

KRZYSZTOF GRADKOWSKI<sup>1)</sup>

## PODATNOŚĆ WARSTW MODELOWEGO PODŁOŻA NAWIERZCHNI A EFEKT WZMOCNIEŃ GEOTEKSTYLAMI Cz. I

**STRESZCZENIE.** Artykuł przedstawia wyniki przeprowadzonych pomiarów wstępnych, modułu odkształcenia jako miary podatności dwojakich struktur podłoża nawierzchni drogowych. Pomiary przeprowadzono na odpowiednio sporządzonym poligonowym poletku doświadczalnym. Porównawcze zestawienie wyników pozwoliło na ustalenie wniosków o istotnym znaczeniu dla dalszych badań i pomiarów oraz ważnych dla opisu konstrukcji podłoża nawierzchni drogowych. Pomiar podatności przez wolnozmiennie obciążenia statyczne nie potwierdził efektu wzmocnienia podłoża gruntowego nawierzchni drogowych przy zastosowaniu geowłókniny.

### 1. WPROWADZENIE

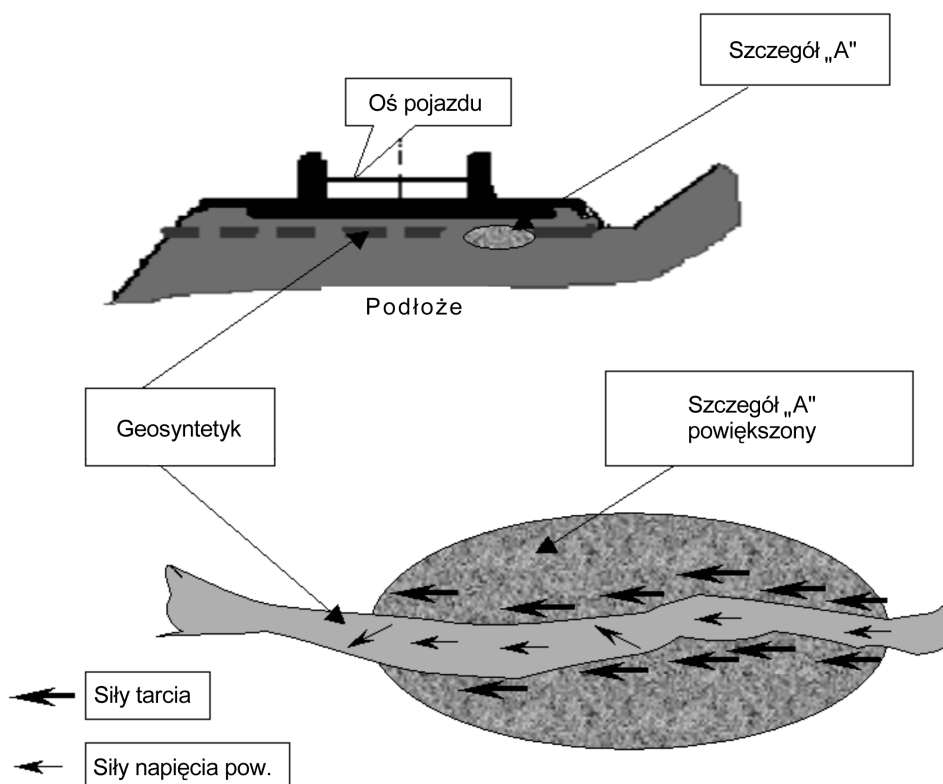
Problemem otwartym od wielu lat jest skuteczność wzmocnienia, czy też zmian niektórych parametrów bezpośredniego podłoża nawierzchni dróg samochodowych i szynowych w górnej strefie aktywnej ośrodka gruntowego. Wprowadzenie do podłoża fundamentowego nawierzchni, w strefie aktywnej budowli ziemnej, warstwy o istotnie różnych parametrach materiałowych, lub też pojedynczej przekładki geowłókniny w odpowiednio cienkiej i jednorodnej warstwie gruntu piaszczystego,

