

Korelacje parametrów gruntu w badaniach stanu zagęszczenia nasypu kontrolowanego

Dr inż. Mariusz Wyroślak
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Połowe badania gruntów, wykonywane za pomocą sondy dynamicznej, płyty dynamicznej, czy też płyty statycznej, są podstawową techniką ustalania stanu gruntów. Ma to szczególne znaczenie w przypadku gruntów nasypowych, których właściwe zagęszczenie jest elementem kluczowym w praktyce robót ziemnych.

W wielu sytuacjach inżynierskich występuje konieczność porównania właściwości gruntu lub wyprowadzenia jednego parametru geotechnicznego na podstawie wzajemnych zależności z innym znanym parametrem. Korelacje przedstawione w artykule są wynikiem badań przeprowadzonych w trakcie prowadzonej inwestycji. Ze względu na warunki gruntowe, poziom posadowienia oraz charakter konstrukcji wymagane było wykonanie na powierzchni 100×150 m nasypu budowlanego o wysokości 1,8 m. Badania przeprowadzono wymienionymi na wstępie urządzeniami w takich samych warunkach i stanie gruntu nasypowego.

Wykonywanie nasypu kontrolowanego zalicza się do podstawowych robót ziemnych. Dotyczy to zarówno formowania nasypów, przygotowania podłoża do posadowienia fundamentów bezpośrednich oraz zasyпки fundamentów. Poprawne wykonanie nasypu jest istotnym czynnikiem prawidłowego funkcjonowania i użytkowania budowli, ze szczególnym zwróceniem uwagi na stan graniczny użyteczności, gdyż w przypadku nasypów drogowych bądź na przykład podłoża pod podłogą hal przemysłowych wymagania dotyczące osiadania mogą być restrykcyjne.

W zależności od uziarnienia stosowanych materiałów jakość zagęszczenia warstwy gruntu określa się za pomocą oznaczenia wskaźnika zagęszczenia I_s lub porównania wtórnego i pierwotnego modułu odkształcenia (E_{v2} i E_{v1}), czyli wyznaczając wskaźnik odkształcenia I_0 .

W wielu przypadkach w specyfikacjach technicznych dopuszcza się wykorzystanie innych metod kontroli stanu nasypu, na przykład badanie lekką płytą dynamiczną z oznaczeniem dynamicznego (sprężystego) modułu odkształcenia E_{vd} , a także badanie sondą dynamiczną i wyznaczenie stopnia zagęszczenia I_D .

Bez wątpliwości celowe jest ustalenie korelacji między tymi parametrami, chociaż jest to zadanie złożone, dające w różnych rodzajach gruntu niejednoznaczne korelacje. Wyniki mogą posłużyć do zamiennego oszacowania parametrów, w przypadku możliwości wykonania oznaczenia tylko jednego z parametrów, jak na przykład stopień zagęszczenia, moduł statyczny albo moduł dynamiczny [1].

W artykule przedstawiono pogłębioną analizę wyników przedstawionych w pracach [10 i 11] na podstawie zweryfikowanych zakresów ważności korelacji między parametrami.

LEKKA SONDA DYNAMICZNA

Lekka sonda dynamiczna (DPL) należy do urządzeń powszechnie stosowanych do badania gruntów nasypowych i rodzimych. Opis techniczny sondy DPL i metodę badawczą przedstawiono w normie [3]. Urządzenie składa się z zestawu żerdzi o masie 3,0 kg/mb. Pierwsza żerdź jest zakończona stożkową końcówką z kątem wierzchołkowym wynoszącym 90° . Żerdzie są wbijane w grunt za pomocą swobodnie spadającego młota o masie 10 kg. Urządzenie służy do wyznaczenia stopnia zagęszczenia gruntu niespoistego na podstawie korelacji i jakościowego oszacowania zmienności uwarstwienia podłoża. Podczas badania określa się liczbę uderzeń młota (N_{10}) przypadającą na każde 10 cm wpedu żerdzi.

