

Ocena przydatności płyty VSS i lekkiej płyty dynamicznej do kontroli zagęszczenia gruntów

Dr hab. inż. Krzysztof Parylak

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji

UWARUNKOWANIA STANU WIEDZY

Stan zagęszczenia gruntów w układanych konstrukcjach ziemnych stanowi jeden z najistotniejszych czynników wpływających między innymi na ich stateczność czy ścisłość, a w efekcie na późniejszą eksploatację obiektu. Niemal we wszystkich dokumentacjach projektowych stosujący się do obowiązujących przepisów i norm projektanci wymagają w realizacji projektowanych obiektów zachowania określonych przepisami lub normami stopni lub wskaźników zagęszczenia [13]. W świetle ponad stuletnich doświadczeń i badań ustalono powiązania tych wskaźników z szeregiem innych parametrów wytrzymałości na ścinanie, ścisłości czy wodoprzepuszczalności gruntów. Te z kolei umożliwiają poprawne wymiarowanie fundamentów, prognozowanie osiadań budowli komunikacyjnych, wymiarowanie ścian oporowych, czy prognozowanie stateczności skarp.

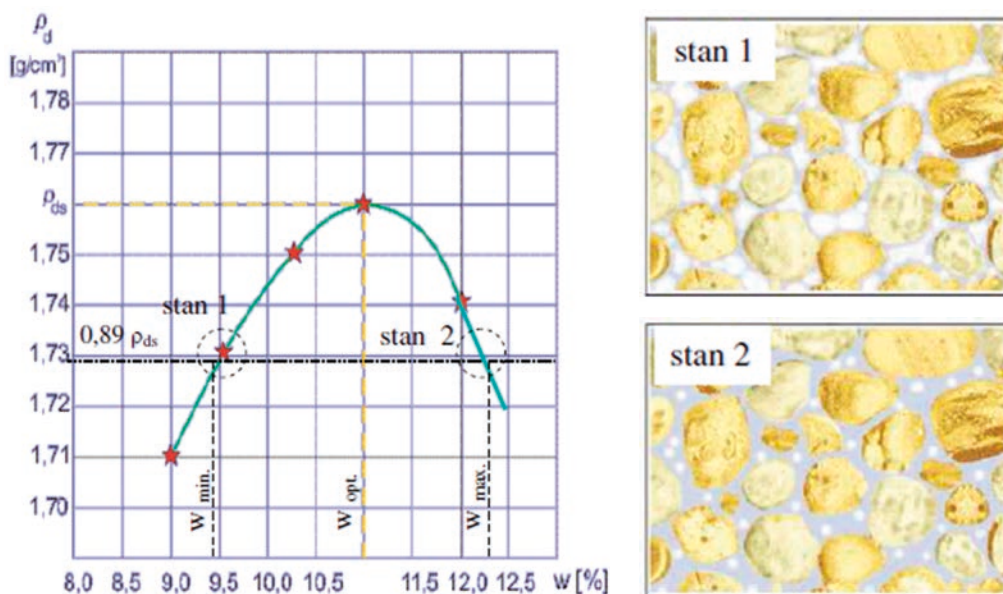
Korelacje te wypracowywali naukowcy i inżynierowie geotechnicy, poczynając chociażby od szkoły prof. K. Terzagiego (1923), po czasy obecne. Wiodącą dziedziną nauki w tym zakresie jest mechanika gruntów rozwijana i doskonalona na świecie między innymi w ramach liczącego ponad 17 000 członków światowego stowarzyszenia International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Skutkiem tego jest wypracowanie setek podręczników i norm geotechnicznych, w tym Eurokodu 7.

W ostatnim dwudziestoleciu, wraz z ogromnym przyspieszeniem realizacji inwestycji, obiekty budowlane są nierzadko realizowane i nadzorowane w Polsce przez niedostatecznie przygotowane osoby. Brak w tym udziału inżynierów geotechników

powoduje, że problemy wiarygodności kontroli zagęszczenia są realizowane przez osoby nie mające odpowiedniej wiedzy i uprawnień do fachowej oceny zjawisk technicznych określonej w art. 12 ust.1 i 2 Prawa budowlanego i w rozporządzeniu [13]. Przykłady z praktyki wskazują, że kontrola zagęszczenia staje się zadaniem, w którym nierzadko zarówno wykonawcy, nadzorowi kontrolującemu budowę, a nawet inwestorowi zależy, aby odnotowane wyniki były pozytywne, gdyż nie wydłuży to czasu realizacji budowy. Zastępuje się sprawdzone i wiarygodne metody badań [6, 7, 8] uproszczonymi sposobami, które nie dają prawdziwych informacji o stanie zagęszczonej warstwy. Stanowi je na przykład trwające 3 minuty badanie płytą dynamiczną. W wyniku niedostatecznej kontroli pojawiają się spękania nowych nawierzchni dróg spowodowane brakiem równomiernego zagęszczenia podłoża [9].

