbrojonych większą liczbą warstw.



Rys. 3.7. Zależność nacisku od zagłębienia trzpienia w próbce z trzema warstwami geosyntetyku – wg [45]

Kolejne serie testów *CBR* zostały podjęte w celu sprawdzenia wpływu zastosowania geotekstyliów jako wkładek warstwowych na odkształcalność gruntów piaszczystych. Wnioski z badań wykazały, że zastosowanie geotekstyliów jako warstwy zbrojenia w gruncie zwiększa wskaźnik *CBR* gruntu warstwy zbrojonej. Polepszenie nośności gruntu zbrojonego geosyntetykiem zależy także od uziarnienia gruntu. Efekt ten jest tym wyraźniejszy, im wyższa jest zawartość frakcji piasku w gruncie. Wniosek taki był udokumentowany w seriach pomiarów, które nie są przedstawione w tym opracowaniu. W innych badaniach objętość pojemnika modelującego warstwowe podłoże gruntowe, przedstawione w pracy Montenelli i inni [44], wynosiła ok. 1 m³. Na stanowisku laboratoryjnym badane były różne rodzaje geosyntetyków układanych pomiędzy warstwami kruszywa i gruntu piaszczystego według schematu z rysunku 3.8. Założenia te miały odzwierciedlać przybliżony model warstw kruszyw podbudowy drogowej jako warstwy nawierzchni dróg samochodowych lub model nawierzchni z tłuczniową pryzmą podsypki jako odpowiednika modelu nawierzchni dróg szynowych. Dla tych przypadków warstwę geotekstyliów w formie tkanych siatek drobnoczkowych przewidywano jako wzmacniającą i separującą grunty o różnym uziarnieniu. Stosując co najwyżej dwie zespolone ze sobą warstwy geosyntetyku, uzyskano pomiary osiadań nieodbiegające od oczekiwanych.

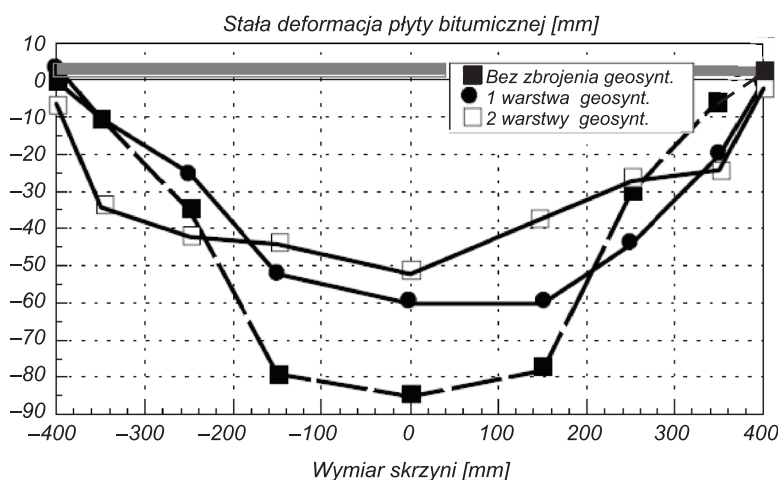


Rys. 3.8. Pojemnik stanowiska laboratoryjnego – wg [44]

Powierzchnię przekazującą obciążenie stanowiła warstwa bitumiczna o grubości 7,5 cm, którą obciążała płyta metalowa o średnicy 30 cm. Płyta wraz z warstwą bitumiczną była relatywnie podatna, symulując warstwę nawierzchni bitumicznej lub sprężysty podkład podszynowy, co umożliwiło pomiar odkształcenia i osiadania płyty w zależności od różnych struktur wypełnienia pojemnika. Górną warstwę wypełnienia sześciennego pojemnika stanowiła warstwa kruszywa tłucznioowego, która w ogólnym przybliżeniu odpowiada warstwie podsypki drogi szynowej lub dolnej warstwie podbudowy nawierzchni drogi samochodowej. Podczas testów wykonywano również pomiary deformacji poszczególnych ograniczających powierzchni warstw i powierzchni geosyntetyków układanych w różnych położeniach i ilościach warstw. Za charakterystyczny dla jednej z serii badań należy jednak uznać porównawczy wykres osiadań powierzchni płyty obciążającej z jedną i dwiema warstwami zbrojeń geosyntetycznych (rys. 3.9). Z wykresu tego wynika fakt występowania efektu wzmocnienia układu warstw gruntowych zbrojeniem geosyntetycznym, w przeciwieństwie do wypełnień bez zbrojenia.

Najmniejszy zakres osiadań płyty bitumicznej uzyskano dla dwóch warstw geosyntetyków rozgraniczających warstwy modelu podłoża. Jest to nieco odmienny rezultat od tego, jaki występował w innych badaniach pomiarowych, gdzie zwiększona liczba warstw geosyntetyków, w formie geotekstyliów, wywoływała efekt większych osiadań podłoża. W tym wypadku okoliczność większych osia-

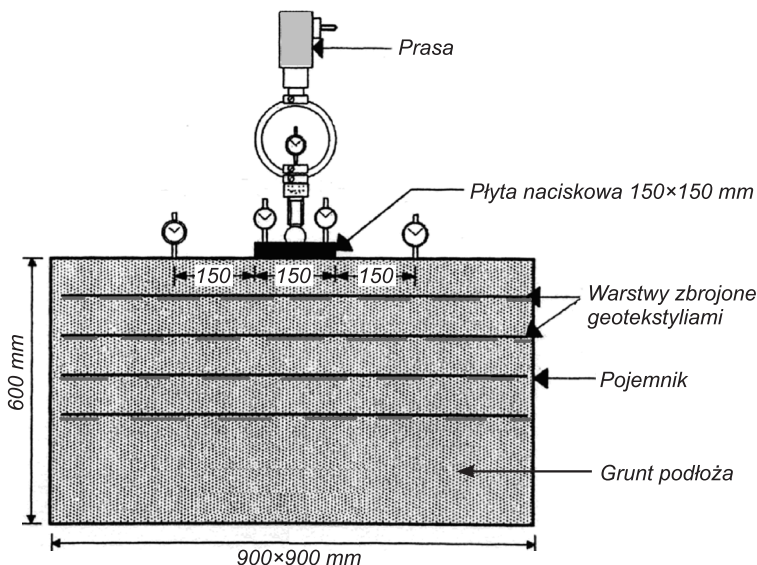
dań można jedynie tłumaczyć omawianym już efektem klinowania się ziaren kru-
szywa w oczkach geosyntetyku, które były użyte w pomiarach. Pewne znaczenie
ma również wymiar i skala pojemnika użytego do modelowania podłoża, które
w tym przypadku należy zaliczyć do średniowymiarowych. Oznacza to również,
że zjawisko osiadania podłoża w zależności od liczby warstw podłoża ma charak-
ter nieregularny.



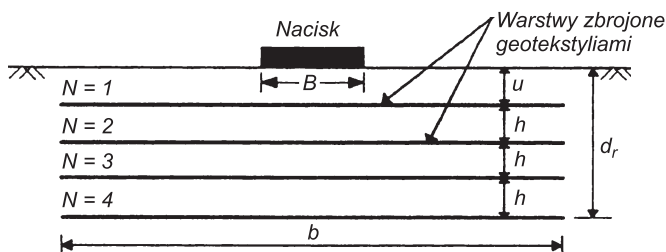
Rys. 3.9. Odkształcenie płyty nawierzchniowej przy różnej liczbie warstw – wg [44]

W kontekście formułowania zakresu i odpowiedniego własnego programu laboratoryjnych badań modelowych nad zachowaniem się zbrojonych gruntów podłoża szczególną uwagę zwracają badania zreferowane w pracy [37]. Na sztywną, kwadratową płytę stalową było przekazywane wolnozmienne obciążenie statyczne za pomocą układu hydraulicznego. Bezpośrednie przekazywanie obciążeń płytą odróżnia badania od przedstawionych wyżej. Wypełnienie pojemnika stanowił jeden rodzaj gruntu, co umożliwiała identyfikację efektu wzmocnienia podłoża przez geosyntetyczne zbrojenia w różnych układach ilości warstw i różnych typów. Porównawczy charakter pomiarów wymagał też możliwie jednolitych sposobów przygotowania poszczególnych struktur wypełnień pojemnika. Odpowiedni schemat układu zbrojenia podłoża gruntowego warstwami geosyntetyków, stanowiących geotekstylia o różnych gramaturach, prezentuje rysunek 3.10 i 3.11.

Grunt modelu podłoża wypełniający pojemnik metalowy o pojemności ok. 0,5 m³, stanowił jeden rodzaj piasku, o $\rho = 1,56 \text{ g/cm}^3$. Pojemnik był 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 , d_r/B i s/B . Dodatkowo stosunek d_r/B określono jako współczynnik głębokości ulepszenia i zbrojenia podłoża gruntowego – I_R .



Rys. 3.10. Schemat stanowiska pomiarowego – wg [37]



Rys. 3.11. Schemat układu warstw geotekstyliów w modelu pomiarowym – wg [37]

Przy czym:

$$d_r = u + (N - 1)h \quad (3.1)$$

gdzie: d_r – 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],

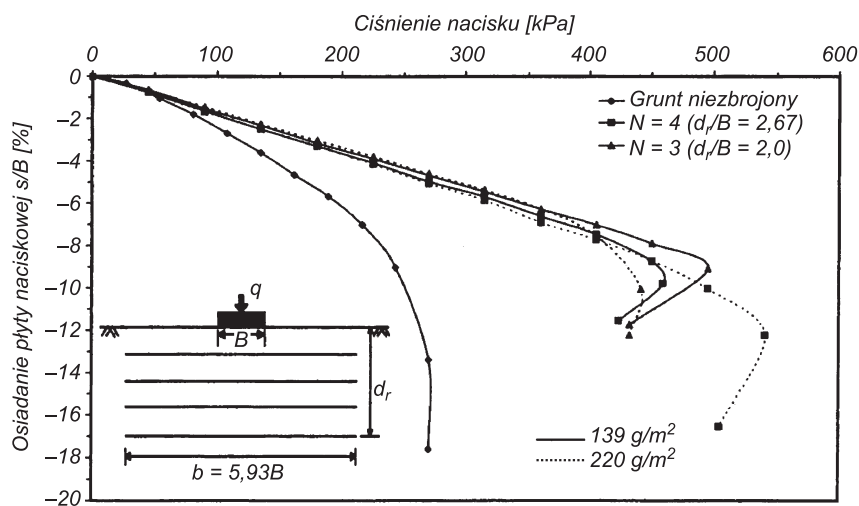
b – szerokość ułożenia warstw geotekstyliów [mm],

B – wymiar kwadratowej płyty naciskowej [mm],

s – osiadanie [mm].

Różnice w zakresach osiadań, przedstawione na rysunku 3.12, wyraźnie wskazują na wzmacniającą funkcję trzech i czterech warstw geotekstyliów w stosunku do osiadań gruntu niezbrojonego.

Spośród wielu zestawień i wykresów wyników uzyskanych w testach obciążeń pojemnika wypełnionego uwarstwowionym gruntem, jako bardzo znamienne i potwierdzające słuszność sugestii rozwiązania wzmocnienia podłoża nawierzchni drogowych przy pomocy kilku warstw geotekstyliów, należy przytoczyć wyniki pomiarów obejmujących zmiany osiadania płyty obciążającej, pokazane na rysunkach 3.12 i 3.13. Wyniki pomiarów były przedstawione również w pracy [38]. Wskazują one na fakt, że zmniejszenie osiadania powierzchni obciążenia pewnej strefy zbrojenia podłoża gruntowego d_r można osiągnąć przez zwiększenie liczby warstw geotekstyliów bądź przez zagłębienie całej strefy zbrojenia podłoża.



Rys. 3.12. Osiadanie względne przy zmiennej liczbie warstw geotekstyliów i zmiennych gramaturach – wg [37]

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 rysunku 3.13 wynika też, że efekt wzmocnienia, mierzony zakresem osiadania układu podłoża pod naciskiem, może być zwiększony poprzez stosowanie geotekstyliów o wyższych gramaturach tylko w ograniczonym zakresie. Zdefiniowano też miarę efektu i skuteczności zbrojenia geotekstyliami, określoną współczynnikiem wzmocnienia (zbrojenia, ulepszenia) podłoża gruntowego jako:

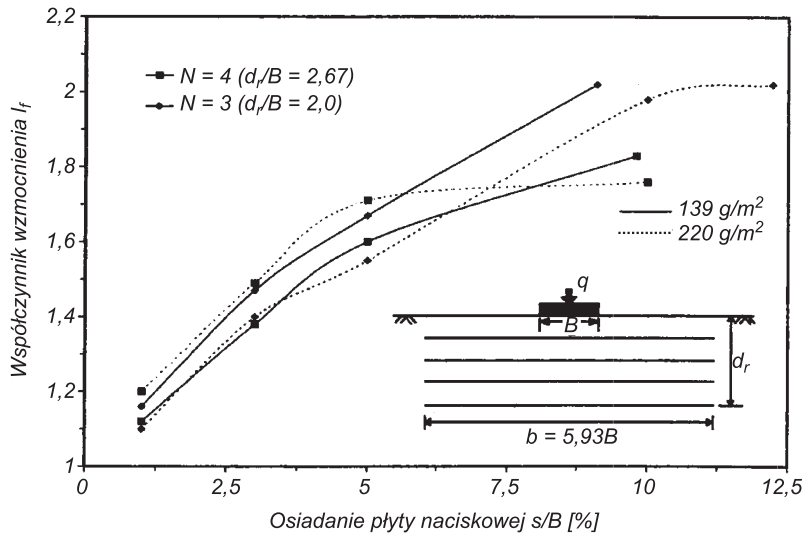
$$I_f = q_r / q_0 \quad (3.2)$$

gdzie: I_f – współczynnik wzmocnienia (ulepszenia) podłoża [–],

q_r – nacisk na podłożo zbrojone geotekstyliami dla zadanego osiadania [kN/cm²],

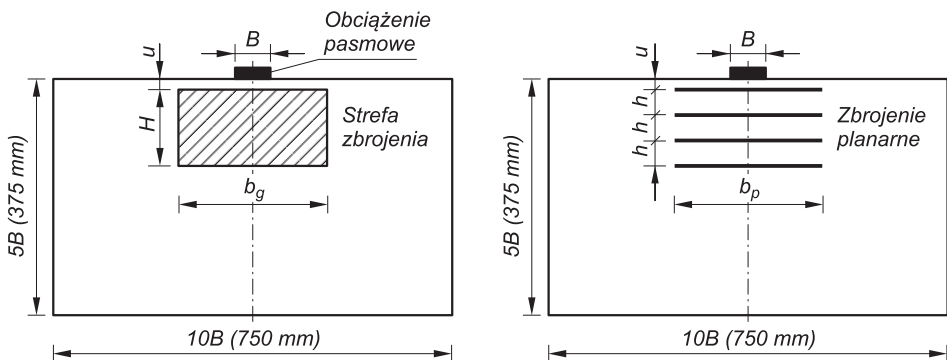
q_0 – nacisk na podłożo niezbrojone geotekstyliami dla uzyskania tego samego osiadania [kN/cm²],

s – zmierzone osiadanie [mm].



Rys. 3.13. Współczynnik wzmocnienia podłoża płyty przy różnych strefach zbrojenia – wg [37]

Zakres zmian tego współczynnika w zależności od osiadań i obciążenia płyty przedstawia rysunek 3.13. Z wykresu na rysunku wynika, że dwukrotne wzmocnienie I_f układu z trzema warstwami geotekstyliów uzyskujemy przy wywołaniu dziesięcioprocentowego wzrostu osiadań, zaś cztery warstwy geotekstyliów przy tym samym zakresie osiadania wskazują na wzmocnienie tylko 1,75-krotne. Warto też zwrócić uwagę, że zdefiniowane wzorem (3.1) głębokość strefy zbrojenia i wzorem (3.2) współczynnik wzmocnienia, mogą mieć też odniesienia w projektowaniu technicznym. W kolejnym programie badań, opisanym w pracy [42], prowadzono badania według schematu stanowiska pomiarowego przedstawionego na rysunku 3.14.



Rys. 3.14. Schemat stanowiska planarnego zbrojenia geowłókninami i geosiatkami – wg [42]

Mniejszy pojemnik wynikał z wymiaru innego obciążenia pasmowego i głębokości strefy zbrojenia planarnego oraz większej precyzji aparatury rejestrują-

cej osiadania. W badaniach tych określano wpływ zagłębienia strefy zbrojenia u w stosunku do obciążonej powierzchni ośrodka gruntowego oraz wpływ zastosowania warstw geosiatki na wzrost współczynnika wzmocnienia I_f dla jednego ustalonego zakresu obciążenia pasmowego. Badania wykazały, że większą efektywność zbrojenia podłoża gruntowego uzyskujemy nie tylko przez zwiększenie liczby warstw geowłókniny, lecz także przez zmianę rodzaju geosyntetyku oraz grubości geosiatki w mniejszych ilościach warstw.

W ogólnych uwagach podsumowujących przedstawione badania i testy gruntów zbrojonych geosyntetykami można zauważyć, że:

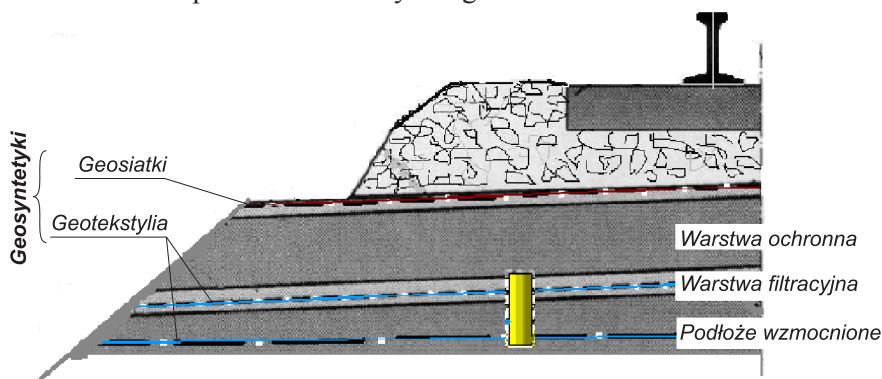
- przeprowadzone badania wskazują na zasadność stosowania zbrojeń geosyntetycznych w formie geowłóknin i geosiatek w warstwach gruntów piaszczystych, potwierdzając uzyskanie efektu wzmocnienia tych warstw oraz całego układu konstrukcyjnego, w skład których wchodzi;
- występuje właściwe uzasadnienie prowadzenia badań i pomiarów w kameralnych warunkach laboratoryjnych, które są ekonomiczne i pozwalają odnieść wyniki do warunków technicznych budowy podłoża gruntowych dróg lądowych;
- zakres aplikacji wyników prowadzonych badań do rzeczywistych warunków budowy podłoża gruntowych zależy również od skali i gabarytów stanowisk modelujących układy warstw gruntów.

4. WŁASNE BADANIA PODŁOŻY NAWIERZCHNI ZBROJONYCH GEOTEKSTYLIAMI

4.1. BADANIA LABORATORYJNE PODŁOŻY ZBROJONYCH PLANARNIE

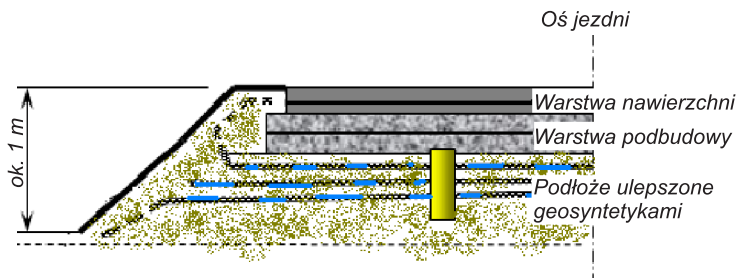
Z przeprowadzonych analiz mechanizmu interakcji zbrojenia geosyntetycznego z warstwami gruntu oraz z przeglądu wykonywanych pomiarów i badań laboratoryjnych w różnych ośrodkach wynikają określone wskazania w zakresie obszaru przygotowania badań własnych. Za niewątpliwy należy uznać fakt wzmacniania warstw gruntowych przez warstwę geotekstyliów układanych poziomo jako przekładki. Zakres tego wzmacniania, w przypadkach rozłożonych nacisków pionowych na układ warstw podłoża konstrukcji nawierzchni, jest zmienny i zależy w znacznym stopniu od parametrów gruntu warstwy, własności geosyntetyku oraz od jakości i ilości warstw stanowiących nawierzchnię drogi. Okoliczności te stanowią również o możliwości stosowania zbrojenia geosyntetykami jako sposobu ulepszania warstw gruntowych podłoża nawierzchni alternatywnego do ulepszania spoiwami hydraulicznymi typu cement lub wapno.

Drugim ważnym spostrzeżeniem jest to, że dla ogólnie stosowanych układów warstw nawierzchni dróg użycie geotekstynnego wzmocnienia jedną warstwą jest mało skuteczne. Widoczne efekty w zakresie ulepszenia gruntu podłoża, to znaczy zwiększenie odporności na obciążenia – także powtarzające się cyklicznie – i zmniejszoną odkształcalność warstwy, otrzymujemy stosując co najmniej dwie lub trzy warstwy geotekstyliów. Założeniem do przeprowadzenia bezpośrednich pomiarów w laboratorium było ustalenie takich prób, które oddawałyby możliwie blisko specyfikę pracy warstwy gruntowego podłoża zarówno nawierzchni drogi szynowej (rys. 4.1), jak i samochodowej (rys. 4.2). Założono też, że pewnym ogólnym przybliżeniem tej specyfiki sposobu zbrojenia podłoża będą pomiary odkształcalności próbek dla różnych wariantów ułożenia wielu warstw geotekstyliów w warunkach pomiaru edometrycznego.



Rys. 4.1. Strefa lokalizacji próbek w podłożu nawierzchni drogi szynowej

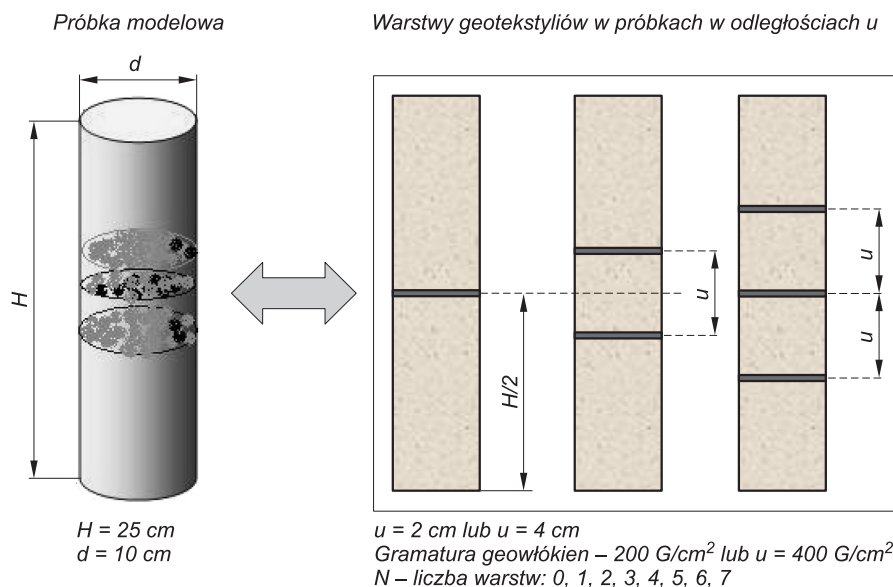
Warunki fizyczne tego pomiaru polegają na obciążeniu jednoosiowym próbki gruntu bez możliwości odkształcenia bocznego, czyli objętościowego, próbki. Jest to zatem pewna analogia do pomiarów edometrycznych odkształcalności gruntów, lecz bez zachowania wymaganych normą wymiarów próbki. Pewne ogólne przybliżenie modelowe pracy podłoża nawierzchni wynika również z ustalenia wysokości próbek, które jest związane z grubościami warstw ulepszanego podłoża nawierzchni.



Rys. 4.2. Idea lokalizacji wyodrębnienia próbek struktur uwarstwionych podłoża nawierzchni

W tym kontekście i w celu przeprowadzenia bezpośrednich testów laboratoryjnych przygotowano odpowiednie formy próbek do wypełnienia różnymi strukturami uwarstwienia geosyntetykami jednego typu gruntu piaszczystego o znanych parametrach fizycznych.

