

Zasady modelowania pracy geosyntetycznego zbrojenia wykorzystywanego do wzmacniania konstrukcji dróg

Dr inż. Krystyna Kazimierowicz-Frankowska
Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku

KRÓTKI RYS HISTORYCZNY

Drogi budowane są od tysięcy lat. Stanowią jeden z najstarszych rodzajów konstrukcji inżynierskich i ważny element infrastruktury transportowej. Nowoczesna infrastruktura transportowa jest niezbędna do rozwoju społeczno-gospodarczego poszczególnych regionów i krajów świata. W ciągu wieków zmieniała się konstrukcja dróg, materiały używane do ich budowy oraz wymagania techniczne stawiane nowo oddawanym do użytku odcinkom nawierzchni. Przez lata, w coraz szybszym tempie zmieniała się też specyfika ruchu drogowego. Zwłaszcza w ciągu ostatnich kilku dekad jesteśmy świadkami lawinowo rosnącej liczby coraz cięższych pojazdów poruszających się po sieci dróg lokalnych i międzynarodowych. Problem dotyczy większości krajów świata. W celu uświadomienia sobie skali tego zjawiska wystarczy podać kilka przykładów. Otóż w USA w latach 1973-1993 długość sieci drogowej wzrosła o około 2,6%, podczas gdy w tym samym czasie liczba poruszających się po nich pojazdów zwiększyła się o 54%, a długość pokonywanych przez nie tras wzrosła o około 75%. W Polsce zaś w ciągu dziesięciolecia 1990-2000 nastąpiło podwojenie liczby zarejestrowanych pojazdów [17].

Zmiana charakterystyki ruchu drogowego oraz konieczność budowy nowych odcinków dróg na słabych podłożach gruntowych stała się dużym wyzwaniem dla projektantów i wykonawców nawierzchni drogowych. Dotychczas stosowane materiały i rozwiązania konstrukcyjne dróg okazały się niewystarczające wobec wzrastającej intensywności ruchu drogowego. Pod jego wpływem nawierzchnie ulegały deformacjom, a na ich powierzchni w coraz szybszym tempie pojawiały się różnego rodzaju pęknięcia umożliwiające przenikanie wody opadowej w głąb konstrukcji i przyspieszające proces jej zniszczenia. Trzeba było opracować nowe, dostosowane do zmieniających się potrzeb, konstrukcje nawierzchni drogowych oraz metody wzmacniania podłoża drogowych. Trzeba też było zmodyfikować parametry dotychczas stosowanych materiałów do budowy nawierzchni drogowych oraz poszukać nowych rozwiązań. Z punktu widzenia projektantów, wykonawców i inwestorów sieci drogowych istotne było, by były one atrakcyjne cenowo i proste technologicznie. Te dwa podstawowe wymagania spełniały materiały zwane geosyntetykami, które od lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku zaczęto stosować do wzmacniania konstrukcji dróg. Geosyntetyki to, najogólniej rzecz ujmując, materiały produkowane na bazie tworzyw sztucznych, których grubość jest znacznie mniejsza od pozostałych wymiarów. Oferowane są na rynku w bardzo szerokim asortymencie i ze względu na swoje zalety weszły już do kanonu praktyki inżynierskiej. Są powszechnie stosowane zarówno do budowy nowych, jak i renowacji istniejących sieci drogowych.

Mało kto pamięta już, że pierwsze próby zastosowań tkanin technicznych do budowy dróg sięgają lat dwudziestych

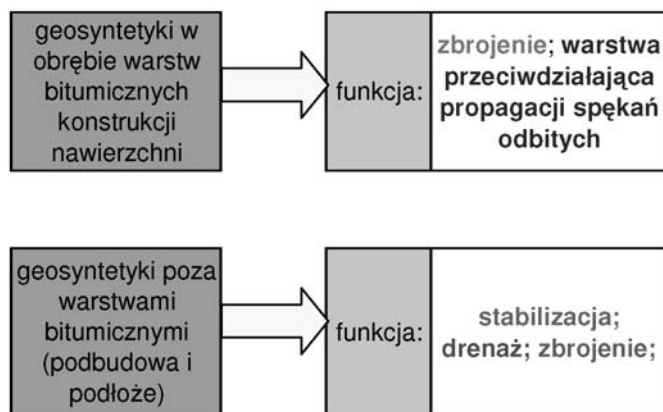
ubiegłego stulecia. W 1926 roku w Stanie Południowa Karolina w USA wybudowano osiem eksperymentalnych odcinków dróg, do wzmocnienia których zastosowano tkaniny bawełniane [2]. Wykorzystano je jako warstwy pośrednie w obrębie warstw bitumicznych podatnych nawierzchni drogowych. Można uznać to za pionierski początek późniejszej fali zastosowań geosyntetyków w drogownictwie, gdyż od tamtych czasów zmieniono rodzaj materiałów stosowanych do wzmocnień, lecz idea ich pracy pozostała ta sama.

Pierwsze, profesjonalnie udokumentowane próby stosowania geosyntetyków do celów wzmacniania podłoża gruntowego oraz konstrukcji prostych dróg terenowych [4, 5] zaczęto podejmować w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Ze względu na zaobserwowane korzyści (mniejsze deformacje nawierzchni drogowych, dłuższy możliwy czas ich użytkowania) wzrosło zainteresowanie wykorzystaniem tych materiałów, tym bardziej, że na rynku była dostępna coraz szersza gama wyrobów. Obecnie, praktycznie każdy inżynier zajmujący się projektowaniem i wykonawstwem dróg ma na co dzień do czynienia z geosyntetykami. Umieszcza się je w różnych miejscach konstrukcji dróg, gdzie mogą pełnić różne funkcje.

Artykuł ten zawiera kompendium podstawowych informacji na temat geosyntetyków wykorzystywanych w drogownictwie. Przedstawiono w nim funkcje i rodzaje materiałów stosowanych do wzmacniania konstrukcji dróg. Podano kryteria oceny skuteczności ich pracy oraz scharakteryzowano najważniejsze właściwości i parametry, które należy wyznaczyć przed zastosowaniem w drogownictwie. Pokazano schematycznie proces budowy nawierzchni drogowej, której konstrukcję wzmocniono przy użyciu geosyntetyków, z podziałem na poszczególne etapy. Omówiono najpopularniejsze metody stosowane w trakcie projektowania tego rodzaju konstrukcji. Scharakteryzowano zawartość specyfikacji projektowej, która musi być sporządzona dla geosyntetyków.