POPRAWNE METODY KONTROLI ZGĘSZCZENIA UKŁADANYCH KONSTRUKCJI ZIEMNYCH

Pierwsze zasady kontroli zagęszczenia gruntów opracowano w Stanach Zjednoczonych w 1933 roku przez Proctora, który wprowadził umowny test kontrolnego ubijania gruntów spoistych określoną wówczas jednostkową energią 6 KGcm/cm^3 , a w przypadku gruntów gruboziarnistych 27 KGcm/cm^3 . Zagęszczając w laboratorium kilka próbek o różnych wilgotnościach, wyznacza się maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego ρ_{ds} , i co jest równie istotne dla potrzeb wykonawcy wilgotność optymalną w_{opt} , przy której uzyskanie wymaganego wskaźnika I_s jest najłatwiejsze (rys. 1).



Rys. 1. Wynik badań zagęszczalności w aparacie Proctora ze zróżnicowanym stopniem wilgotności w stanie 1 i w stanie 2 dla jednokrotnie zagęszczonego gruntu

Już samo porównanie stanu gruntu o niskiej wilgotności zapewniającej takie samo zagęszczenie jak gruntu o zbyt wysokiej wilgotności wskazuje, że w warunkach terenowych pod obciążeniem powierzchni płytą dynamiczną ugięcie podłoża w stanie 1 powinno być nieporównywalnie mniejsze niż w stanie 2 (rys. 1).

W realizacji badań metodą pomiaru gęstości z przygotowanej do kontroli powierzchni zagęszczonej warstwy pobiera się próbę o mierzonej objętości jedną z procedur określoną w [6], wykonując dla niej oznaczenie gęstości objętościowej szkieletu ρ_d , która odniesiona do ρ_{ds} wyznacza wskaźnik zagęszczenia I_s .

W przypadku gruntów niespoistych, dla których wyznaczenie wilgotności optymalnej ze względu na mały wpływ zmian wilgotności na ρ_d jest trudne – jak wykazano jeszcze w latach czterdziestych ubiegłego wieku lepszym badaniem jest wyznaczenie gęstości $\rho_{d\max}$ oraz $\rho_{d\min}$ w aparacie wibracyjnym. Znając gęstość ρ_d uzyskaną dla próby pobranej z kontrolowanej warstwy nasypu, wyznacza się stopień zagęszczenia I_D [7, 15].

MECHANIZMY ODDZIAŁYWANIA NACISKÓW OD UGIĘCIOMIERZY

Obecnie w procesie układania wielowarstwowych nasypów wykonawcy unikają opisanej wyżej procedury wymagającej uruchomienia laboratorium polowego i czasu potrzebnego na określenie wilgotności prób. Korzystają z polecanych przez producentów ugięciomierzy mających stanowić sposób badania równoważny metodom pomiaru gęstości. Są to: lekka płyta dynamiczna (DPL) i uciskowa płyta statyczna (VSS). Badania te najczęściej wykonują mocno reklamujące się grupy zawodowe, na ogół nieuprawnione do fachowej oceny zjawisk technicznych.

Ugięciomierze skonstruowano pierwotnie do pomiaru nośności i trwałości konstrukcji drogowych ocenianych najczęściej na podstawie wyznaczanych modułów odkształcenia. Badania tych parametrów datuje się od skonstruowania w Szwajcarii w latach sześćdziesiątych ubiegłego stulecia płyty VSS. Wykonywane próbne obciążenia stanowią pewną analogię do obciążenia kołem samochodowym, a powierzchnia płyty odpowiada w przybliżeniu powierzchni styku koła samochodowego z nawierzchnią.