Grunt wypełnień stanowił piasek średnioziarnisty, $\rho = 1,78 \text{ g/cm}^3$, stałej wilgotności $w_n = 5\%$ i wskaźniku jednorodności uziarnienia $C_u = 5$. Formy walcowe wykonano z nieodkształcalnych odcinków rur o wysokości $H = 25 \text{ cm}$ i średnicy wewnętrznej $d = 10 \text{ cm}$, czyli o współczynniku proporcjonalności kształtu próbek równym 2,5. Do badań użyto powszechnie stosowanej w drogownictwie geowłókniny o gramaturze 200 g/m^2 . W sześciu formach próbek (rys. 4.4) wykonano cztery serie wypełnień gruntem o różnej strukturze uwarstwienia geowłókniną w poszczególnych próbkach. W kolejnych seriach A, B, C, D zmienne były zarówno ilości 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/m^2 . W nawiązaniu do przedstawionych badań [37], można byłoby określać analogiczny współczynnik ulepszenia i zbrojenia podłoża I_R . Byłby on jednak zmienny w poszczególnych próbkach serii i zależny od liczby warstw zbrojenia N oraz odległości między warstwami geowłókniny u , pokazanych na rysunku 4.3.



Rys. 4.3. Zasada sporządzania serii warstwowych struktur próbek



Rys. 4.4. Formy do badań edometrycznych próbek o różnych strukturach wypełnień uwarstwionych

4.2. POMIARY ODKSZTAŁCALNOŚCI PRÓBEK O RÓŻNYCH ZAKRESACH ZBROJENIA

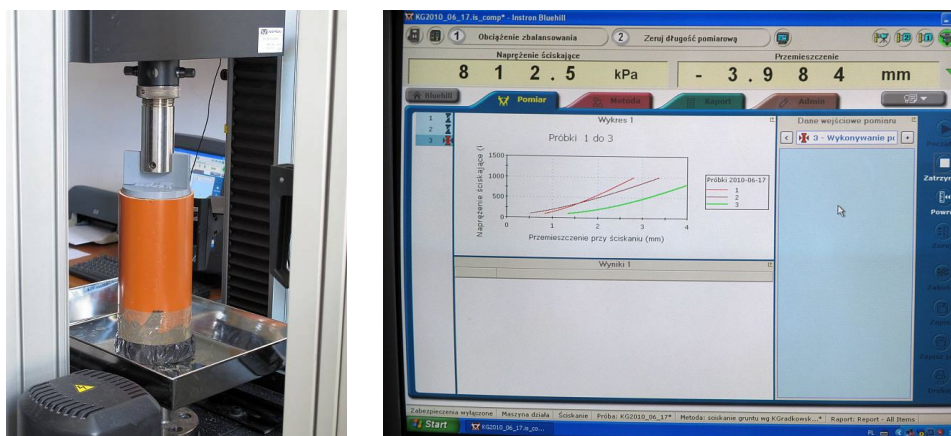
4.2.1. Założenia i sposób przeprowadzenia badań laboratoryjnych

Bezpośrednich pomiarów odkształcalności przygotowanych serii próbek dokonano na maszynie wytrzymałościowej typu Instron 5567 w Katedrze Inżynierii Materiałów Budowlanych PW (rys. 4.5).



Rys. 4.5. Stanowisko maszyny wytrzymałościowej typu Instron 5567

Maszyna wytrzymałościowa jest wyposażona w rejestrator cyfrowy i monitor obrazu graficznego pomiaru odkształceń i sił obciążających (rys. 4.6). Ustaleń zakresu i skali obciążeń i przemieszczeń dokonano na pojedynczej próbce zerowej, wypełnionej samym gruntem zagęszczonym warstwowo w sposób przyjęty dla wszystkich próbek. Przed rozpoczęciem rejestracji przemieszczeń, w celu ujednolicenia warunków pomiaru bezpośredniego i maksymalnego eliminowania różnic w zagęszczeniu wypełnień gruntowych, każdą z próbek poddano obciążeniu wstępnemu 100 kPa. Obciążenie to było jednorazowe, a po odciążeniu próbki było przyłożone jako obciążenie początkowe.



Rys. 4.6. Jednoosiowe obciążenie wypełnionej próbki oraz ekran rejestratora

Po wykonaniu i rejestracji cyfrowej pomiarów z pełnego zestawienia ciągłego zapisu cyfrowego pomierzonych wielkości przemieszczeń i sił nacisku tłoka wyodrębniono zapisy przemieszczeń pionowych dla nacisków o przyroście 0,1 MPa, podając jedynie tabelę przykładową dla serii A. Do skróconych zapisów cyfrowych wyników pomiarów sporządzono wykresy przemieszczeń pionowych poszczególnych próbek w seriach A, B, C, D. W ogólnym ujęciu pomierzono podatność na odkształcenia p_o badanego materiału próbki, odpowiadającą ogólnej formule:

$$p_o = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4.1)$$

gdzie: $\Delta\sigma$ – przyrost naprężenia ściskającego [kPa];

$\Delta\varepsilon$ – względny przyrost odkształcenia pionowego [–].

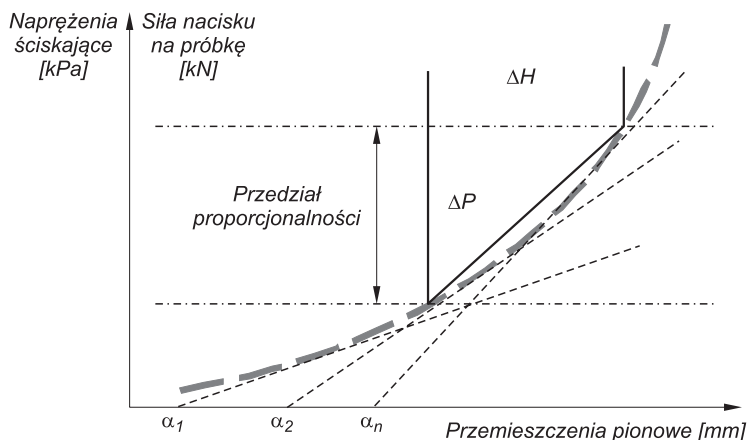
W danym przypadku, przy stałej powierzchni nacisku na próbkę walcową, współczynnik podatności p można określić również jako:

$$p = \frac{\Delta P}{\Delta H} = \operatorname{tg} \alpha \Rightarrow \text{constans} \Rightarrow \text{moduł podatności próbki [kN/mm]} \quad (4.2)$$

gdzie: ΔP – przyrost siły obciążającej [kN];

ΔH – zmiana wysokości próbki [mm];

α – kąt nachylenia stycznych w przedziale.

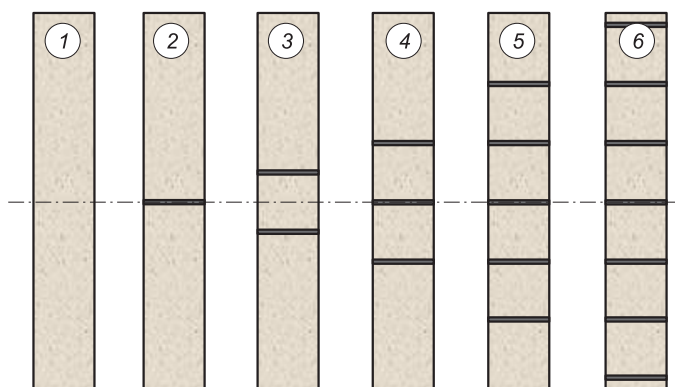


Rys. 4.7. Zasada ustalania przedziału dla określenia współczynnika podatności na odkształcenia p

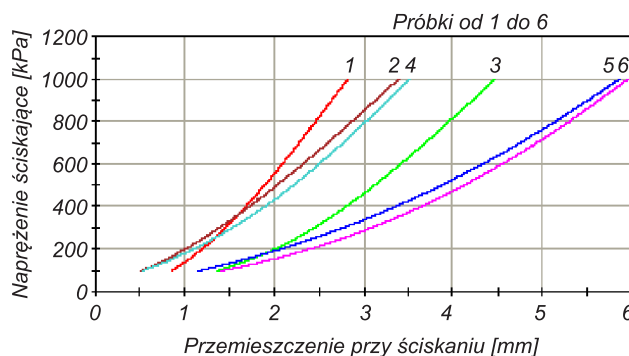
Wykres na rysunku 4.7 przedstawia oczekiwany układ zmian podatności badanych próbek w zależności od wzrostu liczby warstw geotekstyliów. Podatność próbek na odkształcenie, czyli zmianę wysokości próbek, jest rozumiana jako odwrotność stałej sprężystości próbek i może być miarą wytrzymałości na ściskanie uwarstwionej geotekstyliami struktury warstwy gruntu. Miara ta nie może być traktowana jako miara wytrzymałości i odkształcalności całej warstwy zbrojonej, bowiem ten rodzaj „wyciętej” próbki stanowi zbyt odległe przybliżenie modelowe. Badania próbek jednego rodzaju gruntu uwarstwowanego geotekstyliami jednego rodzaju (geowłóknina) służą jedynie do określenia wpływu ilości warstw geotekstyliów na zachowanie się ośrodka gruntowego o podobnych konstrukcyjnie warstwach. Wyniki pomiaru podatności na odkształcenia każdej z serii próbek poddano aproksymacji w ten sposób, że określono przedział proporcjonalności (maksymalnej stałości przyrostów) podatności według formuły (4.2), stosując zasadę przedstawioną na rysunku 4.7. Sposób ten pozwala na uzyskanie niezbędnych zakresów proporcjonalności i uśrednień wyników. Procedurę tę powtórzono czterokrotnie, to znaczy dla każdej z czterech serii próbek oddzielnie, przedstawiając kolejne wykresy. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 4.8–4.31 i w tab. 4.1.

4.2.2. Wyniki pomiaru odkształceń próbek w seriach

Próbki serii A



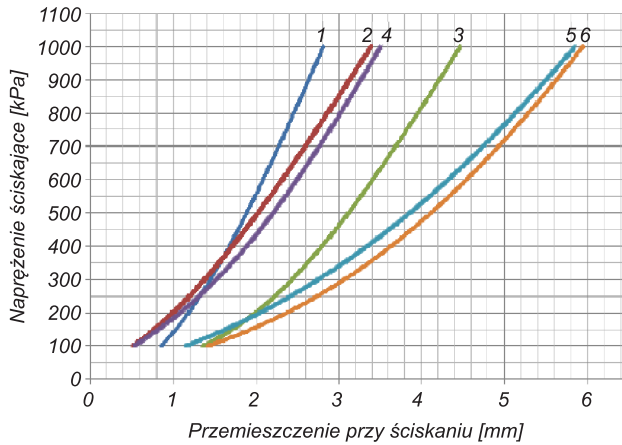
Rys. 4.8. Układ zbrojenia geotekstylowego próbek w serii A



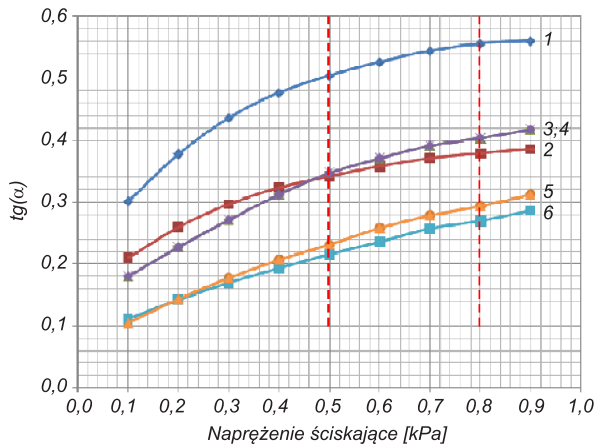
Rys. 4.9. Obraz graficzny zbioru zarejestrowanych wyników pomiaru w serii A

Tabela 4.1. Zestawienie wyników przemieszczeń pionowych próbek w przedziałach 0,10 MPa (A)

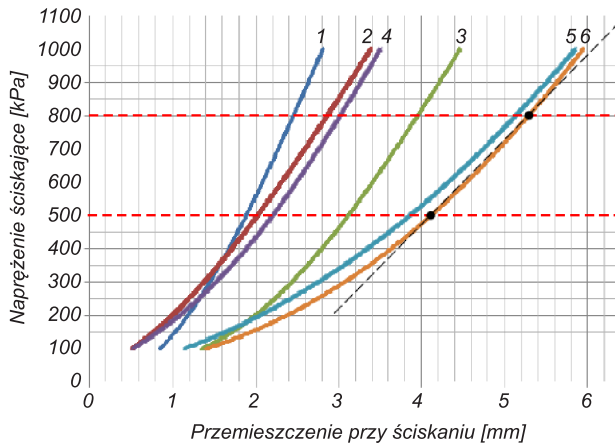
Napężenia ściskające [MPa]	Przemieszczenie przy ściskaniu [mm]					
	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	Próbka 4	Próbka 5	Próbka 6
0,10	0,85	0,51	1,38	0,52	1,14	1,41
0,20	1,18	0,99	2,04	1,08	2,04	2,36
0,30	1,44	1,37	2,38	1,52	2,74	3,08
0,40	1,67	1,71	2,78	1,88	3,33	3,62
0,50	1,88	2,02	3,08	2,20	3,85	4,11
0,60	2,08	2,31	3,40	2,49	4,31	4,54
0,70	2,27	2,59	3,78	2,76	4,74	4,92
0,80	2,46	2,86	3,92	3,02	5,13	5,28
0,90	2,64	3,13	4,10	3,26	5,50	5,62
1,0	2,81	3,38	3,48	3,50	5,85	5,94



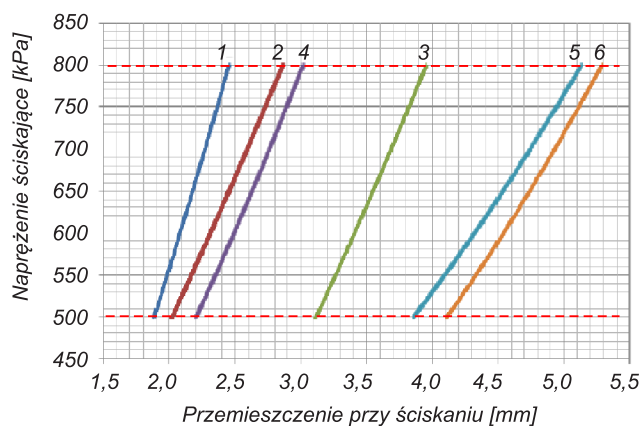
Rys. 4.10. Odształcalność próbek w przedziałach co 100 kPa, seria A



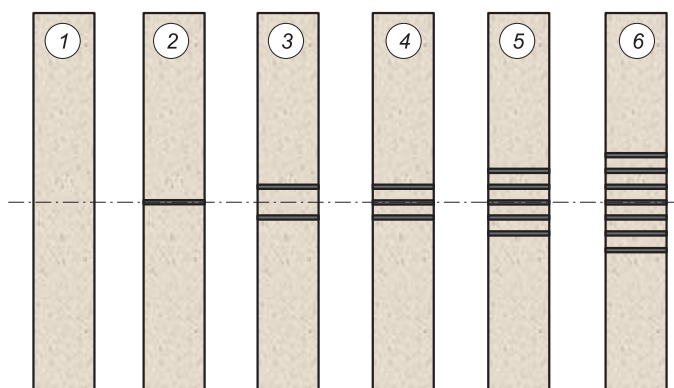
Rys. 4.11. Zakresy zmienności współczynnika podatności próbek, seria A



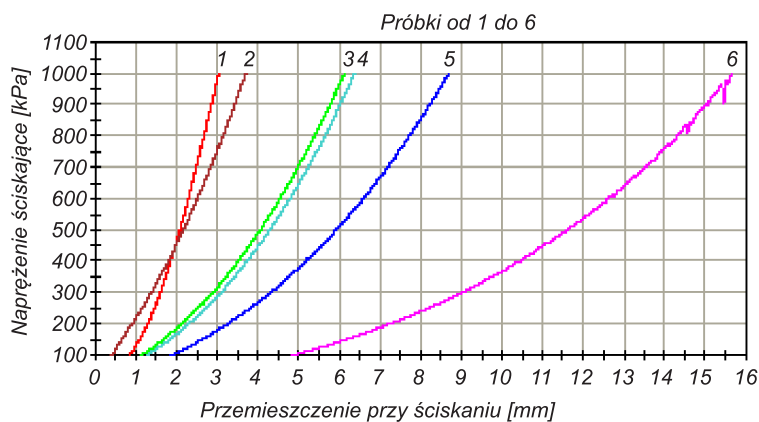
Rys. 4.12. Położenie przedziału proporcjonalności współczynnika podatności próbek, seria A



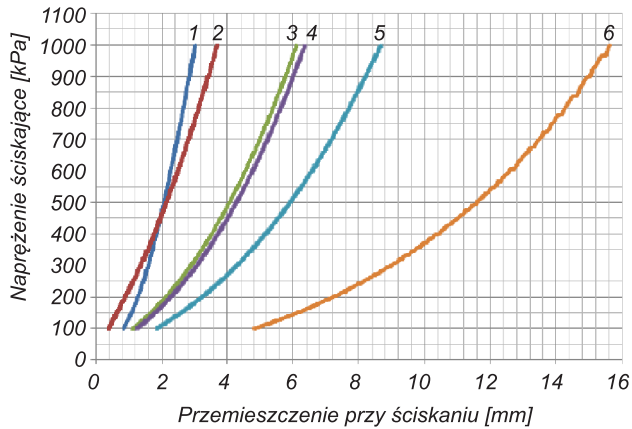
Rys. 4.13. Przyjęty podział proporcjonalności współczynnika podatności próbek, seria A

Próbki serii B

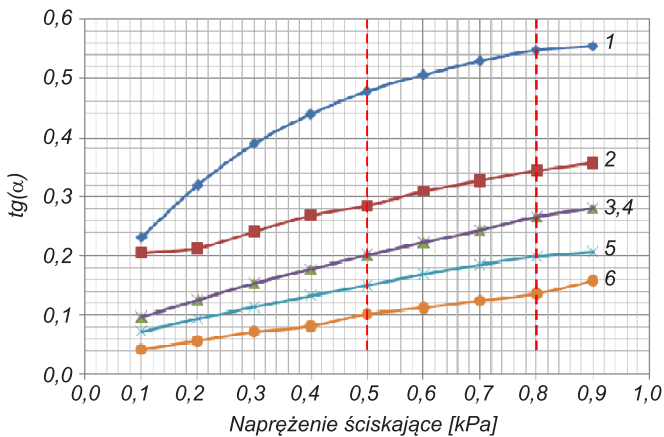
Rys. 4.14. Układ zbrojenia geotekstylnego próbek w serii B



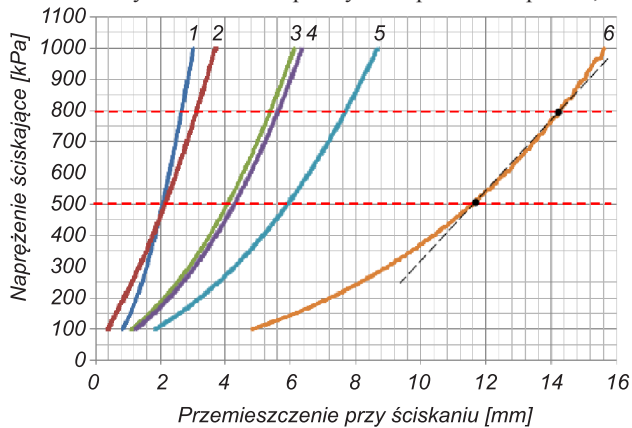
Rys. 4.15. Obraz graficzny zbioru zarejestrowanych wyników pomiaru w serii B



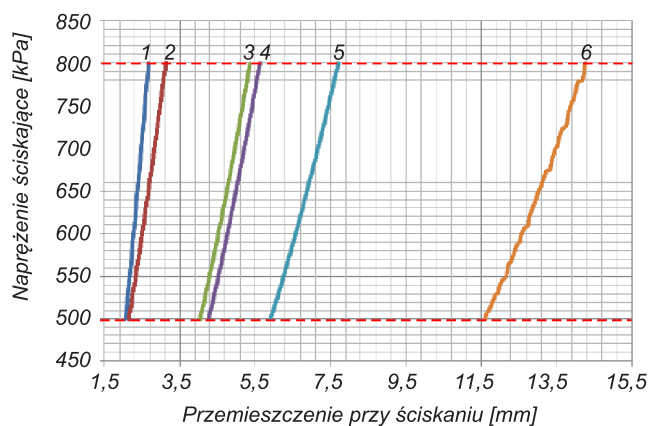
Rys. 4.16. Odształcalność próbek w przedziałach co 100 kPa, seria B



Rys. 4.17. Zakresy zmienności współczynnika podatności próbek, seria B

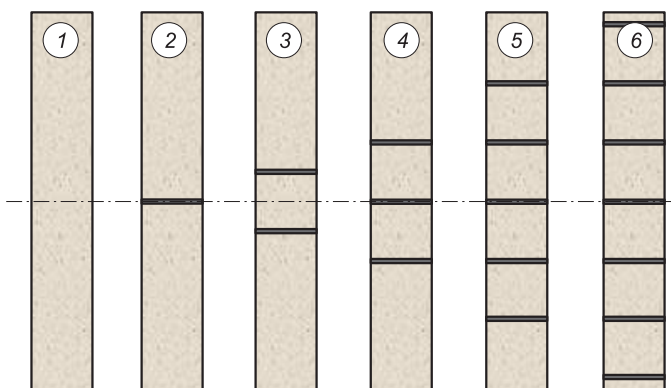


Rys. 4.18. Położenie przedziału proporcjonalności współczynnika podatności próbek, seria B

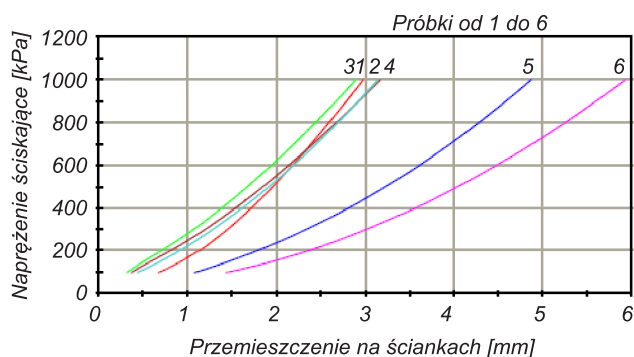


Rys. 4.19. Przyjęty podział proporcjonalności współczynnika podatności próbek, seria B

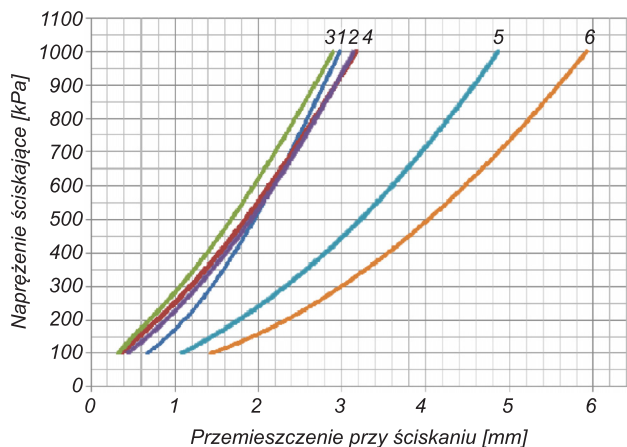
Próbki serii C



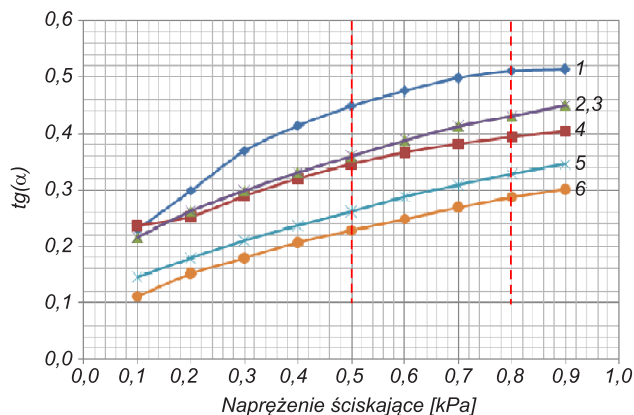
Rys. 4.20. Układ zbrojenia geotekstylowego próbek w serii C



