

Zastosowanie lekkiej płyty dynamicznej do badania gruntów zbrojonych

Mgr Grzegorz Bartnik – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

Dr hab. inż. Maria Jolanta Sulewska – Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Wśród metod oceny zagęszczenia gruntów coraz większą rolę odgrywają pośrednie metody badawcze [17]. Preferowane są te urządzenia i metody badawcze, które dzięki swojej mobilności pozwalają uzyskać wynik pomiaru w krótkim czasie, w każdych warunkach placu budowy, przekazujące, z zadowalającą dokładnością, bieżącą informację o jakości zagęszczenia gruntów wbudowywanych. Płyty dynamiczne (zwane też ugięciomierzami dynamicznymi) są obecnie powszechnie stosowane i wydaje się, że z powodu swoich niewielkich gabarytów i masy, możliwości zastosowania w miejscach trudnodostępnych i samowystarczalności oraz niskiego kosztu badania urządzenia te spełniają wymienione wymagania. Ukazują się liczne prace naukowe, których celem jest poznanie i analiza czynników wpływających na wynik pomiaru, ustalenie korelacji pomiędzy badanymi parametrami geotechnicznymi oraz wypracowanie metodyki badań [2, 6, 16]. Wyniki badań prowadzonych w kraju [3, 5] i na świecie [4, 7] potwierdzają przydatność ugięciomierza udarowego jako przyrządu stosowanego do kontroli zagęszczenia gruntu wbudowywanego w budowlę ziemne.

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat, wraz z gwałtownym rozwojem technologii robót ziemnych z użyciem geosyntetyków, pojawiła się konieczność oceny zagęszczenia podłoża zbrojonych. W literaturze nie znaleziono doniesień na temat przydatności płyty dynamicznej do oceny zagęszczenia gruntów ułożonych na podłożach z wbudowanymi geosyntetykami. Liczne są natomiast opracowania na temat przydatności tego urządzenia do oceny zagęszczenia gruntów niezbrojonych [3 ÷ 7, 16, 17]. Kontrola zagęszczenia warstw gruntów wbudowywanych w nasypy odbywa się na podstawie oceny następujących miar: wskaźnika zagęszczenia I_s lub wtórnego modułu odkształcenia E_2 i wskaźnika odkształcenia $I_o = E_2/E_1$, gdzie E_1 jest wartością pierwotnego modułu odkształcenia [13]. Badana warstwa nasypowa jest zagęszczona właściwie, gdy osiągnięta wartość przyjętej miary zagęszczenia jest większa lub równa wartości

wymaganej, podanej w odpowiedniej normie dotyczącej robót ziemnych, np. PN-S-02205:1998P [13].

Celem pracy była próba oceny możliwości zastosowania lekkiej płyty dynamicznej do badania zagęszczenia warstw gruntowych ułożonych na gruntach słabo nośnych wzmocnionych geosyntetykiem.

OPIS PROCEDURY BADAWCZEJ

Przeprowadzono badania warstw kruszywa ułożonych na słabym podłożu gruntowym z wbudowanym geosyntetykiem. Badane podłoże modelowano na stanowisku badawczym w laboratorium.

Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze stanowiła skrzynia drewniana o wymiarach: długość $l = 250$ cm, szerokość $s = 150$ cm i wysokość $h = 125$ cm, ustawiona na posadzce betonowej (rys. 1). W celu zabezpieczenia gruntu i kruszywa przed zmianami wilgotności podczas pomiarów wewnątrz skrzyni pokryto impregnatem oraz dodatkowo wyłożono folią paroizolacyjną. Stanowisko badawcze wyposażono w konstrukcję stalową, umożliwiającą obciążenie statyczne podłoża płytą VSS.