Miarą nośności nawierzchni i podłoża dróg, czy też warstwy podtorza kolejowego (rys. 2) są moduły odkształcenia pierwotne i wtórne E_1 i E_2 . Wiadomo jednak, że takie materiały budowlane jak warstwy nawierzchni czy kamiennej podbudowy znacząco różnią się reologicznymi współczynnikami rozszerzalności bocznej ν od gruntów naturalnych. Wynika to między innymi z braku oddziaływania w tych materiałach wilgotności na wartości kąta tarcia wewnętrznego, który ma dominujące znaczenie zwłaszcza w gruntach zawierających frakcję pyłową i ilową.

Ponadto poprawne badanie ugięciomierzem VSS wymaga dokładnego wyrównania badanej powierzchni. Przykładowo, na powierzchniach tłuczniowych wymagana jest wykonywana z gipsu $2 \div 3$ cm warstwa wyrównawcza, do której przykładają się folię i dopasowuje płytę. Po związaniu gipsu przykładają się płytę i prowadzi stopniowe kilkustopniowe obciążenie Δp o przyrostach co 50 kPa. Badanie może trwać nawet do 2 godzin. Po poszczególnych określonych czasach rejestruje się przyrosty osiadania Δs zarówno w cyklu obciążenia pierwotnego, jak i po odciążeniu obciążenia wtórnego [12]. Wartości modułu M_E określanego płytą VSS o średnicy D definiuje zależność:

$$M_E = \frac{\Delta p}{\Delta s} \cdot D \quad (1)$$

Do 1978 roku w Polsce badanie płytą naciskową stosowano wyłącznie do oznaczania modułu odkształcenia E poszczególnych warstw robót ziemnych i konstrukcji nawierzchni. Po 1978 roku rozszerzono zakres stosowania metody do oznaczania modułów: pierwotnego E_1 , wtórnego E_2 oraz wskaźnika odkształcenia I_0 , a według niektórych badaczy na podstawie wartości odkształcenia wtórnego E_2 zaczęto określać wartości wskaźnika zagęszczenia I_s [1].

Przedstawione przez wielu badaczy propozycje określenia wskaźnika zagęszczenia I_s na podstawie wartości odkształcenia wtórnego E_2 nie znajdują racjonalnego związku z gęstością podłoża gruntowego, chociażby z powodu pominięcia wpływu wilgotności i sferycznego a niejednoosiowego rozkładu naprężeń i odkształceń, a także ich zanikającego oddziaływania z głębokością (rys. 3).

Proponowane współzależności pomiędzy E_2 i I_s są zmienne i nie mają powiązania, gdyż na przykład ugięcia powierzchni gruntu spoistego zagęszczonego do $I_s = 0,92$ (tabl. 1) będą inne, gdy jest on w stanie twardoplastycznym, a inne gdy po opadach deszczu jego stan będzie plastyczny (rys. 1). Dotyczy to także badania płytą dynamiczną.

Tabl. 1. Zależność wskaźnika zagęszczenia I_s od wtórnego modułu odkształcenia E_2

Rodzaj gruntu	Moduł E_2 [MPa]	Wskaźnik zagęszczenia I_s
Grunty spoiste	20	0,92
Grunty spoiste	30	0,97
Piaski równoziarniste	45	0,95
Piaski równoziarniste	60	1,00
Pospółki różnoziarniste	70	0,95
Pospółki różnoziarniste	100	1,00
Pospółki różnoziarniste	120	1,03



Rys. 2. Badanie płytą uciskową ugięcia podtorza kolejowego z warstwą wyrównującą

Pomimo wskazywanych w literaturze wątpliwości [1, 2, 4] metoda ta jest rozpowszechniona i bezzasadnie propagowana w praktyce budowlanej [11].

W celu dalszego skrócenia procedury badania kontroli ugięcia podłoża wprowadzono lekką płytę dynamiczną PLT i oznaczany nią dynamiczny moduł odkształcenia podłoża E_{vd} [2,5].

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

gdzie:

r – promień płyty naciskowej [m],

σ – naprężenie w podłożu $[\text{N/m}^2]$,

s – amplituda odkształcenia podłoża pod płytą [mm] (wartość średnia z trzech pomiarów badawczych następujących po trzech pomiarach wstępnych).