FUNKCJE I RODZAJE GEOSYNTETYKÓW STOSOWANYCH W DROGOWNICTWIE

Geosyntetyki są stosowane zarówno w obrębie warstw bitumicznych konstrukcji nawierzchni (pełnią funkcję zbrojenia lub warstwy pośredniej zapewniającej korzystny rozkład naprężeń od kół pojazdów w obrębie konstrukcji nawierzchni i opóźniającej wystąpienie zjawiska propagacji spękań odbitych), jak i poza nimi. Umieszczane są w obrębie zagęszczonego kruszywa w konstrukcjach dróg tymczasowych oraz w podbudowach nawierzchni bitumicznych. Stanowią warstwy separacyjne, drenażowe, filtracyjne lub zbrojeniowe (rys. 1). Geosyntetyki pełniące funkcje separacyjne są układane na powierzchni styku dwóch materiałów o różnych właściwościach (najczęściej gruntów o różnym uziarnieniu) w celu zapobieżenia ich mie-



Rys. 1. Funkcje geosyntetyków w zależności od miejsca występowania w konstrukcji dróg

Tabl. 1. Rodzaje geosyntetyków stosowanych w drogownictwie

Rodzaj materiału	Zastosowanie
geotkaniny	separacja, filtracja
geosiatki	zbrojenie
geodreny	drenaż
geowłókniny	filtracja; separacja; zbrojenie; warstwa pośrednia służąca poprawie rozkładu obciążeń
geokompozyty	separacja, warstwa pośrednia służąca poprawie rozkładu obciążeń

szaniu się. W praktyce inżynierskiej najczęściej spotykamy je na granicy pomiędzy konstrukcją nawierzchni i podłożem gruntowym. Geosyntetki mogą też łączyć ze sobą różne funkcje, np. separacyjną i zbrojeniową (geowłókniny). Funkcja, którą pełni geosyntetyk i miejsce jego wbudowania determinują rodzaj i parametry wyrobu, który powinien być zastosowany w celu wzmocnienia konstrukcji nawierzchni (tabl. 1).

ZASADY OCENY EFEKTYWNOŚCI DZIAŁANIA GEOSYNTETYKÓW W KONSTRUKCJACH DRÓG

Skuteczność pracy geosyntetyków w konstrukcjach dróg ocenia się, stosując kryteria przedstawione w tabl. 2.

Prawidłowe prognozowanie wartości zdefiniowanych współczynników wzmocnienia do projektowanych konstrukcji nawierzchni drogowych jest sprawą kluczową przy opracowywaniu i wyborze technologii zastosowanej w trakcie ich budowy lub renowacji. Wymaga to wiedzy zarówno z dziedziny geotechniki, budownictwa, inżynierii materiałowej, jak i praktycznego doświadczenia projektanta. Zakres uzyskiwanych w praktyce wartości współczynników wzmocnienia jest bardzo szeroki [4]. Na przykład w zależności od parametrów badanych układów (nawierzchnia drogowa – geosyntetyk – podłoże gruntowe – obciążenie od ruchu drogowego) odnotowywano wartości współczynników *TBR* mieszczące się w zakresie od 1,5 do 70.

WŁAŚCIWOŚCI GEOSYNTETYKÓW

Podstawowe właściwości geosyntetyków najprościej omówić, analizując przebieg ich krzywych wytrzymałościowych