Modelowanie podłoża gruntowego o zmiennej nośności

Geosyntetyki w roli wzmocnienia są stosowane w przypadku podłoża charakteryzujących się modułem odkształcenia $E_2 < 30$ MPa [14], dlatego w modelach podłoża przygotowywa-



Rys. 1. Stanowisko badawcze

nych na stanowisku badawczym słaba warstwa gruntu powinna spełniać ten warunek. Biorąc pod uwagę potencjalne trudności z zastosowaniem gruntów naturalnych do modelowania warstw gruntów słabych (z ich przygotowywaniem, formowaniem i zagęszczaniem), podjęto próbę modelowania słabego podłoża z użyciem innego materiału, aby uzyskać wartość wtórnego modułu odkształcenia podłoża $E_2 < 30$ MPa.

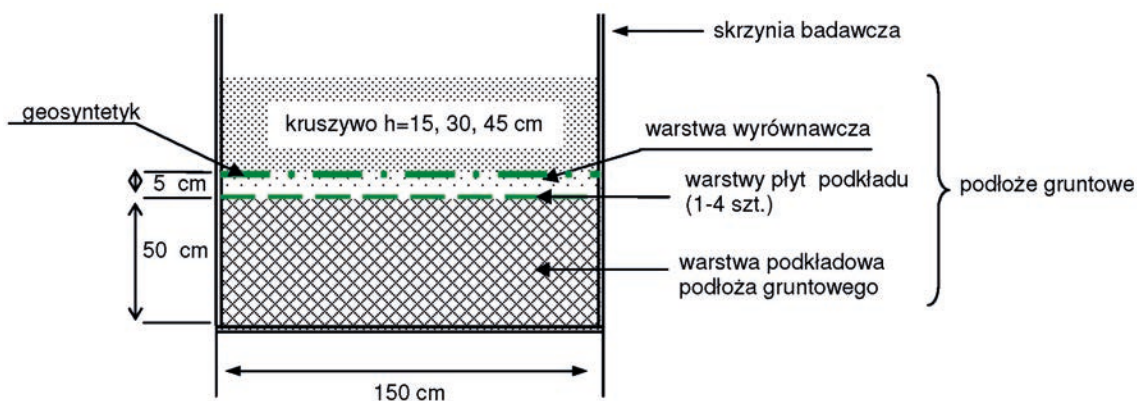
Podłoże gruntowe o zmiennej nośności modelowano za pomocą układu warstw materiałów według schematu przedstawionego na rys. 2.

Najniższą warstwę badanych modeli czyli warstwę podkładową podłoża gruntowego o miąższości równej 0,5 m ułożono z gruntu niespoistego – piasku średniego (MSa), charakteryzującego się następującymi parametrami geotechnicznymi: wilgotność optymalna $w_{opt} = 10,75\%$, maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego $\rho_{ds} = 1,79$ g/cm³, gęstość objętościowa gruntu $\rho \approx 1,89$ g/cm³, wilgotność $w \approx 9\%$, wskaźnik zagęszczenia $I_s \approx 0,98$. Po zagęszczeniu wibratorem powierzchniowym warstwa ta nie była przebudowywana.

Zmienny moduł odkształcenia podłoża gruntowego uzyskano poprzez zastosowanie od jednej do czterech warstw cienkich płyt z tworzywa sztucznego, ułożonych na powierzchni warstwy podkładowej podłoża gruntowego. Były to płyty o grubości około 2 mm, stosowane w budownictwie jako podkład pod panele podłogowe. Zmienna liczba ułożonych płyt $k = 1 \div 4$ umożliwiła uzyskanie podłoża gruntowych o różnych wartościach modułów odkształcenia. Na powierzchni płyt formowano warstwę wyrównawczą o grubości 5 cm z piasku średniego. Warstwa wyrównawcza nie była zagęszczana, a jej zadaniem było zapobieganie poślizgowi geosyntetyku po płytach podkładu. Uzyskane średnie wartości i odchylenia standardowe pierwotnego E_1 i wtórnego E_2 modułu odkształcenia z pomiarów na 3 modelach podłoża z daną liczbą płyt podkładu oraz średnie wartości i odchylenia standardowe modułu E_{vd} z 4 pomiarów na 3 modelach podłoża z daną liczbą płyt, przeprowadzanych na powierzchni warstwy wyrównawczej w zależności od liczby płyt zestawiono w tabl. 1. W celu porównania pokazano także wartości modułów zbadanych na powierzchni przygotowanej warstwy podkładowej bez wbudowanych płyt podkładu: $k = 0$.