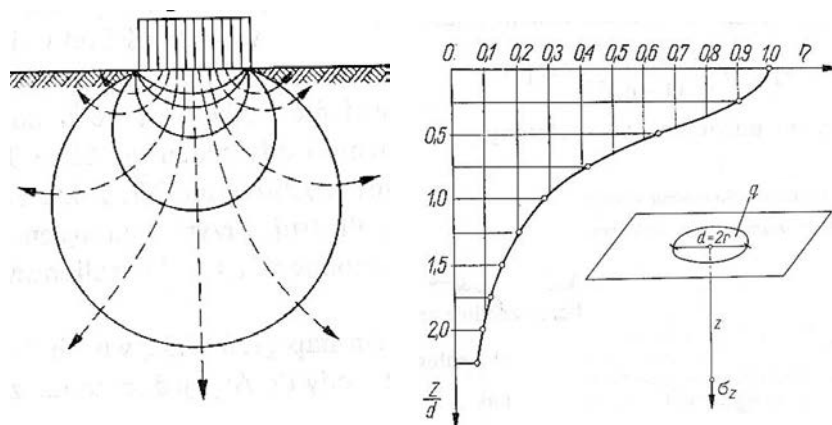
W powszechnie dostępnej literaturze nie ma szerszych danych prezentujących możliwe korelacje dla różnych rodzajów gruntu i analizy porównywalnej kontroli jakości zagęszczenia gruntu w nasypie na podstawie badań lekką płytą dynamiczną, czy płytą statyczną z innymi metodami, które umożliwiłyby szybkie określanie stanu zagęszczenia.[4].

Norma Eurocod 7 [8] zupełnie pomija tego rodzaju badania, a statyczne obciążenia podłoża zalecone są tylko w przypadkach próbnych obciążeń poziomów posadowienia fundamentów, gdzie możliwości odkształceń bocznych nie są znacząco istotne.

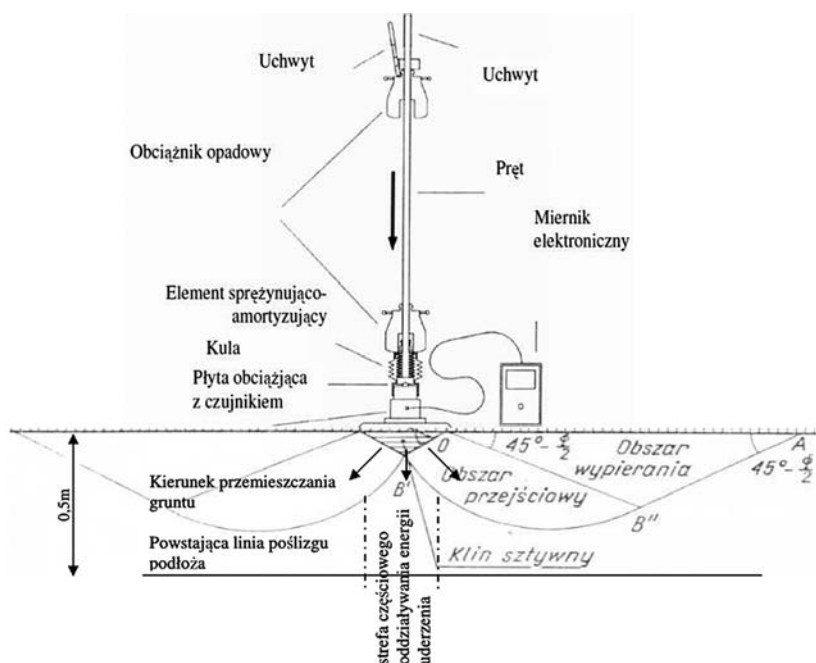
KIERUNKI I GŁĘBOKOŚCI ROZCHODZENIA SIĘ NAPRĘŻEŃ W GRUNCIE W WYNIKU OBCIĄŻENIA POWIERZCHNI

Ocena możliwości oddziaływania energii przyłożonej na powierzchnię gruntu na zagęszczaną warstwę wynika z powszechnie znanego w mechanice gruntów rozkładu kierunków działania wektorów naprężeń i wynikających z tego odkształceń, a także z teorii zanikania przyłożonych naprężeń z głębokością, co przedstawiono na rys. 3 i 4 [15].

