

WYBRANE ZWIĄZKI KORELACYJNE PARAMETRÓW ZAGĘSZCZENIA OKREŚLONE METODAMI VSS I LFG

Maciej Kordian KUMOR*, Joanna FARMAS, Łukasz Aleksander KUMOR

Katedra Geotechniki, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy ul. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Streszczenie: Geotechniczna ocena poprawności wykonania korpusu drogowego obejmuje szereg zagadnień, wśród których istotne są dobór i kontrola jakości wykonywanych robót ziemnych. Artykuł przedstawia wyniki badań *in situ* nad określeniem zależności korelacyjnych pomiędzy parametrami oznaczonymi za pomocą badań płytą sztywną VSS – E_1 i E_2 , a uzyskanymi z badania lekką płytą dynamiczną LFG. Badania wskazują, iż określenie związków korelacyjnych pomiędzy parametrami charakteryzującymi uziarnienie (C_C , C_U , D_{10} , D_{20} , D_{30} , D_{60}), a parametrami odkształceniowymi uzyskanymi podczas sprawdzania jakości zagęszczenia piasku średniego równoziarnistego wbudowanego w nasyp (E_{vd} , E_1 , E_2 , I_0) jest aktualnie trudne praktycznie lub fizycznie złożone.

Słowa kluczowe: zagęszczanie nasypów, dynamiczny moduł odkształcenia, statyczny moduł odkształcenia, wskaźniki zagęszczenia.

1. Wprowadzenie

Geotechniczna ocena poprawności wykonania korpusu drogowego obejmuje szereg zagadnień, wśród których szczególnie istotne są zarówno dobór stosowanego materiału, jak i kontrola jakości wykonywanych robót ziemnych. Dotyczy to szczególnie jednoznaczności i pewności oceny stanu zagęszczenia kolejnych warstw gruntu w nasypie budowlanym. Jak wiadomo, materiał gruntowy używany do formowania nasypu powinien charakteryzować się odpowiednim składem granulometrycznym i mineralnym, gwarantującym uzyskanie wymaganych właściwości mechanicznych konstrukcji ziemnej oraz racjonalnie uzasadnione zagęszczenie. Korpus nasypu drogowego powinien uzyskać wartości liczbowe parametrów geotechnicznych zapewniające zaprojektowaną nośność, odkształcalność, trwałość i bezpieczeństwo konstrukcji (PN-S-02205:1998 *Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania*).

Zgodnie z zaleceniami normy PN-S-02205:1998, podstawowymi parametrami gruntów, umożliwiającymi poprawny dobór i ocenę przydatności materiału są: wskaźnik jednorodności uziarnienia C_U oraz wskaźnik krzywizny C_C . Ocenę jakości zagęszczenia dokonuje się zwykle na podstawie wartości umownych parametrów, to jest wskaźnika zagęszczenia I_S lub stopnia zagęszczenia I_D . Alternatywnie można oceniać zagęszczenie gruntów w nasypie na podstawie wartości wskaźnika odkształcenia I_0 , który jest zdefiniowany jako stosunek modułów:

odkształcenia wtórnego E_2 do pierwotnego E_1 , otrzymanych podczas badania płytą sztywną VSS (PN-S-02205:1998). Badanie statyczne płytą VSS jest stosunkowo czasochłonne i kłopotliwe w praktycznych warunkach utrzymania tempa robót ziemnych. Ponieważ ze względów realizacyjnych, dąży się do skrócenia czasu oczekiwania na wynik badania zagęszczenia, istnieje potrzeba opracowania „szybkiej” metody uzyskania wyniku, najlepiej już w trakcie sprawdzających badań kontrolnych. Wyniki pozyskane w wyniku zastosowania szybkiej metody w sposób jednoznacznie wiarygodny i prosty powinny określać jakość zagęszczenia warstwy gruntu w sukcesywnie zagęszczanym nasypie, na przykład na podstawie zależności korelacyjnych.

W celu określenia możliwych związków fizycznych pomiędzy stosowanymi metodami kontroli w zależności od stanu zagęszczania nasypu, wykonano serie badań polowych na poligonie w trakcie realizacji korpusu drogowego nowo budowanej ulicy (rys. 1).

W trakcie badań przeprowadzono szczegółowe analizy geotechniczne identyfikujące cechy fizyczne i mechaniczne gruntów niespoistych zastosowanych do wbudowania w konstrukcję nasypu. Wyniki badań polowych i laboratoryjnych poddano analizie matematycznej. Poszukiwano użytecznej praktycznie, możliwie prostej formuły w postaci liniowej zależności funkcyjnej, na potrzeby szybkiej oceny zagęszczenia wbudowywanego materiału gruntowego.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: mkkumor@utp.edu.pl