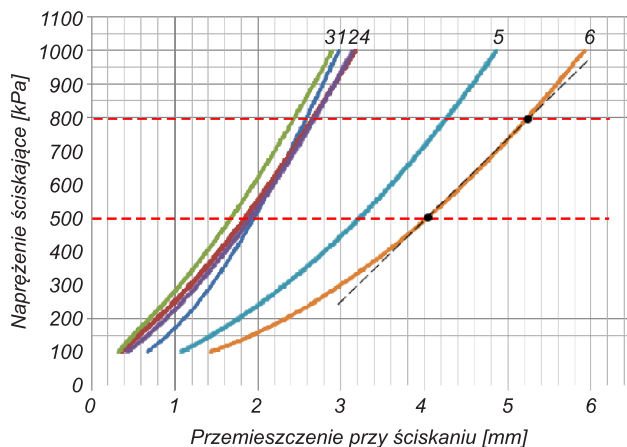
Rys. 4.21. Obraz graficzny zbioru zarejestrowanych wyników pomiaru w serii C



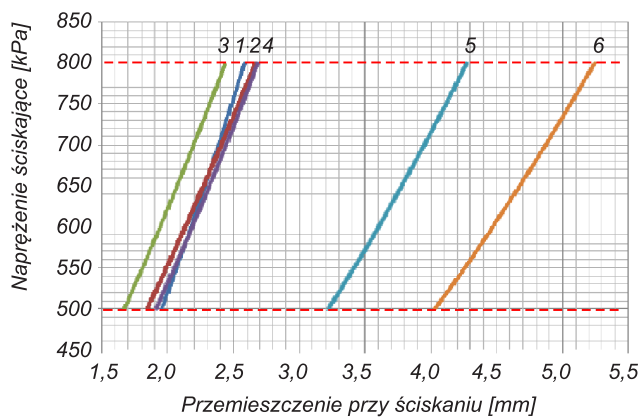
Rys. 4.22. Odształcalność próbek w przedziałach co 100 kPa, seria C



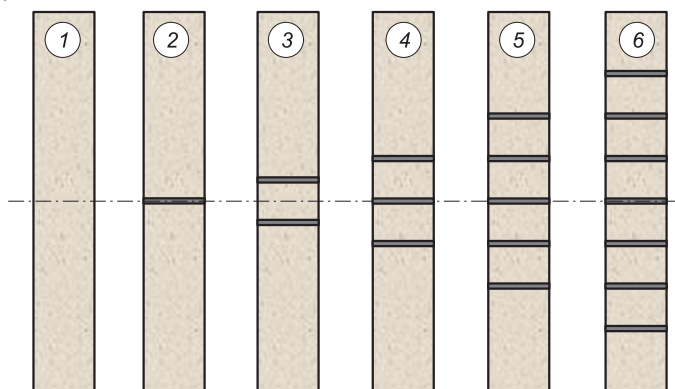
Rys. 4.23. Zakresy zmienności współczynnika odształcalności próbek, seria C



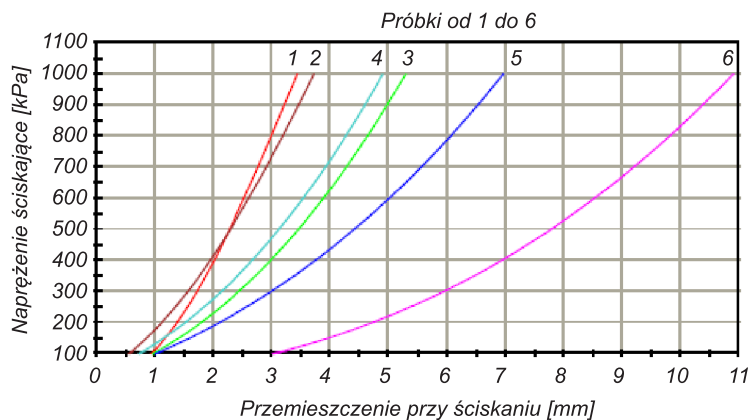
Rys. 4.24. Położenie przedziału proporcjonalności współczynnika podatności próbek, seria C



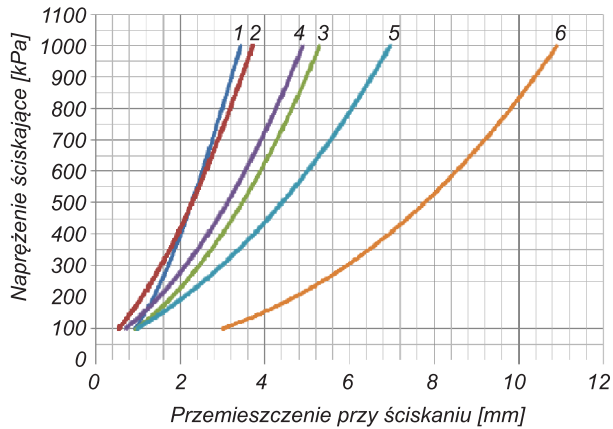
Rys. 4.25. Przyjęty podział proporcjonalności współczynnika podatności próbek, seria C

Próbki serii D

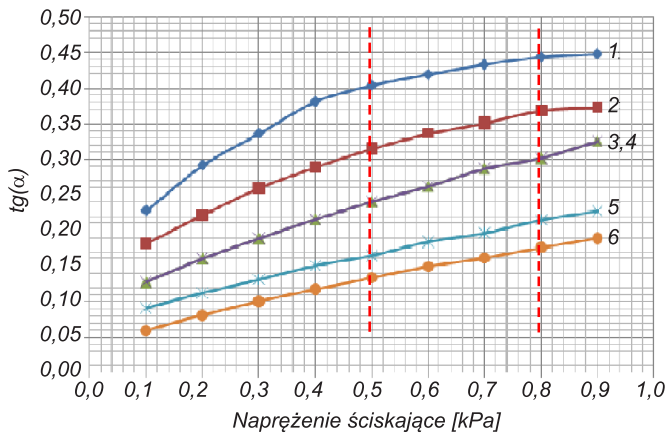
Rys. 4.26. Układ zbrojenia geotekstylnego próbek w serii D



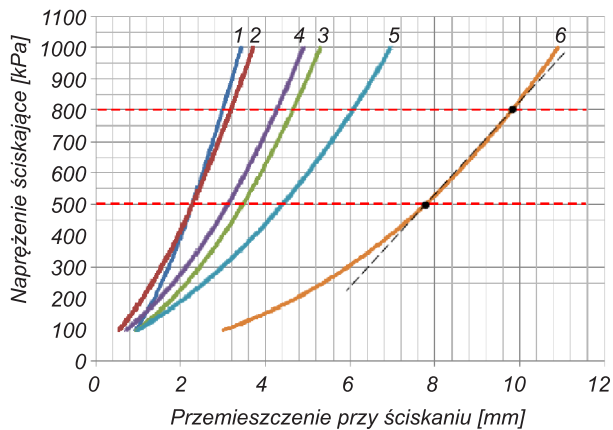
Rys. 4.27. Obraz graficzny zbioru zarejestrowanych wyników pomiaru w serii D



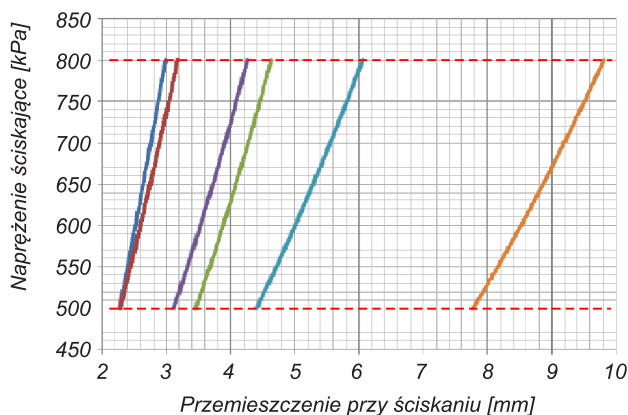
Rys. 4.28. Odształcalność próbek w przedziałach co 100 kPa, seria D



Rys. 4.29. Zakresy zmienności współczynnika odształcalności próbek, seria D



Rys. 4.30. Położenie przedziału proporcjonalności współczynnika podatności próbek, seria D



Rys. 4.31. Przyjęty podział proporcjonalności współczynnika podatności próbek, seria D

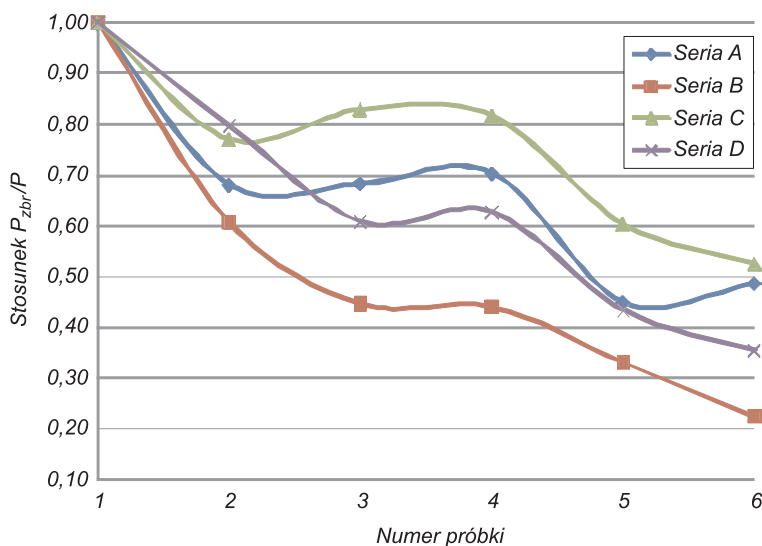
4.3. PODSUMOWANIE WYNIKÓW WYKONANYCH BADAŃ LABORATORYJNYCH

Po analizie pełnych zapisów cyfrowych pomiarów odkształceń uzyskano moduły podatności poszczególnych próbek w kolejnych 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.

Tabela 4.2. Zbiorne zestawienie wyników pomiarów odkształcalności próbek

Nr próbki w serii	1	2	3	4	5	6
Liczba warstw geotekstyliów	0	1	2	3	5	7
Wsp. podatności	p	p_{zbr}	p_{zbr}	p_{zbr}	p_{zbr}	p_{zbr}
Seria A						
Wsp. podatności	0,525	0,357	0,358	0,369	0,235	0,255
Stosunek p_{zbr}/p	1	0,680	0,681	0,703	0,448	0,486
Seria B						
Wsp. podatności	0,504	0,306	0,225	0,222	0,167	0,113
Stosunek p_{zbr}/p	1	0,607	0,446	0,440	0,331	0,224
Seria C						
Wsp. podatności	0,473	0,364	0,392	0,386	0,285	0,248
Stosunek p_{zbr}/p	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

Podatność poszczególnych próbek w seriach nie może odpowiadać w żadnym stopniu rzeczywistej podatności warstw zbrojonych geosyntetykami w realnym układzie podłoża nawierzchni dróg. Określona dla trzydziestu próbek podatność pozwala na wyciągnięcie względnych wniosków odnośnie do prognozowanych zachowań warstw gruntowych. Zestawienie wyników i przedstawione na wykresach wyniki bezpośredniego pomiaru podatności próbek poszczególnych serii (tab. 4.2) oraz zestawienie graficzne tych wyników (rys. 4.32) ma pewne znaczenie dla ustalenia właściwego sposobu wzmocnienia geotekstyliami podłoża nawierzchni drogowej zbrojonego planarnie. W analizie wyników nie były brane pod uwagę wyniki skrajne, które mogły powstać na skutek niezachowania jednorodnych warunków przygotowania wszystkich próbek bądź trudnych do uniknięcia błędów w pielęgnacji próbek.



Rys. 4.32. Graficzne porównanie podatności próbek serii A, B, C, D

Przeprowadzone pomiary podatności próbek pozwalają na sformułowanie wniosków bezpośrednich, wynikających z przeprowadzonych pomiarów i ważnych tylko dla dokonanych ogólnych założeń modelowych:

1. 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 5 i 7 warstw geotekstyliów.
2. Relatywnie stałą podatność na odkształcenie próbek uzyskuje się przy 2 i 3 warstwach geotekstyliów w próbkach, co odpowiadałoby modelowym próbkom „wyciętym” z podłoża nawierzchni drogowej z 3 i 4 warstwami, dla których uzyskujemy relatywnie zmniejszoną podatność na odkształcenie.

3. Zmniejszenie odległości pomiędzy warstwami geotekstyliów ułożonych pojedynczo – seria B – czyli grubości warstw gruntu pomiędzy warstwami geotekstyliów, zwiększa podatność próbek modelowych na ich odkształcalność.
4. Zmniejszenie odległości między podwójnie ułożonymi warstwami geotekstyliów prowadzi do zwiększenia podatności próbek – seria D.
5. Zwiększona gramatura warstwy geotekstyliów uzyskiwana przez podwójne ułożenie warstw o gramaturze 200 g/cm^2 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 prac [2, 42] 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:

1. W gruntowych podłożach nawierzchni drogowych należy stosować nie mniej niż dwie i nie więcej niż cztery warstwy geotekstyliów o gramaturach od 200 do 400 g/m^2 . Większa liczba warstw nie przynosi znaczącego efektu wzmocnienia podłoża, natomiast w istotny sposób zwiększa koszt materiałów takiego rozwiązania, które przestaje być konkurencyjne dla zastosowania spoiw hydraulicznych lub bezpośredniej wymiany warstwy gruntu.
2. 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.
3. Istotne znaczenie ma grubość warstw gruntu znajdująca się pomiędzy sąsiednimi warstwami geotekstyliów. Według sugestii zawartych w pracy [38] i niektórych pomiarów przedstawionych w pracy [31], grubość ta uzależniona jest, między innymi, od uziarnienia gruntu podłoża C_U . Większa średnica d_{60} , czyli wymiar cząstek gruntu, których masa wraz z mniejszymi stanowi 60% masy próbki wysuszonej w gruncie podłoża, czyli d_{60} , powoduje możliwość zwiększenia grubości warstwy między warstwami geotekstyliów, która w przeciętnych rodzajach gruntów piaszczystych wynosi od 5 do 10 cm.

Wnioski powyższe są w znacznym stopniu zbieżne z wnioskami opracowanymi na podstawie wyników doświadczeń poligonowych, relacjonowanych w pracach [31, 36, 38], bowiem badania podatności i odkształcalności na poletkach doświadczalnych pozwoliły ustalić między innymi to, że grubość warstwy gruntu pokrywającej geowłókniną redukuje odkształcalność całego układu gruntowych warstw podłoża. Pozwalają też na bezpośrednie zastosowanie techniczne wzmocnienia podłoża gruntowych kilkoma warstwami geowłóknin w podłożu nawierzchni budowanych dróg samochodowych z odpowiednim współczynni-

kiem pewności i skuteczności wzmocnienia. Z przeprowadzonych doświadczeń wynika również, że sposób wzmocniania 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.

Warto też zwrócić uwagę na aspekt ekonomiczny tego sposobu wzmocnień. W przypadku gruntów piaszczystych polepszenie ich właściwości nośnych cementem (stabilizacja) może być znacznie niższe dopiero wówczas, gdy planarne zbrojenie podłoża gruntowego będzie wymagało wykonania wzmocnienia pięcioma lub większą liczbą warstw geotekstyliów. Porównując materiałowe koszty jednostkowe, to znaczy koszty użytych materiałów budowlanych na 1 m² wykonanych podłoży nawierzchni, rozwiązania z trzema lub czterema warstwami geotekstyliów, w zależności od ich gramatur, mogą być tańsze niż zastosowanie odpowiedniej wymiany gruntów bądź cementu dla uzyskania wymaganej normami jakości podłoża nawierzchni dróg samochodowych lub szynowych. Pewne optimum kosztów wzmocnienia gruntów podłoża drogi w konkretnych, lokalnych warunkach gruntowych można jednak uzyskać dopiero po przeanalizowaniu alternatywnego zastosowania dwóch lub trzech warstw geotekstyliów zamiast zastosowania spoiwa hydraulicznego, na ogół cementu. Dodatkowym aspektem ulepszeń podłoża nawierzchni dróg, poprzez zastosowanie więcej niż jednej warstwy geotekstyliów, jest uzyskiwanie odporności podłoża gruntowego na przemarzanie. Jest to wynikiem większej izolacyjności termicznej warstw z udziałem geotekstyliów oraz zwiększenia własności filtracyjnych warstw w układzie konstrukcyjnym podłoży nawierzchni różnych typów.

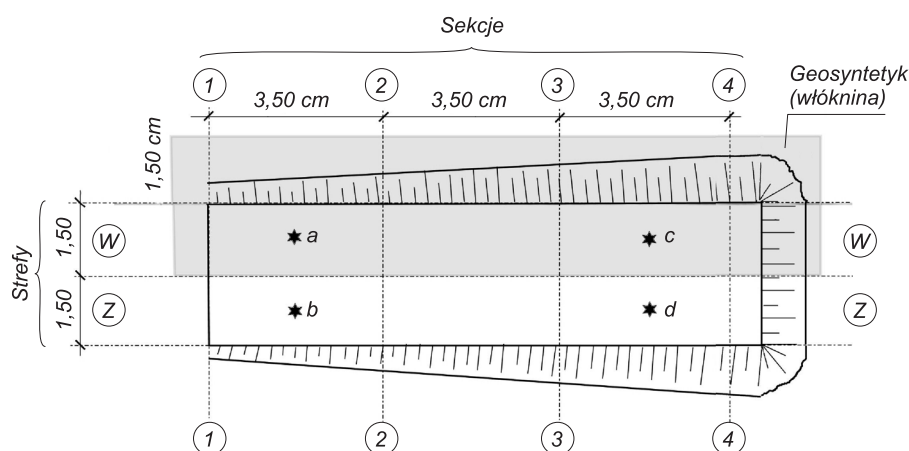
5. POMIARY ODKSZTAŁCALNOŚCI MODELU PODŁOŻA Z JEDNĄ WARSTWĄ GEOTEKSTYLIÓW

5.1. STATYCZNE MODUŁY ODKSZTAŁCENIA MODELU PODŁOŻA

Występujące miary podatności próbek gruntowych, którymi posługiwano się na etapie badań laboratoryjnych, są względnymi cechami mechanicznymi opisującymi dany rodzaj prób. Przy większej skali testów i pomiarów polowych należy zwrócić uwagę na stosowanie możliwie prostych i popularnych sposobów pomiarów, stwarzając możliwość porównań z innymi tego typu pomiarami lub badaniami. Pomiar jednej cechy fizycznej, na przykład sprężystości, za pomocą dwóch różnych metod powinien zawierać każdorazowo zamknięty cykl pomiaru, łącznie z częścią wnioskową. Może on być porównany tylko z testami o bardzo

zbliżonym lub wręcz analogicznym programie. W każdym innym przypadku prowadzone pomiary są ważne tylko dla danego stanowiska badawczego.

Etap wstępny pomiarów odkształcalności pewnego modelu podłoża na powierzchni wykonano na podstawie pomiaru modułu odkształcenia warstw gruntowych. Celem tego etapu było sprawdzenie zakresu występujących odkształceń warstw gruntu różnej grubości, zbrojonego geotekstyliami w znaczeniu geowłókniny drogowej. Różna odkształcalność warstw gruntów zbrojonych pozwala na ocenę stopnia wzmocnienia modelowej warstwy podłoża gruntowego jedną warstwą geowłókniny. Modelową warstwę podłoża gruntowego zbudowano na prostokątnym poletku doświadczalnym usypanym na sztywnym, betonowym podłożu o powierzchni ok. 40 m².

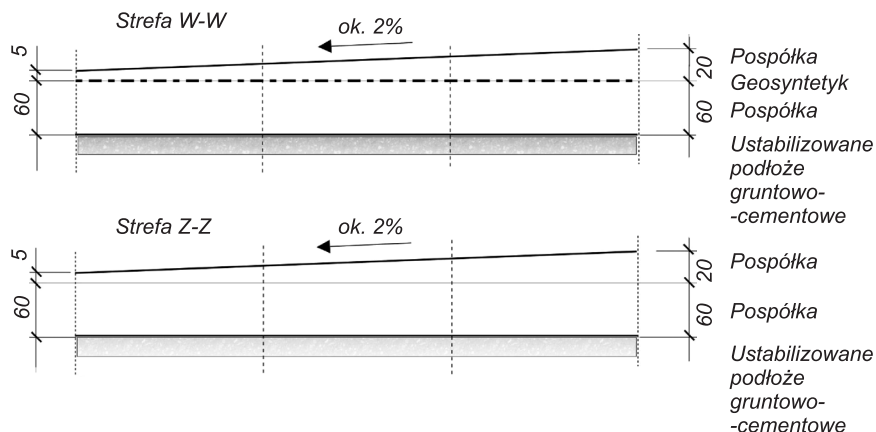


Rys. 5.1. Plan poligonowego poletka pomiarowego

Kształt, wymiary i przekroje poletka testowego przedstawiają rysunki 5.1 i 5.3. Natomiast rysunki (fotografie) 5.2 i 5.4, to relacja z wykonanych robót budowy poletka.



Rys. 5.2. Widok planu poligonowego poletka doświadczalnego



Rys. 5.3. Przekroje podłużne poletka w strefach o zmiennej grubości pospółki



Rys. 5.4. Widok przekroju poligonowego poletka pomiarowego

W poszczególnych punktach poletka testowego określano pierwotne i wtórne moduły odkształcenia jako miary podatności, zdolności do odkształceń pod wpływem obciążenia, tych samych układów warstw o różnej grubości i strukturze, z „przekładką” z geowłókniny – punkty a i c [strefa W-W] i bez geowłókniny – punkty b i d [strefa Z-Z] na rysunku 5.1. Jest to pomiar statyczny obciążeń wolnozmiennych, w którym różnice odkształcalności poszczególnych układów warstw, w dwóch seriach o różnych stanach niedogęszczenia, sporządzonych z tych samych materiałów, lecz różnych grubości, spodziewane były jako ewidentnie duże. Wyniki zestawione w tabelach 5.1 i 5.2 są jednak bardzo zbliżone, nie wykazują istotnych różnic.

Mechanizm pomiaru modułów odkształceń warstwy gruntu wzmocnionej geowłókniną zawiera się w wywołaniu „ruchu osiadania” obciążonej płytą pomiarową powierzchni warstwy gruntowej. Hipotetyczny rozkład sił wewnętrznych w strefie naciskowej płyty na podłoże gruntowe zakłada, że pod wpływem powtarzającego się obciążenia statycznego, do pewnej głębokości (nie mniejszej niż 20 cm), grunt piaszczysty ulega niewielkiemu i częściowemu mikrop przesunięciu, mobilizując w ten sposób siły tarcia wewnętrznego. Podobnej deformacji nie

ulega warstwa geowłókniny, poza zakresem odkształceń sprężystych (rozciągania). Pomiary modułów na rysunku 5.5. Całość prezentuje pewien analog zachowań fizycznych fragmentu ośrodka gruntowego uwiarygodniony między innymi w opracowaniach [13, 36, 44, 49] (rys. 5.6).



Rys. 5.5. Osprzęt do pomiaru modułów odkształcenia na poletku doświadczalnym

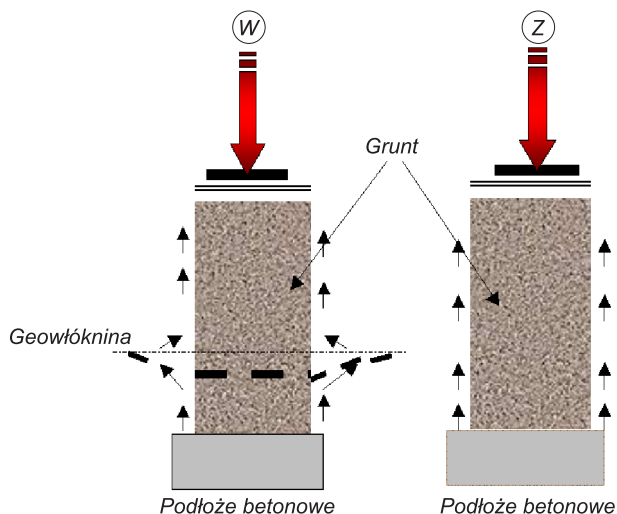
Niewielka liczba punktów pomiarowych podyktowana była tym, że każdorazowy wjazd samochodu-przeciwwagi wymagał odbudowy struktury poletka doświadczalnego w poszczególnych sekcjach.