Trajektorie izolinii rozkładu naprężeń wskazują, że linia najwyższego naprężenia znajduje się w bezpośredniej bliskości powierzchni, a występujące najgłębiej najmniejsze naprężenie



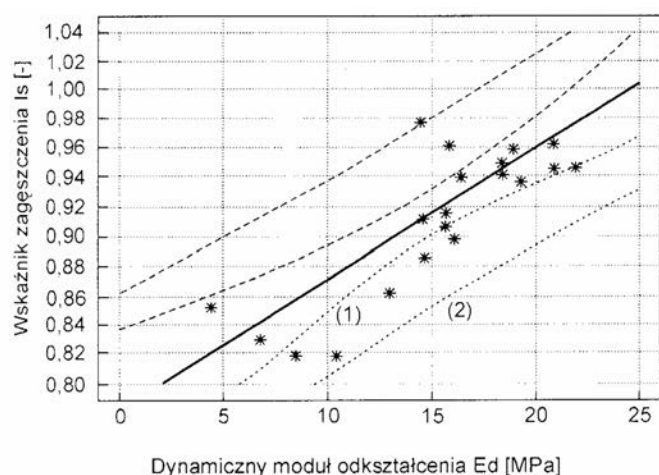
Rys. 3. Trójwymiarowa konsolidacja obciążonego podłoża i rozkład naprężeń pod środkiem kołowego obszaru obciążonego [15]



Rys. 4. Rozkład kierunków naprężeń oraz zasięg strefy przejmującej energię od podstawy płyty

ma taką samą wartość jak w pewnym oddaleniu od krawędzi uciskającej płyty. Wyznaczone prostopadłe do tych linii kierunku wywołanych naciskiem przemieszczeń (linie przerywane) wskazują, że energia uderzenia nie jest kierowana wyłącznie pionowo w głąb zagęszczanej warstwy, ale także na boki. Mechanizm ten w projektowaniu jest podstawą do wyznaczania granicznej nośności podłoża fundamentów na wyparcie (rys. 4). Te same mechanizmy występują przy każdym nacisku na ośrodek rozdrobniony.

Powstaje on także w przypadku obciążenia podłoża płytą VSS jak i przy energii przekazywanej przez płytę dynamiczną. Na rys. 4 zilustrowano, że nacisk wywołany przez płytę powoduje wytworzenie się pod jej podstawą klina sztywnego, który powoduje, że część energii przekazywana jest w głąb strefy wydzielonej liniami przerywanymi, a część pochłaniana jest przez przemieszczenia boczne. **Brak jej równomiernego działania w pionowej przestrzeni pod płytą powoduje, że odczyty przemieszczenia płyty nie mają zawiązku ze stanem zagęszczenia gruntu. Mechanizmu tego nie zmieniają również**



Rys. 5. Zależność wskaźnika zagęszczenia piasków od dynamicznego modułu odkształcenia

kolejne uderzenia obciążnika płyty. Z tego względu płytami można mierzyć ugięcie podłoża, bo jest ono efektem współpracy stref przyległych do miejsca ucisku, ale nie można mierzyć oporów gruntu, które wskazywałyby na jego zagęszczenie, gdyż do głębszych pokładów kontrolowanej warstwy dociera znikoma część energii przekazywanej przez płytę.