Sonda dynamiczna ze względu na swoją budowę i metodę badawczą, przy wzrokowym odczytywaniu danych pomiarowych, nie jest urządzeniem dokładnym w przypadku badania powierzchniowych warstw gruntu. Zgodnie z [4] zaleca się rozpocząć interpretację wyników sondowania poniżej tzw. głębokości krytycznej, natomiast do głębokości krytycznej, gdy liczba uderzeń młota na jednostkę wpedu $N_{10} > 3$, należy przyjmować skorygowaną liczbę uderzeń [4]. W omawianych badaniach nie korygowano jednak tej wielkości zakładając, że podczas badania występuje pełna kontrola jakości zagęszczanego nasypu, a także brak powierzchniowego rozluźnienia lub niejednorodności stanu gruntu. Odczytywana liczba uderzeń na głębokości 60 cm poniżej powierzchni badań nie wskazywała na konieczność przeprowadzenia procedury korekcji. Stopień zagęszczenia I_D ustalono jako średnią z liczby uderzeń N_{10} na głębokości 60 cm [11].

PŁYTA STATYCZNA

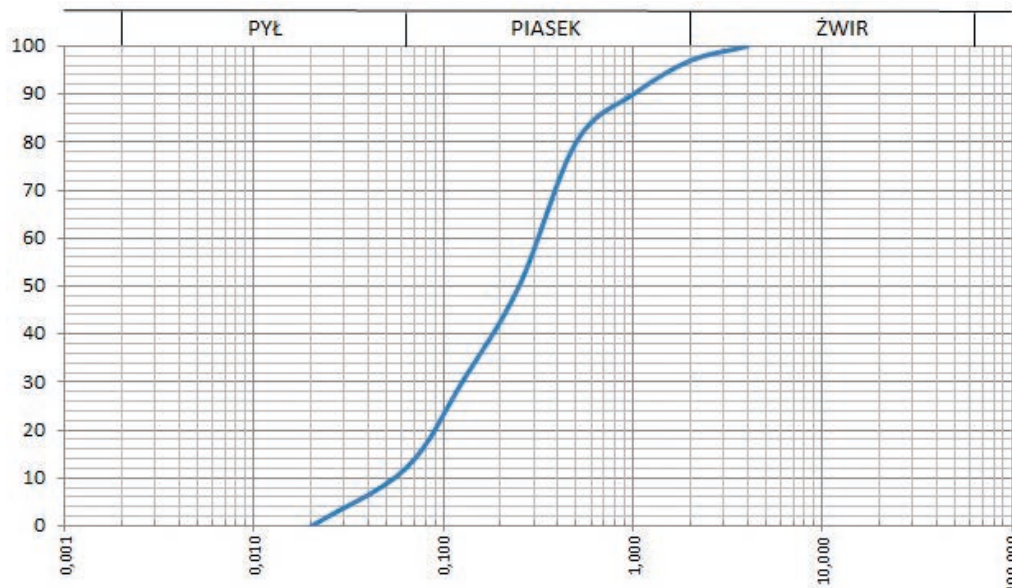
Płyta obciążenia statycznego, zwana jest powszechnie w Polsce płytą VSS. Nazwa pochodzi od skrótu szwajcarskiego zarządu drogownictwa (*Vereinigung Schweizerischer Straßenfachleute*, skrót: VSS). Metodę badania opisano w normie [9], a także w normie [2]. Zasady badania są zbliżone z zaleceniami dotyczącymi określania modułu statycznego E_v zawartymi w polskiej normie [8].

Podstawą urządzenia jest sztywna stalowa płyta o średnicy 300 mm. W trakcie obciążania podłoża płytą statyczną odczytuje się wielkość osiadania płyty. Zgodnie z procedurą normową zwiększanie nacisku na płytę odbywa się quasi-statycznie, czyli przyrostami obciążenia o wartości 0,05 MPa. Maksymalne obciążenie płytą statyczną dla gruntów nasypowych wynosi 0,25 MPa. Obciążenie gruntu wykonuje się w dwóch etapach, w pierwszym etapie oznaczając pierwotny statyczny moduł odkształcenia (E_{v1}), następnie po całkowitym odciążeniu, w drugim etapie wtórny statyczny moduł odkształcenia (E_{v2}). Odkształcenia podłoża powstałe w wyniku zadawanego obciążenia mają charakter w znacznej części trwałe, stąd krzywe zależności obciążenie – odkształcenie w pierwszym i drugim etapie obciążania mają inny przebieg, powodując różnice w wartościach modułu pierwotnego i wtórnego.