Tabl. 2. Kryteria oceny skuteczności pracy geosyntetyków w konstrukcjach dróg

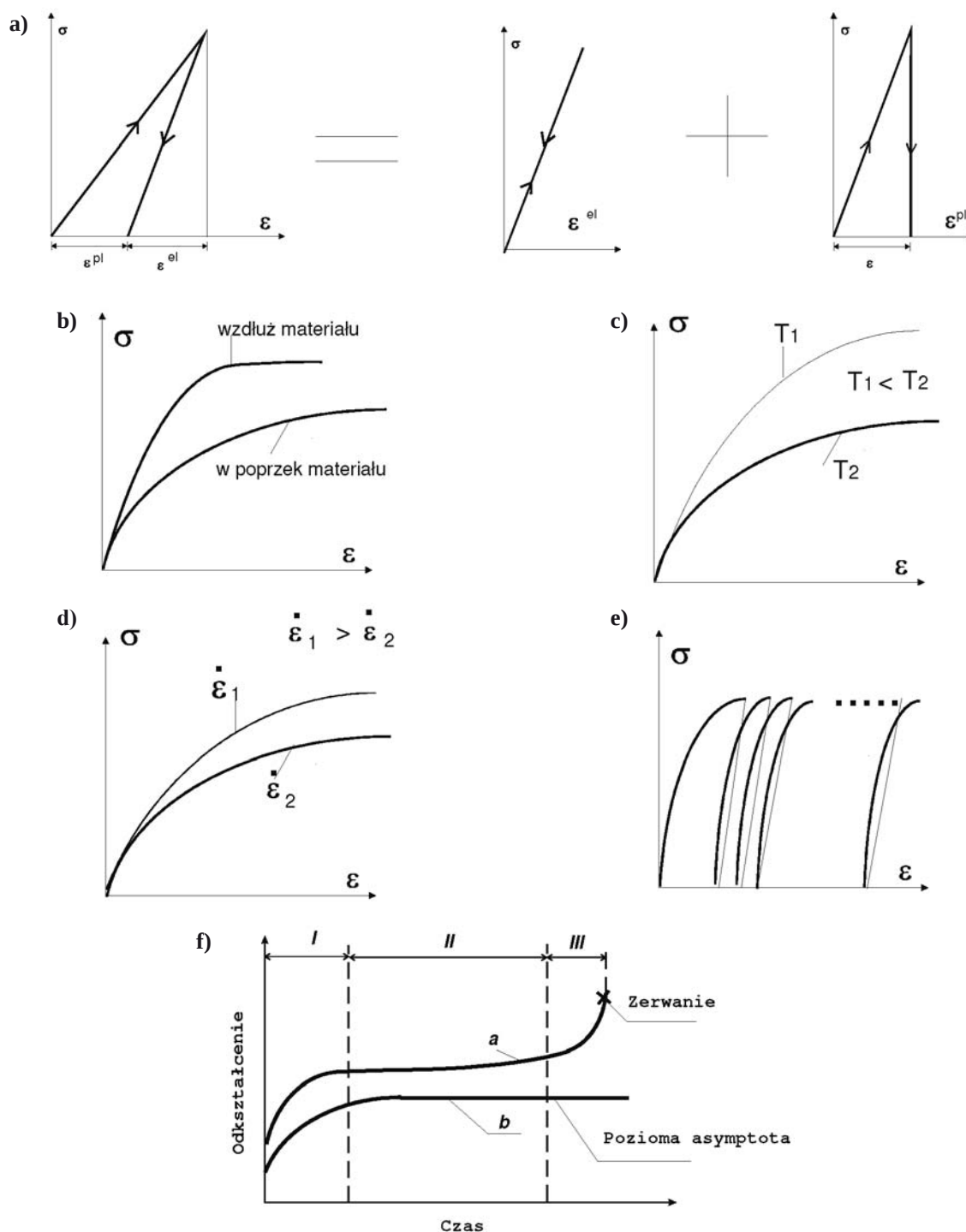
Funkcja geosyntetyku	Kryterium oceny skuteczności pracy	Formuła obliczeniowa
wzmocnienie konstrukcji nawierzchni	oszczędności związane z możliwością zastosowania mniejszej ilości materiałów do budowy nawierzchni	$LTR = [(D_U - D_R) / D_U] \cdot 100$ $LTR \text{ (ang. Layer Thickness Reduction)}$ $D_U \text{ i } D_R \text{ to: grubość niezbrojonej i zbrojonej konstrukcji nawierzchni, które trzeba zastosować, aby przy danych parametrach ruchu i podłoża gruntowego uzyskać ten sam dopuszczalny czas użytkowania nawierzchni}$
	wydłużenie czasu użytkowania nawierzchni drogowej	$TBR = N_{dr} / N_{du}$ $TBR \text{ (ang. Traffic Benefit Ratio)}$ $N_d \text{ – liczba cykli obciążenia od ruchu drogowego, którą można przyłożyć do powierzchni konstrukcji nawierzchni do osiągnięcia maksymalnej dopuszczalnej wartości jej odkształcenia, wskaźniki } R \text{ i } U \text{ oznaczają odpowiednio zbrojoną i niezbrojoną sekcję nawierzchni drogowej}$
	opóźnienie wystąpienia spękań odbitych	$FEF = N_{drc} / N_{duc}$ $FEF \text{ (ang. Fabric Effectiveness Factor)}$ $N_{drc} \text{ i } N_{duc} \text{ – liczba cykli obciążeń od ruchu drogowego, którą należy przyłożyć do zbrojonej i niezbrojonej konstrukcji nawierzchni, aby wystąpiła propagacja pęknięć odbitych do powierzchni nawierzchni}$
wzmocnienie podłoża gruntowego	zmniejszenie deformacji podłoża gruntowego	$LCR = q_r / q$ $LCR \text{ (ang. Load Capacity Ratio)}$ $q_r \text{ i } q \text{ – to wartości obciążeń, które należy przyłożyć odpowiednio do powierzchni konstrukcji nawierzchni, której podłoże wzmocniono przy użyciu geosyntetyku i takiej samej konstrukcji, w której wzmocnienia nie zastosowano, by wywołać identyczną wielkość odkształcenia podłoża.}$
	zwiększenie nośności podłoża gruntowego	$BCR = q_{u(R)} / q_u$ $BCR \text{ (ang. Bearing Capacity Ratio)}$ $q_{u(R)} \text{ i } q_u \text{ – określają odpowiednio nośność podłoża gruntowego wzmocnionego przy użyciu geosyntetycznego zbrojenia oraz nośność podłoża, w którym nie zastosowano wzmocnienia}$

(zależności: naprężenie – odkształcenie). Na rys. 2a zamieszczono wykres pokazujący reakcję materiału na pojedynczy cykl obciążenia i odciążenia. Jego przebieg wskazuje na właściwości sprężysto-plastyczne geosyntetyków, gdyż powstające w próbce materiału odkształcenia można podzielić na część sprężystą (odwracalną) i plastyczną (trwałą) [18]. Kolejną cechą charakterystyczną tych materiałów jest anizotropia. Ich właściwości zależą od kierunku (rys. 2b). Inne są wzdłuż i w poprzek materiału [11]. Na przebieg zależności naprężenie – odkształcenie mają wpływ również takie czynniki, jak: temperatura, w której przeprowadza się badanie (rys. 2c), prędkość przyrostu odkształcenia próbki

(rys. 2d), charakter i historia przyłożonego obciążenia (rys. 2e) oraz czas (rys. 2f) – geosyntetyki są podatne na pełzanie.

PARAMETRY DECYDUJĄCE O PRZYDATNOŚCI GEOSYNTETYKÓW W DROGOWNICTWIE

Zakres badań, które należy wykonać przed zastosowaniem geosyntetyków do celów praktycznych zależy przede wszystkim od takich czynników, jak: funkcja, którą geosyntetyk ma pełnić, rodzaj konstrukcji, w której będzie wbudowany, czas jej użyt-



Rys. 2. Geosyntetyki cechuje: a) sprężysto-plastyczność i b) anizotropia. Ich właściwości są zależne od: c) temperatury, d) prędkości odkształcenia, e) historii obciążenia – charakter przyrostu odkształceń pod wpływem obciążeń cyklicznych, f) czasu – wyniki testów pełzania

Tabl. 3. Wymagane badania geosyntetyków w przypadku ich zastosowań w budownictwie drogowym

Lp.	Właściwość	Metoda badań	Funkcja		
			filtracja	separacja	zbrojenie
1	Wytrzymałość na rozciąganie	PN-EN ISO 10319	H	H	H
2	Wydłużenie przy maksymalnym obciążeniu	PN-EN ISO 10319	A	A	H
3	Wytrzymałość na rozciąganie szwów i połączeń	PN-EN ISO 10321	S	S	S
4	Przebiecie statyczne	PN-EN ISO 12236	S	H	H
5	Przebiecie dynamiczne	PN-EN 918	H	A	H
6	Tarcie	EN ISO 12957	S	S	A
7	Pelzanie przy rozciąganiu	PN EN ISO 13431	--	--	S
8	Uszkodzenia w czasie instalacji	ENV ISO 10722-1	A	A	A
9	Charakterystyczna wielkość porów	PN-EN ISO 12956	H	A	--
10	Wodoprzepuszczalność w kierunku normalnym do powierzchni	EN ISO 11058	H	A	A
11	Trwałość	Aneks B do EN 13249	H	H	H
11.1	Odporność na starzenie się w warunkach atmosferycznych	EN 12224	A	A	A
11.2	Odporność na degradację chemiczną	ENV ISO 12960 lub ENV ISO 13438, EN 12447	S	S	S
11.3	Odporność na degradację biologiczną	EN 12225	S	S	S