Rys. 1. Widok badanych warstw nasypu korpusu drogowego

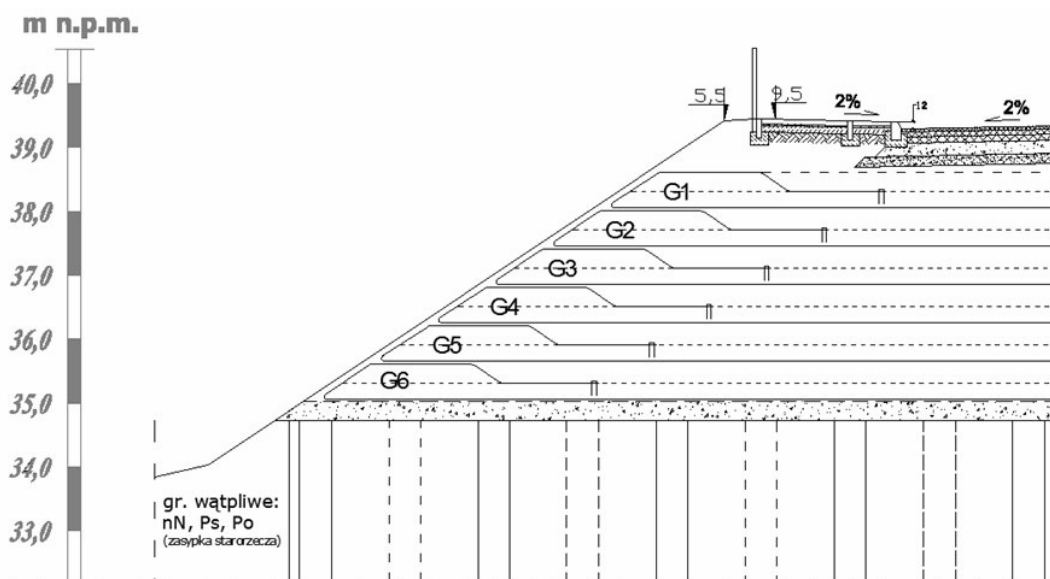
Oczekiwaniem badawczym, najbardziej przydatnym z praktycznego punktu widzenia, byłoby ustalenie zależności korelacyjnej pomiędzy modułem odkształcenia badanym płytą statyczną VSS i dynamicznym modułem odkształcenia określonym przy pomocy płyty dynamicznej LFG. Ponadto, poszukiwano innych związków formalnych pomiędzy zbadanymi parametrami geotechnicznymi gruntu. Analizę odniesiono do wymaganych projektem parametrów stanu zagęszczenia warstw konstrukcji nasypu budowlanego korpusu drogowego, na poziomie istotności statystycznej $\alpha = 0,05$.

Niniejszy artykuł przedstawia wyniki badań *in situ* nad określeniem zależności korelacyjnych pomiędzy parametrami kontrolowanymi metodą statyczną i dynamiczną, to jest – wartościami modułów odkształcenia określonymi przy pomocy badań płytą

statyczną VSS – E_1 i E_2 , a wartościami modułu dynamicznego E_{vd} uzyskanymi z badania lekką płytą dynamiczną LFG oraz poszukiwanie związków z innymi parametrami opisującymi stan ośrodka gruntowego.

2. Charakterystyka obiektu doświadczalnego

Teren poligonu badawczego stanowił nowo realizowany nasyp obejmujący ponad 700 metrowy odcinek drogi miejskiej. Nasyp korpusu drogowego zaprojektowano jako konstrukcję zbrojoną na długości około 180 m. Odcinek badawczy składał się z 6 warstw (od G1 do G6) wzmocnionych siatką geosyntetyczną oraz warstw wyrównujących (rys. 2). Przed formowaniem nasypu wzmocniono podłoże korpusu drogowego ze względu



Rys. 2. Konstrukcja nasypu zbrojonego geosyntetykami badanych warstw korpusu drogowego

na występowanie miększych, nieregularnych warstw namulów gliniastych (Nmg) i piaszczystych (Nmp), torfów (Tp) oraz węgla brunatnego (Cb), zalegających w dolinie rzecznej. Mięszczość nieskonsolidowanych organicznych gruntów w strefie przypowierzchniowej starorzecza wynosiła od 2,0 m do co najmniej 4,0 m. Warstwa słabonośna oraz strefa węgla brunatnych, gruntów organicznych i miękkoplastycznych pyłów sięgały do głębokości 11 m poniżej podstawy projektowanego korpusu drogowego (rys. 3).



Rys. 3. Warstwy węgla brunatnego oraz namulów i osadów organicznych pod badanym nasypem drogowym

Geomaterace posadowione zostały na warstwie stanowiącej platformę roboczą, zbudowanej z tłucznia melafirowego frakcji 16-32 mm, o mięszczości od 0,2 m do 0,5 m. Platforma robocza założona została na stropie podłoża wzmocnionego kolumnami betonowymi CMC. Zabiegi te miały na celu zapewnienie między innymi prawidłowego posadowienia korpusu oraz stworzenie dobrej drogi filtracji przez podstawę korpusu, w warunkach wysokich stanów wód w okresie sezonowych podtopień i stanów powodziowych (Kumor i in., 2008).

W projekcie nasypu drogowego (Kumor i in., 2008), określono szczegółowe specyfikacje i wytyczne odnośnie do wymaganych wartości liczbowych parametrów zagęszczenia poszczególnych warstw gruntu korpusu drogi zbrojonego geosyntetykami. W analizowanym nasypie wartości parametrów geotechnicznych wynosiły:

- platforma robocza o grubości 30 cm, na podłożu korpusu drogowego wzmocnionym kolumnami CMC – wymagany wskaźnik zagęszczenia $I_S > 0,98$;
- warstwy konstrukcyjne korpusu drogowego (G1-G6) formowane kolejno i zagęszczane, wymagany wskaźnik zagęszczenia $I_S > 1,00$;
- przykrycie geomateraca – dwie warstwy po 25 cm, zagęszczane wibracyjnie – wskaźnik zagęszczenia $I_S > 1,03$.