Tabela 5.1. Wyniki pomiarów modułu odkształcenia

Nr pomiaru „vss”	Pierwotny moduł odkształcenia E_1 [MPa]	Wtórny moduł odkształcenia E_2 [MPa]	Wskaźnik odkształcenia $I_o = E_2/E_1$
Niezagęszczony stan I – $I_s = 0,97$			
a	46,1	124,6	2,70
b	44,9	125,0	2,78
c	46,0	131,1	2,85
d	46,1	130,0	2,82

Tabela 5.2. Wyniki pomiarów modułu odkształcenia

Nr pomiaru „vss”	Pierwotny moduł odkształcenia E_1 [MPa]	Wtórny moduł odkształcenia E_2 [MPa]	Wskaźnik odkształcenia $I_o = E_2/E_1$
Niezagęszczony stan II – $I_s = 0,98$			
a	57,0	131,2	2,30
b	57,9	132,6	2,29
c	56,9	136,7	2,40
d	57,3	134,6	2,35



Rys. 5.6. Schematyczny model rozkładu sił elementarnych pomiarów wstępnych VSS

Jest oczywistym, że przemieszczenie obciążonej płytą części gruntu będzie niewielkie, od 1 do 3 mm, bowiem obciążenia na płytę są wolnozmiennne, niemal statyczne. Niemniej jednak, przy niedogęszczonej warstwie gruntu piaszczystego, wyniki pomiaru E_2 w pewnym stopniu mogą odzwierciedlać wzmacniający wpływ geowłókniny w całej warstwie. Porównawcze zestawienie pomiarów modułów odkształceń pozwala na ustalenie wpływu poszczególnych czynników na zakres wzmocnienia.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i analizy zestawionych w tabelach 1 i 2 wyników, można stwierdzić:

1. Pomierzone bezwzględne wartości modułów nie są miarodajne w zakresie jakości wykonanego jako model podłoża nawierzchni, które nie spełnia wymagań normowych nawierzchni dróg pod tym względem. Dowodzą tylko niepełnych stanów zagęszczeń i nie najwyższej jakości materiału gruntowego użytego do doświadczeń. Stan ten był zamierzony w wypełnieniu celu badań.
2. Jeżeli miarą podatności jest również dokonany pomiar (vss) statyczny modułu odkształcenia $E_{1,2}$, a więc przy obciążeniu wolnozmiennym, to porównawcze zmniejszenie podatności całej warstwy, czyli wzmocnienie podłoża nawierzchni jedną warstwą geowłókniny, występuje w niewielkim zakresie.
3. Efekt wzmocnienia gruntowego układu warstw, z jedną warstwą geowłókniny, uznać należy za znikomy i w tym przypadku niezmierny. Jeśli pewną miarą podatności może być podatność mierzona modułem odkształcenia, to przyrost podatności, czyli zmniejszona podatność jest zaledwie kilkuprocentowa.
4. W przypadku układu warstw samego gruntu, który nie jest odpowiednio zagęszczony, występuje niemal pełna proporcjonalność pomiędzy grubością

warstwy gruntu a wzrastającą podatnością. Największą podatność, czyli odkształcalność, wykazuje zatem 60-centymetrowa warstwa gruntu, przy pierwszym stanie niedogęszczenia. Pomiary warstw o większej grubości wykazują stałość modułu odkształcenia, a to oznacza właściwość zbudowanego modelu.

Stwierdzenia w niektórych wymienionych wyżej wnioskach są znane z wyników wielu innych badań. Ich sformułowanie pozwoliło jednak na ustalenie, w jakim stopniu podjęte badania nie potwierdzają oczekiwanej i pozytywnej odpowiedzi o istnieniu wzmocnienia warstwy gruntu piaszczystego przez jedną warstwę geowłókniny. Wnioski te pozwalają też na jednoznaczne odrzucenie pomiaru modułu odkształcenia, jako sposobu mierzenia efektu wzmocnienia warstwy gruntu modelowego podłoża nawierzchni przez warstwę geosyntetyku. W każdym przypadku możliwe są różne interpretacje tego samego zjawiska fizycznego, a nawet tych samych wyników. Niemniej zagadnienie podatności, czyli sztywności i nośności podłoża nawierzchni drogowych jest dość złożone i wieloaspektowe, wymagające wielu różnych badań i pomiarów [23] oraz analiz teoretycznych [30, 49, 80].

5.2. POMIAR DYNAMICZNEGO MODUŁU PODATNOŚCI PODŁOŻA WZMOCNIONEGO

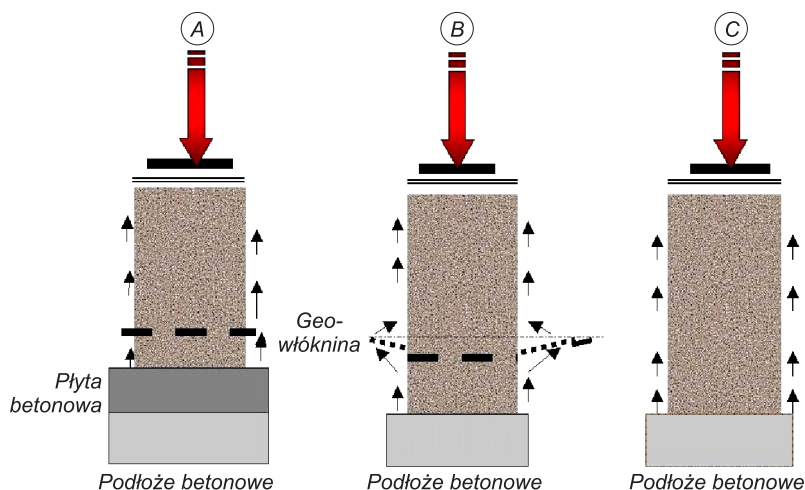
W uzupełnieniu i rozwinięciu przeprowadzonych testów podjęto fazę zasadniczą badań na poletku doświadczalnym, która obejmowała pomiar dynamicznego modułu odkształceń, jako miary sztywności pod wpływem obciążenia uderowego. Trwałość i odkształcalność nawierzchni drogowych, dróg samochodowych i szynowych, w zasadniczym stopniu zależy od jakości podłoża i jego odporności również na wpływy dynamiczne. Podłoża nawierzchni stanowią na ogół gruntową część strefy aktywnej budowli ziemnej, jako „samodzielnej” części konstrukcyjnej dróg komunikacyjnych, która w ograniczonym stopniu podlega tym wpływom, wobec odbioru nawierzchni jako warstwy bezpośredniego kontaktu z drganiami i uderzeniami kół pojazdów. Jest ona w podstawowym zakresie obciążona statycznie, niemniej występują tu też obciążenia dynamiczne w trakcie technologii wykonawczych.

Podatność podłoża gruntowego bądź warstw gruntu określana jest jako zdolność do odkształceń, sprężystych i trwałych, pod wpływem obciążenia równomiernie rozłożonego. Fizyczną odwrotnością tego pojęcia jest sztywność. Oznacza to, że im większa podatność warstw gruntowych, tym potencjalna nośność warstw jest mniejsza, a odkształcalność większa. Pomiar dynamicznego modułu odkształcenia jest więc pod wpływem siły uderu również miarą podatności, lecz o innym charakterze niż mierzony poprzednio moduł odkształcenia statycznego. Charakterystyki podatności to moduły odkształceń oraz odkształcenia sprężyste, które nie są porównywalne między sobą nawet dla dokładnie tych samych miejs

pomiaru warstw gruntów. Przeprowadzony program pomiarów w drugiej fazie badań wynikał z dwóch podstawowych przesłanek:

- ograniczającego sposobu pomiaru statycznego modułu odkształcenia E_o , pod względem jego mobilności i wieloznaczności uzyskanych wyników pomiarów układów warstw gruntów niedostatecznie zagęszczonych, a także ich niedostatecznej liczby, pozwalających na szerszą i wnikliwszą interpretację;
- braku rozstrzygnięcia w zakresie powyższych hipotez odnośnie do mechanizmów i efektów wzmacniania geotekstylami piaszczystych warstw gruntowych, przy ewidentnym istnieniu zastosowań technicznych prezentujących takie wzmocnienia.

Warunki obciążenia uderowego przy pomiarze modułu dynamicznego sprządzają się do analogicznych jak na rysunku 5.7. Wydaje się też, że efekt mobilizacji tarcia wewnętrznego, zachodzący pod wpływem uderu na płytę kontaktową w gruncie, jest znaczniejszy.



Rys. 5.7. Analog fizyczny rozkładu sił wewnętrznych w wyodrębnionym elemencie pomiaru VSS

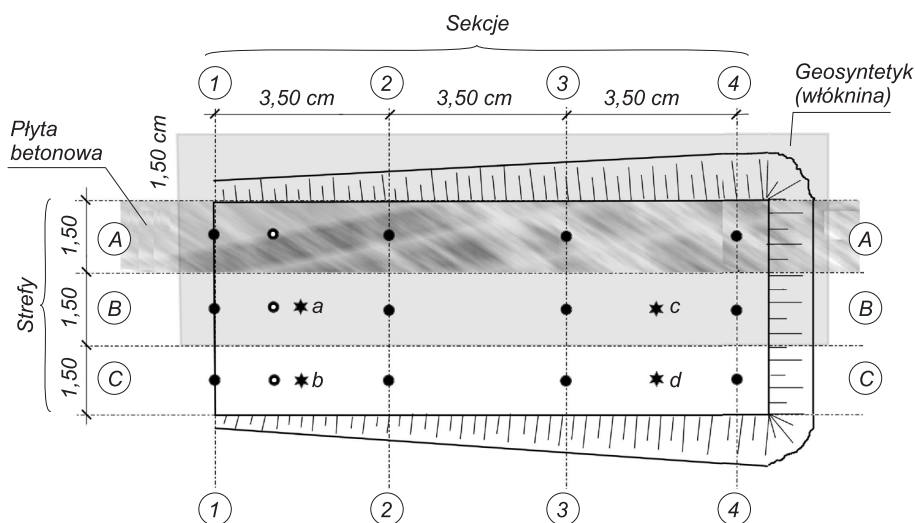
W celu uzyskania maksymalizacji różnic i różnych wpływów na mierzone parametry podatności różnorodnych struktur podłoża nawierzchni na poletku, pomiaru dokonano również w przypadku dwóch stanów niedostatecznych zagęszczeń, o powiększonej różnicy w stosunku do pomiarów modułu odkształcenia:

- pierwsza seria pomiarów stanu [I] o zagęszczeniu $I_s = 0,96$,
- druga seria pomiarów stanu [II] o zagęszczeniu $I_s = 0,98$.

Pomiary zagęszczenia wykonano według odpowiedniej normy metodą bezpośrednią, oznaczając I_s , i pośrednią. W tym przypadku, w fazie badań zasadniczych, nie wykonano pomiaru za pomocą vss i nie wykonano oznaczenia I_o , nie dopuszczając w ten sposób do każdorazowej przebudowy poletka po wykona-

nym pomiarze, które było wymagane po użyciu przeciwwagi. Stany niepełnego i niedostatecznego zagęszczenia umożliwiają skuteczniejszą ekspozycję efektu wzmocnienia geosyntetyku na nieodkształcalnym podłożu betonowym. Całkowite zagęszczenie do stanu $I_s = 1$ którejkolwiek z serii pomiarów spowodowałoby zminimalizowanie ruchu odkształcenia gruntu przy uderzeniu obciążenia płyty. Mogłoby to wyeliminować możliwość rejestracji efektu wzmocnienia przez geowłókninę, dlatego też powiększono w tej serii pomiarów różnicę pomiędzy niedostatecznymi zagęszczeniami.

Realizując cel i założenia programowe pomiarów tego etapu, sporządzono analogiczne do poprzedniego poletko poligonowe w formie rozszerzonej, według planu na rysunku 5.8 oraz na rysunkach (fotografiach) 5.9, 5.10 i rysunkach 5.11, 5.12.



Rys. 5.8. Plan poligonowego poletka pomiarowego



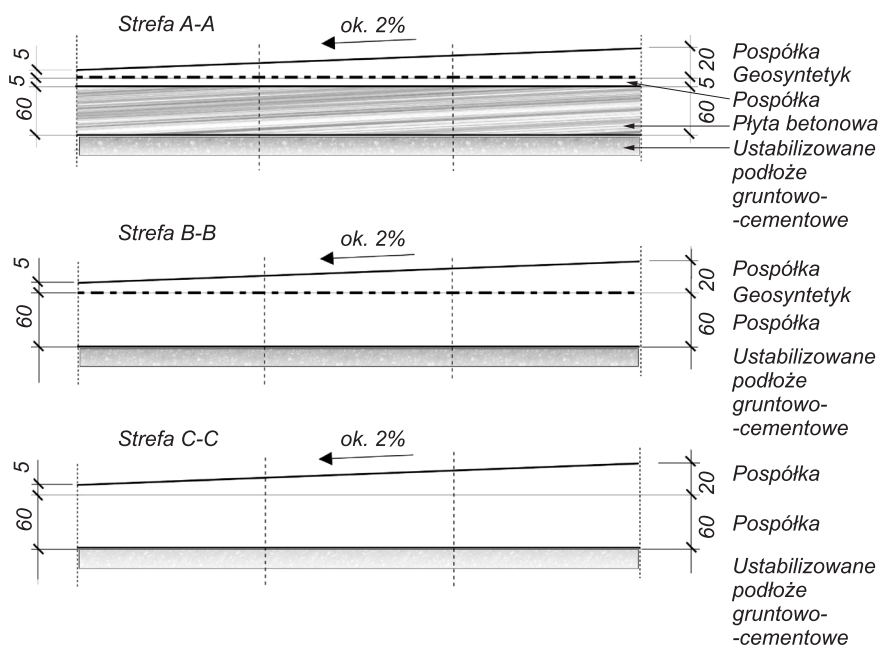
Rys. 5.9. Widok z prawego narożnika poligonowego poletka pomiarowego

W stosunku do pomiarów wstępnych poletko zostało poszerzone o jedną strefę 1,5 m, której podłoże stanowi dodatkowo wylana płyta betonowa, całkowicie sztywna, co w sposób istotny zmieniło warunki „podparcia” modelu gruntowej warstwy podłoża nawierzchni w tej strefie. Punkty oznaczone (*) określają poło-

żenie punktów pomiarów modułów odkształceń fazy przeprowadzonej wstępnie. Pomiar statycznych modułów odkształceń E_o określono w sposób opisany w poprzednim rozdziale, uzyskując średnio analogiczne wyniki.



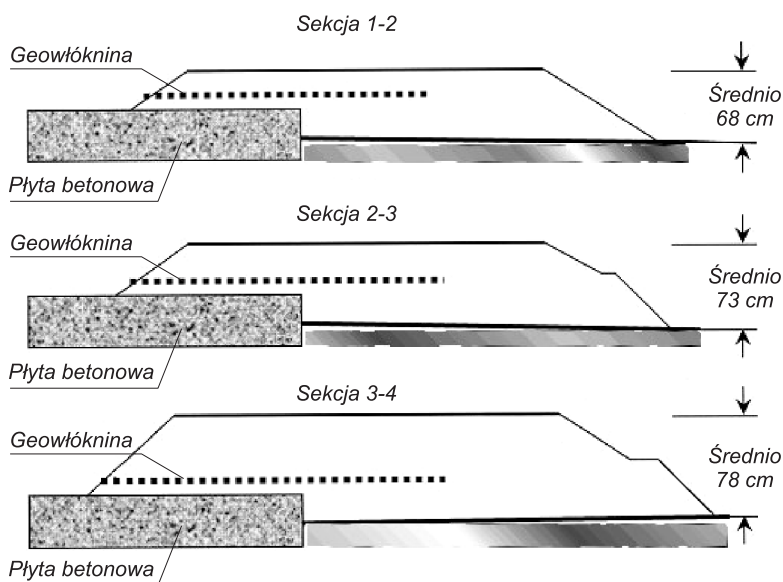
Rys. 5.10. Widok z lewego narożnika polygonowego poletka pomiarowego



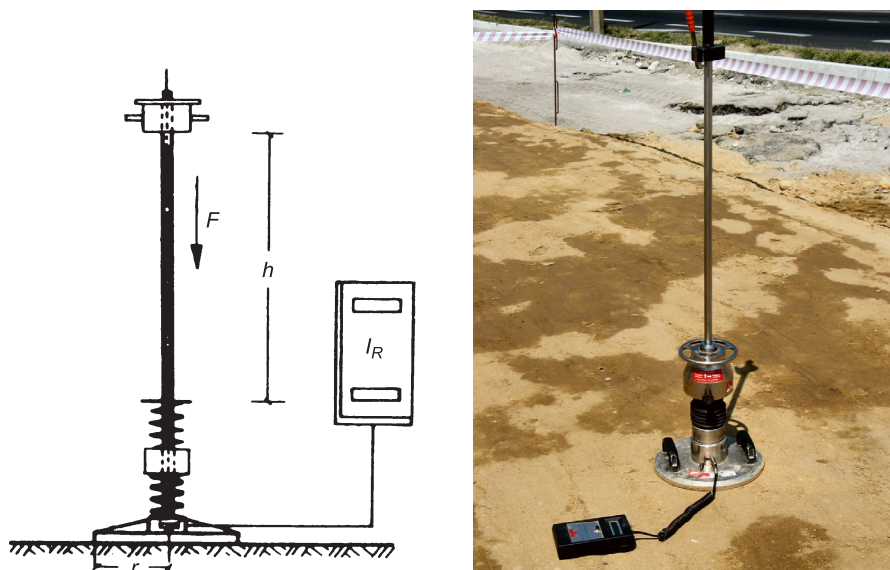
Rys. 5.11. Przekroje w strefach podłużnych poletka

Przy redukowanych co 5 cm grubościach pokrycia geosyntytyku dokonano pomiaru bezpośredniego, dynamicznego modułu odkształcenia E_d , lekką sondą dynamiczną typu ZFG 02 (rys. 5.13), zwaną też ugięciomierzem dynamicznym. Ugięciomierz dynamiczny pozwala na kontrolne, uzupełniające, pozanormowe (nieujęte w polskich normach) pomiary stanu podatności i nośności gruntów. Jest to podręczny i nowoczesny przyrząd, którego pomiar pozwala na dość szeroką interpretację wyników, w tym ustalanie takich parametrów warstw gruntowych,

jak wskaźnik i stopień zagęszczenia oraz dynamiczne moduły odkształcenia, zwanych ogólnie parametrami podatności warstw gruntowych. Mobilność tego sprzętu pozwala na powszechne jego zastosowanie. Należy zwrócić uwagę, że uzyskiwane za jego pomocą parametry dynamicznego modułu odkształcenia danej warstwy gruntowej są bardzo przybliżone.



Rys. 5.12. Przekroje poletka w poszczególnych sekcjach



Rys. 5.13. Lekka sonda dynamiczna ZFG-02

Interpretacja pomiarów uzyskiwanych za pomocą ugięciomierza dynamicznego powinna następować przy ścisłym powiązaniu z jego metryką skalowania. Niezależnie od znormalizowanych wymiarów i ciężaru poszczególnych części urządzenia pomiarowego, metryka skalowania dotyczy tylko ograniczonej ilości rodzajów gruntów, które nie zawsze odpowiadają gruntom warstwy konkretnie mierzonej. Powstające w ten sposób uśrednienia pomiaru mogą często prowadzić do podobnych wyników dla różnych gruntów w warstwie. Poza tym miarodajność wyników dynamicznych ugięć warstwy można przyjmować tylko dla warstw o grubości do 30 cm, czyli w przybliżeniu odpowiadającej średnicy płyty pomiarowej.

Na podstawie pionowej amplitudy osiadania płyty obciążonej dynamicznej s , zmierzonej podczas uderzenia, można według odpowiednich instrukcji obliczyć:

$$E_d = 1,5r \frac{\sigma}{s}, \quad (5.1)$$

gdzie: E_d – dynamiczny moduł odkształcenia [MPa],
 σ – średnia wartość obciążenia pod płytą [0,1 MN/m²],
 r – promień siły obciążającej [150 mm],
 s – amplituda osiadania [mm].

Przybliżoną zależność wtórnego modułu odkształcenia E_2 od modułu dynamicznego E_d , według [68], można opisać za pomocą równania:

$$E_2 \approx 600 \ln \frac{300}{300 - E_d} \quad (5.2)$$

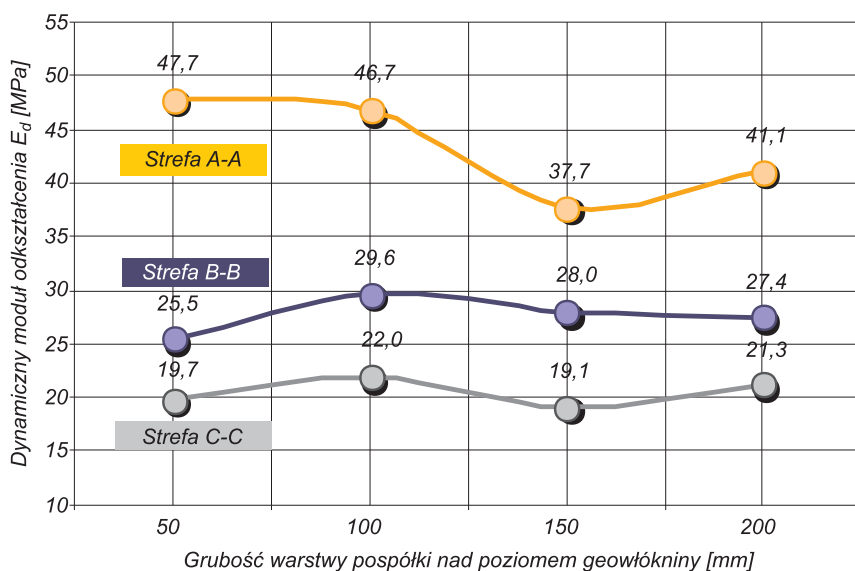
Zależność ma wysoki stopień przybliżenia i w przypadku prowadzonych pomiarów przeliczenia tego nie stosowano. Wynika z niego bowiem, że różne jakościowo rodzaje gruntów mogą wykazać taki sam wtórny moduł odkształcenia.

Rezultaty pomiaru parametru podatności

Przy zmiennej grubości pokrycia gruntem geowłókniny wykonano serię pomiarów E_d , uzyskując wyniki przedstawione na wykresach. Analogicznego pomiaru dokonano na podłożu całkowicie sztywnym (płyta betonowa) $E_d = \infty$, używając tego samego gruntu o tych samych grubościach warstw pokrycia geowłókniny i izolując ją każdorazowo od podłoża betonowego 5-centymetrową warstwą tego samego gruntu. W celach porównawczych zachowano strefę zmiennej grubości samego podłoża gruntowego. Wyniki zestawiono w tabelach i na wykresach. Uzyskane wyniki dla pierwszego stanu niedostatecznego zagęszczenia [I] przedstawiono tabelarycznie, w celu łatwiejszej i odpowiedniej ich interpretacji sporządzono wykresy (tab. 5.3 i 5.4, rys. 5.14, 5.15).

