

## **BADANIE MODUŁU ODKSZTAŁCENIA PODŁOŻA GRUNTOWEGO W NASYPIE KONTROLOWANYM ZA POMOCĄ PŁYTY STATYCZNEJ I LEKKIEJ PŁYTY DYNAMICZNEJ**

Mariusz Wyroślak, Rafał Ossowski

Politechnika Gdańska

**Streszczenie.** W praktyce inżynierskiej, zarówno projektowej, jak i wykonawczej, niewątpliwie przydatne są korelacje między parametrami geotechnicznymi. Artykuł przedstawia polowe badania porównawcze z lekką płytą dynamiczną (LFWD) oraz płytą statyczną (VSS) wraz z określeniem zależności korelacyjnych pomiędzy modułem odkształcenia podłoża wyznaczonym za pomocą lekkiej płyty dynamicznej ( $E_{Vd}$ ) oraz pierwotnym i wtórnym modułem odkształcenia ( $E_{V1}$ ,  $E_{V2}$ ). Korelacja nie może być procedurą zero-jedynkową, czyli można uzyskać zależność między parametrami w różnej skali dokładności. Wykazano w przeprowadzonej analizie, że dynamiczny moduł odkształcenia lepiej koreluje z wtórnym modułem odkształcenia niż z modułem pierwotnym. Fakt ten w dużej mierze wynika z charakteru obu modułów statycznych odkształcenia, gdyż grunt znajduje się w innym stanie podczas pierwotnego i wtórnego obciążania.

**Słowa kluczowe:** płyta dynamiczna LFWD, płyta statyczna VSS, korelacja parametrów gruntu, moduł odkształcenia wyznaczany za pomocą lekkiej płyty dynamicznej, statyczny moduł odkształcenia

### **WSTĘP**

W praktyce robót ziemnych związanych z przygotowaniem podłoża do posadowienia fundamentów lub wykonania nawierzchni elementem kluczowym jest optymalizacja procesu zagęszczenia warstw gruntu nasypowego. Optymalizację taką można rozumieć jako zależność między wymaganą jakością zagęszczenia, włożoną pracą i energią oraz czasem zagęszczania.

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Mariusz Wyroślak, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, e-mail: mwyr@pg.gda.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2016

Połowe metody badań stanu podłoża gruntowego pozwalają na bieżącą weryfikację i parametryczny opis jakości zagęszczenia. Badania takie muszą być szybkie i skuteczne, tzn. powinny podawać precyzyjny wynik, który można porównać z wymaganiami specyfikacyjnymi.

Stabilne podłoża gruntowe powinny posiadać właściwą nośność i podatność. Jako miarodajne dla oceny stanu gruntu nasypowego można wskazać wtórny moduł odkształcenia ( $E_{V2}$ ), który wraz z pierwotnym modulem odkształcenia ( $E_{V1}$ ) opisuje stan gruntu wskaźnikiem odkształcenia  $I_0 = E_{V2}/E_{V1}$ . Często praktyką opisania nośności podłoża jest wyznaczanie modułu odkształcenia podłoża za pomocą płyty dynamicznej ( $E_{Vd}$ ), często w literaturze nazywanym modulem dynamicznym odkształcenia.

Moduł odkształcenia pierwotnego i wtórny wyznacza się w badaniach płytą średnicy 30 cm, obciążaną i odciążaną skokowymi przyrostami obciążenia. Moduł dynamiczny odkształcenia także wyznacza się płytą dynamiczną średnicy 30 cm, ale obciążaną impulsem udarowym. Moduły statyczny i dynamiczny odkształcenia nie mogą być porównane ze sobą bezpośrednio. Ze względu na inny charakter oddziaływania na grunt podczas badania uzyskuje się parametry o innej skali wartości. Bezpośrednie porównanie modułów statycznego i dynamicznego pokazuje dużą różnicę w relacji naprężenie – odkształcenie, a korelacja wartości liczbowych między tymi parametrami nie jest proporcjonalna.