---

<sup>1)</sup> dr inż. – Instytut Dróg i Mostów Politechniki Warszawskiej

również zmienia parametry mechaniczne układu konstrukcyjnego podłoże gruntowo-nawierzchnia. Przemawiają za tym też rozważania analityczne i próby formułowania algorytmów projektowych [1 - 3]. Dotyczy to zarówno nawierzchni szynowych jak i dróg samochodowych, przy czym pomiary tych parametrów powinny być i były wielokrotnie wykonane dla kompletnej konstrukcji podłoża gruntowego i nawierzchni danego rodzaju drogi.[4 - 5]. Z przeprowadzonych badań jak i dotychczasowych analiz można ustalić, że:

- a) Analiza i praktyka, oraz niektóre doświadczenia wskazują, że przy zastosowaniu geotekstylii w warstwach gruntów, występuje pewne wzmocnienie podłoża gruntowego, które może być efektem:
- rozciągania zbrojenia geotekstylii warstwy gruntowej, uzasadnianą między innymi analogią membranową napięcia powierzchni,
  - sił tarcia obu powierzchni geotekstylii, wewnątrz zbrojonej warstwy gruntowej, oraz obu tych czynników razem (rys.1);



Rys.1. Schemat ideowy sił wzmacniających w gruntowej warstwie z geotekstyną  
Fig.1. Idea schema of strengthening forces in the ground layer with geotextil

- b) Otwartym problemem jest, czy w istocie i dla jakich grubości warstw i rodzajów geotekstylii oraz gruntów, zakres tego wzmocnienia jest ewidentny;
- c) Pełną weryfikację hipotezy wzmocnienia warstw gruntowych przez przekładkę z geotekstylii, a w tym przypadku geowłókniny, może zapewnić jedynie bezpośredni pomiar odkształcalności podłoża i jego parametrów. Pomiar w podłożu rzeczywistej nawierzchni drogowej nastęrcza na ogół dużo problemów technicznych, w związku z tym może być zastąpiony odpowiednim modelem uproszczonym.

Podstawowe pojęcia z metodologii wszelkich analiz i rewizji hipotez, wskazują na konieczność wyodrębnienia poszczególnych części z jednego układu, przy zachowaniu warunków otoczenia i spójności. I tak, skoro nie można wyodrębnić parametrów wpływu polepszenia i ewentualnego wzmocnienia pełnego układu warstw nawierzchni, można dokonać pomiaru określonych parametrów dla wyodrębnionych modeli samego podłoża.

## 2. CEL I ZAKRES POMIARÓW

### 2.1. ZAŁOŻENIA BADAWCZE

Podstawowym celem przeprowadzenia pomiarów było porównanie parametrów charakteryzujących podatność [6] różnych warstw i struktur podłoża nawierzchni drogowej, wraz ze sprawdzeniem efektu zastosowania geowłókniny. Pomiary przeprowadzono na poletku poligonowym, zbudowanym zgodnie z założeniami technicznymi umożliwiającymi bezpośredni pomiar podatności. Dla maksymalizacji różnic i wpływów na mierzone parametry podatności różnych struktur podłoża nawierzchni na poletku, pomiaru dokonano dla dwóch stanów nie całkowitych zagęszczeń. Stany nie pełnego zagęszczenia umożliwiają fizyczną ekspozycję „efektu wzmocnienia” geosyntetyku i nie odkształcalności podłoża betonowego. Pomiary wskaźnika zagęszczenia wykonano według normy, metodą bezpośrednią oznaczając  $I_s$ .