Tabela 5.3. Wyniki pomiaru dynamicznego modułu odkształcenia

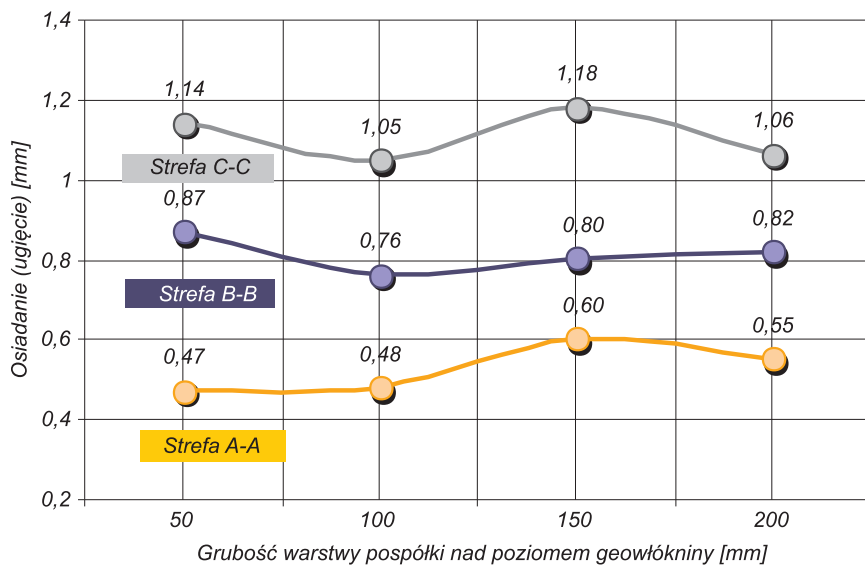
Grubość warstwy pospółki [mm]	Dynamiczny moduł odkształcenia E_d [MPa]		
	Strefa A-A	Strefa B-B	Strefa C-C
50	47,7	25,5	19,7
100	46,7	29,6	22,0
150	37,7	28,0	19,1
200	41,1	27,4	21,3



Rys. 5.14. Dynamiczny moduł odkształcenia – niedostateczne zagęszczenie wg stanu [I]

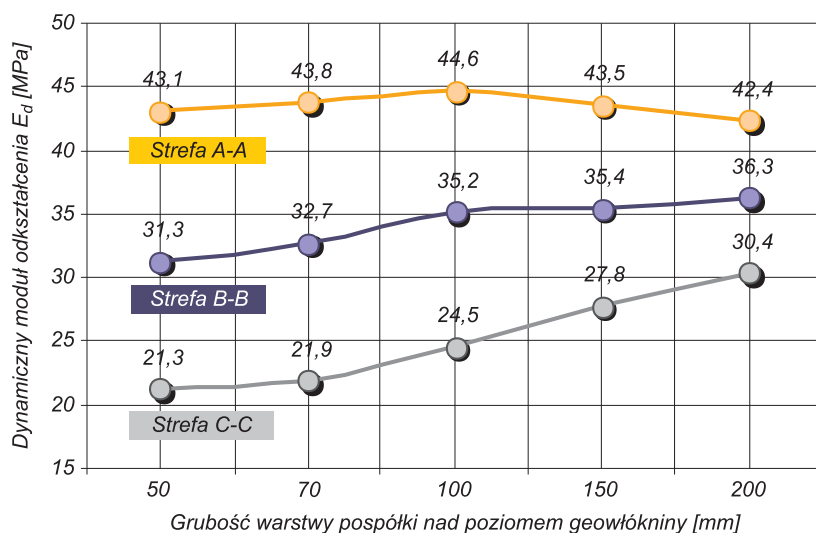
Tabela 5.4. Wyniki pomiaru średniego osiadania płyty

Grubość warstwy pospółki [mm]	Średnie osiadania płyty [mm]		
	Strefa A-A	Strefa B-B	Strefa C-C
50	0,47	0,87	1,14
100	0,48	0,76	1,05
150	0,60	0,80	1,18
200	0,55	0,82	1,06



Rys. 5.15. Średnie osiadania płyty wg stanu [I]

W drugim stanie zagęszczenia drugiej serii pomiarów, po dogęszczeniu, zwiększono liczbę pomiarów w poszczególnych strefach o jeden, przy 7-centymetrowej grubości pokrycia geowłókniny gruntem (tab. 5.5 i 5.6).



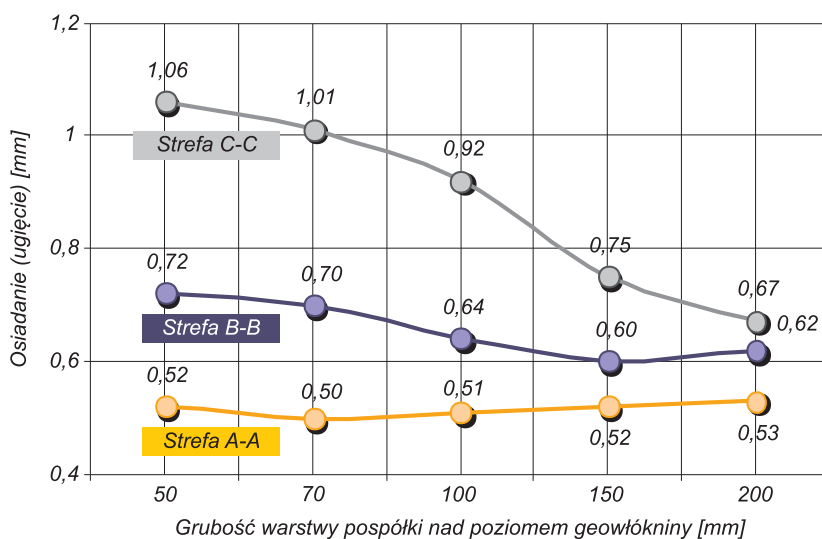
Rys. 5.16. Dynamiczny moduł odkształcenia – stan [II]

Tabela 5.5. Wyniki pomiaru dynamicznego modułu odkształcenia

Grubość warstwy pospółki [mm]	Dynamiczny moduł odkształcenia E_d [MPa]		
	Strefa A-A	Strefa B-B	Strefa C-C
50	43,1	31,3	21,3
70	43,8	32,7	21,9
100	44,6	35,2	24,5
150	43,5	35,4	27,8
200	42,4	36,3	30,4

Tabela 5.6. Wyniki pomiaru średniego osiadania płyty

Grubość warstwy pospółki [mm]	Średnie osiadania płyty [mm]		
	Strefa A-A	Strefa B-B	Strefa C-C
50	0,52	0,72	1,06
70	0,50	0,70	1,01
100	0,51	0,64	0,92
150	0,52	0,60	0,75
200	0,53	0,62	0,67



Rys. 5.17. Średnie osiadania płyty wg stanu [II]

5.3. ANALIZA I WNIOSKI Z UZYSKANYCH WYNIKÓW

Przeprowadzenie pomiarów zaprojektowanego i wykonanego, zmiennego układu warstw gruntowych modelu podłoża, tak co do ich grubości – od 5 do 20 cm warstwy pokrywającej geowłókninę, jak i struktury warstw podłoża, nie pozwala na ich bezpośrednie porównywanie. Zbyt mała liczba pomiarów eliminuje też możliwość interpretacji statystycznej. Odnośne wnioski co do przydatności pomiaru statycznego modułu odkształcenia do ocen zakresu wzmocnienia badanego modelu podłoża gruntowego jedną warstwą geotekstylną, zostały przedstawione w rozdziale poprzednim. Mając na uwadze jeden z celów badań, to jest ustalenie m.in. efektu wzmacniającego zastosowanej geowłókniny, odpowiednie zestawienie uzyskanych wyników pomiarów E_d , w szczególności w strefach A-A, B-B i C-C poszczególnych stanów zagęszczeń, pozwala jednak na pewne uogólnienia. W zestawieniu wyników nie przedstawiono wszystkich rezultatów uzyskanych w trakcie pomiarów oraz nie uniknięto możliwych błędów pomiaru wynikających z dokładności odczytów, który w szczególności przy E_d może przekraczać nawet ± 2 MPa. Znacznie większy błąd tego pomiaru występuje przy przeliczeniach E_d na wskaźniki zagęszczenia I_s lub inne charakterystyki statyczne, których wyliczenia nie przedstawiano w niniejszym opracowaniu, bowiem ich wyliczenie mija się z celem. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i wyników zestawionych na rysunkach 5.14, 5.15, 5.16, 5.17 można wyciągnąć kilka wniosków:

1. Efekt wzmocnienia gruntowego układu warstw jedną warstwą geowłókniny uznać należy za istotnie wyraźny, aczkolwiek nie w pełni opisany parametrami wpływającymi na zakres tego wzmocnienia. Jeśli pewną miarą nośności może być podatność mierzona dynamicznym modułem odkształcenia, to przyrost nośności, czyli zmniejszona podatność jest widoczna w stosunku do warstwy z geowłókniną (krzywe strefy B-B) w stosunku do warstwy bez geowłókniny (krzywe strefy C-C).
2. Sztywne podłoże betonowe gruntowych warstw podłoża nawierzchni drogowych całkowicie redukuje wpływ jednej warstwy geowłókniny na podatność podłoża (krzywe strefy A-A). W stanie [I] ($I_s = 0,97$) i stanie [II] ($I_s = 0,98$) zwiększenie podatności następuje jedynie w wyniku zwiększenia grubości warstwy niezagęszczonego dostatecznie gruntu, stanowiącej przekrycia geowłókniny gruntem.
3. W przypadku układu warstw samego gruntu występuje niemal pełna proporcjonalność pomiędzy rosnącą grubością warstwy gruntu a wzrastającą jego podatnością. Największą podatność wykazuje 60-centymetrowa warstwa gruntu modelu podłoża zbrojonego, przy pierwszym stanie niedogęszczenia, a efekt wzmocnienia zbrojeniem jest całkowicie zredukowany.
4. Pomierzone wartości dynamicznych modułów odkształcenia są miarodajne w zakresie jakości sporządzonego podłoża nawierzchni, które w tym wypadku

jest tylko modelem i nie spełnia wymagań normowych technicznej konstrukcji podłoża nawierzchni drogi samochodowej lub szynowej. Pomierzone E_d dowodzą też niepełnych stanów zagęszczeń i nie najwyższej jakości materiału gruntowego użytego do zestawienia modelowego układu. Stan ten był zamierzony w celu wypełnienia badań zmierzających do ustalenia zakresu i wpływu grubości otuliny gruntowej na wzmacniającą funkcję geowłóknin w warstwach gruntów piaszczystych.

5. Dla każdego układu modelowego warstw istnieje pewna „optymalna” grubość gruntowej warstwy pokrycia warstwy geowłókniny, przy której uzyskujemy relatywnie znaczny efekt wzmocnienia. Wówczas uzyskujemy największą mobilizację tarcia geowłókniny o grunt i jego podłużnej sprężystości. W przypadku przeprowadzonych pomiarów i danego rodzaju gruntów, jakich użyto w pomiarach, jest to pokrycie warstwą od 5 do 7 cm, na co najmniej 5-centymetrowej warstwie tego samego gruntu. Potwierdzenie tej hipotezy, w odniesieniu do innych rodzajów gruntów piaszczystych o różnorodnym uziarnieniu i różnych gramaturach geotekstyliów, wymaga oddzielnego i szerszego zakresu pomiarów.
6. W przypadku gdy miarą podatności jest dokonany pomiar (VSS) statyczny modułu odkształcenia E_2 , a więc przy obciążeniach wolnozmiennych, zmniejszenie podatności, czyli efektu wzmocnienia modelu gruntowego podłoża nawierzchni geowłókniną jest jeszcze bardziej trudne do określenia.

6. GEOTECHNICZNE WŁAŚCIWOŚCI FIBROGRUNTU WZMACNIAJĄCEGO PODŁOŻA NAWIERZCHNI

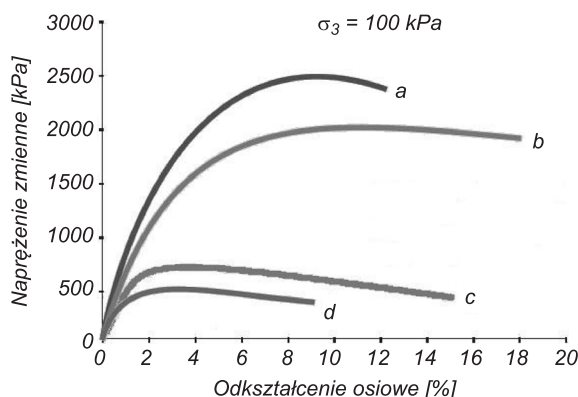
6.1. WPROWADZENIE I PRZEGLĄD BADAŃ NAD FIBROGRUNTAMI

Mianem fibrogruntów określa się mieszanki gruntowe, których jednym ze składników są fibry jako drobnoelementowy materiał, na ogół sporządzony z tworzyw sztucznych. Specyficzne własności fizyczne fibr i zastosowania ich jako komponentu mieszanek z gruntem wyznacza określenie ich jako geofibr. Pierwsze testy laboratoryjne nad zastosowaniem geofibr 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 [26]. Później prowadzono badania laboratoryjne w różnych ośrodkach badawczych Kanady, Chin i Indii. Były to pierwsze testy w aparacie bezpośredniego ścinania jednego rodzaju piasków zmieszanych z geofibrami wy-

konanymi z syntetyków, metalu i materiałów 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 geofibr, elastyczności poszczególnych rodzajów geofibr oraz od ich wymiarów określających powierzchnię czynną tarcia w gruncie. Koncepcja zastosowania geofibr w ulepszaniu jakości gruntów została zaczerpnięta z doświadczeń wytwarzania fibrobetonu. Rodzaj i jakość używanych do testów geofibr odbiegała jednak znacznie od współczesnych wymagań dla włókien fibrowych do betonu, opisywanych na przykład w normie [55]. Wynika to choćby z braku chemicznych procesów wiązania, które zachodzą w przypadku betonów.

Znaczące i rozpoznawcze badania laboratoryjne gruntów z różnymi formami geosyntetyków w aparacie trójosiowego ściskania, w tym i fibrogruntów, przedstawiono w publikacjach [38] i [39]. W wyniku przeprowadzonych testów uzyskano przekonujące i jednoznaczne rezultaty, przedstawione na rysunku 6.1. Wyższa wytrzymałość na ściskanie w aparacie trójosiowym, a tym samym na ścinanie fibrogruntu od gruntu bez żadnych zbrojeń i ulepszeń, była ewidentna, aczkolwiek dla innych form zbrojenia gruntów geosyntetykami jest znacznie większa.

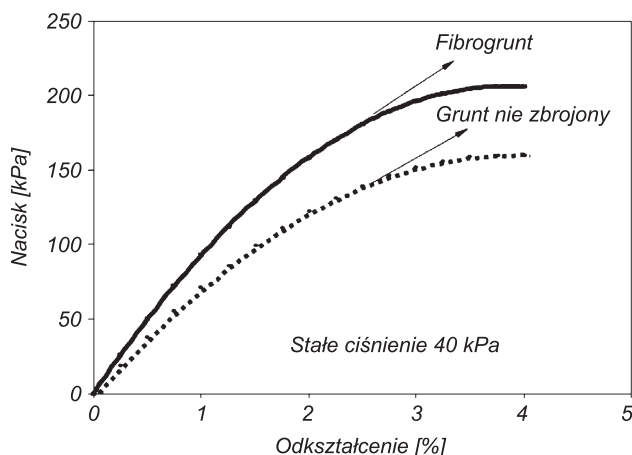


Rys. 6.1. Wyniki testu w aparacie trójosiowego ściskania próbek o zawartości różnych form geosyntetyków – wg [38]: a) – osiem warstw geotekstyliów, b) – grunt w woreczku geotekstylnym, c) fibrogrunt, d) grunt niezbrojony

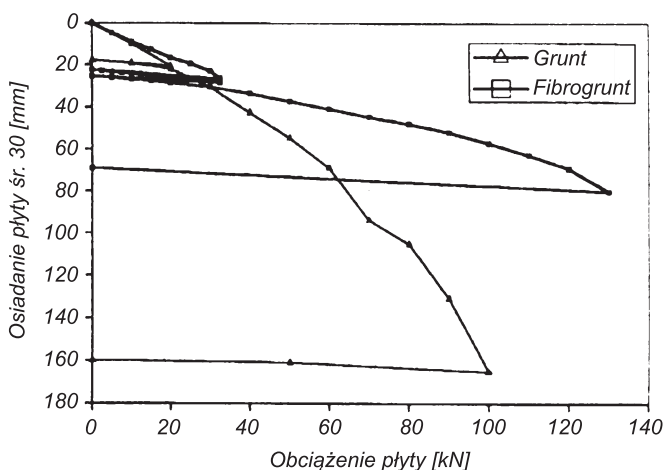
Badania zreferowane w pracy [38] były rozwinięciem programu badań opisanego w pracy [39], którego wyniki okazały się na tyle interesujące, że kontynuacja tych badań nad efektem wzmocnień za pomocą różnych form zastosowań geosyntetyków została zapowiedziana w tym ośrodku jako przedmiot badań na dalsze lata. W przedstawionych pracach [38, 39, 60] zastosowano geofibry elastyczne, poliestrowe o długości ok. 12 mm i szerokości ok. 2 mm, przy czym w dyskusji wyników tych badań podkreślono, że wymiary geofibr 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 geofibr, uziarnienia gruntu oraz od sposobu mieszania geofibr z gruntem. Wydajność w polepszeniu relacji naprężenie-odkształcenie jest istotna, lecz szersza interpretacja wyników była ograniczona do specyficznych warunków testu nastawionego na określenie skuteczności stosowania poszczególnych rodzajów geotekstyliów.

W badaniach [39] jako grunt stosowano piasek drobny o $\rho = 1,65 \text{ g/cm}^3$ i $C_u = 3,6$. Podobne wyniki, świadczące o wzmacniającej funkcji geofibr w gruncie, uzyskano w pracy [19]. Odształcalności próbek fibrogruntu, określane w aparacie trójosiowego ściskania i referowane w pracy [60], przedstawiono na rysunku 6.2.



Rys. 6.2. Porównanie odkształcalności próbek gruntu i fibrogruntu badanych aparacie trójosiowego ściskania – wg [60]



Rys. 6.3. Osiadanie płyty obciążającej warstwę gruntu i fibrogruntu – wg [39]

W pracy [74] użyto geofibr włóknistych o długości ok. 15 mm i przeciętnej średnicy 0,25 mm, mieszając je z piaskiem drobnym o takich samych wymiarach próbek jak określono wyżej.

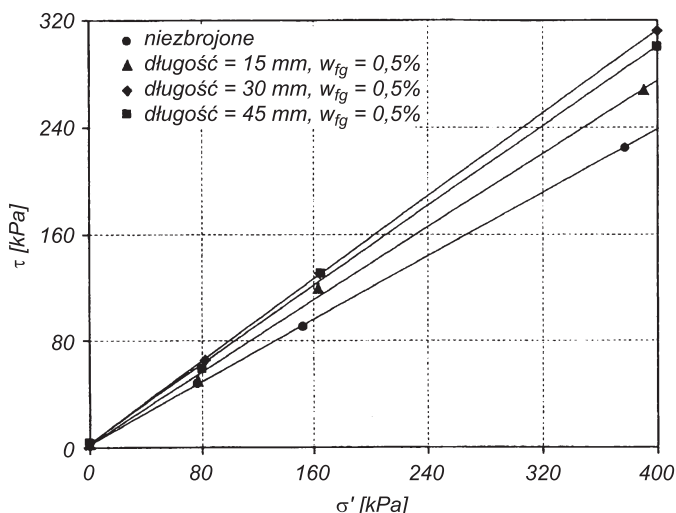
W dalszych badaniach określano także parametry mechaniczne fibrogruntów w formie struktur warstwowych. Stosując obciążenie warstw gruntu ułożonych na sztywnym podłożu płytą o średnicy 30 mm, uzyskano wyniki świadczące o mniejszym osiadaniu od warstw wykonanych z fibrogruntu w stosunku do warstw sporządzonych z tego samego gruntu bez dodatków (rys. 6.3).

6.2. REZULTATY LABORATORYJNYCH BADAŃ FIBROGRUNTÓW

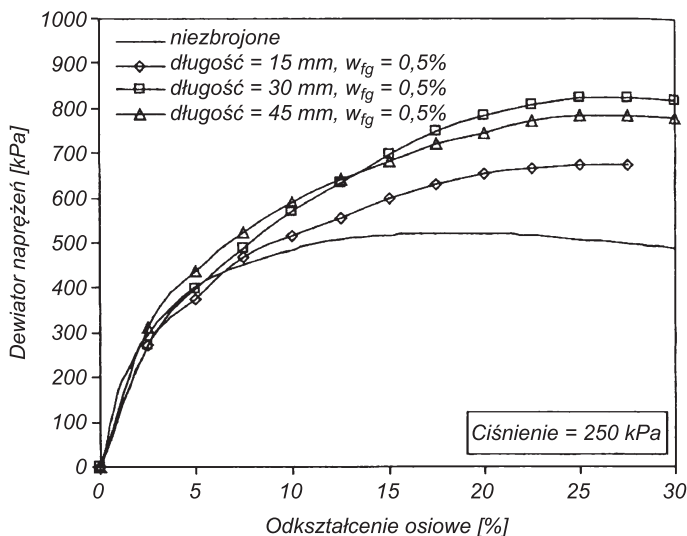
Na podstawie wielu przeprowadzonych doświadczeń stwierdzono także skuteczność stosowania geofibr jako składnika gruntów ulepszonych spoiwami hydraulicznymi. Zadowalające rezultaty badań uzyskiwano dla mieszanek różnych gruntów i geofibr z dodatkiem wapna, cementu oraz lokalnie występującymi popiołami lotnymi [8, 27, 46, 70]. W tych przypadkach funkcja zbrojenia geofibrowego była bardzo wyraźna i polepszona o zachodzące w takich mieszkankach procesy wiązania spoiwami hydraulicznymi. Zakres możliwych do wzmocnienia rodzajów gruntów był jednak nieco ograniczony przez wymagania przydatności do sporządzania cementogrunty i stabilizacji popiołami lotnymi. Wpływ dodatków różnych spoiw hydraulicznych na własności fibrogruntów może być odrębnie analizowany. W badaniach opisanych w pracy [46] do zmodyfikowanego testu *Proctora* użyto piasku pylastego, popiołów ze spalania węgla kamiennego oraz geofibr wykonanych z polipropylenu o długości ok. 20 mm i włókien sizalu o długości ok. 80 mm. Stosunek długości włókien do średnicy – aspekt kształtu a_f – wynosił ok. 400, a maksymalny dodatek geofibr 2% w stosunku do ciężaru suchego piasku. W pracy [19] do badań użyto geofibr propylenowych o długości ok. 12 mm, mieszając je jedynie z pyłem ilastym oraz pyłem ilastym i cementem. Przeprowadzano testy porównawcze zagęszczalności próbek oraz wytrzymałości na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania. Według [79] sprawdzano wpływ zbrojenia geofibrami na pęcznienie spoistych gruntów ilastych w edometrach, dodając maks. 0,5% geofibr w stosunku do ciężaru gruntu. Zastosowano propylenowe geofibry o szerokości ok. 2 mm i długościach od 15 do 90 mm.

Opracowaniu i stosownym analizom podlegały nie tylko własności samych mieszanek fibrogruntowych, lecz także dobór rodzaju i własności geofibr, w nawiązaniu do lokalnych warunków możliwości ich produkcji. Potwierdzają to zdecydowanie wyniki obszernych badań opublikowane w pracy [20]. Laboratoryjne testy fibrogruntów z piaskiem pylastym w aparacie trójosiowego ściskania wykazały wzrost wytrzymałości próbek na ścinanie. W badaniach [20] testowano próbki w warunkach odpływu wody i bez odpływu, z zawartością wagową geo-

fibr w_{fg} 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 – stosunku długości do średnicy, 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 geofibr uwidocznione zostały na rysunku 6.4.



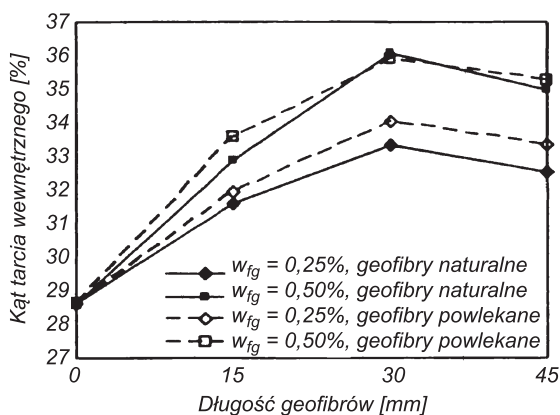
Rys. 6.4. Wytrzymałość na ścinanie próbek z mieszanek gruntowych zbrojonych geofibrami o różnej długości – wg [20]



Rys. 6.5. Krzywe naprężenia-odkształcenia z badań w aparacie trójosiowym z geofibrami powlekanyymi – wg [20]

Długość i kształt geofibr ma również znaczący wpływ na parametry wytrzymałościowe próbek fibrogruntów określane w aparacie trójosiowym (rys. 6.5). Wydłużone kształty geofibr tworzą większą powierzchnię trącą w ośrodku gruntowym, polepszając własności mechaniczne mieszanki fibrogruntowej.

Geofibry użyte w badaniach [20], 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 geofibr 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. 6.6 i 6.7).