W celu kontroli jakości zagęszczenia poszczególnych warstw gruntów, w projekcie określono minimalne wartości modułów odkształcenia, które stanowiły warunki progowe dla oceny badania poprawności zagęszczenia płytą sztywną VSS. Parametry progowe uznane za spełniające wymogi projektowe objęte kontrolą jakości to: moduł pierwotny odkształcenia podłoża o wartości $E_1 \geq 60,0$ MPa, moduł wtórny $E_2 \geq 120,0$ MPa oraz wskaźnik odkształcenia $I_0 \leq 3,0$ (Kumor i in., 2008).

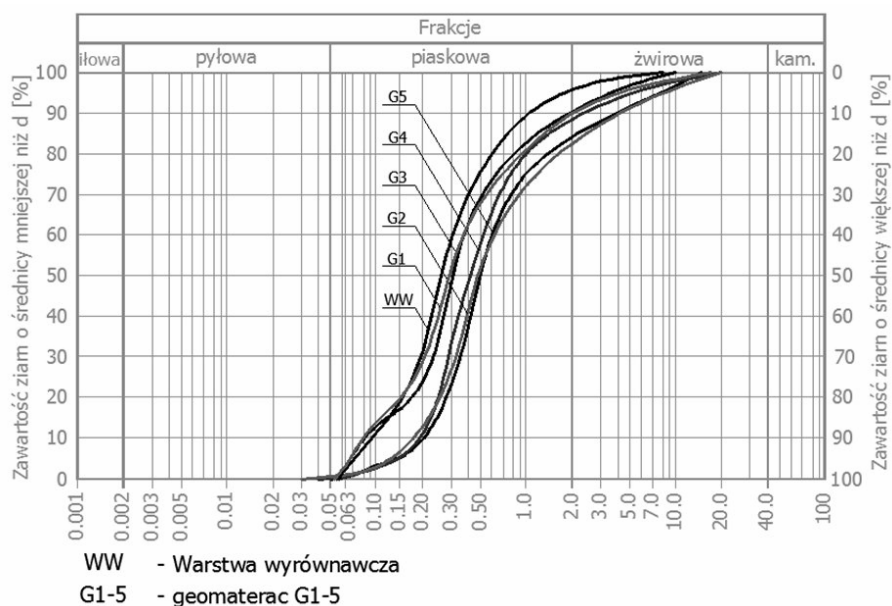
3. Kontrola jakości zagęszczenia gruntu w nasypie

3.1. Charakterystyka zastosowanego materiału

Materiał gruntowy zastosowany do wykonania nasypów charakteryzował się:

- właściwym uziarnieniem (rys. 4) umożliwiającym poprawne zagęszczenie i uzyskanie wymaganych właściwości mechanicznych nasypu, przy czym szczególne znaczenie w doborze materiału miały wytrzymałość, odkształcalność, mrozoodporność, wysadzinowość;
- odpowiednią wodoprzepuszczalnością, uniemożliwiającą podpiętrzanie się wody gruntowej w warstwach poza korpusem lub w korpusie konstrukcji;
- brakiem zanieczyszczeń chemicznych i związków rozpuszczalnych w wodzie, mających szkodliwy wpływ na długotrwałą wytrzymałość i odkształcalność zbrojenia syntetycznego (Wysokiński i Kotlicki, 2007).

Uziarnienie gruntu jest podstawową cechą fizyczną decydującą o warunkach jego zagęszczenia oraz o uzyskiwanych właściwościach mechanicznych i hydraulicznych nasypu (Wysokiński i Kotlicki, 2007). Jak wiadomo, podczas zagęszczenia gruntów niespoistych następuje przemieszczanie się i ściślejsze upakowanie ziaren gruntu względem siebie wskutek zewnętrznych wymuszeń. Proces ten zachodzi pod wpływem dostarczonej energii zewnętrznej oraz z powodu kruszenia się ziaren. Powoduje to zawsze zmniejszenie porowatości do wartości krytycznej charakteryzującej fazę zagęszczenia. W przypadku osiągnięcia w masywie maksymalnego upakowania cząstek i ziaren gruntu, dalsze zagęszczanie przynosi zwykle niekorzystne efekty (faza rozluźnienia). Prowadzi to do *quasi* cyklicznego rozgęszczania masywu, typowego dla fazy rozluźnienia. Oczekiwany końcowym efektem zagęszczania nasypu jest uzyskanie gęstości objętościowej szkieletu



Rys. 4. Przykładowe krzywe granulometryczne gruntów badanego nasypu budowlanego

gruntowego przy stałej wilgotności optymalnej (Pisarczyk, 1993b) i nieprzekroczenie stanu równowagi dla maksymalnie zagęszczonego materiału w fazie zagęszczenia, przy minimalnej liczbie przejazdów maszyny zagęszczającej.

W związku z fazowością procesu wykonano podstawowe analizy obejmujące różne wyjściowe grunty (sześć rodzajów gruntów), to jest oznaczenie składu granulometrycznego oraz wilgotności optymalnej badanej standardową metodą Proctora (Pisarczyk, 1993a). Badania powtarzano w trakcie realizacji nasypu dla próbek

kontrolnych pobranych z każdej nowo wbudowywanej warstwy. Grunt pobierano z różnych, rozproszonych punktów warstwy tak, aby próbę można było uznać za reprezentatywną. Badaniu poddano warstwy nasypu zawarte we wszystkich 5 geomateracach (G1-G5) oraz warstwę wyrównującą.