H – parametr o zasadniczym znaczeniu

A – parametr istotny we wszystkich warunkach stosowania

S – parametr istotny w specyficznych warunkach stosowania

-- – parametr nieistotny dla danej funkcji

Tabl. 4. Maksymalny dopuszczalny czas poddawania geosyntetyków działaniu czynników atmosferycznych

Funkcja	Wytrzymałość szczątkowa	Dopuszczalny czas
Zbrojenie i inne zastosowania, w których wytrzymałość długoterminowa jest istotna	> 80%	1 miesiąc*
	60 ÷ 80%	2 tygodnie
	< 60%	1 dzień
Pozostałe zastosowania	> 60%	1 miesiąc*
	20 ÷ 60%	2 tygodnie
	< 20%	1 dzień

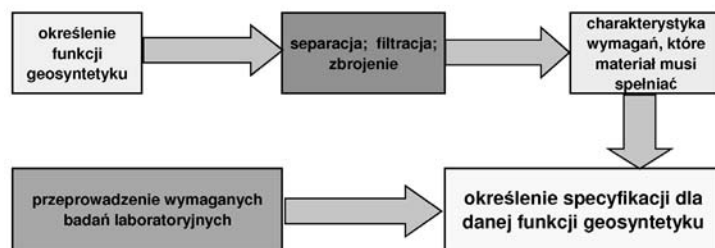
kowania oraz środowisko, w którym materiał będzie pracował. W tabl. 3 wyszczególniono badania, które należy przeprowadzić w przypadku, gdy geosyntetyki będą stosowane w budownictwie drogowym [3, 15, 16]. Podstawowy zakres badań obejmuje: wyznaczenie cech fizycznych, przeprowadzenie badań wytrzymałościowych, zbadanie współpracy geosyntetyków z gruntem oraz ocenę ich trwałości. W przypadku, gdy geosyntetyk pełni funkcję zbrojenia, zasadnicze znaczenie mają wyniki badań wytrzymałościowych (w trakcie których określa się takie parametry, jak: wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie przy maksymalnym obciążeniu, wytrzymałość na przebiecie) oraz ocena trwałości wyrobu. Należy pamiętać, że geosyntetyki zmieniają swoje właściwości pod wpływem działania czynników atmosferycznych (promieniowanie UV, ciepło, wilgoć). Materiały, które

w dniu montażu nie zostaną przykryte gruntem, należy poddać badaniom na starzenie się w warunkach atmosferycznych [13]. Podstawowe badanie polega na zbadaniu efektów oddziaływania promieniowania UV (różne dawki promieniowania, temperatura i wilgotność) na próbki materiałów. Po jego zakończeniu określa się pogorszenie właściwości geosyntetyku [14]. Wytrzymałość po badaniu (tzw. szczątkowa) oraz funkcja, którą ma pełnić materiał, określają czas, przez który może on być poddawany działaniu czynników atmosferycznych (tabl. 4).

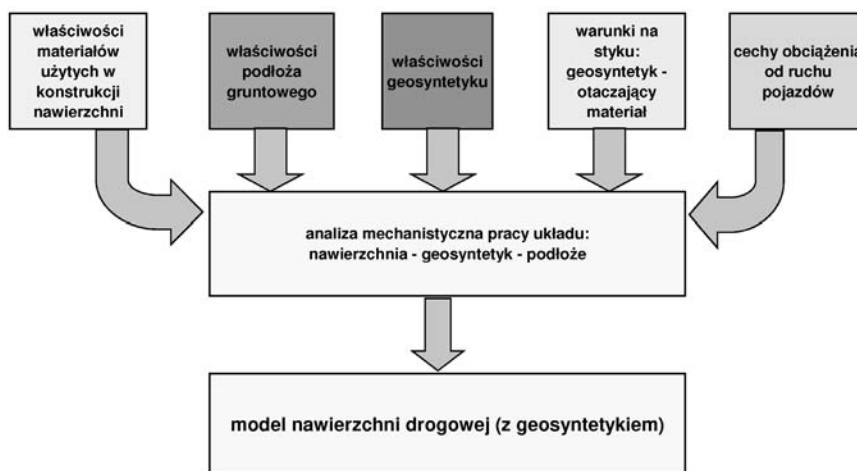
ETAPY REALIZACJI KONSTRUKCJI DROGI WZMOCNIONEJ PRZY UŻYCIU GEOSYNTETYKÓW

Geosyntetyki różnią się parametrami i wymiarami (przede wszystkim grubością) od innych warstw materiałowych stosowanych w konstrukcjach nawierzchni. Trzeba to uwzględnić w trakcie projektowania i wykonywania konstrukcji drogi. Podstawowe etapy realizacji inwestycji, w której do wzmocnienia konstrukcji drogi wykorzystuje się geosyntetyki przedstawiono na rys. 3. Tylko prawidłowe wykonanie wszystkich wymienionych czynności zapewnia osiągnięcie finalnego celu, którym jest wybudowanie dobrej jakościowo nawierzchni o konstrukcji odpowiednio trwałej i odpornej na uszkodzenia. Jak pokazały doświadczenia praktyczne, technologia wzmocniania konstrukcji nawierzchni drogowych przy użyciu geosyntetyków jest wrażliwa na wszelkie niedociągnięcia i błędy. Tylko poprawnie zaprojektowana i wykonana warstwa zbrojenia zwiększa trwałość konstrukcji nawierzchni.

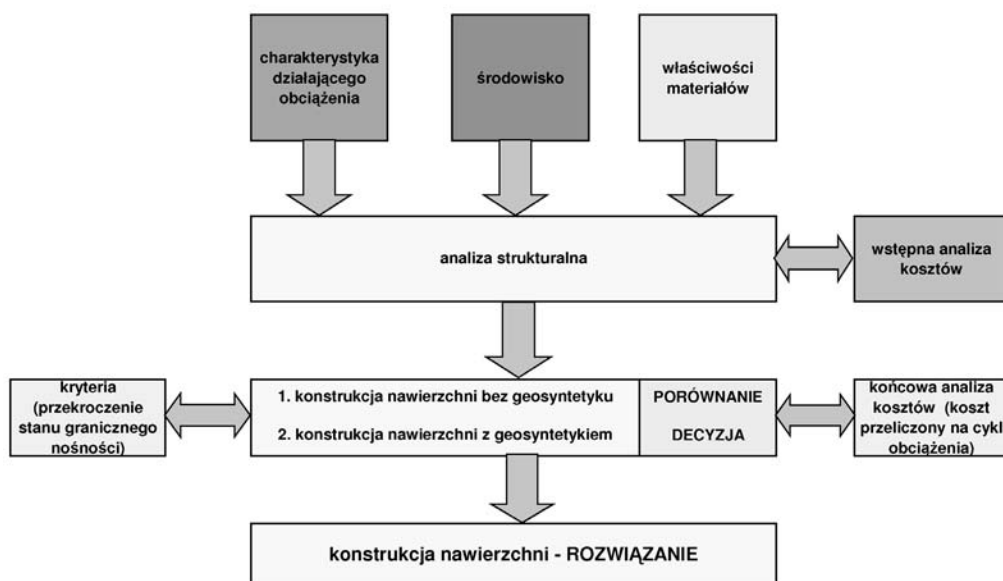
1. Etap: określenie wymaganych parametrów geosyntetyku