Badanie płytą statyczną wymaga zapewnienia właściwego balastu oporowego. Przy maksymalnym obciążeniu podłoża z gruntów nasypowych balast równoważący wynosi 1,73 t. Z praktycznego punktu widzenia, w celu zapewnienia właściwej przeciwwagi masę balastu należy ustalić na poziomie co najmniej 150% masy równoważącej.

LEKKA PŁYTA DYNAMICZNA

Lekka płyta dynamiczna (LWD) jest urządzeniem przenośnym, łatwym w transporcie, może być obsługiwane przez jedną osobę. Najczęściej stosowane jest urządzenie o całkowitej masie 15 kg, a cały pomiar trwa nie dłużej niż 1 do 2 minut. Głównym elementem urządzenia jest stalowa płyta o średnicy 300 mm i grubości 20 mm, wyposażona w akcelerometr, który jest połą-



Rys.1. Reprezentatywna krzywa uziarnienia gruntu wykorzystanego do wykonania nasypu

czony z oddzielnym urządzeniem do rejestracji i analizy danych. Prowadnica umieszczona przegubowo w środku płyty pozwala na zrzucanie centralnie na płytę obciążnika o masie 10 kg ze stałej wysokości 700 mm. Urządzenie jest skalibrowane na przeniesienie obciążenia dynamicznego o wartości 7,07 kN przy czasie obciążania równym 18 milisekund [12].

Jako założenie przyjmuje się, że płyta jest wystarczająco sztywna, aby przemieszczać się równo z gruntem oraz wywierane na płytę obciążenie dynamiczne jest stałe. Odskształcenie gruntu jest obliczane na podstawie odczytów z akcelerometru.

Pomiar rozpoczyna się od fazy wstępnej, w której obciążnik zrzucany jest trzy razy dla zapewnienia dobrego przylegania płyty do gruntu. Właściwy pomiar również składa się z trzech odczytów, na podstawie których określa się trzy wartości modułu dynamicznego E_{vd} . Jeżeli odczyty różnią się o więcej niż 10% oznacza to, że pomiar jest niemiernodajny, a grunt jest słabo zagęszczony [10].

BADANIA PORÓWNAWCZE I UZYSKANE WYNIKI

Na obszarze nasypu kontrolowanego wykonano ponad 50 badań porównawczych różnych parametrów gruntu, natomiast do analizy wybrano 31 par pomiarów.

Grunt pod nasypem stanowiły piaski przewarstwione namulami piaszczystymi, wzmocnione metodą dynamicznego zagęszczania. Było to podłoże wystarczająco sztywne do wznoszenia nasypu kontrolowanego i nie wykazywało istotnego wpływu na formowanie i zagęszczanie nasypu.

Grunt nasypowy układano warstwami na całej powierzchni, zraszano wodą w celu doprowadzenia do stanu bliskiego wilgotności optymalnej, a następnie warstwę zagęszczano lekkimi walcami gładkimi.

Materiałem nasypowym był piasek z domieszką pyłu grubego [6]. Przeprowadzone badania uziarnienia [5] na wybranych

czterech próbkach gruntu nie wykazały istotnych różnic w składzie granulometrycznym. Reprezentatywną próbę przesiewu gruntu, z którego wykonywano nasyp, przedstawiono na rys. 1.

Wyliczona wartość wskaźnika jednorodności wyniosła $C_u = 6$, natomiast wartość wskaźnika krzywizny $C_c = 1$. Wartości te ustalono na podstawie [7].