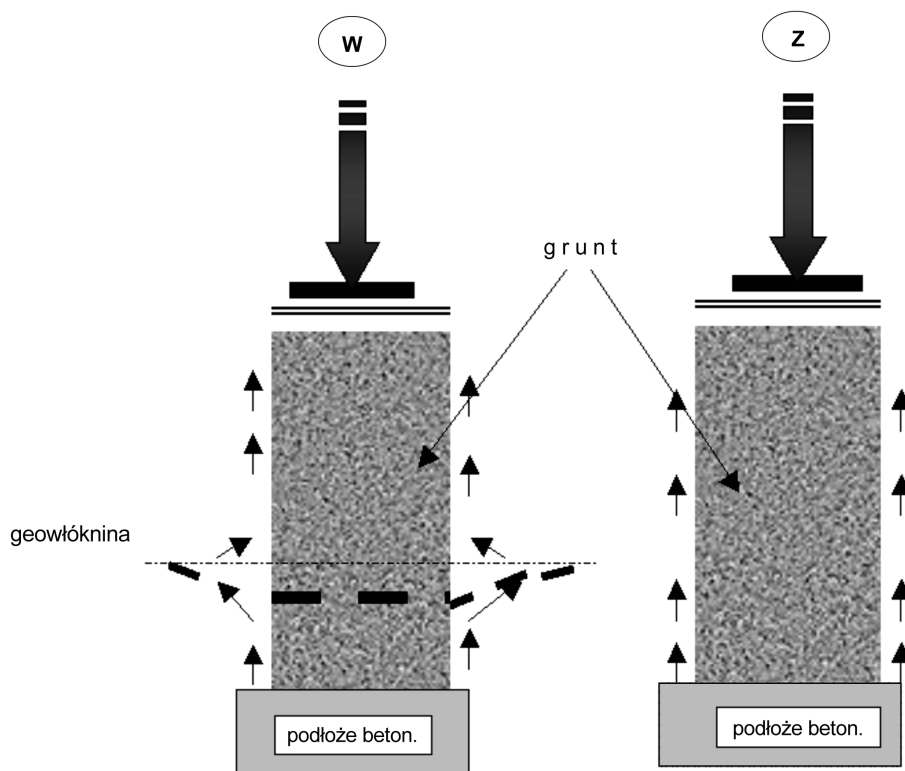
### 2.2. ZASADY POMIARÓW W PÓLTECHNICZNEJ SKALI MODELOWEJ

Podjęmowany program pomiarów porównawczych na poletku doświadczalnym powinien spełniać następujące warunki, które wynikają z ogólnych zasad tworzenia analogów fizyko-mechanicznych [7 - 8]. Do warunków tych należą:

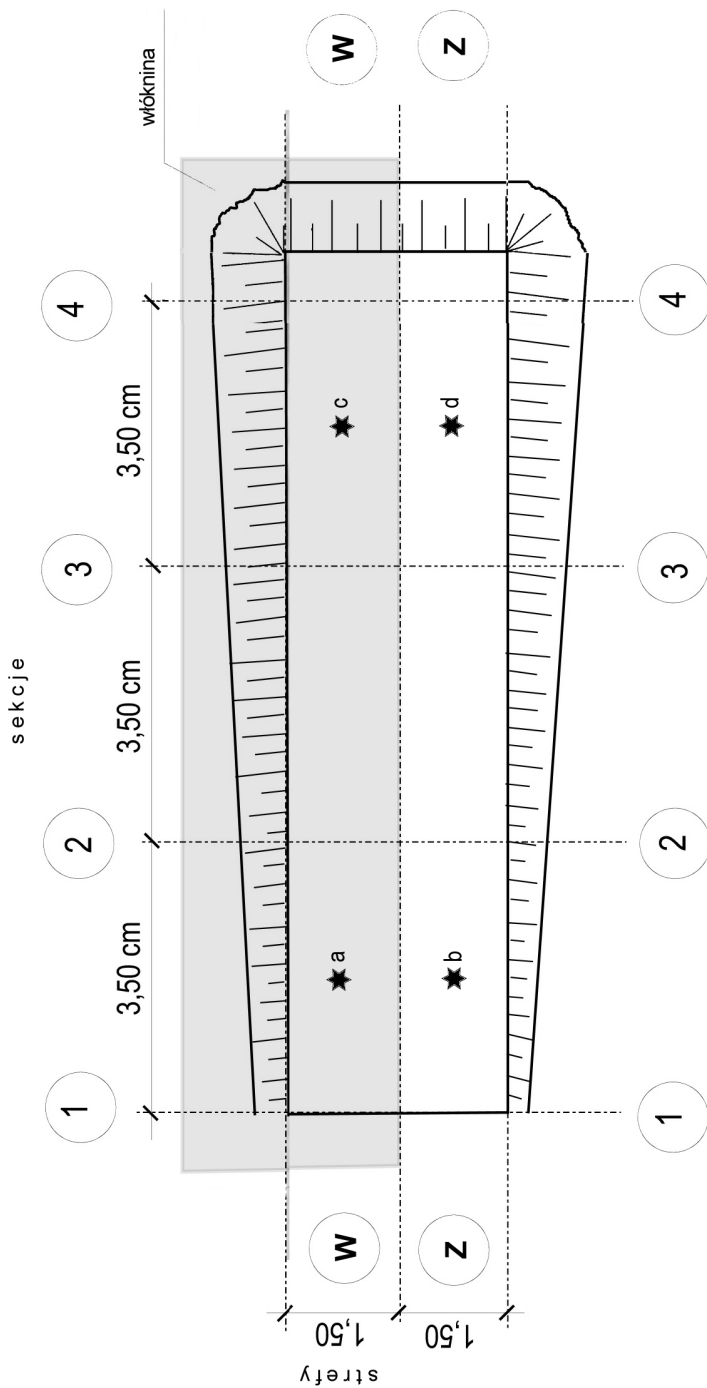
1. Jednorodności badanych struktur warstwowych podłoża nawierzchni.
2. Selektowność, ograniczenie zmiany jednego parametru układu [tu; grubości] rodzaju materiałów podłoża nawierzchni i pomiaru jednego rodzaju parametru.
3. Stan podatności i zagęszczenia pełnych struktur podłoża nawierzchni powinien zapewnić mobilizację sił tarcia geowłókniny w gruncie i powierzchniowych sił napięcia membranowego geowłókniny.