Tabl. 1. Wartości modułów odkształcenia E_1 , E_2 oraz E_{vd} w zależności od liczby wbudowanych płyt podkładu

Liczba płyt podkładu k	E_1 [MPa]		E_2 [MPa]		E_{vd} [MPa]	
	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
0	20,45	–	56,25	–	31,35	0,96
1	8,60	0,98	31,84	0,26	14,96	0,65
2	9,12	0,09	21,16	0,42	10,33	1,22
3	6,18	1,04	12,53	0,28	6,08	0,40
4	6,06	0,29	9,32	0,17	4,58	0,27



Rys. 2. Przekrój pionowy badanego podłoża

Tabl. 2. Parametry geowłókniny odmiany 400 według Aprobaty technicznej [1]

Gramatura	g/m^2	400
Gęstość	g/cm^3	1,38
Grubość przy nacisku: – 2 kPa – 20 kPa – 200 kPa	mm mm mm	2,0 1,9 1,4
Wytrzymałość na rozciąganie	wzdłuż pasma, kN/m w poprzek pasma, kN/m	16 21
Wydłużenie	wzdłuż pasma, % w poprzek pasma, %	80 80
Siła przebicia (metoda CBR)	kN	2,6
Średnica otworu przy dynamicznym przebiciu (metoda spadającego stożka)	mm	21
Prędkość przepływu wody prostopadle do płaszczyzny wyrobu	mm/s	36



Rys. 3. Warstwa geosyntetyku w skrzyni stanowiska badawczego

Można zauważyć, że średnia wartość modułu E_2 zmniejszyła się od 56,25 MPa na powierzchni warstwy podkładowej podłoża gruntowego, poprzez 31,84 MPa przy wbudowanej 1 płycie podkładu do 9,32 MPa przy 4 płytach podkładu, a odchylenie standardowe ma małą i prawie niezmienną wartość, co świadczy o dobrej powtarzalności wyników. Taką samą prawidłowość wykazują średnie wartości i odchylenia standardowe modułu E_{vd} . Na tej podstawie uznano, że taki sposób modelowania może odzwierciedlać obecność słabo nośnej warstwy gruntu w podłożu.

Zbrojenie podłoża geosyntetykiem

Do wzmocnienia gruntów słabo nośnych zastosowano geowłókninę o parametrach zestawionych w tabl. 2.

Geosyntetyk układano w postaci pojedynczej warstwy tkanki na powierzchni warstwy wyrównawczej (rys. 3).

Badana warstwa kruszywa

Górną warstwę modelowanego podłoża stanowiło kruszywo łamane dolomitowe o ciągłym uziarnieniu 0/31,5 mm. Wykonano badania najważniejszych właściwości kruszywa:

- skład granulometryczny określono według PN-EN 933-1:2012E [10],
- zawartość pyłów równą 7,94% określono według PN-EN 933-1:2012E [10],
- wilgotność optymalną $w_{opt} = 8,0\%$ oraz maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego $\rho_{ds} = 2,16 \text{ g/cm}^3$ określono według PN-EN 13286-2:2010E [12].

Kruszywo układano bezpośrednio na geosyntetyku, a następnie zagęszczano zagęszczarką płytową (wibratorem powierzchniowym EWD12 z przymocowaną płytą stalową o wymiarach $43 \times 60 \text{ cm}$).

Zakres badań

Plan badań uwzględniał następujące wielkości zmienne:

- trzy różne miąższości warstwy kruszywa: $h_1 = 15 \text{ cm}$; $h_2 = 30 \text{ cm}$ oraz $h_3 = 45 \text{ cm}$,
- cztery różne nośności podłoża gruntowego, osiągnięte poprzez zróżnicowanie liczby warstw podkładu $k = 1 \div 4$,
- trzy różne stany zagęszczenia kruszywa: $I_{s1} = 0,88 \div 0,92$; $I_{s2} = 0,93 \div 0,96$; $I_{s3} = 0,97 \div 0,99$, osiągnięte poprzez zróżnicowanie czasu zagęszczania kruszywa wibratorem powierzchniowym.