Zagęszczanie obejmowało cykl czterech przejazdów lekkiego walca drogowego. Po każdym przejeździe wykonywano w bezpośredniej bliskości: badania płytą dynamiczną LWD, płytą statyczną (VSS) oraz sondą dynamiczną.

Proces zagęszczania był w pełni kontrolowany, powierzchniowe warstwy badawcze gruntu nasypowego nie ulegały w trakcie badania rozluźnieniu, zatem uznano je za miernodajne i jednorodne na całej głębokości badawczej.

Korelację między dynamicznym modułem odształcenia i statycznym wtórnym modułem odształcenia przedstawiono w postaci wykresu na rys. 2.

Dynamiczny moduł odształcenia E_{vd} można opisać zależnością, w funkcji potęgowej, od wtórnego modułu odształcenia E_{v2} :

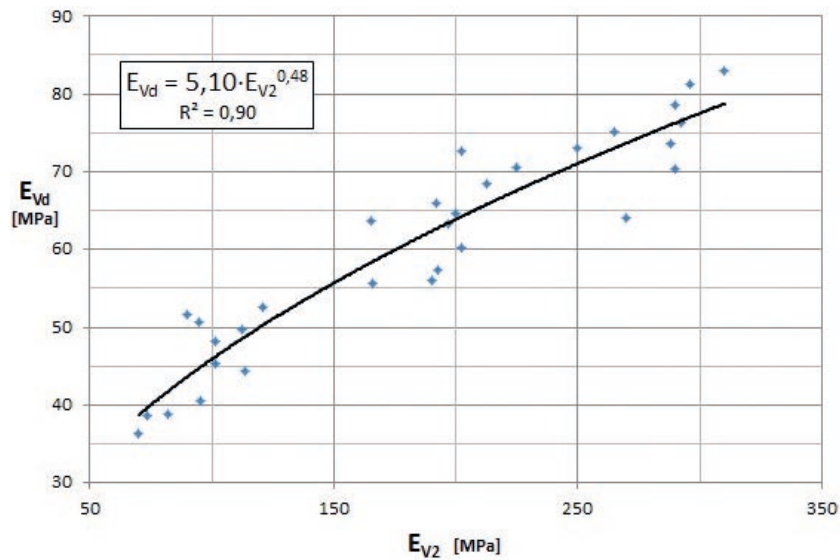
$$E_{vd} = 5,14 \cdot E_{v2}^{0,48} \quad (1)$$

ze współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,9$. Oznacza to, że poziom wartości wtórnego modułu odształcenia w 90% objaśnia zmienność modułu dynamicznego E_{vd} , a w 10% zmiana wartości E_{v2} jest podyktowana czynnikami innymi niż zmiana wartości E_{vd} . Zakres ważności relacji dotyczy przedziału E_{v2} od 60 do 300 MPa.

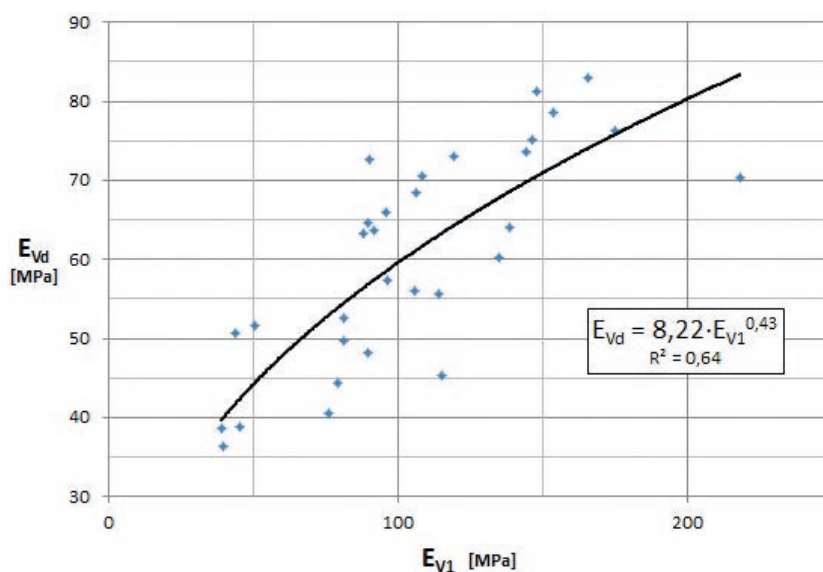
Z kolei zależność między modułem dynamicznym E_{vd} a pierwotnym modułem odształcenia E_{v1} (rys. 3) można zapisać również w funkcji potęgowej:

$$E_{vd} = 8,22 \cdot E_{v1}^{0,43} \quad (2)$$

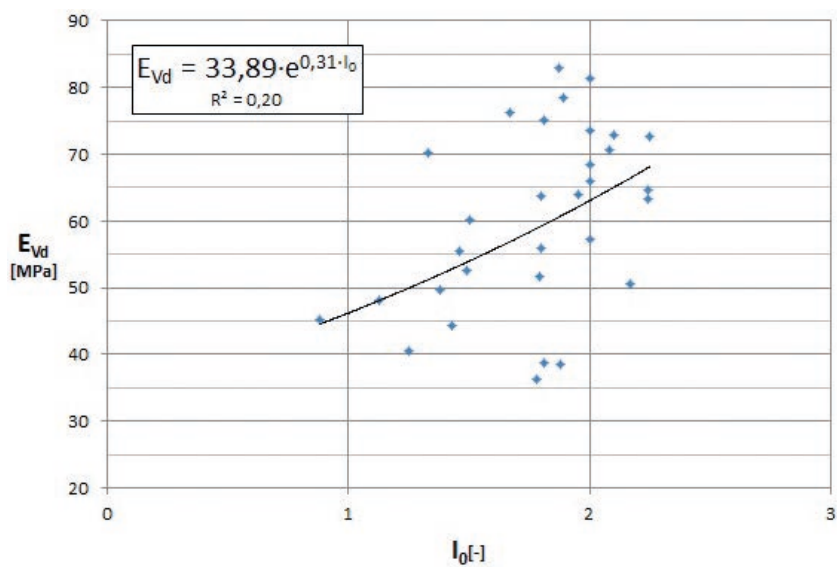
ze współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,64$. Oznacza to, że poziom wartości pierwotnego modułu odształcenia w 64% ob-



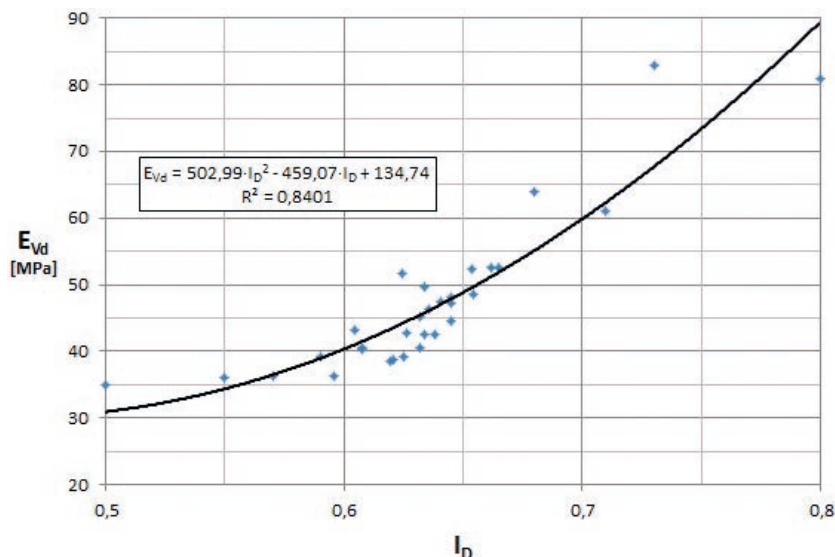
Rys. 2. Zależność wtórnego modułu odkształcenia od modułu dynamicznego [10]



Rys. 3. Zależność pierwotnego modułu odkształcenia od modułu dynamicznego [10]



Rys. 4. Zależność wskaźnika odkształcenia od modułu dynamicznego [10]



Rys. 5. Wykres zależności wartości modułu dynamicznego odkształcenia od stopnia zagęszczenia [11]

jaśnie zmienność modułu dynamicznego E_{vd} , a w 36% zmiana wartości E_{v1} podyktowana jest czynnikami innymi niż zmiana wartości E_{vd} . Zakres ważności relacji dotyczy przedziału E_{v1} od 40 do 200 MPa.