4. Pełnej skali technicznej (1:1) układu samego podłoża gruntowego nawierzchni.
5. Pół-techniki polegającej na zbliżonej technologii przygotowaniu gruntowego układu modelowego, bez obciążenia technicznego odwzorowującego

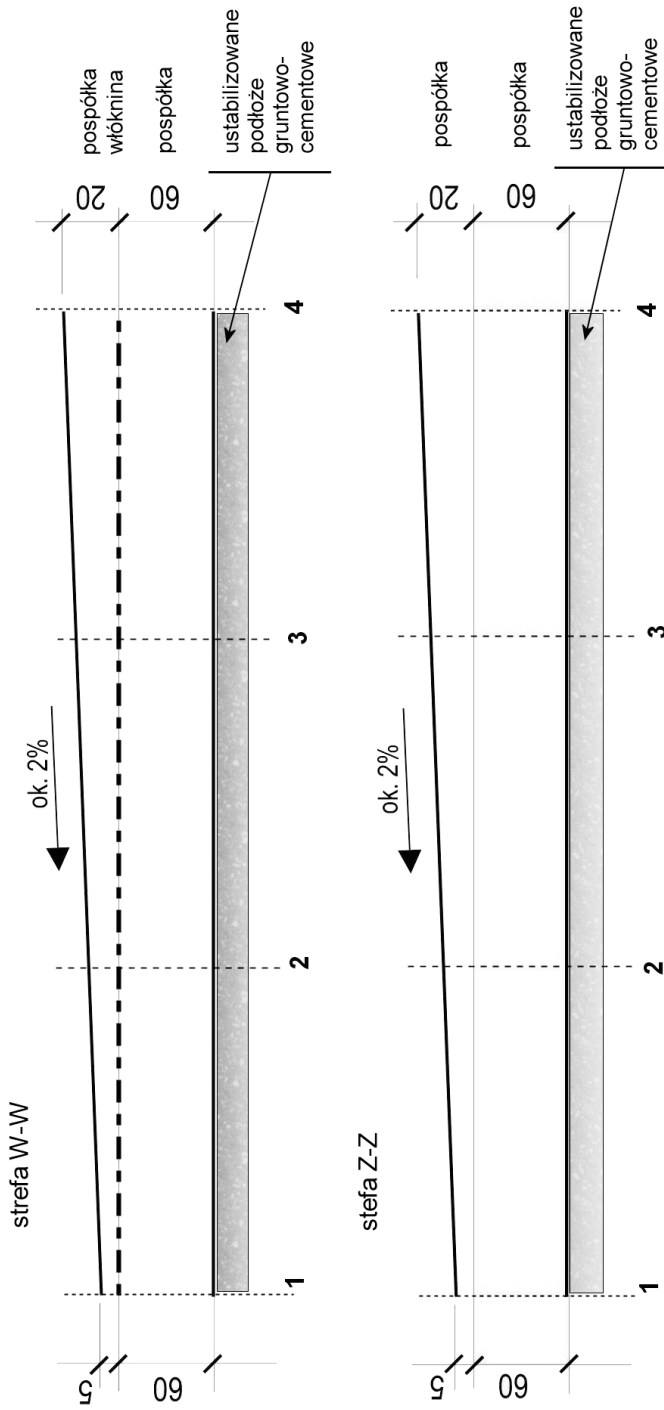
Ograniczenia te i warunki sprowadzają się do określenia rozkładu sił elementarnych i zachowań mechanicznych, oraz fizycznych, elementarnego układu „wyodrębnionego” przedstawionego na rysunku 2. Całość szerzej zakrojonego programu badawczo-pomiarowego, finansowanego ze środków własnych autora, podzielono na trzy etapy, pomiarów wstępnych, zasadniczych i pomiarów końcowych. W każdym z etapów dokładano starań o jak największą porównywalność wyników pomiarów. Wszystkie wymienione od 1 do 5 warunki miał spełniać przygotowany na fragmencie modelu podłoża budowanej nawierzchni drogowej, układ stopniowej redukcji grubości warstw, stanowiący poligonowe poletko pomiarowe, jak na rysunkach 3 i 4. W etapie wstępnym, tu referowanym, w dwóch pasmach pomiarowych, wykorzystano jako dolną warstwę, sztywną płytę betonową dawnej podbudowy stabilizacji cementem, z przekładką geowłókniny warstwy gruntowej – element „W”. Element „Z” jak obok, lecz bez geowłókniny (rys. 2).