Bez wątpienia celowe jest ustalenie korelacji między tymi parametrami, chociaż jest to zadanie złożone, dające w różnych rodzajach gruntu niejednoznaczne oszacowania, wyniki mogą posłużyć do zamiennego ustalania parametrów w przypadku możliwości wykonania oznaczenia albo modułu statycznego albo dynamicznego.

## CHARAKTERYSTYKA PŁYTY STATYCZNEJ VSS

Płyta obciążenia statycznego zwana jest powszechnie w Polsce płytą VSS. Nazwa pochodzi od skrótu szwajcarskiego zarządu drogownictwa (Vereinigung Schweizerischer Straßenfachleute – VSS), w którym metodę opracowano i opisano w normie [SN 670312b:1998-04]. Zasady badania są zbieżne z zaleceniami dotyczącymi określania modułu statycznego ( $E_V$ ) zawartymi w polskiej normie [PN-S-02205:1998].

Podstawą urządzenia jest sztywna stalowa płyta. W trakcie obciążania podłoża płytą statyczną odczytuje się wielkość jej osiadania. 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 ustala się wtórny statyczny moduł odkształcenia ( $E_{V2}$ ). Odkształcenia podłoża powstałe w wyniku zadawanego obciążenia mają charakter w znacznej większości trwałe, stąd krzywe zależności obciążenie – odkształcenie w pierwszym i drugim etapie obciążania mają inny przebieg, powodując różnice w wartościach modułu pierwotnego i wtórnego. Według polskiej normy [PN-S-02205:1998] moduły odkształcenia statycznego określa się w zakresie przyrostu obciążenia od 0,05 do 0,15 MPa i odpowiadającego tym obciążeniom przyrostu odkształcenia. Przedziały te są znacząco inne w przypadku zaleceń normy szwajcarskiej [SN 670312b:1998-04] i niemieckiej [DIN 18134: 2001-09].

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 masa balastu powinna przekraczać masę równoważącą co najmniej o 150%.

## CHARAKTERYSTYKA PŁYTY DYNAMICZNEJ LFWD

Lekka płyta dynamiczna (Light Falling Weight Deflectometer – LFWD) jest urządzeniem przenośnym, łatwym w transporcie, może być obsługiwana przez jedną osobę. Najczęściej jest stosowane urządzenie z płytą o masie 15 kg. Cały pomiar trwa nie dłużej niż 2 min. Głównym elementem urządzenia jest stalowa płyta grubości 20 mm, wyposażona w akcelerometr połączony 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, ustalonej w procesie kalibracji tak, aby wartość przekazywanego obciążenia dynamicznego wynosiła 7,07 kN przy czasie obciążania 18 milisekund [Zorn Instruments 2005].

Jako założenie przyjmuje się, że płyta jest wystarczająco sztywna, aby przemieszczać się równo z gruntem, a amplituda obciążenia ma stałą wartość. Odkształcenie gruntu jest obliczane na podstawie odczytów z akcelerometru umieszczonego centralnie w płycie obciążającej.

Pomiar rozpoczyna się od fazy wstępnej, w której obciążnik jest zrzucany trzy razy w celu 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 więcej niż o 10%, to pomiar jest niemiarodajny, a grunt uznaje się za słabo zagęszczony. Wynikiem badania lekką płytą dynamiczną jest średnia z trzech pomierzonych modułów.