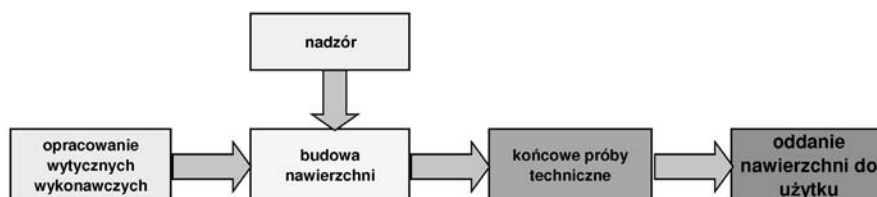
2. Etap: modelowanie pracy nawierzchni



3. Etap: projekt nawierzchni



4. Etap: wykonanie nawierzchni



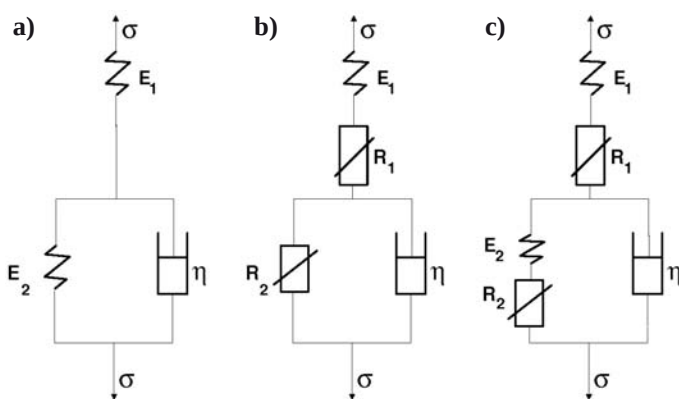
Rys. 3. Etapy realizacji konstrukcji nawierzchni drogowej, w której zastosowano geosyntetyki

ZASADY MODELOWANIA WŁAŚCIWOŚCI GEOSYNTETYKÓW

Modele teoretyczne mogą być bardziej lub mniej skomplikowane. Modelami o prostej strukturze zwykle mniej dokładnie opisuje się rzeczywistość, ale są łatwiejsze do zrozumienia i zastosowania. Modelami bardziej złożonymi jesteśmy w stanie opisać bardzo dokładnie reakcję materiałów na przyłożone obciążenie. Mankamentem tej drugiej grupy rozwiązań jest fakt, że są one skomplikowane, a ich stosowanie wymaga wyznaczenia wielu parametrów i żmudnych obliczeń, co znacznie ogranicza ich praktyczne wykorzystanie i czasami mija się z celem. W procesie modelowania bardzo istotna jest więc sztuka kompromisu oraz właściwe połączenie wiedzy teoretycznej z praktyczną i intuicją dotyczącą uproszczeń, które mogą być zastosowane w trakcie opisywania rzeczywistych właściwości materiałów.

Geosyntetyki charakteryzują się całą gamą różnych właściwości (rys. 2). Przystępując do procesu modelowania należy odpowiedzieć sobie na kilka podstawowych pytań, od których zależy przyjęta strategia (zastosowana metodyka i dokładność) działania:

- 1) Jaki jest cel modelowania?
- 2) Jaka jest wymagana dokładność modelowania?



Rys. 4. Modele reologiczne geosyntetyków opisujące ich zachowanie pod wpływem działania: obciążenia o stałej i rosnącej wartości (a) oraz malejącej wartości (b i c).

- 3) Które z właściwości geosyntetyków musi uwzględniać opracowany model (lub modele)?
- 4) Kto będzie go stosować?

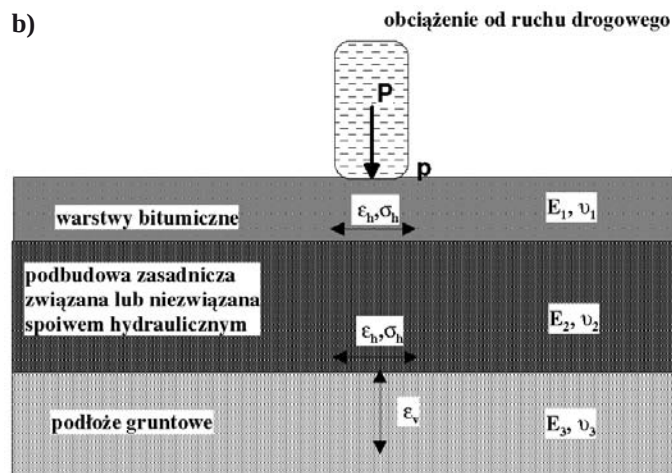
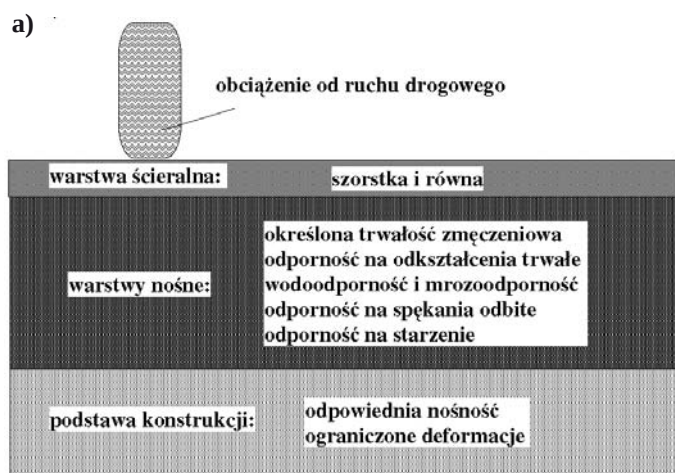
Możliwe jest zarówno tworzenie modeli teoretycznych opisujących, z dużą dokładnością, poszczególne właściwości geosyntetyków, jak i modeli uproszczonych odwzorowujących z mniejszym, ale wystarczającym z inżynierskiego punktu widzenia przybliżeniem pracę konstrukcji inżynierskich, w których geosyntetyki stanowią jeden z wielu użytych materiałów. Przykładem pierwszego z wymienionych powyżej przypadków są modele geosyntetyków zamieszczone na rys. 4 [7, 18]. Są one efektem procesu modelowania właściwości reologicznych tych materiałów. Opisuje się nimi zachowanie szerokiej gamy geosyntetyków poddanych działaniu prostych i złożonych historii obciążeń. W celu ich stosowania należy wyznaczyć parametry modeli, np. lepko-sprężysty model pokazany na rys. 4a charakteryzuje się trzema parametrami E_1 , E_2 i η , z których pierwsze dwa wyznacza się doświadczalnie, a trzeci (η) w sposób pośredni (z minimum kwadratu błędów).