Rys.2. Analog fizyczny rozkładu sił elementarnych  
Fig.2. Physical analogue of the force distribution



Rys. 3. Plan poligonowego polećka pomiarowego  
 Fig.3. Plan of the small testing field



Rys.4. Przekroje podłużne poleitka w strefach  
 Fig.4. Cross sections along the testing fields in two strips

### 3. PODATNOŚĆ PODŁOŻY NAWIERZCHNI DRÓG

Przy określaniu doświadczalnym skuteczności stosowania poszczególnych warstw gruntowych, oraz warstw z geotekstyliami należy ustalić konsekwentnie stosowane kryterium pomiaru lub miarę. Założono, że skuteczną w takim przypadku może być podatność podłoża nawierzchni, która może mieć różne formy miar, w rodzaju modułów odkształceń, modułów deformacji objętościowej, wielkości osiadań itp. [9]. Ogólnie, jest to zdolność warstwy gruntowej do odkształceń, sprężystych i trwałych, pod wpływem obciążeń. W gruntoznawstwie drogowym, przy projektowaniu nawierzchni sztywnych wyznacza się tak zwany współczynnik podatności podłoża  $k_z$ :

$$k_z = \frac{q}{s}, \quad (1)$$

gdzie:

$q$  – jest naciskiem jednostkowym [ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ ],

$s$  – osiadanie sprężyste podłoża gruntowego [m].

Standardową i powszechną miarą podatności podłoży gruntowych, a jednocześnie pośrednią miarą zagęszczenia jest moduł odkształcenia  $E$ . Pomiar wykonuje się zestawem aparatury VSS, według normy [10], przy pomocy stalowej płyty o średnicy 0,30 m. określając pierwotny modułu odkształcenia  $E_1$  i wtórny modułu odkształcenia  $E_2$ , oraz pochodny im wskaźnika odkształcenia  $I_0$  (stosunek  $E_2 / E_1$ ) z zachowaniem procedury wstępnego obciążenia płytą. Pomiar ten można uznać za statyczny:

$$E_1 = \frac{3\Delta p_1 D}{4\Delta s_1}, \quad E_2 = \frac{3\Delta p_2 D}{4\Delta s_2}, \quad (2)$$

gdzie:

$E_1$  – pierwotny moduł odkształcenia [MPa];

$E_2$  – wtórny moduł odkształcenia [MPa];

$\Delta p_{1,2}$  – różnica obciążeń w pierwszym i drugim cyklu obciążenia w zakresie 0,05 do 0,15 MPa w przypadku podłoża gruntowego - (0,15 do 0,25 MPa przy podłożu ulepszonym);

$\Delta s_{1,2}$  – przyrost przemieszczeń odpowiednio w 1 i 2 cyklu obciążenia, odpowiadający podanemu zakresowi obciążeń;

$D$  – średnica płyty pomiarowej.