Na rys. 4 przedstawiono korelację między wskaźnikiem odkształcenia I_0 oraz modułem dynamicznym E_{vd} , którą opisano funkcją eksponencjalną:

$$E_{vd} = 33,89 \cdot e^{0,31 \cdot I_0} \quad (3)$$

Współczynnik determinacji dla tej relacji wynosi zaledwie $R^2 = 0,2$.

Dynamiczny moduł odkształcenia E_{vd} , w zależności od stopnia zagęszczenia I_D , można opisać funkcją wielomianową (rys. 5):

$$E_{vd} = 502,99 I_D^2 - 459,07 I_D + 134,74 \quad (4)$$

ze współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,84$.

Oznacza to, że poziom zagęszczenia opisany jako stopień zagęszczenia I_D , w 84% objaśnia zmienność nośności gruntu wyrażoną modułem dynamicznym E_{vd} , a w 16% zmiana wartości I_D jest spowodowana czynnikami innymi niż zmianą zagęszczenia gruntu, na przykład rodzajem gruntu, wilgotnością, niedokładnością odczytu N_{10} .

Zgodnie z definicją przyjmowaną w statystyce współczynnik determinacji R^2 określa jaka część danych przyjętych do analizy jest wytłumaczona przez przyjęty model. Im współczynnik determinacji większy, tym krzywa regresji jest lepiej dopasowana do danych. Jakość dopasowania danych do modelu zestawiono w tabl. 1.

Tabl. 1. Dopasowanie danych do krzywej regresji

Współczynnik determinacji	Jakość dopasowania
$0,0 \leq R^2 < 0,5$	niezadowalająca
$0,5 \leq R^2 < 0,6$	słaba
$0,6 \leq R^2 < 0,8$	zadowalająca
$0,8 \leq R^2 < 0,9$	dobra
$R^2 \geq 0,9$	bardzo dobra

Z tabl. 1 wynika, że dopasowanie wskaźnika odkształcenia do modułu dynamicznego w przyjętym modelu jest niezadowalające. Fakt ten jest związany ze znacznym rozrzutem wartości wskaźnika odkształcenia względem parametru korelowanego, czyli modułu dynamicznego. Cecha jest pochodną definicji wskaźnika odkształcenia, w której istotny jest stosunek $\frac{E_{v2}}{E_{v1}}$. Zatem dla wielu znacznie różniących się wartości E_{vd} można otrzymać zbliżoną wartość I_0 .

Kwadrat współczynnika korelacji R^2 , czyli współczynnik determinacji, jest drugim obok współczynnika korelacji R miernikiem siły związku między porównywanymi zmiennymi. Współczynnik korelacji przyjmuje wartości z zakresu od -1 do +1, wartość dodatnia lub ujemna określa kierunek zależności. Jeżeli wraz z przyrastającymi wielkościami jednej zmiennej druga zmienna wykazuje również wartości przyrastające, to współczynnik korelacji będzie dodatni. Jeżeli wartości drugiej zmiennej w takim przypadku maleją, to współczynnik korelacji ma wartość ujemną (tabl. 2).

Tabl. 2. Interpretacja współczynnika korelacji

Współczynnik korelacji	Interpretacja
$R = 0$	Brak korelacji między zmiennymi
$R = 1$	Pełna korelacja, związek funkcyjny (-1, +1)
$R < 0$	Ujemna korelacja, tzn. że wzrost wartości jednej zmiennej powoduje spadek wartości drugiej
$R > 0$	Dodatnia korelacja, tzn. że wzrost wartości jednej zmiennej powoduje także wzrost wartości drugiej (i odwrotnie)

W rozpatrywanych korelacjach wartość jej współczynnika będzie dodatnia. Siłę korelacji można określić na podstawie tabl. 3.