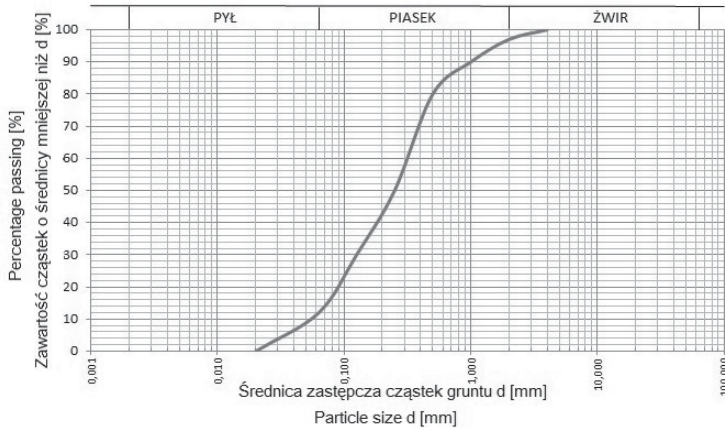
## METODA BADAWCZA

Obszarem badań objęty był nasyp kontrolowany pod fundamenty i płytę podłogową obiektu magazynowego o wymiarach  $100 \times 150$  metrów. W sumie wykonano ponad 50 badań porównawczych nasypu gruntowego, natomiast do analizy wybrano ponad 30 par pomiarów.

Grunt pod nasypem, o miąższości około 6 m, stanowiły piaski przewarstwione namulami piaszczystymi, wzmocnione metodą dynamicznego zagęszczania. Było to podłoże wystarczająco sztywne do wznoszenia nasypu kontrolowanego, niewykazujące istotnego wpływu na układanie i zagęszczanie nasypu.

Grunt nasypowy układano warstwami na całej powierzchni, zraszano wodą w celu doprowadzenia do stanu bliskiego wilgotności optymalnej, a następnie warstwę o miąższości około 40 cm zagęszczano lekkimi walcami gładkimi. Zagęszczanie zawierało cykl czterech przejazdów lekkiego walca drogowego. Po każdym przejeździe wykonywano w bezpośredniej bliskości parę badań płytą dynamiczną LFWD oraz płytą statyczną VSS. Badania wykonano zgodnie z procedurami opisanymi w Badaniu i ustaleniu... [2005].

Materiałem nasypowym był piasek z domieszką pyłu grubego [PN-EN ISO 14688-1:2006]. Przeprowadzone badania uziarnienia [PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009] na wybranych czterech próbkach gruntu nie wykazały istotnych różnic w składzie granulometrycznym. Reprezentatywną próbę przesiewu gruntu, z którego wykonywano nasyp, przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Reprezentatywna krzywa uziarnienia gruntu wykorzystanego do wykonania nasypu  
Fig. 1. Representative grain size distribution curve of soil used for embankment

Wyliczona wartość wskaźnika jednorodności wyniosła  $C_U = 6$ , natomiast wartość wskaźnika krzywizny  $C_C = 1$ . Wartości te ustalono na podstawie [PN-EN ISO 14688-2:2006].

Proces zagęszczania był kontrolowany, tj. na bieżąco sprawdzano grubość warstwy przeznaczonej do zagęszczania oraz zraszano powierzchnię wodą, aby wyrównać poziom wilgotności. Powierzchniowe warstwy badanego gruntu nasypowego nie ulegały w trakcie badania rozluźnieniu, zatem uznano je za miarodajne do oceny sztywności podłoża i jednorodne na całej głębokości badawczej.

Badania oraz określenie parametrów przeprowadzono zgodnie z opisanymi wyżej zasadami dla lekkiej płyty dynamicznej i płyty statycznej.

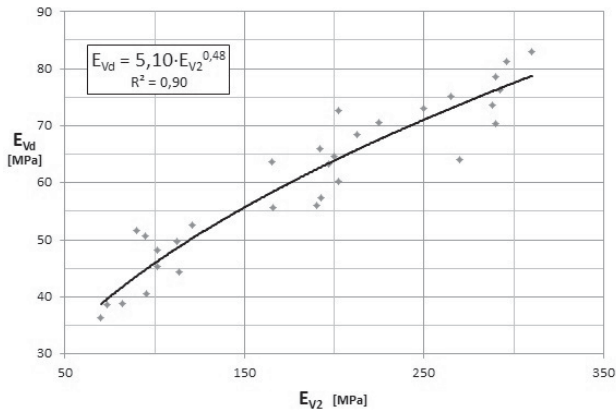
## UZYSKANE WYNIKI BADAŃ

Zależność korelacyjną między dynamicznym modułem odkształcenia i statycznym wtórnym modułem odkształcenia przedstawiono w postaci wykresu na rysunku 2.