Zależność pomiędzy współczynnikiem odkształcenia  $E$  gruntu można określić wykorzystując znany wzór Garbunowa-Posadowa:

$$s = \frac{q \cdot \omega \cdot B(1 - \nu^2)}{E} \quad \text{i} \quad E = \frac{q \cdot \omega \cdot B(1 - \nu^2)}{s}, \quad (3)$$

gdzie:

- $q$  – obciążenie jednostkowe przekazywane przez powierzchnię płyty na pół-przeźren sprężystą [ $\text{kN m}^{-2}$ ],
- $B$  – szerokość płyty lub jej średnica [m],
- $E$  – współczynnik odkształcenia,
- $\omega$  – współczynnik kształtu płyty, sztywności i miejsca punktu mierzonego osiadania.

Z powyższego wzoru jednoznacznie wynika, że odkształcalność podłoża pod wpływem nacisków, oraz jego podatność zależy w zasadniczym stopniu od kształtu powierzchni nacisku i charakterystyki nacisku. Kształt pola nacisku w formie prostokąta, który występuje w przypadku dróg szynowych może być w tym przypadku uwzględniony poprzez  $\omega$ . W przypadku dróg szynowych, w podłożu nawierzchni mamy do czynienia z obciążającym kształtem wydłużonego prostokąta – podkładu i znacznie większymi obciążeniami. Stąd, charakterystyką podatności podłoża nawierzchni szynowej jest analogiczny współczynnik  $C$ , określanany jako:

$$C = \frac{P}{s_{sr}}, \quad (4)$$

gdzie:

- $p$  – średnie ciśnienie spodu podkładu [ $\text{kN m}^{-2}$ ],
- $s_{sr}$  – średnie, sprężyste osiadanie podkładu pod obciążeniem użytkowym [m].

Postać współczynnika odpowiada postaci wzoru (1) oraz związków (2) i (3).

W konstrukcjach dróg szynowych występuje też skala jakości podłoża nawierzchni, jako zespołu przyzmy podsypki i podłoża gruntowego, określająca jego jakość. Rozróżnia się podłoża; złe gdy  $C = 2 \text{ kN m}^{-3}$ , dostateczne gdy  $C = 5 \text{ kN m}^{-3}$  i bardzo dobre gdy  $C = 10 \text{ kN m}^{-3}$ . Występuje zatem pełna analogia pojęć charakterystyki podatności obu rodzajów nawierzchni dróg, przy czym współczynniki  $k_z$  i  $C$  charakteryzują podatność podłoża nawierzchni tylko w zakresie sprężystym.

Szczególną miarą podatności jest kryterium odkształceń podłoża nawierzchni, stosowane w większości metod projektowania warstw nawierzchni [11]. Wyraża się ona następującą formułą:

$$\varepsilon_p = k (1 / N_{f,p})^m, \quad (5)$$



gdzie:

- $\epsilon_p$  – odkształcenie pionowe wywołane na górnej powierzchni podłoża gruntowego przez obciążenie osią, standardową;
- $N_{f,p}$  – liczba dopuszczalnych obciążeń do osiągnięcia krytycznej głębokości koleiny;
- $k, m$  – współczynniki empiryczne, które według kryterium Instytutu Asfaltowego są równe:  $k = 1,05$ ;  $m = 0,223$ ;

czyli

$$N_{fs} / N_{fj} = (\epsilon_{pj} / \epsilon_{ps})^{1/m} = (\epsilon_{pj} / \epsilon_{ps})^{4,484}, \quad (6)$$

gdzie:

- $\epsilon_{pj}, \epsilon_{ps}$  – odkształcenia wywołane na górnej powierzchni podłoża gruntowego odpowiednio przez obciążenie osią rzeczywistą ( $j$ ) i standardową ( $s$ ).

Zależność (6) jest zatem kryterium zmęczeniowym dla podłoża gruntowego nawierzchni, związanym ściśle z regułą Minera i nieco odległym od przedmiotu pomiarów i dociekań.