Przedmiotem modelowania w drogownictwie jest praca konstrukcji nawierzchni drogowej poddanej działaniu obciążeń powtarzalnych od ruchu drogowego. Celem modelowania jest zaprojektowanie takiej konstrukcji nawierzchni, aby stany graniczne nośności i przydatności do użytkowania nie były przekroczone w okresie jej eksploatacji. Dodatkowo jej konstrukcja powinna spełniać wymagania pokazane schematycznie na rys. 5a [12].

W trakcie procesu modelowania pracy nawierzchni drogowej stosuje się wiele uproszczeń, które dotyczą zarówno przyjętych właściwości materiałów użytych do niej, jak i sposobu oddziaływania obciążeń od ruchu drogowego (rys. 5b).

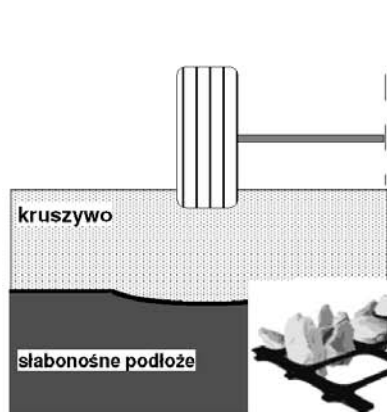
METODY MODELOWANIA PRACY GEOSYNTETYCZNEGO ZBROJENIA WZMACNIAJĄCEGO KONSTRUKCJĘ DROGI

Metody wykorzystywane do modelowania pracy geosyntetycznego zbrojenia najczęściej dzieli się na analityczne i numeryczne, stosując jako kryterium podziału rodzaj metod matematycznych wykorzystywanych do rozwiązywania zagadnienia.

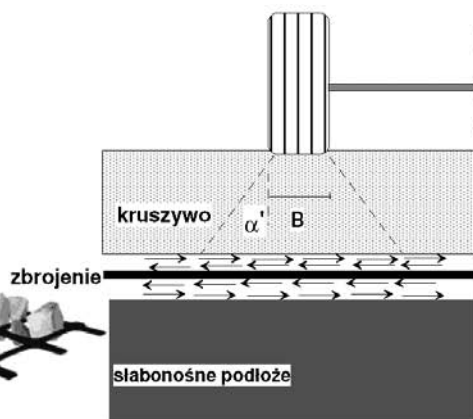


Rys. 5. Wymagania stawiane konstrukcji typowej nawierzchni drogowej (a) i jej schemat obliczeniowy (b)

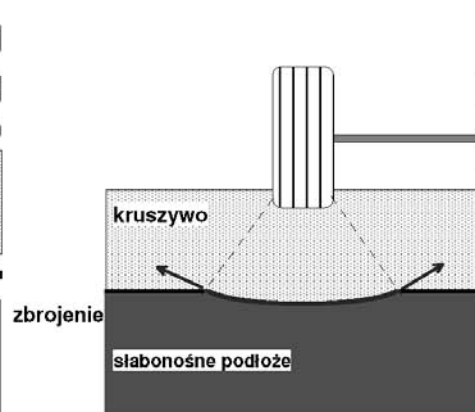
a) separacja



b) zmiana rozkładu naprężeń



c) efekt rozciąganej membrany



Rys. 6. Sposób działania geosyntetycznego zbrojenia wzmacniającego konstrukcję drogi tymczasowej:

a) separacja; b) zmiana kąta rozkładu obciążeń w warstwie kruszywa; c) zmiana wartości naprężeń normalnych przekazywanych do podłoża

Historycznie rzecz ujmując, pierwsze opublikowane rozwiązania [5] dotyczą zastosowania metod analitycznych do prognozowania odkształceń dróg terenowych wzmocnionych przy użyciu geosyntetycznego zbrojenia. Wykorzystanie metod analitycznych wymaga przyjęcia określonych założeń dotyczących mechanizmu (lub mechanizmów) pracy geosyntetycznego zbrojenia oraz wyznaczenia niezbędnych do obliczeń parametrów układu (co w praktyce nie zawsze jest proste). Jak pokazały wyniki doświadczeń, precyzyjne określenie sposobu działania nawet pojedynczej warstwy zbrojenia (rys. 6) nie jest sprawą trywialną. Można wyodrębnić kilka różnych mechanizmów, które w sumie dają obserwowany w praktyce efekt wzmocnienia konstrukcji drogi [9]. Najwcześniej opisano efekt tzw. rozciąganej membrany (rys. 6c), który można stosować [6, 8], gdy osiadania konstrukcji drogi spełniają warunek:

$$\Delta / 2B \geq 0,2 \div 0,3$$

gdzie:

 Δ – wartość deformacji pionowych, $2B$ – szerokość przyłożenia obciążenia (czyli w praktyce do analizy pracy dróg terenowych, w których dopuszczalne jest występowanie dużych deformacji).

Inne mechanizmy pracy geosyntetycznego zbrojenia (i wzo-ry, które można w praktyce do ich oceny zastosować) nie są jeszcze tak precyzyjnie określone. Na przykład stwierdzono doświadczalnie, że geosyntetyczne zbrojenie zmienia kąt rozkładu obciążenia w warstwie kruszywa (rys. 6b), ale można spotkać różne opinie dotyczące wielkości tych zmian (najczęściej stosuje się wzór:

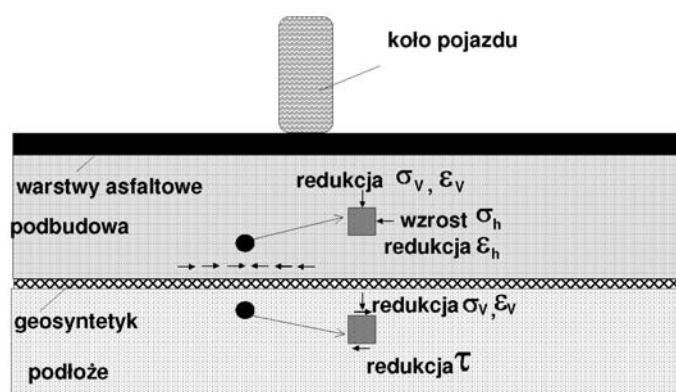
$$\alpha' \approx 1,3 \cdot \alpha$$

gdzie:

 α i α' – odpowiednio kąty rozkładu obciążeń w układzie bez i z zbrojeniem [6]).