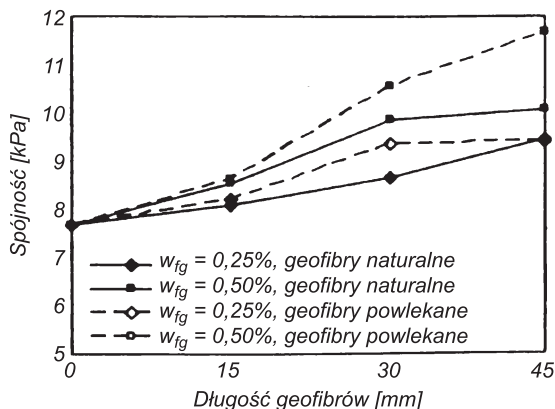
Rys. 6.6. Wpływ długości i zawartości geofibr na kąt tarcia wewnętrznego fibrogruntów – wg [20]

Znacznie wzrasta też spójność mieszanki fibrogruntowej z zastosowaniem geofibr powlekanych tworzywem powodującym „szorstkość” i „szczepność” ścianek elementów geofibr.

Spójność wszystkich mieszanek wzrasta wraz ze wzrostem długości geofibr, a najwięcej dla geofibr powleczonych przy $w_{fg} = 0,5\%$ (rys. 6.7).

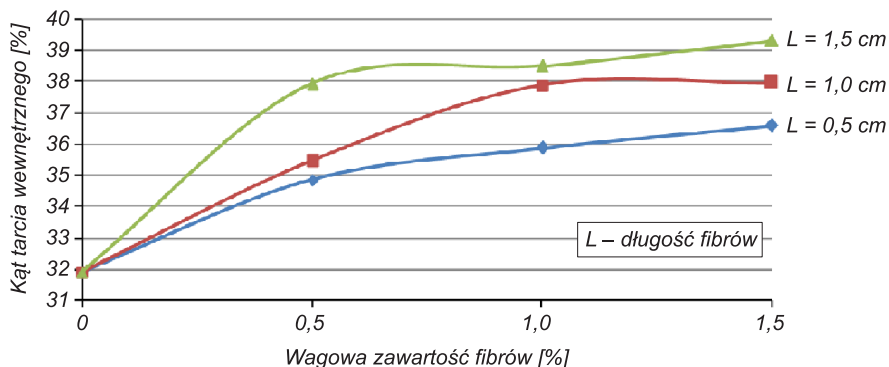
Z badań [20] wynika jednoznacznie, że ten rodzaj fibrogruntu wykazuje ewidentny wzrost parametrów wytrzymałościowych. Wnioski te odnoszą się wyłącznie do gruntów, dla których można określić zarówno kąt tarcia wewnętrznego, jak i spójność. Do takich gruntów należą bardzo często w warunkach krajowych piaski podłoża rodzimego, czyli piaski niekopalniańskie. Fakt ten dodatkowo przemawia za celowością zbrojenia takich gruntów geofibrami, zamiast ich wymiany na piaski o dobrych parametrach wytrzymałościowych. Zbrojenie piasku pylastego $w_{fg} = 0,5\%$ dodatkiem powlekanych geofibr o długości 30 mm powoduje 25% wzrost kąta tarcia wewnętrznego i 35% wzrost spójności w warunkach bez odpływu wody. Badania prowadzone w ostatnim okresie wskazują

na znaczenie wpływu kształtu geofibr na korzystne zmiany parametrów gruntów piaszczystych.



Rys. 6.7. Wpływ długości i zawartości geofibr na spójność fibrogruntów – wg [20]

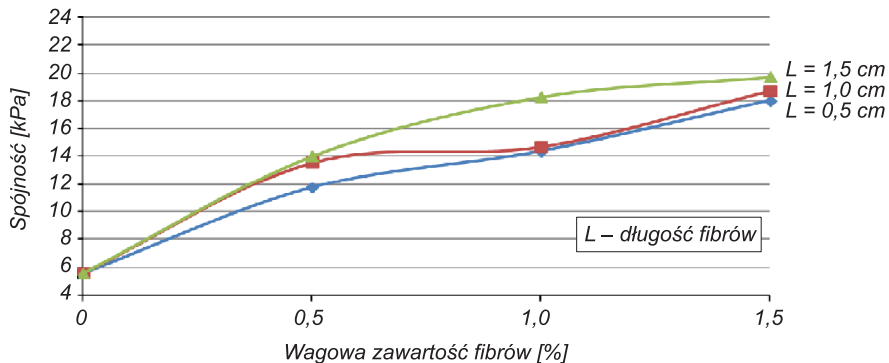
W badaniach [10] wykazano istotny wpływ długości geofibr na kąt tarcia wewnętrznej mieszanki oraz spójność fibrogruntu (rys. 6.8 i 6.9). Wzrost długości pojedynczych geofibr prowadzi do polepszenia wymienionych parametrów geotechnicznych danego rodzaju gruntu, stanowiącego w tym wypadku piasek pochodzenia pustynnego, czyli relatywnie równoziarnisty. Jest to bezpośredni wpływ tzw. współczynnika aspektu kształtu geofibr a_f , który dla najdłuższych włókien osiągał 45. Badania opisane w pracy [10] dla danego jednego rodzaju gruntu potwierdziły też ogólną tendencję polegającą na tym, że procentowy wzrost zawartości fibrogruntów powoduje wzrost jakościowy parametrów fibrogruntów.



Rys. 6.8. Wpływ długości geofibr na kąt tarcia wewnętrznego fibrogruntu – wg [10]

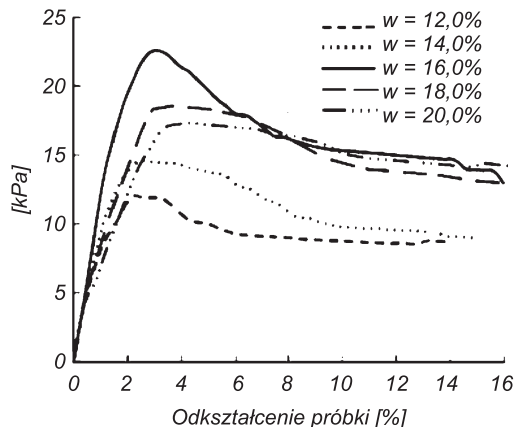
Omawiane badania [10] miały również pewien kontekst proekologiczny. Polegał on na tym, że geofibry były przygotowane z materiałów odpadowych produkcyjnych zakładów petrochemicznych zlokalizowanych w pobliżu obszarów

pustynnych. Oznacza to, że pozytywne testy laboratoryjne fibrogruntów zestawionych z lokalnie występujących materiałów, pozwalają na efektywne zagospodarowanie odpadów poprodukcyjnych, które i tak są składowane w wyznaczonych strefach pustynnych.



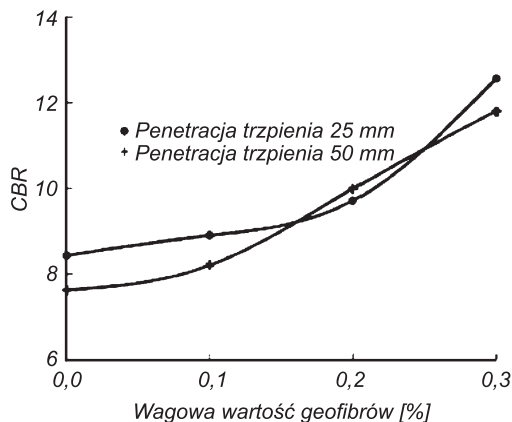
Rys. 6.9. Wzrost spójności fibrogruntu przy wzroście długości fibr – wg [10]

Badania przeprowadzone przez Nataraja i McManisa, przedstawione w publikacji [46], były ukierunkowane na wykorzystanie geofibr w budowie dróg. Stąd też określano wpływ zawartości jednego rodzaju przygotowanych geofibr na właściwości gruntów występujących w określonym miejscu budowy. Przy stałej zawartości geofibr $w_g = 0,5\%$ określono odkształcalność próbek fibrogruntu w zależności od wilgotności gruntu (rys. 6.10).

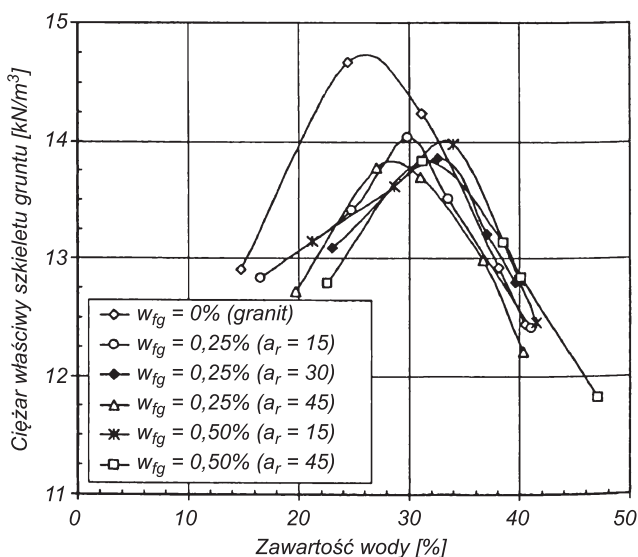


Rys. 6.10. Odkształcalność próbki fibrogruntu w zależności od wilgotności w – wg [46]

Potencjalną nośność tych samych gruntów badano, określając kalifornijski wskaźnik nośności CBR . Uzyskane wyniki i w tym przypadku potwierdziły proporcjonalny wzrost wskaźnika nośności w odniesieniu do wzrastającej zawartości wagowej geofibr w mieszance (rys. 6.11).

Rys. 6.11. Wzrost CBR dla próbek piasku ilastego – wg [46]

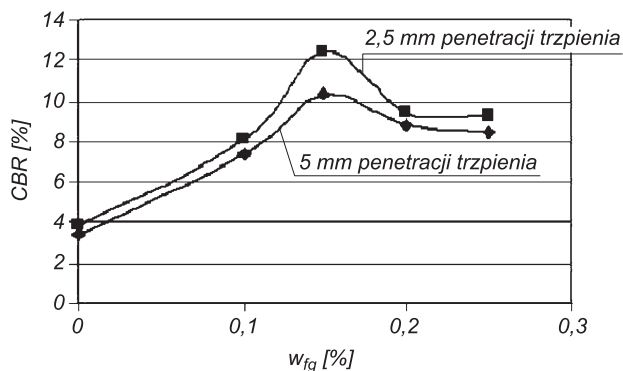
W tym samym kierunku prowadzono też badania opisane w pracy [11], na podstawie których można przytoczyć wykresy przedstawione na rysunku 6.12.



Rys. 6.12. Testy Proctora dla różnych typów mieszanek – wg [11]

Pod uwagę wzięto też wyniki oznaczeń wskaźnika CBR , według pracy [8], w których określono zależność wskaźnika CBR od koncentracji geofibr w mieszance w_{fg} , dla penetracji trzpienia 2,5 mm i 5 mm (rys. 6.13). 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.



Rys. 6.13. Zależność wskaźnika CBR od koncentracji geofibr w_{fg} – wg [19]

6.3. OGÓLNE UWAGI O PRZEDSTAWIONYCH BADANIACH

Z przeglądu przytoczonych badań i doświadczeń oraz prac [15, 64, 74, 75] wynika, że do wszelkiego rodzaju prób i pomiarów laboratoryjnych używano bardzo szerokiego zakresu odmian gruntów piaszczystych. 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 mieszkankach spoiw hydraulicznych w postaci cementu i popiołów lotnych. Na ogół stosowano zasadę doboru odpowiedniego rodzaju geofibr do danego rodzaju gruntu. Generalnie jednak, rodzaj mieszanek fibrogruntowych uzależniony jest od lokalnych możliwości pozyskiwania składników. Różnorodność geofibr używanych w testowych badaniach laboratoryjnych pozwala na sformułowanie następujących uwag:

- Geofibry wykonane są głównie z tworzyw syntetycznych, polipropylenu, polichlorku winylu, poliestrów i elastycznych, nierozkładalnych odpadów poprodukcyjnych; w mniejszym zakresie występują również geofibry metalowe i siłowe (włókna roślin tropikalnych), o wydłużonych kształtach regularnych i nieregularnych w formie włókien i makrowłókien oraz drobnych elementów.
- Stosowane są zmienne i różne wymiary pojedynczych elementów geofibr od włóknistych, o średnicy 0,2 mm i długości 100 mm, do drobnych elementów płaskich, o średnicy lub szerokości od 1 mm do 3 mm i długościach do 80 mm.
- Geofibry włókniste są stosowane jako dodatki do gruntów mało spoistych i z dodatkami spoiw hydraulicznych (cement, popioły), zaś geofibry drobnoelementowe stosowane są do gruntów niespoistych, o dobrych własnościach mieszania i zagęszczania.

- W mieszankach fibrogruntowych ze spoiwami hydraulicznymi stosuje się odpowiednie proporcje w stosunku do wagi gruntu piaszczystego mało spoistego, a współczynnik zawartości (koncentracji) geofibr, stanowiący procentową zawartość geofibr, określa się jako:

$$w_{fg} = \frac{W_f}{W_g} \cdot 100\% \quad (6.1)$$

gdzie: w_{fg} – wagowy współczynnik zawartości geofibr w mieszance [%],

W_f – ciężar geofibr w zadanej próbce mieszanki [G],

W_g – ciężar próbki gruntu [G].

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

$$v_{gf} = \frac{V_f}{V_g} \cdot 100\% \quad (6.2)$$

gdzie: v_{gf} – objętościowy współczynnik koncentracji geofibr w mieszance [%],

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

V_g – objętość próbki gruntu [cm³].

- Charakterystykę kształtu i wymiarów geometrycznych geofibr 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:

$$a_f = \frac{l}{b} \quad (6.3)$$

gdzie: a_f – wskaźnik kształtu geofibr [–],

l – przeciętna długość geofibr [mm],

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

Selekcja i dobór wymiarów geometrycznych geofibr powinien uwzględniać wskaźnik aspektu kształtu geofibr a_f . Oznacza to, że im wyższa jest zawartość frakcji pylastych w danym gruncie piaszczystym, tym elementy geofibr powinny być cieńsze i dłuższe. Dotychczas w różnych badaniach z użyciem fibrogruntów stosowano $a_f \langle 10, 15, 30, 45, 60, 100, 200, 400 \rangle$. Można też zauważyć, że dla $a_f < 30$ stosuje się proporcje w stosunku do objętości gruntu, określając v_{gf} według wzoru (6.2), a dla $a_f > 30$ proporcje w stosunku do ciężaru gruntu, określając w_{gf} według wzoru (6.1). W testach laboratoryjnych wymiary geofibr na ogół dostosowane są do dominujących frakcji gruntów, rodzaju pozostałych komponentów mieszanek oraz do wymiarów badanych próbek fibrogruntów. W mieszankach geofibr z gruntem i cementem oraz geofibr z gruntem i popiołem lotnym stosuje się na ogół fibry

syntetyczne włókniste, $a_f \langle 30-50 \rangle$, o wymaganiach nieco bardziej zbliżonych do podanych w normie [55]. Niemniej wymiary samych geofibr dobierano w kontekście przewidywanych konkretnych zastosowań technicznych i możliwości uzyskania poszczególnych rodzajów geofibr w warunkach lokalnych.

6.4. 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. Tego typu badaniom poświęcone są prace [27, 59, 60]. Potencjalne zastosowania wynikały zarówno z doboru odpowiednich gruntów, jak i możliwości pozyskania odpowiednich geofibr jako składnika testowanych mieszanek. Pewnym wskazaniem przy opracowaniu założeń własnego programu badań były nie tylko przewidywane zastosowania mieszanek fibrogruntowych, lecz także wyniki wykonywanych typowych badań gruntów podłoża nawierzchni drogowych, gdzie podstawowe znaczenie mają parametry zagęszczenia, odkształcalności i nośności gruntów.

Próby rozpoczęto od wykonania badania zmian wilgotności optymalnej według testu *Proctora*, zgodnie z normą [52]. Niektóre z wyników tych badań zamieszczano na bieżąco w materiałach seminaryjnych. Próbki mieszanek fibrogruntowych sporządzono dla różnych współczynników objętościowych koncentracji geofibr v_{fg} według wzoru (6.2) zmieszanych z gruntem piaszczystym występującym w przeciętnych warunkach w podłożach gruntowych budowli drogowych w warunkach krajowych w regionie mazowieckim. Jako materiał podstawowy mieszanki do badań laboratoryjnych przyjęto piasek średnioziarnisty, którego właściwości określono według normy [52]: 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 jednorodności uziarnienia $C_U \approx 5$. Geofibry sporządzono ze zużytych pociętych pojemników i taśm z tworzyw polipropylenowych oraz polichlorku winylu o podłużnych, płaskich, nieregularnych kształtach zbliżonych do prostokąta, o największym wymiarze 25 mm, a najmniejszym 2 mm i wskaźniku kształtu geofibr $a_f \approx 10$ do 12. Strukturę przygotowanych geofibr, ich kształt i wymiary przedstawiono na rysunku 6.14.

Należy zaznaczyć, że przygotowane geofibry były wykonane z surowców wtórnych, produktów z różnorodnych tworzyw syntetycznych (*PCV*, *PPV* itp.) o różnym przeznaczeniu użytkowym (butelki, pojemniki, talerze, taśmy pakowe itp.), o niewielkim utrudnieniu ręcznego cięcia. Taki sam rodzaj geofibr można pozyskać jako odpady poprodukcyjne wymienionych wyrobów bądź też przez maszynowe cięcie posortowanych surowców wtórnych. Wspólną cechą fizyczną

uzyskanych w ten sposób geofibr powinna być odporność i brak biodegradacji w naturalnym środowisku gruntowym.



Rys. 6.14. Struktura i wymiary geofibr

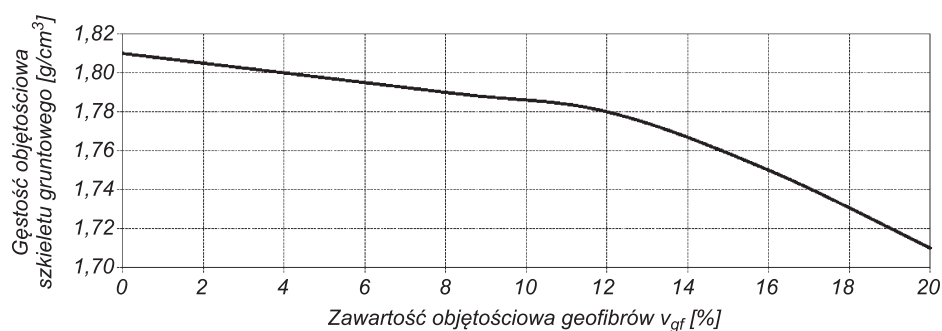


Rys. 6.15. Struktura przygotowanego fibrogruntu

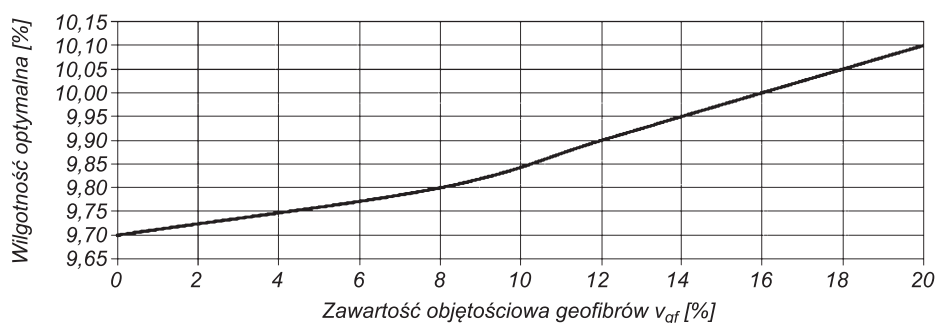
Użyte geofibry wytworzono w taki sposób, aby ich wymiary były pewnym kompromisem pomiędzy wymiarami fibr włóknistych a fibrami uzyskiwanymi z odpadów lub wtórnych produktów z tworzyw poliwinylowych i poliestrowych,

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 użyte jedynie jako uboczne formy zastosowań lub jako odpady poprodukcyjne. Takie założenie pozwala na znaczne oszczędności i czyni przedsięwzięcie bardzo opłacalnym. Ten sposób wzmocnienia i ulepszenia parametrów nośności warstw podłoża gruntowych wykorzystywany był w większości omówionych prac.

Sporządzono próbki mieszanek fibrogruntowych z objętościową zawartością $v_{gf} = 8, 12, 16$ i 20% geofibr w mieszance. Strukturę sporządzonej mieszanki fibrogruntowej, w stanie luźnym i zagęszczonym, przedstawiono na rysunku 6.15. Na próbkach wykonano badania *Proctora* w wersji zmodyfikowanej według normy [53], określając maksymalne gęstości objętościowe szkieletu gruntowego ρ_{ds} i wilgotności optymalne w_{opt} dla różnej zawartości objętościowej geofibr. Uzyskane wyniki oznaczeń poszczególnych pomiarów przedstawiono bezpośrednio na rysunkach 6.16 i 6.17.

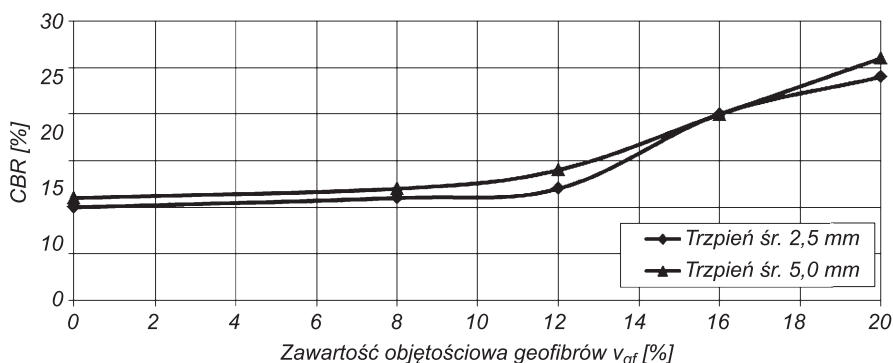


Rys. 6.16. Zmiany maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego dla różnych zawartości geofibr



Rys. 6.17. Zmiany wilgotności optymalnej fibrogruntu dla różnych zawartości geofibr

Na rysunku 6.18 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 geofibr w gruncie. Występują też pewne analogie wyników do wyników testów przedstawionych wcześniej. Według wielu przedstawianych uprzednio prac, wyniki oznaczeń *CBR* wskazują też polepszającą się mrozoodporność mieszanek fibrogruntowych, co ma istotne znaczenie dla sugerowanego zastosowania w warstwach gruntowych podłoży nawierzchni dróg samochodowych i szynowych.



Rys. 6.18. Kalifornijski wskaźnik nośności *CBR* dla różnych zawartości geofibr

Bezpośrednie wyniki testów laboratoryjnych mieszanek fibrogruntowych, przedstawione na wykresach na rysunkach 6.16, 6.17 i 6.18, wskazują na istotne polepszenie własności fizycznych i mechanicznych fibrogruntów w stosunku do samych gruntów. Oznacza to wzrost jakości i mniejszą odkształcalność wbudowanej w układ podłoża nawierzchni warstwy konstrukcyjnej. W szczególności należy zwrócić uwagę na następujące okoliczności:

1. Redukcja maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego mieszanek ρ_{ds} wraz ze wzrostem zawartości geofibr w gruncie rokuje wzrost zdolności zagęszczania fibrogruntów jako warstwy ulepszonego gruntu, skutecznie wzmacniającej podłoża gruntowe.
2. Wzrost w_{opt} proporcjonalnie do objętościowej zawartości geofibr 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 geofibr jednoznacznie wskazuje na polepszenie nośności, filtracji i mrozoodporności warstwy podłoża gruntowego wykonanej z fibrogruntów.