Na podstawie analizy granulometrycznej sporządzono krzywe uziarnienia dla każdej badanej warstwy (rys. 2 i 4) oraz wyznaczono wartości średnic zastępczych i wskaźnika jednorodności uziarnienia C_U oraz wskaźnika krzywizny C_C . Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wyniki (wartości średnie) geotechnicznych badań gruntów poszczególnych warstw korpusu drogowego

Warstwa nasypu	ρ_{ds}	$V(\rho_{ds})^*$	w_{opt}	$V(w_{opt})^*$	C_C	$V(C_C)^*$	C_U	$V(C_U)^*$
	(Mg/m ³)	(%)	(%)	(%)	(1)	(%)	(1)	(%)
G5	2,059	1,82	9,83	12,74	0,942	2,10	2,815	4,27
G4	2,036	2,85	9,79	3,20	1,031	49,00	3,432	30,83
G3	1,956	0,32	10,27	1,04	1,766	10,37	4,685	1,96
G2	2,019	0,53	9,61	2,71	1,563	34,23	4,660	26,43
G1	1,979	0,44	9,63	4,31	1,042	55,60	4,990	6,80
WW	1,968	0,67	9,88	6,38	1,322	3,00	3,595	6,10
Warstwa nasypu	D_{10}	$V(D_{10})^*$	D_{20}	$V(D_{20})^*$	D_{30}	$V(D_{30})^*$	D_{60}	$V(D_{60})^*$
	mm	(%)	mm	(%)	mm	(%)	mm	(%)
G5	0,215	3,29	0,28	0,00	0,35	0,00	0,605	1,17
G4	0,160	39,73	0,237	28,10	0,290	32,49	0,555	58,58
G3	0,080	0,00	0,170	8,32	0,230	6,15	0,375	1,89
G2	0,117	42,76	0,230	15,97	0,293	14,42	0,517	28,48
G1	0,150	66,00	0,220	38,57	0,305	44,05	0,765	71,17
WW	0,085	8,32	0,145	14,63	0,185	3,82	0,305	2,32

V* – współczynnik zmienności

3.2. Badania modułów płytą VSS i lekką płytą dynamiczną LFG

Korpus drogowy wznoszono sukcesywnie formując kolejne warstwy nasypu, zagęszczając je walcami wibracyjnymi. W trakcie zagęszczania warstwy wykonywano, po każdym przejeździe walca, kontrolne badania sprawdzające płytą dynamiczną. Jako badanie kontrolne porównawczo wykonano badania lekką płytą dynamiczną LFG oraz pobrano próbki typu A1 (NNS), w celu oznaczenia wskaźnika zagęszczenia. Odbiór końcowy warstwy odbywał się na podstawie pozytywnych wyników badań uzyskanych płytą statyczną VSS.

Badanie stopnia zagęszczenia warstw metodą sondowania dynamicznego DPL, nie było możliwe ze względu na zbrojenie korpusu geosyntetykami. W przypadku, gdy stwierdzono niedostateczne zagęszczenie gruntu, dogęszczano warstwę i ponownie kontrolowano stan zagęszczenia.

Badanie statyczną płytą VSS polega na pomiarze odkształceń pionowych (osiadań) warstwy podłoża pod wpływem nacisku statycznego wywieranego za pomocą

stalowej okrągłej płyty (rys. 5) o średnicy $D = 300$ mm (PN-S-02205:1998). Badanie płytą sztywną obciążoną statycznie służy do określenia pierwotnego modułu odkształcenia podłoża E_1 oznaczonego w pierwszym obciążeniu warstwy oraz wtórnego modułu odkształcenia podłoża E_2 wyznaczonego analogicznie w powtórnym obciążeniu warstwy.

Moduł odkształcenia jest iloczynem stosunku przyrostu obciążenia jednostkowego do przyrostu odkształcenia badanej warstwy podłoża w ustalonym zakresie obciążeń jednostkowych, pomnożonym przez 0,75 średnicy płyty obciążającej, co wyraża następujący wzór (PN-S-02205:1998):

$$E = \frac{3 \cdot \Delta p}{4 \cdot \Delta s} \cdot D \quad [\text{N/m}^2] \quad (1)$$

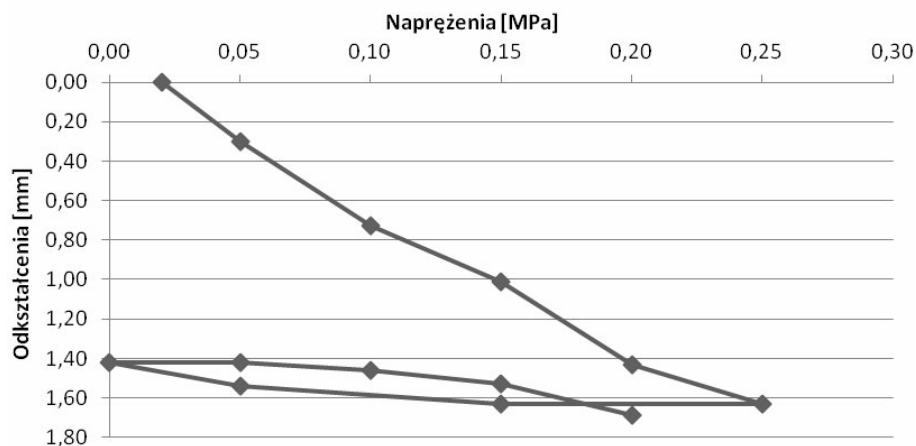
gdzie: Δp jest różnicą nacisków w N/m^2 , Δs jest przyrostem osiadań odpowiadającym różnicy nacisków w m, a D jest średnica płyty w m.