Na rys. 7 pokazano schematycznie zmianę stanu naprężenia i odkształcenia w konstrukcji typowej nawierzchni i podłożu gruntowym po wprowadzeniu warstwy geosyntetycznego zbrojenia na granicy pomiędzy konstrukcją nawierzchni i podłożem gruntowym [5].

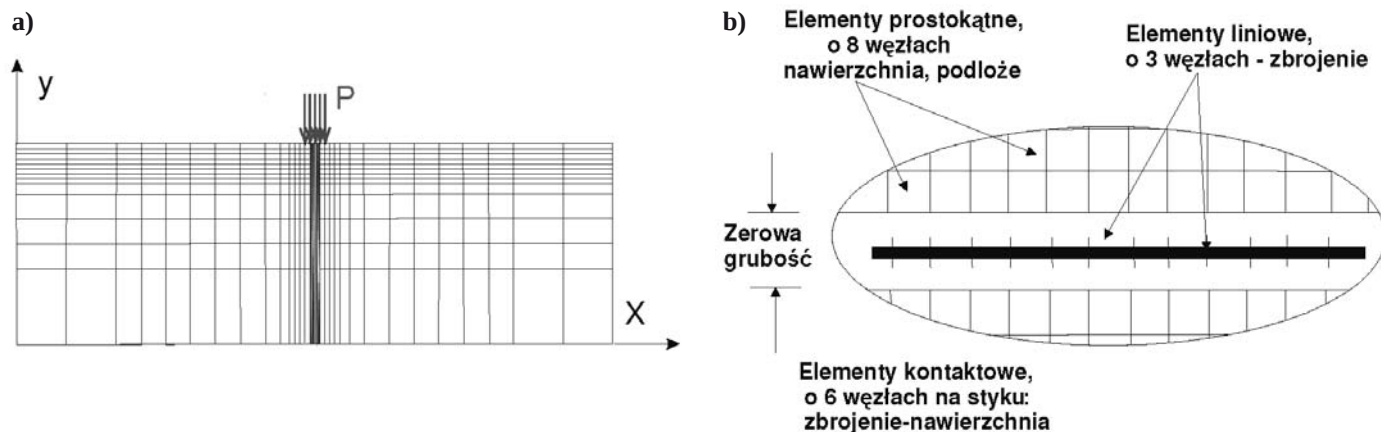
Nie trzeba określać mechanizmów pracy zbrojenia, stosując metody numeryczne (najczęściej oparte na metodzie elementów skończonych). W celu ich wykorzystania należy znać dane do-



Rys. 7. Wpływ geosyntetycznego zbrojenia na rozkład naprężeń i odkształceń w typowej konstrukcji nawierzchni i podłożu gruntowym

tyczące: geometrii analizowanego układu, parametry i modele konstytutywne wszystkich warstw materiałowych nawierzchni drogowej oraz podłoża gruntowego. Trzeba również określić warunki brzegowe. Metody numeryczne zaczęły rozwijać się na początku lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku i są obecnie bardzo popularne – przede wszystkim ze względu na szeroką dostępność i łatwość użytkowania opartego na nich oprogramowania, które jest oferowane na rynku. Należy jednak pamiętać, że prawidłowość uzyskiwanych wyników (w tym prawidłowość przyjętych danych wyjściowych) powinna być weryfikowana na podstawie rezultatów badań doświadczalnych. Stosując metody numeryczne, najczęściej zakłada się sprężyste właściwości poszczególnych warstw materiałowych, z których wykonana jest konstrukcja drogi. Dla każdej z nich należy podać wartości modułu Younga, współczynnika Poissona oraz grubość warstwy. Wykonując obliczenia metodą elementów skończonych, należy dokonać podziału konstrukcji drogi na elementy skończone - najczęściej używa się elementów trójkątnych lub prostokątnych. Siatkę elementów zagęszcza się w rejonie, w którym spodziewane są największe wartości składowych naprężenia i odkształcenia, a więc w bezpośrednim sąsiedztwie oddziaływania obciążenia od ruchu drogowego oraz w okolicach występowania pęknięć i nieciągłości w konstrukcji nawierzchni (rys. 8a).

Geosyntetyki, niezależnie od miejsca ich umieszczenia w obrębie konstrukcji drogi, różnią się właściwościami (przede



Rys. 8. Konstrukcja drogi wzmocnionej geosyntetykiem: a) typowa siatka elementów skończonych – widok ogólny, b) rodzaje użytych elementów

wszystkim sztywnością) i wymiarami (grubością) od sąsiadujących z nimi warstw materiałów. Najczęściej fakt ten uwzględnia się w trakcie procesu modelowania poprzez zastosowanie innych rodzajów elementów do opisu ich pracy w konstrukcji (rys. 8b). W tym celu powszechnie stosuje się liniowe elementy belkowe [10], dla których należy zdefiniować wartości dwóch parametrów: sztywność E oraz powierzchnię przekroju poprzecznego elementu zbrojenia A . Najczęściej korzysta się też z istniejącej w analizie numerycznej możliwości wprowadzenia warstwy kontaktowej (tzw. interface) pomiędzy strefy materiałowe znacznie różniące się sztywnością. W strefie takiej, nawet pod działaniem umiarkowanych składowych stycznych naprężeń, występuje silna konsolidacja deformacji postaciowej, która może być początkiem poślizgu. Elementy kontaktowe o zerowej grubości umieszcza się najczęściej poniżej i powyżej warstwy geosyntetycznego zbrojenia wzmacniającego konstrukcję drogi. Pozwalają one na poślizg zgodnie z warunkiem Coulomba-Mohra [5].