6.5. ZASTOSOWANIA FIBROGRUNTÓW W PODŁOŻACH NAWIERZCHNI DRÓG LĄDOWYCH

Na podstawie kompleksowego przeglądu informacji zawartych w piśmiennictwie technicznym i portalach internetowych można stwierdzić, że różne formy geofibr znajdują wielorakie zastosowanie w budownictwie infrastrukturalnym. W Indiach tradycyjne formy geofibr, stanowiące odpady obróbki drewna oraz łupiny orzechów kokosowych, są używane do sporządzania biodegradowalnych mat, które przez co najmniej kilka sezonów służą do antyerozyjnego zabezpieczania skarp budowli ziemnych. Po biologicznym rozkładzie stanowią podłoże dla umacniającego wzrostu traw i bylin. W tych samych regionach taki rodzaj fibr używany jest do zbrojenia cegieł i bloczków z gliny i ilów jako powszechnie stosowany materiał budowlany. Kanadyjskie doświadczenia prowadzą do zastosowań rozdrobnionych, zużytych opon samochodowych, określanych jako parafibry. Fibry propylenowe, powstające z odpadów przemysłowych, mają zastosowanie w ulepszaniu własności mechanicznych piasków pustynnych w Arabii Saudyjskiej i Algierii. Na uwagę zasługuje też rozpowszechniony w Japonii sposób zabezpieczania skarp geofibrami włóknistymi w rejonach zagrożeń sejsmicznych. Specjalnie przygotowane z odpadowych tworzyw sztucznych fibry drobnoelementowe są stosowane w Wielkiej Brytanii jako ulepszenia nawierzchni dróg gruntowych, parkingów dla samochodów osobowych, boisk sportowych, bieżni i hipodromów. Na nawierzchniach trawiastych z podłożem geofibrowym zaobserwowano lepszy wzrost traw spowodowany większym napowietrzeniem i dotlenieniem ukorzenienia.

Wzmacniająca funkcja geofibr z tworzyw syntetycznych w warstwach gruntów piaszczystych została potwierdzona w doświadczalnych pracach [8, 20, 39, 60, 64, 65]. Przeprowadzone testy laboratoryjne i oznaczenie niektórych parametrów fizycznych fibrogruntów kwalifikują je i potwierdzają jako skuteczny sposób wzmacniania i stabilizacji piaszczystych gruntów podłoża nawierzchni drogowych, a także gruntowych podłoża fundamentów budynków i innych budowli. Wykonane testy laboratoryjne parametrów charakterystycznych dla fibrogruntów wskazują na ich przydatność do wzmocnień gruntowych podłoża nawierzchni drogowych. Istnieje też wiele przykładów bezpośrednich zastosowań fibrogruntów w podłożach nawierzchni drogowych, odzwierciedlających również wyniki obserwacji i testów pomiarów polowych [46, 59–61]. Zastosowanie tego rodzaju wzmocnień i stabilizacji właściwości gruntów w warstwach podłoża nie jest oparte na ścisłych algorytmach obliczeń projektowych nośności wzmocnionych podłoża 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 rozwią-

zań jako skutecznych i ekonomicznych. Podstawowym wymogiem jakościowym dla gruntowego podłoża nawierzchni drogowej jest uzyskanie odpowiedniej wartości wtórnego modułu odkształcenia E_2 lub wskaźnik odkształcenia I_o określonego 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 własności gruntów ulepszonych, jako fibrogruntów, może mieć pełne zastosowanie techniczne jako wykonywane warstwy wzmocnione podłoża nawierzchni dróg lądowych, kołowych i szynowych. Sugestie w tym zakresie zawiera, między innymi, publikacja [61]. Pomiar modułów odkształcenia odbywa się na wykonanej warstwie gruntowej podłoża. Wymagany poziom wskaźnika odkształcenia I_o , jako równemu stosunkowi wtórnego modułu odkształcenia E_2/E_1 wyznaczonego pomiarem v_{ss} , 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:

$$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}} \quad (6.4)$$

gdzie: I_s – wskaźnik zagęszczenia [–],

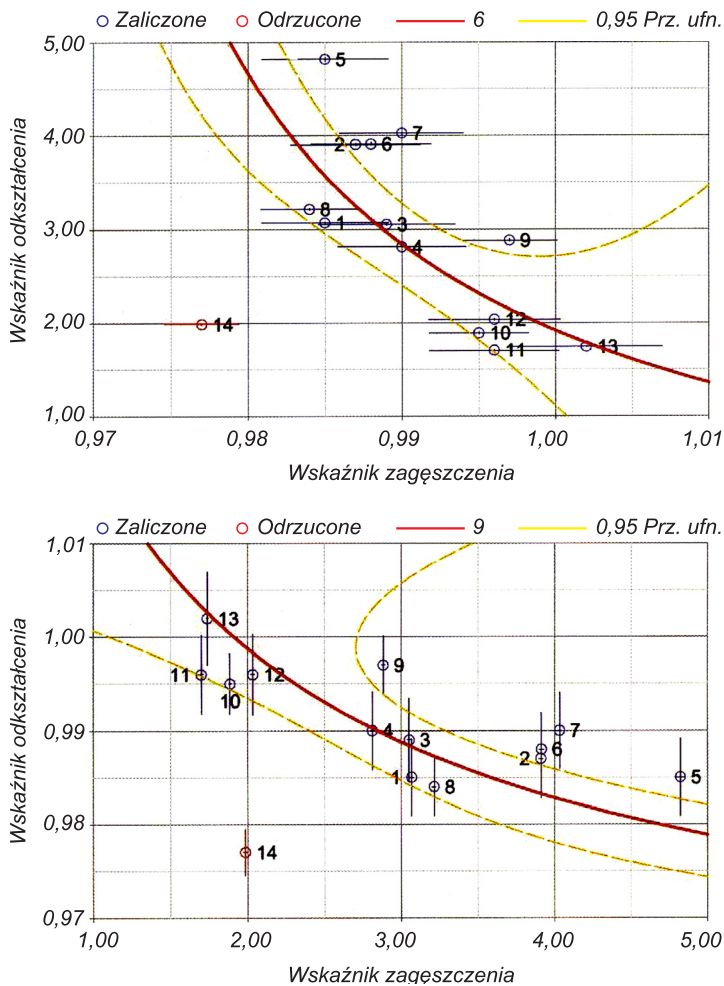
ρ_d – gęstość objętościowa szkieletu gruntu warstwy nasypowej [g/cm^3],

ρ_{ds} – maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntu zagęszczonego przy wilgotności optymalnej (w_{opt}) wyznaczona w aparacie Proctora wg normy [53].

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 określone jedynie empirycznie. Wynika z nich jednak, że dla danego rodzaju gruntu warstwy nośnej, o grubości ok. 50 cm podłoża nawierzchni, zmiany ρ_{ds} i jego wilgotności optymalnych w_{opt} mają istotne znaczenie. Podobne wnioski ustalono w pracy [70], pośrednio wskazując na:

$$I_s \Rightarrow f(\rho_{ds}, w_{opt}) \quad \text{ i } \quad I_o = E_2/E_1 \Rightarrow (I_s, \text{ CBR}) \quad (6.5)$$

Stąd też, w testach laboratoryjnych określania własności i pomiaru niektórych parametrów geotechnicznych mieszanek gruntu i geofibr, jako potencjalnej gruntowej warstwy nośnej podłoża nawierzchni drogowej, przyjęto ρ_{ds} i w_{opt} określone według normy [53] oraz parametr bezpośredni, kalifornijski wskaźnik nośności CBR określany według normy [54]. W istocie nie istnieją ściśle zależności pomiędzy wskaźnikiem odkształcenia I_o a wskaźnikiem zagęszczenia I_s , lecz ogólna zależność podana na rysunku 6.19 dla jednego rodzaju gruntu, wykazana w badaniach [48] jest zupełnie czytelna.



Rys. 6.19. Zależności pomiędzy wskaźnikami odkształcenia i zagęszczenia danego gruntu – wg [48]

Przy zestawianiu mieszanek fibrogruntów, w których stosowane są drobnoelementowe geofibry, nie zachodzą procesy wiązań chemicznych ani zmian 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, lecz są jedynie mieszanką, której jednym z komponentów są geofibry. Z punktu widzenia technologicznego mieszanie gruntu z drobnoelementowymi geofibrami jest tzw. doziarnieniem gruntów piaszczystych i polega na podobnym procesie jak wykonywanie gruntowych mieszanek o uziarnieniu optymalnym. Zmiana uziarnienia mieszanki jest powodowana zmia-

ną proporcji poszczególnych frakcji w mieszance i wynika ze wskazań wzoru normy [52]:

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (6.6)$$

gdzie: C_U – wskaźnik jednorodności uziarnienia mieszanki fibrogruntowej [–],
 d_{10}, d_{60} – średnice – wymiary cząstek których masa wraz z mniejszymi cząstkami stanowi 10% i 60% masy próbki wysuszonej [mm].

Podobnie jak dla mieszanek gruntowych ze spoiwami hydraulicznymi, istotne znaczenie w uzyskaniu korzystniejszych parametrów nośności warstw gruntowych ma proces zagęszczenia. Zmiana własności zagęszczania dla fibrogruntów wynika także z miary kształtu krzywej uziarnienia w stosunku do gruntu bez mieszania z geofibrą. Parametrem kształtu krzywej przesiewu gruntu, określającym jego zdolność do zagęszczenia według normy [52], jest:

$$C_C = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (6.7)$$

gdzie: C_C – wskaźnik krzywizny krzywej uziarnienia [–],
 d_{10}, d_{30}, d_{60} – średnice – wymiary cząstek, których masa wraz z mniejszymi cząstkami stanowi 10%, 30%, 60% masy próbki wysuszonej [mm].

Dla krzywej przesiewu samego gruntu i fibrogruntu można zauważyć, że na przykład przy 20% dodatku geofibr uzyskujemy zwiększenie średnicy cząstek d_{60} , co przy niezmiennych średnicach cząstek d_{30} i d_{10} plasuje fibrogrunty w grupie lepiej zagęszczanych niż te same grunty bez dodania geofibr, niezależnie od tego, czy zmiana ta będzie o tyle nieznaczna, że w obu przypadkach wskaźnik krzywizny uziarnienia będzie $C_C \approx 3$.

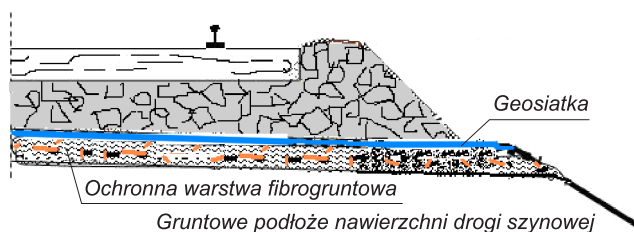
Oczywiste jest, że jeśli odnotujemy w przeprowadzonych testach laboratoryjnych wzrost zawartości frakcji $f_p > 2$ mm, będzie to wynikiem zmiany pozostałych parametrów własności piaszczystych fibrogruntów w zależności od wzrostu zawartości geofibr w mieszance. Zmiana uziarnienia mieszanek fibrogruntowych w konsekwencji doprowadza do polepszenia własności filtracyjnych mieszanek, co wynika też z warunku filtru Terzagiego, podanego w pracy [12]:

$$\frac{d_{85}}{d_{15}} \geq 2,5 \quad (6.8)$$

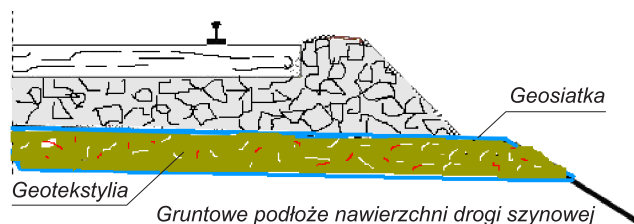
gdzie: d_{15} – średnica oczek sita, przez które przechodzi 15% gruntu [mm],
 d_{85} – średnica oczek sita, przez które przechodzi 85% gruntu [mm].

Fakt ten upoważnia do sugestii możliwości bezpośredniego zastosowania warstw fibrogruntowych jako warstw ochronnych i filtracyjnych w podłożach nawierzchni dróg szynowych (rys. 6.20 i 6.21). Pełną stabilizację składu granu-

lometrycznego materiału warstwy ochronnej w przekroju drogi szynowej można utrzymać, zabezpieczając fibrogrunt przed wymieszaniem z ziarnami podsypki tłuczniowej. Zatem warstwa geosiatki jako zbrojąca spodnią warstwę tłucznia jest bardzo skutecznym rozwiązaniem (rys. 6.20). Ponadto, mieszanki fibrogruntowe cechuje $4 < C_u < 10$, co stwarza większą gwarancję eliminacji sufozji warstw filtracyjnych i ochronnych przy spływie wód po pochyleniu płaszczyzn drogi.

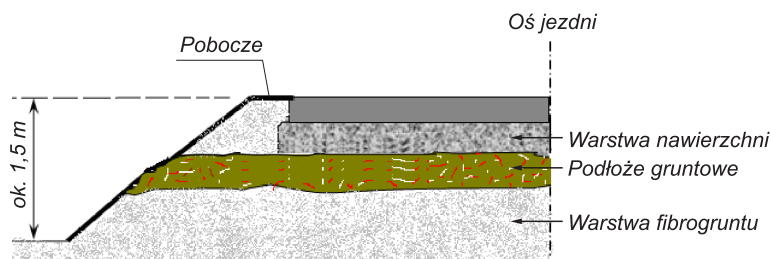


Rys. 6.20. Filtracyjno-ochronna warstwa fibrogruntu w podłożu drogi szynowej



Rys. 6.21. Wzmocnienie gruntowego podłoża nawierzchni drogi szynowej warstwą fibrogruntu

Schemat pokazany na rysunku 6.22 jest sposobem wzmocnienia podłoża nawierzchni drogi samochodowej, który pozwala na wykorzystanie w budowie gruntowego podłoża nawierzchni drogi gruntów piaszczystych o gorszych parametrach jakościowych. Zbliżone co do zasady rozwiązanie z powodzeniem stosowano w pracy [60]. 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 zastosować ulepszenie geofibrami. Ma to istotny wpływ na pełny koszt realizacji drogi.



Rys. 6.22. Wzmocnienie gruntowego podłoża nawierzchni drogowej warstwą fibrogruntu

Stosowanie tego rodzaju rozwiązania jako warstwy wzmocnionej podłoża nawierzchni drogi wydaje się również konkurencyjne w stosunku do każdej innej formy wzmacniania spoiwami hydraulicznymi takiej warstwy. 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 geofibr można też stosować zniszczone geosiatki i geotekstylii lub ich zdeklasowane partie nieodpowiadające właściwościom założonym w procesie produkcji. Wzmocnienie gruntowego podłoża nawierzchni drogowych poprzez zastosowanie tak pozyskanych geofibr 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 geofibr. W tym znaczeniu zastosowanie tworzyw syntetycznych można uważać za proekologiczne, zaś sposób ich pozyskania do tych celów należy do procesu recyklingu wielokrotnego przetwarzania produktów z tworzyw syntetycznych.

Na podstawie przedstawionych rozważań można wskazać, że konkretne zastosowania techniczne fibrogruntów (np. według schematów na rys. 6.20, 6.21, 6.22) muszą polegać na tym, że dla wytypowanej grupy gruntów piaszczystych, występujących lokalnie, oraz możliwości pozyskania danego rodzaju geofibr, należałoby w pierwszej kolejności ściśle dobrać współczynnik koncentracji geofibr v_{fg} lub w_{fg} w zależności od ich współczynnika kształtu a_f i charakterystyki uziarnienia gruntu C_u i C_c . Szczegółowe wymagania co do nośności lub filtracji warstw fibrogruntów powinny wynikać z projektu technicznego zamierzonej realizacji odcinków dróg lądowych.

7. DEMONSTRACYJNE TESTY ODKSZTAŁCALNOŚCI MODELOWYCH STRUKTUR PODŁOŻY UWARSTWIONYCH

W celu ekspozycji i pełniejszego opisu właściwości wzmacniających i funkcji zbrojącej różnych form geosyntetyków, rozumianych jako geotekstylii i geofibry, przeprowadzono testy demonstracyjne. W warunkach laboratoryjnych wykonano ekspozycje modelowe obrazujące ogólne zasady planarnego, czyli poziomego ułożenia warstw wzmacniania gruntów geotekstyliami i warstw fibrogruntowych. Sporządzono układy różnych struktur zbrojeń podłoża gruntowego, wynikające

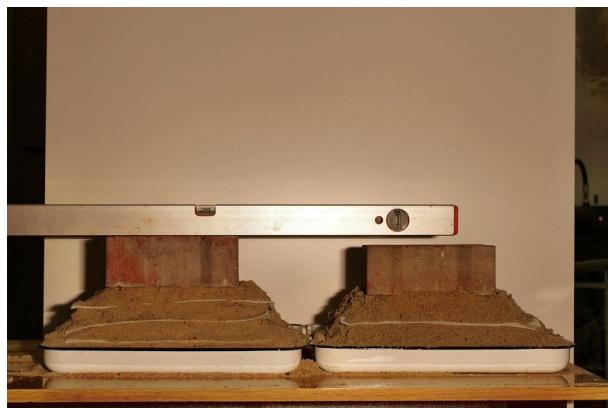
i nawiązujące do ogólnych wniosków z przeprowadzonych badań laboratoryjnych i poligonowych referowanych w poprzednich rozdziałach.

Różne układy podłoża gruntowego wykonano z użyciem jednego rodzaju gruntu, piasku średnioziarnistego o $\rho = 1,65 \text{ g/cm}^3$ w stanie luźnym niezagęszczonym o tej samej wilgotności, usypanym luźno w kuwetach (ok. $3,8 \text{ dcm}^3$) lub w prostopadłościennym pojemniku szklanym (ok. 6 dcm^3). Z wysokości ok. 1 m zrzucano kostkę betonową o masie ok. 5 kg, wyrównując przyzmy samego gruntu i gruntu zbrojonego. Jako geotekstyliów użyto geowłókniny o gramaturze 250 g/cm^2 . Fibrogrunt zawierał stały dodatek określony stosunkiem objętościowym 16% geofibr.

Wykonano fotografie testów, które ilustrują porównawcze efekty wzmocnienia warstw podłoża gruntowego w postaci różnic osiadań poszczególnych układów (rys. 7.1–7.6).



Rys. 7.1. Efekt kilkuwarstwowego zbrojenia geotekstylami w szklanym pojemniku



Rys. 7.2. Efekt zbrojenia warstwowego podłoża gruntowego dwóch przyzm

Fotografie te są jedynie demonstracją efektów wzmocnień i zbrojenia podłoża i nie stanowią obrazu stanowiska pomiarowego. Sposób wywoływania obciążenia jest odpowiedni do skali modeli demonstracyjnych i w znikomym stopniu mógłby odpowiadać zewnętrznym obciążeniom rzeczywistym.



Rys. 7.3. Demonstracja mniejszej podatności fibrogruntów na osiadanie

Po zrzuceniu kostki betonowej z wysokości ok. 1 m wyrównano zdeformowane powierzchnie gruntu. Widoczne różnice osiadań ilustrują zmiany własności nośnych poszczególnych warstw i w ogólnym zarysie korespondują z wnioskami omawianymi wcześniej.



Rys. 7.4. Demonstracja różnych osiadań podłoża gruntowego przez różne formy geosyntetyków

W prezentowany sposób przedstawiono jedynie ogólną odkształcalność samego gruntu piaszczystego oraz gruntu zmieszanego z geofibrami, a także zbrojenie warstwami geotekstyliów. Wyraźne różnice osiadań pomiędzy poszczegól-

nymi strukturami układu zbrojenia, które mogą być zastosowane w gruntowym podłożu nawierzchni dróg różnego typu, są materiałem poglądowym o znaczeniu popularyzacyjnym i dydaktycznym.



Rys. 7.5. Różnice osiadań podłoża gruntowego dla różnych form zbrojenia geosyntetycznego



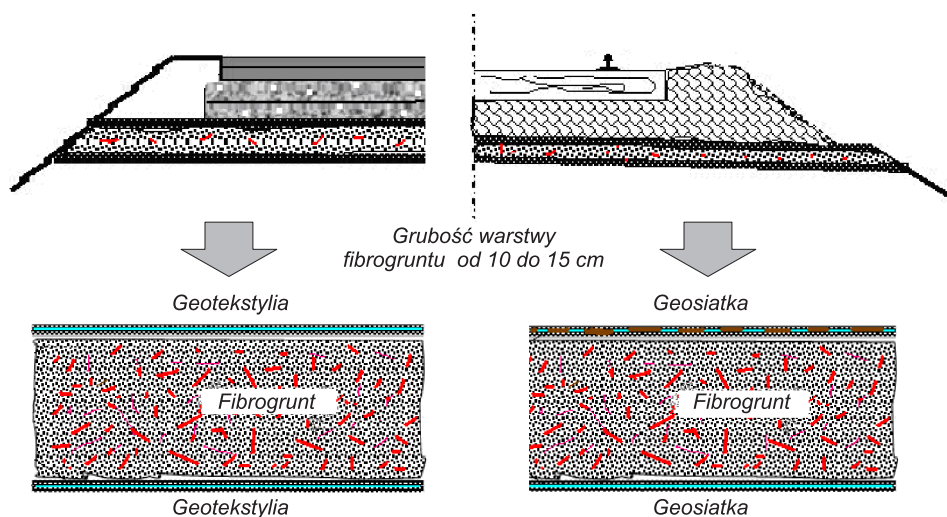
Rys. 7.6. Porównawcza demonstracja osiadań różnie zbrojonych podłoży

Techniczne zastosowania zbrojeń kilkoma warstwami geotekstyliów i fibro-gruntów wymagają wykonania porównań opartych na badaniach odkształcalności podłoża nawierzchni w skalach rzeczywistych. Standardowe zagęszczenie technologiczne gruntów podłoża nawierzchni drogowych jest istotnym, uzupełniającym wpływem efektu wzmacniającego i ulepszającego podłoże gruntowe. W tym przypadku nie wykonywano zagęszczenia. Ten rodzaj testów, demonstrujących zachowanie się przybliżonych modeli wzmocnień i zbrojenia podłoża geosyntetykami o różnych właściwościach, może tylko wskazywać ogólne kierunki poszukiwania odpowiednich rozwiązań.

8. PAKIET GEOSYNTETYCZNY WZMOCNIENIA PODŁOŻY NAWIERZCHNI DRÓG

Pełny zakres przedstawionych w pracy badań własnych nad zastosowaniem geosyntetyków w uwarstwionych gruntowych podłożach nawierzchni dróg lądowych obejmuje geosyntetyki dwóch odmiennych rodzajów, a zatem o różnych właściwościach. Są to geotekstylia i geofibry, które, stosowane każde z osobna, pozwalają na uzyskanie wzmacniających efektów wielowarstwowych układów nawierzchni i podłoża. Tak więc całkiem zasadne jest dążenie do pełnego i jednoczesnego wykorzystania tych efektów w poszczególnych strukturach podłoża nawierzchni dróg. Należy przy tym pamiętać o nieco odrębnej specyfice nawierzchni dróg samochodowych i szynowych.

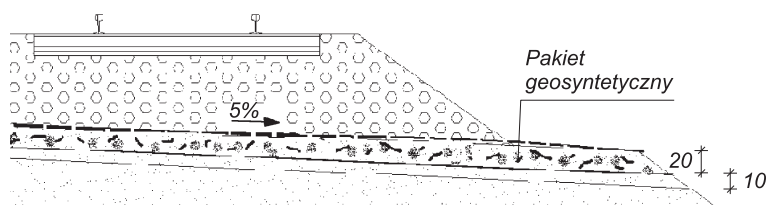
Synteza wyników z kompleksu przeprowadzonych testów laboratoryjnych, w aspekcie technicznym, jest wskazanie sposobów aplikacji w budownictwie komunikacyjnym. Opracowano metodę bezpośredniego zastosowania badanych geosyntetyków do budowy ulepszonych podłoży nawierzchni jako pakietu geosyntetycznego. Schemat ideowy konstrukcji pakietu polega na stworzeniu trójwarstwowego układu, powstającego w trakcie technologii budowy danej drogi, w którym dwie warstwy powinny stanowić geotekstylia wypełnione warstwą fibrogruntu.



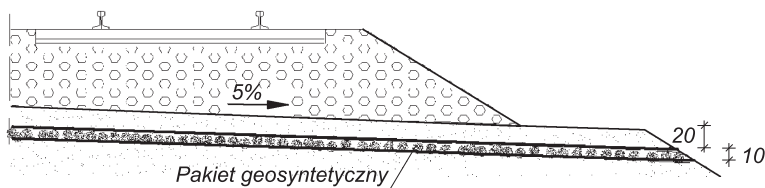
Rys. 8.1. Schematy pakietu geosyntetycznego ulepszenia podłoża nawierzchni dróg lądowych

Grubość pakietu powinna wynosić od 10 do 15 cm w zależności od parametrów fibrogruntu, wynikających także z rodzaju i kształtów użytych geofibr.