## 4. POLIGONOWE POLETKO POMIARÓW PODATNOŚCI

W obrębie placu budowy skrzyżowania ulic Wołowskiej i Marynarskiej w Warszawie, w rejonie przystanku autobusowego ulicy Marynarskiej, wybudowano stosowny układ modelu warstw gruntowych, podłoża nawierzchni drogowej, według dokumentacji i własnym nakładem środków finansowych autora.

Do konstrukcji poletka użyto:

- piasek gruby, zbliżony do pospółki, identyfikowany przez:  $\rho_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$ ;  $W_p = 36 \%$ ;  $U = 11$ ,  $w_{nos} = 14 \%$ ,
- geowłókniny, nazwanej „pled” o parametrach: masa powierzchniowa  $300 \text{ g/m}^2$ , wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż pasma –  $7 \text{ kN/m}$ , siła na przebicie (metoda CBR) –  $2 \text{ kN}$ , wydłużenie względne w poprzek pasma przy zrywaniu –  $75 \%$ .

Pomiarów zagęszczenia dokonano według [10], metodą bezpośrednią oznaczając  $I_s$ . Pierwszą serię pomiarów wykonano dla stanu [I] – o zagęszczeniu  $I_s = 0,97$ , a drugą dla stanu [II] o zagęszczeniu  $I_s = 0,98$ . Dwa stany nie dogęszczenia, są zamierzone jako warunek punktu 2.3. i możliwość sprawdzenia hipotezy mobilizacji „efektu wzmocnienia” uwarstwienia podłoża nawierzchni – geowłókniną. Mała różnica wskaźnika zagęszczenia  $I_s$  może mieścić niekiedy w dokładności pomiarów. W tym przypadku różnica w zagęszczeniu była wyraźna.

## 5. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Pomierzone moduły odkształcenia są pewną miarą podatności, zdolności do odkształceń pod wpływem obciążenia, tych samych układów warstw o różnej grubości i strukturze. Pospółka z „przekładką” geowłókniny – punkty a i c [strefa W-W] i pospółka bez geowłókniny – punkty b i d, [strefa Z-Z] na rys. 3. Jest to pomiar statyczny, obciążeń wolnozmiennych, wykonany w fazie pomiarów wstępnych, w którym różnice odkształcalności poszczególnych układów warstw, przy dwóch stanach nie dogęszczenia, sporządzonych z tych samych materiałów, lecz różnych grubości spodziewane były jako ewidentnie różne. Wyniki zestawione w tabelach 1 i 2 okazują się jednak bardzo zbliżone i porównywalne rzędem wielkości, nie wykazujące istotnych różnic. Okazuje się zatem, że „efekt wzmocnienia” układu warstwowego przez geowłókniny, jeżeli taki jest mierzalny, powinien być wykazany innym pomiarem. Niewielka ilość punktów pomiarowych, podyktowana była tym, że wjazd samochodu – przeciwwagi – wymagał kolejnej odbudowy struktury poletka doświadczalnego w poszczególnych sekcjach.

Tablica 1. Wyniki pomiarów modułu odkształcenia  
Table 1. Results of tests – modulus of deformation, stage I

Nr pomiaru „VSS”	Pierwotny moduł odkształcenia $E_1$ [MPa]	Wtórny moduł odkształcenia $E_2$ [MPa]	Wskaźnik odkształcenia $I_o = E_2 / E_1$
nie zagęszczony stan I			
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

Tablica 2. Wyniki pomiarów modułu odkształcenia  
Table 2. Test results – modulus of deformation, stage II

Nr pomiaru „VSS”	Pierwotny moduł odkształcenia $E_1$ [MPa]	Wtórny moduł odkształcenia $E_2$ [MPa]	Wskaźnik odkształcenia $I_o = E_2 / E_1$
nie zagęszczony stan II			
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