Dynamiczny moduł odkształcenia ( $E_{Vd}$ ) w zależności od wtórnego modułu odkształcenia ( $E_{V2}$ ) można opisać w funkcji potęgowej:

$$E_{Vd} = 5,14 \cdot E_{V2}^{0,48} \quad (1)$$

ze współczynnikiem determinacji  $R^2 = 0,9$ . Oznacza to, że poziome wartości wtórnego modułu odkształcenia w 90% objaśnia zmienność modułu dynamicznego ( $E_{Vd}$ ), a w



Rys. 2. Korelacyjna zależność wtórnego modułu odkształcenia ( $E_{V2}$ ) od modułu  $E_{Vd}$  wyznaczonego za pomocą płyty dynamicznej.

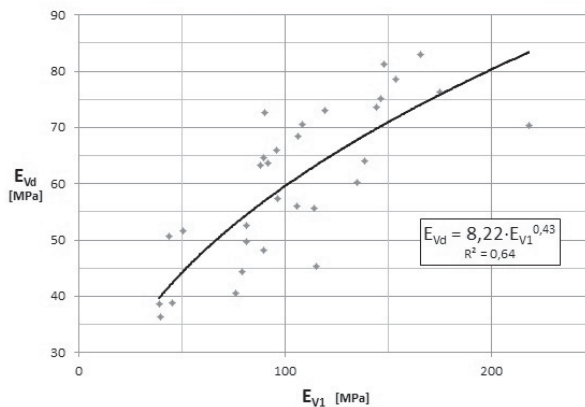
Fig. 2. Correlation between VSS secondary modulus and LFWF modulus

10% zmiana wartości  $E_{V2}$  podyktowana jest czynnikami innymi niż zmiana wartości  $E_{Vd}$  (np. rodzajem gruntu, wilgotnością). Zakres ważności relacji dotyczy przedziału  $E_{V2}$  od 60 do 300 MPa.

Z kolei zależność między modułem dynamicznym ( $E_{Vd}$ ) i pierwotnym modułem odkształcenia ( $E_{V1}$ ) można zapisać w funkcji potęgowej:

$$E_{Vd} = 8,22 \cdot E_{V1}^{0,43} \quad (2)$$

ze współczynnikiem determinacji  $R^2 = 0,64$  (rys. 3). Oznacza to, że poziom wartości pierwotnego modułu odkształcenia w 64% objaśnia 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.

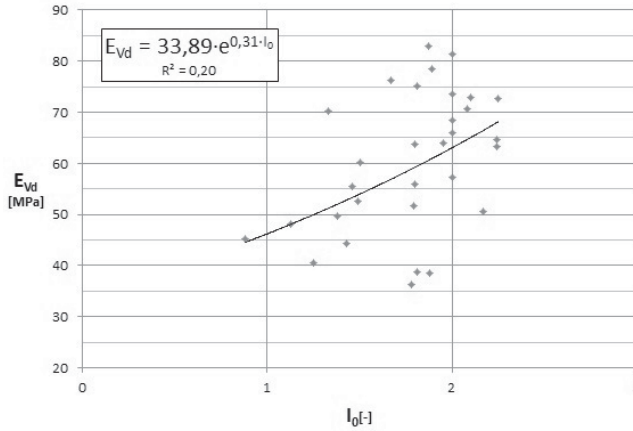


Rys. 3. Korelacyjna zależność pierwotnego modułu odkształcenia ( $E_{V1}$ ) od modułu  $E_{Vd}$  wyznaczonego za pomocą płyty dynamicznej

Fig. 3. Correlation between VSS primary modulus and LFWF modulus

Na rysunku 4 przedstawiono korelację między wskaźnikiem odkształcenia ( $I_0$ ) oraz modułem dynamicznym ( $E_{Vd}$ ), którą opisano funkcją eksponencjalną:

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



Rys. 4. Korelacyjna zależność wskaźnika odkształcenia  $I_0$  od modułu  $E_{Vd}$  wyznaczonego za pomocą płyty dynamicznej

Fig. 4. Correlation between VSS deformation index and LFWD modulus

Współczynnik determinacji dla tej relacji wynosi zaledwie  $R^2 = 0,2$ . 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 jest większy, tym krzywa regresji jest lepiej dopasowana do danych. Jakość dopasowania danych do modelu opisuje tabela 1.