Do każdego modelu podłoża wykonywano:

- badania wilgotności wbudowywanego kruszywa według [11],
- pomiary zmian miąższości kruszywa w trakcie postępującego procesu zagęszczania w celu wyznaczenia gęstości objętościowej szkieletu zagęszczanego kruszywa za pomocą niwelatora geodezyjnego [9], przy czym początkowa gęstość objętościowa szkieletu gruntowego kruszywa luźno usypanego (zbadana w mniejszej skrzyni) wynosiła $\rho_{dp} = 1,56 \text{ g/cm}^3$,
- cztery pomiary dynamicznego modułu odkształcenia E_{vd} oraz stosunku osiadań do prędkości osiadań płyty s/v , za pomocą lekkiej płyty dynamicznej ZFG 3000 według [8, 18], z których obliczano wartości średnie $E_{vd\bar{s}}$ i $(s/v)_{\bar{s}}$,
- pomiar pierwotnego E_1 i wtórnego E_2 modułu odkształcenia płytą obciążoną statycznie oraz wskaźnika odkształcenia I_o według [13].

STATYSTYCZNA ANALIZA WYNIKÓW

W wyniku badań 36 modelowanych podłoży uzyskano zbiór $n = 36$ przypadków, opisanych ośmioma zmiennymi: $E_{vd\bar{s}}$, $(s/v)_{\bar{s}}$, E_1 , E_2 , I_o , I_s , ρ_d , w (tabl. 3).

Statystyczna analiza wyników miała na celu weryfikację założenia, że przy użyciu lekkiej płyty dynamicznej jest możliwa ocena wartości: pierwotnego E_1 i wtórnego modułu E_2 odkształcenia oraz wskaźnika zagęszczenia I_s , zagęszczanych warstw kruszywa ułożonych na słabym podłożu gruntowym wzmocnionym geowłókniną oraz opracowanie empirycznych modeli liniowych regresji prostej oraz regresji wielokrotnej badanych parametrów.

Tabl. 3. Zestawienie analizowanych zmiennych wraz z głównymi parametrami statystycznymi

Parametr	Wartość średnia $\bar{x}$	Wartość minimalna $x_{\min}$	Wartość maksymalna $x_{\max}$	Odchylenie standardowe $s_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{36} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$
E_{vdsr} [MPa]	14,75	3,69	24,84	5,84
$(s/v)_{sr}$ [ms]	7,08	5,81	8,84	0,99
E_1 [MPa]	14,54	3,92	32,14	7,63
E_2 [MPa]	31,25	9,11	54,88	13,34
I_o [-]	2,26	1,55	3,88	0,60
I_s [-]	0,94	0,88	0,99	0,04
ρ_d [g/cm ³]	2,04	1,90	2,14	0,08
w [%]	7,02	6,54	7,41	0,26

Tabl. 4. Macierz współczynników r korelacji liniowej Pearsona

Zmienna	E_{vdsr}	$(s/v)_{sr}$	E_1	E_2	I_o	I_s	ρ_d	w
E_{vdsr}	1,00							
$(s/v)_{sr}$	-0,68	1,00						
E_1	0,92	-0,76	1,00					
E_2	0,86	-0,80	0,87	1,00				
I_o	-0,25	0,12	-0,42	0,06	1,00			
I_s	0,48	-0,45	0,64	0,29	-0,82	1,00		
ρ_d	0,45	-0,44	0,61	0,27	-0,82	1,00	1,00	
w	0,20	0,01	0,09	0,02	-0,12	-0,01	0,02	1,00

Wykonano kolejne kroki statystycznej analizy wyników badań, korzystając z programu komputerowego STATISTICA PL w. 10 [15]. Badanie hipotez o normalności rozkładu każdej z analizowanych zmiennych zbioru wszystkich wyników badań wykonano przy użyciu testu W Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Dla czterech zmiennych: E_{vdsr} , E_1 , E_2 oraz w nie było podstaw do odrzucenia hipotezy zakładającej rozkład normalny zmiennej. Analizę korelacji przeprowadzono na podstawie macierzy współczynników korelacji Pearsona r (tabl. 4), w której statystycznie istotne współczynniki korelacji zapisano czcionką pogrubioną.