Przykładowy wynik badania płytą VSS przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5. Badania modułów odkształcenia podłoża płytą VSS

Wykres zależności odkształceń od zadanych obciążeń gruntu



Rys. 6. Przykładowy wykres zależności odkształceń od zadanych obciążeń gruntu – badanie VSS warstwy G1

Lekka płyta dynamiczna LFG (rys. 7) przeznaczona jest do wyznaczenia dynamicznego modułu odkształcenia E_{vd} warstwy podłoża gruntowego w budownictwie drogowym (Pisarczyk, 1993a; Sulewska, 2009).



Rys. 7. Widok ogólny lekkiej płyty dynamicznej LFG

Dynamiczny moduł odkształcenia podłoża jest obliczany (Pisarczyk, 1993a) według wzoru:

$$E_{vd} = \frac{1,5 \cdot r \cdot \sigma}{s} \quad [\text{N/m}^2] \quad (2)$$

gdzie: r jest promieniem płyty naciskowej w m, σ jest naprężeniem w podłożu w N/m^2 , a s jest amplitudą odkształcenia podłoża pod płytą w mm (wartość średnia z trzech pomiarów badawczych następujących po trzech pomiarach wstępnych).

Zestawienie wyników końcowych badań zagęszczenia płytą dynamiczną LFG oraz płytą VSS dla poszczególnych testowanych warstw przedstawiono w tablicy 2.

Jak wiadomo, praktyczne badanie płytą statyczną VSS wymaga każdorazowo montażu urządzenia pomiarowego w nowym miejscu. W warunkach placu budowy jest więc badaniem czasochłonnym i kłopotliwym. Należy zapewnić odpowiednią przeciwwagę, przez co niewykonalne są badania w wykopach. Znaczącym utrudnieniem w postępie prac jest konieczność zatrzymania procesu zagęszczania odcinka na czas pomiaru. W celu otrzymania wartości modułów pierwotnego i wtórnego oraz wskaźnika odkształcenia należy po zakończeniu badania przeprowadzić obliczenia. Istnieje wysokie ryzyko popełnienia w warunkach rzeczywistych szeregu błędów podczas badania, takich jak: błąd odczytu z czujników zegarowych, czy błędy obliczeń,

Tab. 2. Wyniki badań (uśrednione) parametrów zagęszczenia badanych warstw nasypu

Wyniki badań płytą VSS		Wyniki badań płytą dynamiczną LFG	
Warstwa VI (dół platformy)			
$E_1 = 27,11 \text{ MPa}$ $E_2 = 150,00 \text{ MPa}$ $I_0 = 5,53$		$E_{vd} = 41,44 \text{ MPa}$	
Warstwa V			
$E_1 = 37,50 \text{ MPa}$ $E_2 = 150,00 \text{ MPa}$ $I_0 = 4,00$		$E_{vd} = 43,10 \text{ MPa}$	
Warstwa IV			
$E_1 = 42,45 \text{ MPa}$ $E_2 = 187,50 \text{ MPa}$ $I_0 = 4,42$		$E_{vd} = 51,61 \text{ MPa}$	
Warstwa III			
$E_1 = 33,09 \text{ MPa}$ $E_2 = 118,42 \text{ MPa}$ $I_0 = 3,58$	$E_1 = 25,86 \text{ MPa}$ $E_2 = 132,35 \text{ MPa}$ $I_0 = 5,12$	$E_{vd} = 53,32 \text{ MPa}$	
Warstwa II			
$E_1 = 40,91 \text{ MPa}$ $E_2 = 150,00 \text{ MPa}$ $I_0 = 3,67$		$E_{vd} = 51,84 \text{ MPa}$	
Warstwa I			
$E_1 = 30,81 \text{ MPa}$ $E_2 = 150,00 \text{ MPa}$ $I_0 = 4,87$	$E_1 = 31,69 \text{ MPa}$ $E_2 = 204,55 \text{ MPa}$ $I_0 = 6,45$	$E_{vd} = 61,48 \text{ MPa}$	
Warstwa wyrównawcza			
$E_1 = 40,91 \text{ MPa}$ $E_2 = 140,63 \text{ MPa}$ $I_0 = 3,44$	$E_1 = 33,58 \text{ MPa}$ $E_2 = 204,55 \text{ MPa}$ $I_0 = 6,09$	$E_{vd} = 60,98 \text{ MPa}$	

odczytu i zapisu wyników ciśnienia. Wymienione utrudnienia skłaniają nadzór budowlany w kierunku mniej uciążliwego oznaczania jakości zagęszczenia gruntów między innymi z wykorzystaniem płyty dynamicznej.

Badanie płytą LFG jest badaniem względnie szybkim w odniesieniu do badania VSS. Wyniki otrzymuje się bezpośrednio po pomiarze płytą LFG i można je zapisać wygodnie w rejestratorze współpracującym z płytą. Rezultaty badań można zatem analizować na placu budowy, a automatyczny zapis eliminuje ryzyko popełnienia błędów systematycznych i przypadkowych odczytów. Ponadto badanie można wykonać w niemal każdych warunkach, na przykład w wąskich i głębokich wykopach, gdzie ustawienie pojazdu umożliwiającego obciążenie płyty VSS byłoby niewykonalne.