PODSUMOWANIE

Rodzaj metody, przy użyciu której analizuje się składowe naprężenia i odkształcenia występujące w konstrukcji drogi wzmocnionej geosyntetykiem (lub geosyntetykami), należy dobierać indywidualnie. Do podstawowych czynników, które decydują o sposobie postępowania w danym przypadku można zaliczyć:

- rodzaj i charakter danych, którymi dysponuje projektant,
- zakres, ranga i warunki realizowanej inwestycji drogowej,
- wymagana dokładność obliczeń,
- wiedza i doświadczenie projektanta.

Do każdego geosyntetyku, który ma być zastosowany w konstrukcji drogi należy sporządzić specyfikację projektową. Na jej podstawie wycenia się koszty robót i dobiera materiały, które będą zastosowane w trakcie realizacji inwestycji (tabl. 5).

Specyfikacja projektowa powinna zawierać następujące informacje [1]:

Tabl. 5. Przykładowa specyfikacja projektowa dla geosyntetyku

Lp.	Charakterystyka	Jednostka	Parametr
1	Siła obliczeniowa F_d	kN/m	90,5 ¹⁾
2	Czas eksploatacji	rok	120
3	Polimer	–	PVA
4	Dopuszczalne maksymalne wydłużenie w trakcie próby zrywania z prędkością 20% wydłużenia/min	%	< 6
5	Dopuszczalne maksymalne wydłużenie na końcu okresu eksploatacji	%	2
6	Dopuszczalne maksymalne wydłużenie na skutek pełzania (od zabudowy do końca eksploatacji obiektu)	%	2
7	Rodzaj geosyntetyku	–	geosiatka
8	Wielkość oczek	mm	30 × 30

¹⁾ Producent i/lub dostawca geosyntetyku musi udowodnić, że wytrzymałość obliczeniowa (długoterminowa) wyrobu jest $\geq$ od wartości podanej w tabl. 5. W tym celu musi przedstawić albo wyniki badań wykonanych przez niezależne jednostki badawcze (wyroby geosyntetyczne kwalifikowane), albo wyniki obliczeń przeprowadzonych zgodnie z zaleceniami dotyczącymi zasad doboru wymienionych współczynników przy braku wyników odpowiednich badań (wyroby geosyntetyczne niekwalifikowane).

1. Wartość siły obliczeniowej, którą geosyntetyk musi przemieścić. Jest ona równa jego wymaganej wytrzymałości długoterminowej.
2. Założony czas eksploatacji konstrukcji nawierzchni, na koniec którego została obliczona wymagana wytrzymałość długoterminowa produktu.
3. Rodzaj geosyntetyku, który ma być zastosowany w konstrukcji – geotkanina, geowłóknina, geosiatka itd., a w przypadku geosiatek również wielkość oczek.
4. Polimer, z którego geosyntetyk ma być wykonany – polietylen, polipropylen itd.
5. Dopuszczalne maksymalne wydłużenie geosyntetyku podczas próby zrywania z prędkością 20% wydłużenia na minutę.

Informacje dodatkowe takie, jak: dopuszczalne maksymalne wydłużenie wyrobu na końcu okresu eksploatacji konstrukcji oraz jego dopuszczalne maksymalne wydłużenie na koniec stanu budowlanego.

LITERATURA

1. Ajdukiewicz, J.: Projektowanie z geosyntetykami – możliwe zagrożenia dla projektantów. *Magazyn Autostrady*, nr 5-6/2004.
2. Beckham, W. K.; Mills, W. H.: Cotton-fabric-reinforced roads. *Engineering News Record*, Vol. 114. No. 14, 1935.
3. Bolt, A., Duszyńska, A.: Badania cech i trwałości geotekstyliów według przepisów CEN. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 3/2001.
4. Kazimierowicz-Frankowska, K.: Wykorzystanie geosyntetyków do wzmacniania podłoża nawierzchni drogowych. Cz. I. Przegląd wyników badań doświadczalnych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 4/2005, 340-345.
5. Kazimierowicz-Frankowska K.: Wykorzystanie geosyntetyków do wzmacniania podłoża nawierzchni drogowych. Cz. II. Przegląd koncepcji opisu teoretycznego. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 5/2005, 391-397.
6. Kazimierowicz-Frankowska K.: Analiza wpływu warstwy geosyntetycznego zbrojenia na nośność graniczną i deformacje podłoża. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej*, Z. 28, 2006, 141-150.
7. Kazimierowicz-Frankowska K.: Creep properties of geosynthetics during increasing loading and after partial unloading. [W:] *Proceedings of the Eight International Conference on Geosynthetics*, Yokohama: JC IGS, 2006, 1605-1609.
8. Kazimierowicz-Frankowska, K.: Influence of geosynthetic reinforcement on the load-settlement characteristics of two-layer subgrade. *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 25, No 6, 2007, 366-376.
9. Kazimierowicz-Frankowska K.: Geosyntetyczne zbrojenie jako jeden ze sposobów redukcji osiadań podłoża gruntowego, *Konferencja Ustroń 2009*
10. Kazimierowicz-Frankowska K.: Wpływ geosyntetycznego zbrojenia na wydłużenie czasu użytkowania nawierzchni drogowych. *Przegląd Komunikacyjny*, nr 9, 2012, 46-51.
11. Perkins, S. W.: Constitutive modeling of geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 18, No 5, 2000, 273-292.
12. Piłat, J., Radziszewski, P., Nawierzchnie asfaltowe, *Wydawnictwa Komunikacji i Łączności*, Warszawa 2004.
13. PN-EN 12224:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne. Wyznaczanie odporności na warunki klimatyczne.
14. PN-EN 12226:2002 Geotekstylia i wyroby pokrewne. Badania ogólne do oceny trwałości.
15. PN-EN 13249:2002/A1:2006 Geotekstylia i wyroby pokrewne. Właściwości wymagane w odniesieniu do wyrobów stosowanych do budowy dróg i innych powierzchni obciążonych ruchem (z wyłączeniem dróg kolejowych i nawierzchni asfaltowych).
16. PN-EN 15381:2010 Geotekstylia i wyroby pokrewne. Wymagania w odniesieniu do wyrobów stosowanych w nawierzchniach i pokryciach asfaltowych.
17. Rafalski, L.: Jak wykorzystać rozwój infrastruktury transportowej dla dynamizacji rozwoju kraju. Wystąpienie na konferencji: *Strategia Polski na lata 2004-2015 po akcesji do Unii Europejskiej*, 2004.
18. Sawicki A., Kazimierowicz-Frankowska K.: Creep behaviour of geosynthetics *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 16, No. 6, 1998, str. 365-382.

PODZIĘKOWANIE: Praca została zrealizowana w ramach realizacji projektu badawczego (Umowa nr 1569/B/T02/2011/40) finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w Krakowie.