Tabela 1. Dopasowanie danych do krzywej regresji  
Table 1. Fitting data to regression curve

$R^2$	Jakość dopasowania Quality of fitting
Od 0,0 do < 0,5	niezadowalająca
Od 0,5 do < 0,6	słaba
Od 0,6 do < 0,8	zadowalająca
Od 0,8 do < 0,9	dobra
Od 0,9 do 1,0	bardzo dobra

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  $E_{V2}/E_{V1}$ . Zatem dla wielu znacznie różniących się wartości  $E_{Vd}$  można otrzymać zbliżoną wartość  $I_0$ .

## PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że płyta dynamiczna wykazała większą czułość pomiarową, to znaczy, że różnice w zagęszczeniu gruntu były odwzorowane w zmieniającym się module dynamicznym z mniejszym przedziałem niepewności niż moduł odkształcenia wyznaczony płytą statyczną. Efekt ten można zaobserwować na rysunkach 2 i 3. 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 parametryczne odwzorowanie obciążeń krótkoterminowych, natomiast wtórny moduł odkształcenia jako parametr opisujący obciążenie długotrwałe. Niemiarodajną, ale statystycznie zadowalającą korelację dynamicznego modułu odkształcenia z pierwotnym statycznym modulem odkształcenia należy tłumaczyć wpływem na grunt fazy wstępnej badania lekką płytą dynamiczną.

Celem przeprowadzonych analiz było uzyskanie korelacji między wybranymi parametrami opisującymi stan zagęszczenia powierzchniowych warstw gruntu, które można wykorzystać do celów inżynierskich. Jest to istotne, gdy prowadzi się roboty ziemne i wymagane są szybkie pomiary stanu gruntu i określenie jakości każdej wykonanej warstwy nasypu.

Uzyskane w badaniach własnych wyniki należy traktować jako miarodajne dla określonej grupy gruntów, tj. piasków z pyłem grubym o wilgotności bliskiej wilgotności optymalnej. Jak wskazują dane literaturowe [Badanie i ustalenie... 2005] korelacje tych parametrów dla alternatywnych rodzajów gruntu mogą być inne.

## PIŚMIENNICTWO

- Badanie i ustalenie zależności korelacyjnych dla oceny stanu zagęszczenia i nośności gruntów niespoistych płytą dynamiczną (2005). IBDiM, Warszawa.
- DIN 18134: 2001-09. Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte. Plattendruckversuch.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009. Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 4: Oznaczanie składu granulometrycznego.
- PN-EN ISO 14688-1:2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis.
- PN-EN ISO 14688-2:2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.
- PN-S-02205:1998. Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
- SN 670312b:1998-04. VSS-Gerät für den Plattendruckversuch  $E_V$  und  $M_E$ .
- Zorn Instruments (2005). Operating Manual for Light Drop Weight Tester ZFG 2000. Maschinenbauingenieur Bernd Zorn, Stendal, Germany.

## EVALUATION OF DEFORMATION MODULI IN CONTROLLED SOIL EMBANKMENT BASED ON VSS PLATE AND LFWD PLATE

**Abstract.** In both site engineering practice and design practice correlation between geotechnical parameters are desirable beyond doubt. The paper presents site comparative tests

based on Light Falling Weight Deflectometer (LFWD) and Plate Load Test (VSS) with relationship between dynamic deformation modulus  $E_{Vd}$  and primary and secondary static deformation modulus  $E_{V1}$ ,  $E_{V2}$ . Correlation between parameters is not binary procedure, then it is observed different levels of accuracy. It is proved that dynamic deformation modulus is better correlated with secondary static modulus. That is because soil is in another state in primary and secondary loading.

**Key words:** LFWD plate, VSS plate, soil parameters correlation, LFWD modulus, VSS modulus

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 26.07.2016

Cytowanie: 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.