W powszechnie dostępnej literaturze brakuje szerszych danych prezentujących możliwe korelacje dla różnych rodzajów gruntu i analizy sposobu porównywalnej kontroli jakości zagęszczenia gruntu w nasypie na podstawie badań lekką płytą dynamiczną i płytą statyczną oraz innymi metodami, które umożliwiłyby szybkie określanie stanu zagęszczenia.

W związku z istniejącą potrzebą podjęto próbę opracowania korelacji w warunkach rzeczywistej realizacji sześciowarstwowego typowego nasypu pod konstrukcję nawierzchni. Na podstawie otrzymanych wyników badań wykonano analizę statystyczną parametrów zagęszczenia otrzymanych lekką płytą dynamiczną i płytą statyczną.

3.3. Analiza statystyczna

W analizie uwzględniono łączne wyniki badań parametrów zagęszczenia 7 warstw nasypu, które określono w punktach pomiarowych oddalonych od siebie o około 1,0 m. Najpierw wykonywano badanie płytą LFG, następnie badanie płytą VSS. Dla każdej badanej warstwy nasypu wykonano po 3-5 badań VSS i po 15-20 badań LFG. Łącznie dysponowano wystarczającą z punktu widzenia statystycznego licznoscą populacji charakteryzującą zagęszczenie, w tym dla płyty LFG 100 wyników i 25 wyników VSS. Wyniki poddano analizie matematycznej, szukając związków korelacyjnych pomiędzy parametrami odkształceniowymi uzyskanymi metodą VSS a modulem dynamicznym z badania płytą dynamiczną LFG i parametrami charakteryzującymi cechy fizyczne (uziarnienie).

Wynikiem analizy statystycznej było uzyskanie informacji o funkcjach odpowiedzi, które można zapisać ogólnie następującymi wyrażeniami:

– Grupa 1 – zależności pomiędzy cechami fizycznymi a parametrami odkształceniowymi w nasypie:

$$E_{vd} = E_{vd}(w_{opt}, \rho_{ds}, C_u, C_c, D_{10}, D_{20}, D_{30}, D_{60}) \quad (3)$$

$$E_1 = E_1(w_{opt}, \rho_{ds}, C_u, C_c, D_{10}, D_{20}, D_{30}, D_{60}) \quad (4)$$

$$E_2 = E_2(w_{opt}, \rho_{ds}, C_u, C_c, D_{10}, D_{20}, D_{30}, D_{60}) \quad (5)$$

$$I_0 = I_0(w_{opt}, \rho_{ds}, C_u, C_c, D_{10}, D_{20}, D_{30}, D_{60}) \quad (6)$$

$$I_S = I_S(w_{opt}, \rho_{ds}, C_u, C_c, D_{10}, D_{20}, D_{30}, D_{60}) \quad (7)$$

– Grupa 2 – zależności pomiędzy parametrami zagęszczenia badanymi metodą VSS a modulem dynamicznym otrzymanym z badań płytą dynamiczną LFG:

$$E_{vd} = E_{vd}(E_1, E_2, I_0, I_S) \quad (8)$$

$$E_1 = E_1(E_2, I_0, E_{vd}, I_S) \quad (9)$$

$$E_2 = E_2(E_1, I_0, E_{vd}, I_S) \quad (10)$$

$$I_0 = I_0(E_1, E_2, E_{vd}, I_S) \quad (11)$$

gdzie: w_{opt} jest wilgotnością optymalną w %, ρ_{ds} jest maksymalną gęstością objętościową szkieletu gruntowego w Mg/m^3 , C_u jest wskaźnikiem różnoziarnistości gruntu, C_c jest wskaźnikiem krzywizny uziarnienia, E_{vd} jest dynamicznym modulem odkształcenia w MPa, E_1 jest pierwotnym modulem odkształcenia w MPa, E_2 jest wtórnym modulem odkształcenia w MPa, I_0 jest wskaźnikiem odkształcenia, natomiast D_{10} , D_{20} , D_{30} , D_{60} są średnicami zastępczymi w mm.

Kolejnym krokiem było określenie, czy pomiędzy rozważanymi zmiennymi istnieje istotna, w sensie statystycznym, zależność korelacyjna. Analizowano wykresy rozrzutu. W prostokątnym układzie współrzędnych na osi odciętych zaznaczono wartości zmiennej niezależnej (zmiennej objaśniającej), a na osi rzędnych wartości zmiennej zależnej (zmiennej objaśnianej).

Pomiędzy badanymi zmiennymi poszukiwano w pierwszym przybliżeniu zależności liniowej jako najbardziej użytecznej w postaci funkcji:

$$y = a + bx \quad (12)$$

gdzie: y jest zmienną zależną, a x jest zmienna niezależną.

Zależność uznawano za znaczącą w sensie statystycznym, gdy współczynnik korelacji przyjął wartość $r_{yx} \geq 0,7$ (Bobrowski, 1980).

Otrzymane postaci funkcji rozrzutu oraz wartość współczynnika korelacji dla badanych funkcji w Grupie 1 przedstawiono w tabeli 3, natomiast w Grupie 2 – w tabeli 4.