Tabl. 3. Korelacja między parametrami

Współczynnik korelacji	Siła korelacji
$R < 0,2$	bardzo słaba korelacja
$0,2 \leq R < 0,4$	słaba korelacja
$0,4 \leq R < 0,7$	umiarkowana, ale istotna
$0,7 \leq R < 0,9$	silna korelacja
$R \geq 0,9$	bardzo silna korelacja

Mierniki siły związku między korelowanymi parametrami zestawiono w tabl. 4.

Tabl. 4. Zestawienie miar związku między parametrami

Relacja	R	R^2
$E_{vd}(E_{v2})$	0,95	0,9
$E_{vd}(E_{v1})$	0,8	0,64
$E_{vd}(I_0)$	0,45	0,2
$E_{vd}(I_D)$	0,92	0,84

WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych polowych badań nasypu stwierdzono, że płyta dynamiczna wykazała się większą czułością pomiarową, a wyznaczony moduł odkształcenia ma mniejszą tolerancję błędów niż moduł odkształcenia wyznaczony płytą statyczną. Dla jednej wartości oznaczonego modułu dynamicznego uzyskiwano czasem znaczny rozrzut wartości modułów statycznych, przy czym większy był rozrzut w przypadku modułu pierwotnego.

Pierwotny moduł odkształcenia można traktować jako symulację obciążeń krótkoterminowych, natomiast moduł wtórny jako symulację obciążeń długotrwałych.

Uzyskane w badaniach własnych wyniki należy traktować jako miarodajne dla określonej grupy gruntów, to jest piasków z domieszką pyłu grubego przy wilgotności bliskiej wilgot-

ności optymalnej oraz stopniu zagęszczenia powyżej $I_D = 0,5$. Z danych literaturowych wynika, że korelacje tych parametrów w przypadku alternatywnych rodzajów gruntu mogą być inne [1].

Celem przeprowadzonych analiz było uzyskanie miarodajnych korelacji między wybranymi parametrami opisującymi stan zagęszczenia powierzchniowych warstw gruntu. Jest to istotne, gdy prowadzi się roboty ziemne i jest wymagane przeprowadzenie szybkich pomiarów stanu gruntu oraz określenie jakości każdej wykonanej warstwy nasypu.

LITERATURA

1. Badanie i ustalenie zależności korelacyjnych dla oceny stanu zagęszczenia i nośności gruntów niespoistych płytą dynamiczną. IBDiM, Warszawa, listopad 2005 r.
2. DIN 18134: 2001-09. Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte. Plattendruckversuch.
3. EN ISO 22476-2:2005 Geotechnical engineering – Field testing – Part 2: Dynamic probing.
4. Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych. Część 2: Załącznik. GDDP, Warszawa 1998.
5. PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009. Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 4. Oznaczanie składu granulometrycznego.
6. PN-EN ISO 14688-1:2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis.
7. PN-EN ISO 14688-2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2. Zasady klasyfikowania.
8. PN-S-02205:1998. Drogi samochodowe - Roboty ziemne - Wymagania i badania.
9. SN 670312b:1998-04. VSS-Gerät für den Plattendruckversuch E_v und M_E .
10. Wyroślak M., Ossowski R. (2016). Badanie modułu odkształcenia podłoża gruntowego w nasypie kontrolowanym za pomocą płyty statycznej i lekkiej płyty dynamicznej. Acta Sci. Pol. Architectura, 15 (3), 111-118.
11. Wyroślak M. (2016). Porównanie parametrów stanu nasypu kontrolowanego na podstawie badań płytą dynamiczną i sondą dynamiczną. Inżynieria i Budownictwo. 7/2016.
12. Zorn Instruments (2005). Operating Manual for Light Drop Weight Tester ZFG 2000. Maschinenbauingenieur Bernd Zorn, Stendal, Germany.