## 6. WNIOSKI

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

1. W przypadku gdy miarą podatności jest dokonany pomiar (VSS), statyczny modułu odkształcenia  $E_o$ , a więc obciążenia wolnozmiennie, zmniejszenie podatności, czyli wzmocnienie podłoża nawierzchni geowłókniną, jest bardzo mało znaczące.
2. Pomierzone bezwzględne wartości modułów nie są miarodajne co do jakości sporządzonego podłoża nawierzchni, które nie spełnia wymagań normowych w tym zakresie. Dowodzą tylko niepełnych stanów zagęszczeń i nie najwyższej jakości materiału gruntowego użytego do doświadczeń. Stan ten był zamierzony dla wypełnienia celu badań.
3. Efekt wzmocnienia gruntowego układu warstw z użytą warstwą geowłókniny należy uznać za pomijalny i w tym przypadku nie zmierzony. Jeśli przyjętą miarą nośności może być podatność mierzona modułem odkształcenia, to przyrost nośności, czyli zmniejszona podatność jest zaledwie kilkuprocentowa i znikoma.
4. W przypadku układu warstw samego gruntu występuje niemal pełna proporcjonalność pomiędzy grubością warstwy gruntu, a wzrastającą podatnością. Największą podatność, czyli odkształcalność wykazuje 60 cm warstwa gruntu, przy pierwszym stanie niedogęszczenia.

Oczywistość niektórych wniosków jest aż nadto pewna. Ich sformułowanie pozwala jednak, na ustalenie jak dalece podjęte badania nie spełniają założonego celu. Ściśle rzecz biorąc pewien cel został osiągnięty ponieważ powiodło się samo sprawdzenie, ustalenie wniosków i wykluczenie powziętej hipotezy. Wnioski pozwalają też na jednoznaczne odrzucenie pomiaru modułu odkształcenia, jako sposobu mierzenia efektu wzmocnienia warstwy gruntu modelowego podłoża nawierzchni przez warstwę geowłókniny. W każdym przypadku, możliwe są różne interpretacje tego samego zjawiska fizycznego i często, tych samych wyników. Nie mniej zagadnienie podatności i nośności podłoża nawierzchni drogowych jest dość złożone i wieloaspektowe, wymagające wielu różnych badań i pomiarów [12].

## BIBLIOGRAFIA

- [1] *Frankowska K.*: Wykorzystanie geosyntetyków do wzmacniania podłoża nawierzchni drogowych . Cz. II. Przegląd koncepcji opisu teoretycznego. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 5/2005, 391 - 397
- [2] *Sobolewski J.*: Metody projektowania nawierzchni gruntowych zbrojonych geosyntetykami. Polskie Drogi, nr 12/2006, 72 - 77

- [3] *Dobrucki D.*: Porównanie metod wzmacniania podłoża nawierzchni drogowej geosyntetykami. *Drogownictwo*, nr 10/2005, 295 - 299
- [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] *Gradkowski K.*: Wzmacnianie podłoża drogowego geosyntetykami. *Drogownictwo*, nr 2/2007, 51 - 55
- [6] *Gradkowski K.*: Koncepcja wyznaczania podatności lokalnej podłoża nawierzchni komunikacyjnych. Materiały VII Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Poznań, październik 1984, 150 - 154
- [7] *Gradkowski K., Mańko Z.*: The set-up of plate index tests and bearing capacity. *Proceedings of The International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Trondheim, Norway, 1982
- [8] *Gradkowski K.*: Pomiary porównawcze warstwowych struktur podłoża nawierzchni drogowych. Raport z badań. IDiM PW, Warszawa, grudzień 2005, 35
- [9] *Stigler-Szydło E.*: Posadowienie budowli infrastruktury transportu lądowego. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2005, 311
- [10] PN-S-02205: 1998 Drogi samochodowe – Roboty ziemne – Wymagania i badania
- [11] *Judycki J.*: Podstawy określania współczynników równoważności obciążenia osi do projektowania nawierzchni drogowych. *Drogi i Mosty*, nr 2/2006, 86
- [12] *Gradkowski K.*: Geotechniczne kryteria jakości projektowania dróg. *Drogownictwo*, nr 11/2006, 371 - 374

## **FLEXIBILITY OF LAYERS OF MODEL SUBBASE OF PAVEMENT AND STRENGTHENING EFFECT WITH GEOTEXSTILE**

### **Part I**

#### **Abstract**

This paper presents results of measurements of the deformation modulus of subbase model on the small testing field. This modulus is a measure of flexibility of different kinds of model subbase of road pavement. Comparisons of measurement results revealed few conclusions. The effect of strengthening of ground layer by geotextile was not proved by obtained results.