Wysoka, istotna korelacja występuje między zmiennymi przyjętymi jako zmienne zależne: E_1 , E_2 a zmiennymi przyjętymi jako niezależne: E_{vdsr} i $(s/v)_{sr}$. Niższą, ale również istotną statystycznie korelację obserwuje się między zmiennymi: I_s , ρ_d a E_{vdsr} i $(s/v)_{sr}$. Należy jeszcze zauważyć, że na wartość modułu E_1 i wskaźnika I_o ma wpływ na zagęszczenie podłoża, wyrażone parametrami I_s i ρ_d .

Ustalono następujące zależności prostej regresji liniowej, gdzie r^2 jest współczynnikiem determinacji:

$$E_1 = -3,06 + 1,17E_{vdsr} \pm 2,88, \quad r = 0,92, \quad r^2 = 0,84 \quad (1)$$

$$E_2 = -0,12 + 2,08E_{vdsr} \pm 6,91, \quad r = 0,86, \quad r^2 = 0,75 \quad (2)$$

$$I_s = 0,892 + 0,003E_{vdsr} \pm 0,034, \quad r = 0,48, \quad r^2 = 0,23 \quad (3)$$

Widać, że regresją liniową wyjaśniono odpowiednio około 84% i 75% zaobserwowanej zmienności zmiennych E_1 i E_2 . W przypadku zmiennej I_s równaniem (3) wyjaśniono tylko około 23% obserwowanej zmienności, czyli prognostyczna wartość modelu jest niska.

W kolejnym kroku poddano analizie modele o dwóch zmiennych. Najbardziej przydatne w praktyce są zależności parametrów geotechnicznych E_1 i E_2 i I_s od wyników badań lekką płytą dynamiczną E_{vdsr} i $(s/v)_{sr}$, ze względu na łatwość wyznaczenia potrzebnych zmiennych niezależnych. Mimo pewnej współliniowości zmiennych niezależnych E_{vdsr} i $(s/v)_{sr}$ (tabl. 4) w modelach regresji wielorakiej (wzory (4) i (5)) wszystkie wyrazy są istotne statystycznie, a prawdopodobieństwo testowe $p = 0,0000 \div 0,0173 < 0,05$. Sprawdzono także wskaźniki statystyczne do wykrycia nadmiarowości wprowadzanych do modelu zmiennych objaśniających (np. tolerancja w obu modelach przy obu zmiennych wynosi 0,537, a czynnik inflacji wariancji $CIW = 1,86$, co świadczy o niezakłócającej współliniowości zmiennych opisujących [15]). Ostatecznie ustalono następujące równania regresji o nieco wyższych współczynnikach determinacji niż w modelach (1) ÷ (2):

$$E_1 = -13,95 + 0,94E_{vdsr} - 1,92(s/v)_{sr} \pm 2,57, \quad (4)$$

$$r = 0,94, \quad r^2 = 0,88$$

$$E_2 = 49,90 + 1,42E_{vdsr} - 5,66(s/v)_{sr} \pm 5,68, \quad (5)$$

$$r = 0,91, \quad r^2 = 0,83$$

Na rys. 4 ÷ 5 pokazano błąd względny RE przewidywania modułów E_1 i E_2 za pomocą modeli (4) ÷ (5), obliczony według wzoru:

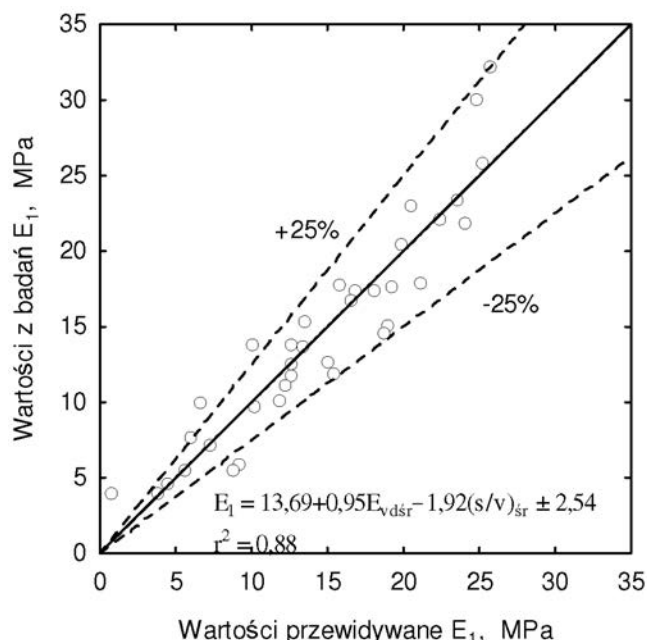
$$RE = \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\% \quad (6)$$

gdzie:

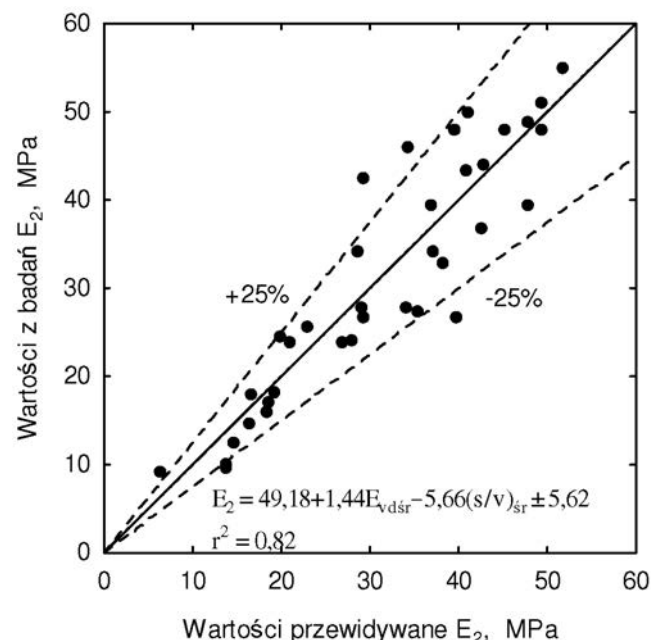
y_i – wartość parametru uzyskana z badań,

$\hat{y}_i$ – wartość parametru przewidywana modelem.

W modelu $I_s = f(E_{vdsr}, (s/v)_{sr})$ wszystkie wyrazy okazały się nieistotne statystycznie. Uwzględnienie w modelu I_s , obok zmiennej $(s/v)_{sr}$, także zmiennej I_o pozwala zwiększyć wartości współczynników r i r^2 :



Rys. 4. Porównanie wartości E_1 z badań z wartościami E_1 przewidywanymi modelem (4) wraz ze stózkami błędów względnego $RE = 25\%$



Rys. 5. Porównanie wartości E_2 z badań z wartościami E_2 przewidywanymi modelem (5) wraz ze stózkami błędów względnego $RE = 25\%$

$$I_s = 1,167 - 0,014(s/v)_{sr} - 0,055I_o \pm 0,017 \quad (7)$$

$$r = 0,90, \quad r^2 = 0,81$$

Należy zauważyć, że wprowadzenie do modelu (7) zmiennej I_o zmniejsza możliwość praktycznego wykorzystania modelu, gdyż powoduje konieczność wykonania badania płytą VSS wraz z wszystkimi jej niedogodnościami. W praktyce budowlanej może być przydatny następujący wzór:

$$I_s = 1,071 - 0,058I_o \pm 0,022, \quad r = -0,82, \quad r^2 = 0,67 \quad (8)$$

PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy wszystkich danych z przeprowadzonych badań warstw kruszywa o miąższościach 15; 30 i 45 cm opracowano modele (1) ÷ (2) i (4) ÷ (5) uzależniające E_1 i E_2 od wyników pomiarów lekką płytą dynamiczną. Modele regresji wielokrotnej: $E_1 = -13,69 + 0,95E_{vdśr} - 1,92(s/v)_{sr} \pm 2,54$ i $E_2 = 49,18 + 1,44E_{vdśr} - 5,66(s/v)_{sr} \pm 5,62$ mają wysokie współczynniki determinacji $r^2 = 0,88$ i $0,83$, na podstawie których wartość prognostyczną modeli można uznać za zadowalającą. Błąd względny przewidywania obu modułów odkształcenia na podstawie powyższych zależności wynosi około 25%. Nie udało się uzyskać przydatnych w praktyce inżynierskiej modeli I_s opartych na wynikach badań lekką płytą dynamiczną. W następnym etapie należy przeanalizować zagadnienie, jaka powinna być optymalna miąższość warstwy kruszywa ułożonej na geowłókninie przy kontroli jakości zagęszczenia za pomocą lekkiej płyty dynamicznej.

LITERATURA

1. Aprobata techniczna IBDiM nr AT/2004-04-1636 Geowłóknina poliestrowa DRENOTEX TFP odmiany: 200, 300, 400. IBDiM, 2004.

2. Fleming P. R.: Small-scale dynamic devices for the measurement of elastic stiffness modulus on pavement foundations. *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli*, Vol. 3, ASTM STP 1375, S.D. Tayabji, and E.O. Lukanen (Eds.), ASTM International, West Conshohocken PA 2000, 41-58.
3. Janiński S., Nowak J., Stankowski Z., Sobkowiak J.: Zastosowanie lekkiego ugięciomierza dynamicznego ZFG 02 do badań zagęszczenia piasków drobnych. II Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowoczesne technologie w budownictwie drogowym”, Poznań 6-7 września 2001, 491-498.
4. Kavussi A., Rafiei K., Yasrobi S.: Evaluation of PFWD as potential quality control tool of pavement layers. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 16, No. 1, 2010, 123-129.
5. Maślakowski M., Bartnik G., Kowalczyk S.: Wpływ geosyntetyków na dobór metody pomiaru odkształcenia podłoża. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, T. 4, nr 4/2013, 281-286.
6. Mooney M. A., Miller P. K.: Analysis of Lightweight Deflectometer test based on in situ stress and strain response. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 2, 2009, 199-208.
7. Nazzari M., Abu-Farsakh M., Alshibli K., Mohammad L.: Evaluating the potential use of a portable LFWD for characterizing pavement layers and subgrades. *Conference of Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, Geo-Trans 2004, Vol. 1, ASCE Geotechnical Special Publication, No. 126, Los Angeles 2004, 915-924.
8. Operating manual for the light drop weight tester ZFG 3000. ZORN Instruments, Germany, 18-10-2010.
9. Pisarczyk S.: Zagęszczalność gruntów gruboziarnistych i kamienistych. Politechnika Warszawska. Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Dróg i Mostów, Warszawa 1977.
10. PN-EN 933-1:2012E Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Oznaczanie składu ziarnowego – Metoda przesiewania.
11. PN-EN 1097-5:2008E Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 5: Oznaczanie zawartości wody przez suszenie w suszarni z wentylacją.
12. PN-EN 13286-2:2010E Mieszanki niezwiązane i związane hydraulicznie – Część 2: Metody badań laboratoryjnych gęstości na sucho i zawartości wody – Zagęszczanie metodą Proktora.

13. PN-S-02205:1998P Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
14. Recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcement – EBGEO. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V./German Geotechnical Society (Ed.), Ernst & Sohn, Berlin 2011.
15. Stanisław A.: Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny. Tom 2. Modele liniowe i nieliniowe. StatSoft, Kraków 2007.
16. Sulewska M. J.: Doświadczenia ze stosowania lekkiego ugięciomierza dynamicznego. Drogownictwo, nr 11/2003, 365-367.
17. Sulewska M. J.: Sztuczne sieci neuronowe w ocenie parametrów zagęszczenia gruntów niespoistych. IPPT PAN, Studia z Zakresu Inżynierii, nr 64, Warszawa-Białystok 2009.
18. TP BF – StB Teil B 8.3 Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau: Dynamischer Plattendruckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 2012.