Tab. 3. Parametry charakteryzujące zależności pomiędzy cechami fizycznymi a parametrami odkształceniowymi z Grupy 1

Lp.	Badana zależność	Postać funkcji liniowej	Współczynnik korelacji r_{yx}	Uwagi
1.	$E_{vd} = f(\rho_{ds})$	$E_{vd} = 267,288 - 108,295(\rho_{ds})$	-0,5512	
2.	$E_{vd} = f(D_{20})$	$E_{vd} = 64,80 - 66,830(D_{20})$	-0,5060	$r_{yx} < 0,7$
3.	$E_1 = f(\rho_{ds})$	$E_1 = -130,895 + 83,541(\rho_{ds})$	0,5808	Warunek niespełniony
4.	$E_1 = f(C_u)$	$E_1 = 49,943 - 3,263(C_u)$	-0,5126	

Tab. 4. Parametry charakteryzujące zależności pomiędzy parametrami zagęszczenia badanymi metodą VSS a modulem dynamicznym otrzymanym płytą dynamiczną LFG z Grupy 2

Lp.	Badana zależność	Postać funkcji liniowej	Współczynnik korelacji r_{yx}	Uwagi
1.	$E_1 = f(I_0)$	$E_1 = 50,889 - 3,126(I_0)$	-0,5427	
2.	$E_1 = f(I_S)$	$E_1 = 246,731 - 220,169(I_S)$	-0,6998	
3.	$E_2 = f(I_0)$	$E_2 = 73,978 + 19,884(I_0)$	0,6657	
4.	$E_2 = f(I_S)$	$E_2 = -372,858 + 562,978(I_S)$	0,6465	$r_{yx} < 0,7$
5.	$I_0 = f(E_{vd})$	$I_0 = 1,652 + 0,057(E_{vd})$	0,6201	Warunek niespełniony
6.	$I_0 = f(E_1)$	$I_0 = 7,995 - 0,094(E_1)$	-0,5427	
7.	$I_0 = f(E_2)$	$I_0 = 0,978 + 0,022(E_2)$	0,6657	
8.	$I_0 = f(I_S)$	$I_0 = -39,519 + 46,184(I_S)$	0,6039	

Z przeprowadzonej analizy statystycznej rezultatów badań zagęszczenia nasypu budowlanego wykonanego z równoziarnistych piasków średnich ($C_U = 2,8$ do $4,9$) otrzymano zależności pomiędzy badanymi parametrami o słabej korelacji lub dla części związków nie uzyskano spodziewanej zależności. Wyniki analizy statystycznej wskazują, że poszukiwane związki przydatne w praktyce, nie zostały potwierdzone wynikami z badań na rzeczywistym obiekcie.

Nawet oczywiste zależności między modułami odkształcenia pierwotnym i wtórnym a wskaźnikiem odkształcenia mają współczynniki korelacji $r_{yx} < 0,7$. Wartość współczynnika r_{yx} otrzymana dla I_0 w funkcji wskaźnika zagęszczenia I_S , która wynosi $0,6039$, nie jest wartością, jaką można uznać za znaczącą. Zwłaszcza, że wartość wskaźnika zagęszczenia otrzymano na podstawie badania gęstości objętościowej na próbkach NNS pobranych cylindrem, które to badanie może być obciążone szeregiem niepewności pomiarowych.

Spośród sporządzonych wykresów rozrzutu szczególną uwagę zwrócono na poszukiwaną zależność w Grupie 2 – pomiędzy modulem odkształcenia badanym metodą VSS a dynamicznym modulem odkształcenia otrzymanym płytą dynamiczną LFG. Współczynnik korelacji osiągał w tym przypadku niską wartość $r_{yx} < 0,7$, co można uznać za zależność praktycznie nieistotną.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wskazują, iż w warunkach budowy określenie związków korelacyjnych pomiędzy parametrami charakteryzującymi uziarnienie (C_C , C_U , D_{10} , D_{20} , D_{30} , D_{60}), a parametrami odkształceniowymi uzyskanymi podczas sprawdzania stanu zagęszczenia piasku średniego równoziarnistego nasypu (E_{vd} , E_1 , E_2 , I_0) jest trudne praktycznie. Ma to miejsce także w przypadku poszukiwania zależności pomiędzy parametrami zagęszczenia otrzymanymi metodą VSS (E_1 , E_2 , I_0), a dynamicznym modulem odkształcenia E_{vd} z badania płytą dynamiczną LFG. W przypadku poszukiwania związków korelacyjnych pomiędzy parametrami

odkształceniowymi modułami statycznymi i dynamicznymi, dodatkowo należałoby uwzględnić zależność wyników od różnych warunków pomiaru oraz od rodzaju gruntu.

Wpływ na małą wartość współczynnika korelacji, w analizowanych przypadkach mają, zdaniem autorów, przede wszystkim niedokładności metody oznaczenia cech fizycznych. Szczególnie dotyczą one problemu oznaczania składu granulometrycznego metodą sitową i umownego wyznaczenia średnic efektywnych materiałów ziarnistych. Istotnym czynnikiem uzyskanych rozrzutów jest duża zmienność wymiarów ziaren szkieletu mineralnego gruntu w złożu naturalnym, związanym z genezą utworów.

W warunkach rzeczywistych nasyp budowlany formowany jest z przemieszanego materiału gruntowego o różnym, losowo zmiennym uziarnieniu. Wartości parametrów charakteryzujących skład granulometryczny analizowanego gruntu są zróżnicowane, a współczynnik zmienności określony dla tych parametrów bywa bardzo wysoki (tab. 1). Wartości odczytywane z krzywej uziarnienia są obciążone szeregiem addytywnych błędów, trudnych do wyeliminowania.