Odmiany pakietu przystosowane do nawierzchni poszczególnych rodzajów dróg, a zwłaszcza do górnej warstwy podłoża gruntowego różnych nawierzchni, zostały przedstawione na schematach na rysunku 8.1. Przy weryfikacji technicznej wzmocnienia zastosowanego w modernizowanych liniach kolejowych o znaczeniu krajowym proponowanym pakietem geosyntetyków, należy rozważyć rozwiązanie, w którym pakiet jest ulokowany poniżej dwudziestocentymetrowej warstwy ochronnej torowiska bądź stanowi warstwę ochronną według schematów na rysunkach 8.2 i 8.3. Szczególne uzasadnienie zastosowania pakietu geosyntetycznego występuje w przypadku drogi szynowej modernizowanej według europejskich standardów interoperacyjności dla dużych prędkości ($v > 200$ km/h).



Rys. 8.2. Pakiet geosyntetyczny jako warstwa ochronna torowiska drogi szynowej



Rys. 8.3. Pakiet geosyntetyczny jako warstwa filtracyjna torowiska drogi szynowej

Konstrukcja pakietu jest pewną analogią do materaców wzmacniających słabe podłoża nasypów, lecz ze znacznie gorszym jakościowo, a co za tym idzie, dużo tańszym materiałem wypełnienia. Pakiet nie powinien stanowić zamkniętego pojemnika lub worka wypełnionego fibrogruntem, bowiem byłby trudny w opanowaniu technologicznym. Założenia techniczne i sposób konstrukcji pakietu geosyntetycznego wzmocniającego podłoża nawierzchni dróg lądowych jest opracowanym patentem autora. Bezpośrednie zastosowanie techniczne tego rozwiązania powinno być jednak poprzedzone rachunkiem ekonomicznym, polegającym na porównaniu różnych wariantów ułożenia. Można się też spodziewać pewnych modyfikacji składu samego pakietu, w zależności od inicjatywy poszczególnych projektantów i twórców projektu budowlanego danego szlaku drogi szynowej lub samochodowej.

9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Aktualny stan techniki i technologii budowy dróg lądowych wymaga prowadzenia ciągłych badań i nowych opracowań, na podstawie których mogą powstawać skuteczne jakościowo i korzystne ekonomicznie rozwiązania konstrukcyjnych nawierzchni dróg zarówno samochodowych, jak i szynowych. Krajowe programy budowy autostrad i dróg ekspresowych oraz europejski program interoperacyjności systemów transportu szynowego wymagają również odpowiednich programów badawczych. Wynikiem badań przedstawionych w rozprawie jest sformułowanie zasad zastosowania geosyntetyków w podłożach gruntowych nawierzchni prowadzące do zwiększenia trwałości i jakości nawierzchni dróg lądowych. Stanowi to oryginalny wkład autora w rozwój budownictwa komunikacyjnego. Opracowanie optymalnych układów konstrukcyjnych dróg lądowych stanowi zadanie w znacznej części technologiczne wymagające również przeprowadzenia wielu programów badawczych podobnych do aktualnie wykonanego, polegające na prowadzeniu wielu prób i doświadczeń. Tylko w pewnej części rodzime programy naukowo badawcze mogą być zastąpione implementacją i zakupem już opracowanych technologii. Liniowy charakter budowli dróg lądowych wymaga szczególnej staranności w konstrukcji warstwowego układu przekroju każdej drogi. Struktura i jakość poszczególnych warstw, składających się na podłoże nawierzchni dróg, ma podstawowe znaczenie dla jakości eksploatacyjnych nawierzchni drogowych. Trwałość i odporność na powstawanie deformacji nawierzchni, a szczególnie ich podstawowej części użytkowej, czyli jezdni, to podstawowe kryteria jakości funkcjonalnej dróg.

Przedstawione i opracowane w niniejszej pracy badania wykonywane były przez autora wieloetapowo. Szczegółowe i uogólniające wnioski o charakterze naukowo-badawczym wynikające z poszczególnych badań i testów laboratoryjnych zostały sformułowane w poprzednich rozdziałach. Poszczególne grupy wniosków szczegółowych służyły ukierunkowaniu i korektom programów badań w kolejnych cyklach. Transformując uogólnienia wnioskowe o charakterze naukowym można podać kilka szczegółowych zasad zastosowań geosyntetyków w podłożach nawierzchni dróg lądowych prowadzących do następujących stwierdzeń:

1. Warstwy gruntów i kruszyw występujące w podłożach nawierzchni dróg samochodowych i szynowych mogą być zbrojone geotekstyliami, w tym również geosiatkami i geofibrami. Zastosowanie tych zbrojeń prowadzi do uzyskania znaczącego efektu wzmocnienia podłoża nawierzchni dróg, większej sprężystości wielowarstwowego podłoża i redukuje podatność nawierzchni na trwałe odkształcenia i deformacje.
2. Kilkuwarstwowe zastosowanie geotekstyliów powoduje istotny zakres wzmocnienia wielowarstwowego podłoża nawierzchni dróg samochodowych

oraz dróg szynowych i nie ogranicza ich funkcji separacyjnych i filtracyjnych w wielowarstwowym układzie podłoża nawierzchni dróg lądowych.

3. Jednowarstwowe zbrojenia geotekstylami nie stanowią wzmocnień układu podłoża nawierzchni dróg samochodowych, a jedynie zachowują ich funkcję separacji warstw i funkcję filtracyjną w układzie podłoża gruntowego.
4. Skuteczną formą zbrojenia warstw gruntowych podłoża nawierzchni jest zastosowanie dwóch lub trzech warstw geowłóknin, przy czym całkowita grubość zbrojonej warstwy gruntowej nie powinna przekraczać 25 cm. Znacząco większy efekt wzmocnienia warstwy można uzyskać przez zastąpienie geosiatką jednej z warstw geotekstylnych.
5. Odpowiednia grubość warstwy gruntu piaszczystego pomiędzy warstwami geotekstyliów zależy od parametrów jakości tych gruntów i nie powinna przekraczać 10 cm przy zachowaniu wymaganych zagęszczeń.
6. Dobrym materiałem wzmacniającym i zbrojącym warstwę gruntową są geofibry uzyskiwane z niedegradowalnych biologicznie tworzyw sztucznych pochodzących z syntetycznych surowców wtórnych. Stosowanie geofibr w budownictwie drogowym w znacznym stopniu należy do proekologicznych technologii zrównoważonego rozwoju w budownictwie.
7. Znaczący efekt wzmocnienia i zbrojenia gruntów piaszczystych geofibrami uzyskujemy dla warstw gruntowych o grubościach nie mniejszych niż 10 cm, zachowując wymagane stopnie zagęszczeń i proporcje szerokości lub średnicy do długości geofibr w stosunku co najmniej 1/20.
8. Wzmocnienie i zbrojenie geosyntetykami gruntowego podłoża nawierzchni dróg lądowych jest alternatywą konstrukcyjną do wzmocnień i ulepszeń gruntowego podłoża za pomocą spoiw hydraulicznych i może być konkurencyjne pod względem ekonomicznym.

Synteza ogólnych wniosków uzyskanych na podstawie poszczególnych etapów badań i testów laboratoryjnych jest opracowanie aplikacyjnego rozwiązania technicznego zastosowania w układzie podłoża nawierzchni dróg lądowych. Rozwiązanie to stanowi odpowiedni pakiet geosyntetyczny przeznaczony do wbudowania w podłoża nawierzchni, który jest przedmiotem zgłoszenia patentowego, przedstawionego w rozdziale poprzednim. Pełen zakres badań i ich opracowanie stanowi oryginalny wkład autora w rozwój zastosowań gruntów zbrojonych geosyntetykami. Niezależnie od faktu technicznego opracowania takiej formy zbrojenia podłoża dróg lądowych, rozwiązanie to wymaga wielokrotnych prób i weryfikacji wpływu na jakość nawierzchni dróg w warunkach rzeczywistych. Ekonomiczne aspekty przyszłej analizy jakościowej tej formy rozwiązania zbrojenia podłoża nawierzchni dróg lądowych mogą dostarczyć dodatkowych argumentów za jego szerszym zastosowaniem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ajdukiewicz J., Kłosek K.; Kryteria doboru oraz weryfikacja skuteczności stosowania geosyntetyków w podtorzu. W tym materiały konf. Drogi Kolejowe '01, Wrocław listopad 2001, www.fibetex.pl/Pub/0031.pdf, s. 48.
- [2] Alenowicz J.; Dobrze dobrany geosyntetyk ma właściwości adekwatne do funkcji. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, nr 1–2, 2009, s. 76–80.
- [3] Alenowicz J.; Specyfikacje geosyntetyków stosowanych w podbudowach drogowych. Magazyn Autostrady, 3/2010, s. 80–83.
- [4] Al-Refeai T., Al-Suhaibani A.; Dynamic and static characterization of polypropylene fiber – reinforced dune sand. Geosynthetics International. No. 5, 1998, pp. 443–458.
- [5] Aydogmus T., Klappenich H.; Geokunststoffbewehrte Böschungen und Stützkonstruktionen. EBGeo Weiterbildungsseminar DIN 1054, Freiburg 2008.
- [6] Barksdale R.D., Brown S.F.; Potential benefits of geosynthetics in flexible pavements. Report NCHRP, Atlanta 1995.
- [7] Bonaparte R., Holz R.D., Giroud J.P.; Soil reinforcement using geotextiles and geogrids. ASTM, 1987.
- [8] 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, pp. 194–202.
- [9] Cheqemizadeh A., Nikraz H.; Permability test on reinforced clayey sand. Engineering & Technology, 78, 2011, pp. 130–134.
- [10] Choura M., Khelif N., Manif T., Menaa L.; The effect of waste polypropylene fibre inclusion on the mechanical behaviour of sand generated industry. Journal of Soil Science and Environmental Management, vol. 2, 2011, pp. 384–392.
- [11] 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, pp. 951–955.
- [12] Crossman M., Sequra D.S., Allsop W.; R&D Technical Report FD 2409, London, May 2003.
- [13] Cuelho E., Perkins S.; Field investigation of geosynthetics used for subgrade stabilization. Final Report. Montana State University & Western Transportation Institute. July 2009.
- [14] Czarnecki L., Kaproń M.; Definiowanie zrównoważonego budownictwa. Materiały budowlane, 1 i 2, 2010.
- [15] Diambra A., Ibraim E., Muir Wood D., Russell A.R.; Fibre reinforced sands: Experiments and modelling. Geotextiles and Geomembranes, 28, 2010, pp. 238–250.
- [16] Dobrucki D.; Nośność podłoża gruntowego wzmocnionego geosyntetykami. Drogownictwo, 11, 2010, s. 390–393.
- [17] Duszyńska A.; Wykorzystanie geosyntetyków do projektowania. Materiały seminarium „Zastosowanie geosyntetyków w budownictwie i inżynierii środowiska”. Gdańsk, wrzesień, 2009.
- [18] Elias J.M.; Building roads on sabkha soils with geosynthetic system. Report GT. Arnhem. The Netherlands, 2004.
- [19] El-Ghaffar A. K.A.M.; Behaviour of subgrade soil reinforced with polypropylene fibers. Geosynthetics International, vol. 16, 2009, pp. 76–84.

- [20] Fauziah Ahmad, Farshid Bateni, Mastura Azmi; Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres. *Geotextiles and Geomembranes*, 28, 2010, pp. 93–99.
- [21] Fattah M.Y., Rahil F.H., Turki M.A.; Determination of the adequate thickness of granular sub-base beneath foundations. *Engineering and Technical Journal*, vol. 29, No. 9, 2011.
- [22] Gajewska B. i inni; Zastosowanie geosyntetyków w budowach ziemnych. Raport Instytutu Badawczego Dróg i Mostów, Warszawa 2003.
- [23] Gradkowski K.; Nośność podłoża nawierzchni dróg samochodowych wzmocnianych geosyntetykami. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
- [24] Gradkowski K.; Właściwości geotechniczne fibrogruntu jako materiału ulepszonych podłoży nawierzchni. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 2/2011, s. 121–130.
- [25] Gradkowski K.; Badania nad strukturami planarnego zbrojenia geotekstylami gruntowych podłoży dróg. *Magazyn Autostrady*, 5/2011, s. 52–59.
- [26] Gray D.H., Ohashi H.; Mechanics of fiber reinforcement in sand. *Journal of Geotechnical Engineering* – ASCE 109(3), 1983, pp. 335–353.
- [27] 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. *Journal of The Institution of India*, vol. 96, April 2007, pp. 221–227.
- [28] Hang M.X., Javadi A.A., Min X.; Triaxial tests of sand reinforced with 3D inclusions. *Geotextiles and Geomembranes*, 24 (2006), pp. 201–209.
- [29] Herold A., Tomaskowicz N.; Geosynthetics under dynamic loads. *EBGEO – Subkomitee Dynamics. Eurogeo 3*, marzec 2004.
- [30] Horvath J.S., Regins J., Colasanti P.E.; New hybrid subgrade model for soil-structure interaction analysis; foundation and geosynthetics applications. *ASCE Geo-Institute, Geo-Frontiers*, March 2011.
- [31] 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), pp. 21–37.
- [32] Jianjun Leng; Characteristics and behaviour of geogrid reinforced aggregate under cyclic load. Dissertation (Ph.D.). North Carolina State University, 2007.
- [33] Kamalzare M., Ziaie-Moayed R.; Influence of geosynthetic reinforcement on the shear strength characteristics of two-layer sub-graden. *Acta Geotechnica Slovenica*, 1, 2011, pp. 39–49.
- [34] Kłosek K., Ajdukiewicz J.; Analiza teoretyczna współpracy nasypu kolejowego i słabonośnego podłoża wzmocnionego geosyntetykami w świetle badań terenowych. Raport. Gliwice 2003.
- [35] Kłosek K.; Trwałość konstrukcyjna autostrad na terenach górniczych. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*. Wrzesień–październik 2007, s. 34–38.
- [36] McCrown A.; The behaviour of geosynthetic reinforced soil systems in various geotechnical application. University of Strathclyde, 2005.
- [37] Madhavi Latha G., Amit Somwanshi; Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 27, 2009, pp. 281–294.
- [38] Mandhavi Latha, Vidya S. Murthy; Effects of reinforcement form on the behavior of geosynthetic reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes* 25, 2007, pp. 23–32.
- [39] Madhavi Latha, Vidya S. Murthy; Investigations on Sand Reinforced with Different Geosynthetics. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 29, No. 6, November 2006, pp. 474–480.

-
- [40] Mahipal Singh Chauhan, Satyendra Mitkal, Bijayananda Mohanty; Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre. *Geotextiles and Geomembranes* 26, 2008, pp. 429–435.
- [41] 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.
- [42] Moghadas Tafreshi S.N., Dawson A.R.; Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile. *Geotextiles and Geomembranes*, 28, 2010, pp. 72–84.
- [43] 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, pp. 434–447.
- [44] Montanelli F., Zhao A., Rimoldi P.; Geosynthetic reinforced pavement system: testing and design. *Tenax report*, Italy 2004.
- [45] Naeini S.A., Mizakhanlari M.; The effect of geotextile and grading on bearing ratio of granular soils. *EJGE*, vol. 13, 2008.
- [46] Nataraj M.S., McManis K.L.; Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers, *Geosynthetics International*, 1997, vol. 4, No. 1, pp. 65–79.
- [47] Noorzad R., Mimoradi S.H.; Laboratory evaluation of the behavior of geotextile reinforced clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 28, 2010, pp. 386–392.
- [48] Pawłowski M.; Zależność wskaźnika zagęszczenia od wskaźnika odkształcenia z próbnych obciążeń modeli podtorza z piasku średniego. *Przegląd Komunikacyjny*, 9–10, 2011, s. 92–97.
- [49] Palmira E.M.; Soil-geosynthetic interaction: Modeling and analysis. *Geotextiles and Geomembranes*, 27, 2009, pp. 368–390.
- [50] Perkins S.; Mechanistic empirical modeling and design model development of geosynthetic reinforced flexible pavement. *Final Report*. Montana State University, October 2001.
- [51] Pospisil K., Zednik P.; *Geosynthetics Limitations for Bearing Capacity Increase*, Report, Department of Infrastructure, CDV – Transport Research Centre, Brno, Czech Republic, 2003.
- [52] PN EN ISO 14688-1,2 *Badania geotechniczne. Oznaczenia i klasyfikowanie gruntów. Część 1. Oznaczenia i opis. Część 2. Zasady klasyfikowania*.
- [53] PN EN 13286-2:2004 *Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 2. Metody oznaczania laboratoryjnej gęstości i wilgotności. Metoda Proctora*.
- [54] PN EN 13286-47:2004 *Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 47. Metoda badania wskaźnika CBR, wskaźnika nośności natychmiastowej i spęcznienia liniowego*.
- [55] PN EN 14889-2: *Włókna do betonu. Część 2. Włókna polimerowe. Definicje, wymagania i zgodność*.
- [56] Rafalski L.; *Podbudowy drogowe*. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. *Studia i Materiały*, 59, Warszawa 2007.
- [57] Rafalski L.; *Podłoże nawierzchni drogowej*. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3/2009, s. 190–193.
- [58] Racana N., Gorves R., Grediac M.; *Mechanical behaviour of soil enforced by geocells*. Blaise Pascal University, Publications 2002, p. 6.
- [59] Rupal Mehta; Polypropylene fibres reinforce soil at green verges or overflow car parks. *Materials World Magazine*, 01 Mar. 2006.

- [60] 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, pp. 258–268.
- [61] Santoni R.L., Webster S.L.; Airfields and roads Construction using fiber stabilization of sands. *Journal of Transportation Engineering*, vol. 127, 2001, pp. 96–104.
- [62] Sawicki A.; Modeling of geosynthetic reinforcement in soil retaining walls. *Geosynthetics International*, vol. 5, No. 3, 1998, pp. 327–345.
- [63] Sikora Z., Ziegler M.; Geosynthetics in Geomechanics. Large triaxial compression tests. Materiały seminarium „Zastosowanie geosyntetyków w budownictwie i inżynierii środowiska”. Gdańsk, wrzesień 2009.
- [64] Silva Dos Santos A.P., Consoli N.C., Baudet B.A.; The mechanics of fibre-reinforced sand. *Geotechnique*, vol. 60, 2010, pp. 791–799.
- [65] Sivakumar Babu G.L., Vasudevan A.K., Sumanta Haldar; Numerical simulation of fiber-reinforced sand behaviour. *Geotextiles and Geomembranes*, 26, 2008, pp. 181–188.
- [66] Shukla S.K.; Applications of geosynthetics for soil reinforcement. Discussion. *Ground Improvement*, No. 4, 2004, pp. 179–182.
- [67] Shukla S.K. et al.; Improved expressions for field values of compaction test parameters. *Geotechnique*, 59, 2009, No. 10, pp. 851–853.
- [68] Sobolewski J.; Wymiarowanie zbrojeń geosyntetycznych w konstrukcjach z gruntu zbrojonego zgodnie z przepisami eurokodu 7. *Drogi i Mosty*, 2/2010, s. 73–86.
- [69] Stigler-Szydło E.; Posadowienie budowli infrastruktury transportu lądowego. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2005.
- [70] Sung-Sik Park; Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 27, 2009, pp. 162–166.
- [71] Surowiecki A.; Interaction between reinforced soil components, *Studia Geotechnica et Mechanica*, vol. XX, No. 1–2, 1998, pp. 43–61.
- [72] Szcześniak W.; Wybrane zagadnienia kolejowe. Wzajemne oddziaływanie w układzie pojazd–tor kolejowy–podtorze–podłoże gruntowe. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Budownictwo*, z. 129, OWPW, Warszawa 1995, s. 1–220.
- [73] 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, pp. 72–84.
- [74] 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, pp. 174–183.
- [75] Ud-din S., Marri A., Wanatowski D.; Effect of high confining pressure on the behaviour of fiber reinforced sand. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS*, vol. 42, No. 4, 2011, pp. 69–76.
- [76] Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego Id-3, PKP PLK SA, 2009.
- [77] Wysokiński L., Kotlicki W.; Projektowanie konstrukcji oporowych, stromych skarp i nasypów z gruntu zbrojonego geosyntetykami. ITB, Instrukcje, Wytyczne, Poradniki, 429/2008.
- [78] Venkatappa Rao G. et al; Strength characteristics of sand reinforced with coir fibres and coir geotextiles. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, <http://www.ejge.com>

- [79] Viswanadham B.V.S., Phanikumar B.R., Rahul V. Mukherjee; Swelling behaviour of a geo-fiber-reinforced expansive soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 27, 2009, pp. 73–76.
- [80] Zamberg J.G., Gupta R.; Geosynthetics in pavements: North American contributions. 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil 2010, pp. 380–398.

TESTING GROUND SUBGRADE REINFORCED WITH GEOSYNTHETICS

S u m m a r y

This paper refers to laboratory and field research conducted by the author on the identification of properties of ground reinforced with geosynthetics (geotextiles and geofibres), as models of ground subgrades of roads and railroads in the past few years. The direction of the research and measurement tests on geotextile application for improvement of surface and ground sub-basis of roads was based on previous analysis of research and testing provided by various research centres. Studies presented in the paper focus on defining the scope of improvements and strengthening of ground sub-basis of roads through the use of two different types of geosynthetics. The abridged method of reaching the results and subsequently conducted measurements that are listed in the bibliography include peer-reviewed publications of the author. The first part contains the author's own laboratory tests of samples of model planar ground reinforcements of road pavement systems. The results of the tests analyzed allowed to determine the amount and form of layers of geotextile reinforcements. The following section presents the research work done on a field model of the road. Quality characteristics and comparative properties of groundfibre layers with different contents and shapes of fibres, as well as potential applications of groundfibres in roads are included in the subsequent parts of the work and also include the author's own research. The work does not include the results of preliminary tests and signalling, which were carried out in preliminary phases. It also presents full technical application of the design solutions developed on the basis of the presented tests and the required verifying studies, as well as practical verification of the construction method of road subgrade and subbing base ground reinforcements, patented by the author.

Key words: roads subgrade, road base, soil, geosynthetic reinforcement, geotextiles

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń	4
Wstęp	4
1. Wzmacnianie geosyntetykami podłoża gruntowych nawierzchni dróg lądowych	6
2. Zasady i założenia techniczne stosowania geosyntetycznych zbrojeń gruntu	14
2.1. Ogólne założenia zbrojenia geosyntetykami podłoża nawierzchni	14
2.2. Mechanizmy interakcji zbrojenia i gruntu podłoża nawierzchni dróg samochodowych ..	23
2.3. Specyfika zbrojenia podłoża podkładów dróg szynowych	30
3. Modelowanie podłoża gruntowych zbrojonych geosyntetykami	34
4. Własne badania podłoża nawierzchni zbrojonych geotekstyliami	47
4.1. Badania laboratoryjne podłoża zbrojonych planarnie	47
4.2. Pomiar odkształcalności próbek o różnych zakresach zbrojenia	50
4.2.1. Założenia i sposób przeprowadzenia badań laboratoryjnych	50
4.2.2. Wyniki pomiaru odkształceń próbek w seriach	53
4.3. Podsumowanie wyników wykonanych badań laboratoryjnych	61
5. Pomiar odkształcalności modelu podłoża z jedną warstwą geotekstyliów	64
5.1. Statyczne moduły odkształcenia modelu podłoża	64
5.2. Pomiar dynamicznego modułu podatności podłoża wzmocnionego	69
5.3. Analiza i wnioski z uzyskanych wyników	78
6. Geotechniczne właściwości fibrogruntu wzmacniającego podłoża nawierzchni	79
6.1. Wprowadzenie i przegląd badań nad fibrogruntami	79
6.2. Rezultaty laboratoryjnych badań fibrogruntów	82
6.3. Ogólne uwagi o przedstawionych badaniach	88
6.4. Własne badania i testy oznaczenia parametrów fibrogruntów	90
6.5. Zastosowania fibrogruntów w podłożach nawierzchni dróg lądowych	94
7. Demonstracyjne testy odkształcalności modelowych struktur podłoża uwarstwionych	99
8. Pakiet geosyntetyczny wzmocnienia podłoża nawierzchni dróg	103
9. Podsumowanie i wnioski	105
Bibliografia	106
Summary. Testing ground subgrade reinforced with geosynthetics	110