Szczególnie błędy związane z wykreśleniem krzywej granulometrycznej mają charakter subiektywny. Mają one znaczący wpływ na odczyt wartości parametrów D_{10} , D_{20} , D_{30} , D_{60} , a w konsekwencji wpływają na rozrzut, dokładność i porównywalność wskaźników jednorodności C_U i krzywizny uziarnienia C_C (tab. 1). Należy zatem przyjąć w praktyce stosowanie tych parametrów jedynie do identyfikacji badanego materiału gruntowego i określenia jego jednorodności, a także do kontroli wbudowywanego materiału gruntowego w tym tylko zakresie.

Szacowaną wartość wskaźników C_C i C_U można traktować jako wielkości odniesienia i orientacyjne, klasyfikujące grunt w kategoriach jego zagęszczalności. Niemniej autorzy uważają, że należałoby potwierdzić uzyskane spostrzeżenia dalszymi badaniami kalibracyjnymi na szerokim zróżnicowanym materiale w warunkach laboratoryjnych i poligonowych. Potwierdzają te wnioski stwierdzone fakty podczas

ostatecznej kontroli i odbioru nasypu (Farmas i Wernitz, 2010; Kumor i in., 2008), gdzie uzyskano wymagane wartości parametrów zagęszczenia dla każdej z warstw, mimo, iż parametry C_U i C_C nie osiągały referencyjnych wartości liczbowych. Podobne wyniki uzyskano w praktyce dla niesortu wapiennego (Kumor, 2006).

Na tej podstawie można wysnuć wniosek, iż poszukiwanie niektórych zależności między parametrami charakteryzującymi skład granulometryczny gruntu, a parametrami charakteryzującymi jego zagęszczenie, jak wykazały analizy (funkcje od 3 do 11, tab. 3 i 4), należy uznać za nieistotne i dyskusyjne z punktu widzenia związków fizycznych.

Istotną w realiach budowy jest technologia zagęszczania mająca zasadniczy wpływ na otrzymane wartości liczbowe parametrów zagęszczenia, między innymi: liczba przejazdów maszyn zagęszczających, wilgotność gruntu, rodzaj i rozkład materiału gruntowego. Są to losowe zmienne trudne do zweryfikowania podczas bieżącej kontroli jakości materiału gruntowego, a także w czasie kontroli jakości zagęszczenia warstwy nasypu budowlanego.

W dalszych badaniach staje się potrzebne opracowanie nowych metod badawczych, które pozwoliłyby na sparametryzowanie wybranych zmiennych, ułatwiających uzyskanie potrzebnych w praktyce korelacji, na przykład: między modułami statycznymi według VSS a modułem dynamicznym otrzymanym z badania płytą dynamiczną LFG.

W świetle przeprowadzonych badań wstępnych na obiektach rzeczywistych (Farmas i Wernitz, 2010; Kumor, 2006; Kumor i in., 2008), powstało wiele wątpliwości natury merytorycznej (Meyer, 2012) związanych z brakiem wiarygodnego modelu fizycznego przy poszukiwaniu teoretycznego uzasadnienia szukanych związków.

Literatura

- Bobrowski D. (1980). Probablistyka w zastosowaniach technicznych. *Wydawnictwo Naukowo-Techniczne*, Warszawa.
- Farmas J., Wernitz K. (2010). Geotechniczna ocena budowy korpusu drogowego w ciągu ulicy. Praca magisterska pod kierunkiem M. K. Kumor, *UTP*, Bydgoszcz.
- Kumor Ł. A. (2006). Badanie zagęszczalności wybranych kruszyw dla potrzeb budowy poduszki kompensacyjnej fundamentu silosu. *Pracownia Inżynierjno-Geologiczna*, Bydgoszcz, materiał niepublikowany.
- Kumor M. K., Kumor Ł. A., Wierzycka E. (2008). Przebudowa ulicy wraz z mostem na rzece. *Pracownia Inżynierjno-Geologiczna*, Bydgoszcz.
- Meyer Z. (2012). Obliczenia inżynierskie osiadania fundamentów. *Zapól*, Szczecin.
- Pisarczyk S. (1993a). Badania laboratoryjne i polowe gruntów. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa.
- Pisarczyk S. (1993b). Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badań. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa.
- Sulewska M. J. (2009). Sztuczne sieci neuronowe w ocenie parametrów zagęszczenia gruntów niespoistych. *Studia z Zakresu Inżynierii*, nr 64, *IPPT PAN*, Warszawa-Białystok.
- Wysokiński L., Kotlicki W. (2007). Projektowanie konstrukcji oporowych, stromych skarp i nasypów z gruntu zbrojonego geosyntetykami. Nr 429/2007, *ITB*, Warszawa.

THE SELECTED CORRELATIONS OF COMPACTION PARAMETERS DETERMINED BY VSS AND LWD METHODS

Abstract: Geotechnical assessment of the correctness of the road embankment erection covers wide range of issues, among which selection and quality control of the earthworks are important. The paper presents the results of *in-situ* tests determining correlations between the parameters carried out by static plate VSS test – E_1 and E_2 , and Light Weight Defectometer LWD. Studies indicate that the determination of correlations between parameters characterising the particle size distribution (C_C , C_U , D_{10} , D_{20} , D_{30} , D_{60}) and parameters obtained during controlling of the embankment compaction (E_{vd} , E_1 , E_2 , I_0) is currently practically difficult or physically complex.