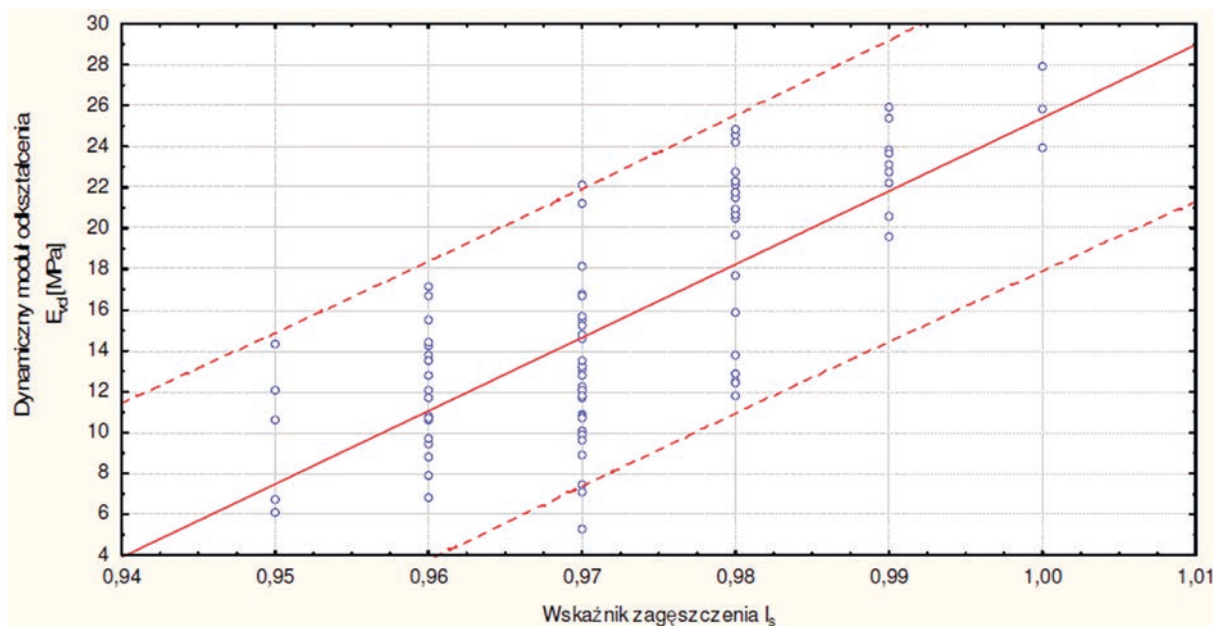
Podawane w instrukcjach płyt dynamicznych informacje, że można nimi kontrolować zagęszczenia warstw o miąższości do 50 cm są nieprawdziwe.

Obliczone wartości naprężeń występujące na poszczególnych głębokościach pod środkiem kołowej powierzchni uciskowej o średnicy $D = 30$ cm określone zasadami podanymi w literaturze i w normach [5, 8, 15] z zastosowaniem nomogramu Newmarka określającego współczynnik zanikania naprężeń η (rys. 3) wykazały, że:

- na głębokości 20 cm $z/D = 0,2 : 0,3 = 0,66 \Rightarrow \eta = 0,48$, tj. **48%** naprężenia od płyty,
- na głębokości 30 cm $z/D = 0,3 : 0,3 = 1,00 \Rightarrow \eta = 0,28$, tj. **28%** naprężenia od płyty,
- na głębokości 40 cm $z/D = 0,4 : 0,3 = 1,33 \Rightarrow \eta = 0,17$, tj. **17%** naprężenia od płyty,
- na głębokości 50 cm $z/D = 0,5 : 0,3 = 1,66 \Rightarrow \eta = 0,10$, tj. **10%** naprężenia od płyty.

Wobec powyższych uwarunkowań należy stwierdzić, że penetracja energii, a tym samym ugięcie, czy też moduł odkształcenia E mają niewiele wspólnego ze stanem zagęszczenia gruntów na poszczególnych głębokościach kontrolowanej warstwy. Nie można oceniać stanu zagęszczenia warstwy, jeśli do poszczególnych głębokości „dociera” od 48% do 10% przykładowej energii. Dodatkowo jeszcze przed pomiarem stan zagęszczenia kontrolowanej warstwy zmieniają tak zwane 3 wstępne uderzenia pobijaka płyty.

Wynikającym z powyższych analiz przykładem rozbieżności wyników wskaźnika zagęszczenia uzyskiwanego w konwencjonalny sposób z modułem dynamicznym E_d są wyniki doświadczeń (rys. 5) [14].



Rys. 6. Zależność wskaźnika zagęszczenia piasków od dynamicznego modułu odkształcenia

Wskazują one, że w punktach, w których w badaniach płytą uzyskano moduł $E_d = 14$ MPa, to w badaniach wiarygodną metodą pomiaru gęstości objętościowej szkieletu wskaźniki zagęszczenia wykazywały zmienności I_s od 0,86 do 0,98, co przy wymaganej przepisami wartości, na przykład $I_s = 0,98$ mogą różnić się od niej nie więcej niż o 0,01, a nie o 0,12 (rys. 5).

Podobne zróżnicowania przedstawiono w pracy [1], w której moduł $E_d = 14$ MPa odpowiadał wartościom I_s $0,95 \div 0,98$ (rys. 6). Wprowadzanie matematycznej korelacji wskazuje, że dla tego przypadku uśrednione $I_s = 0,97$. Daje to także błąd większy od 0,01.

Przykłady te potwierdzają małą przydatność sondy dynamicznej do badań kontroli zagęszczenia gruntów.

PODSUMOWANIE

Zastosowanie do kontroli zagęszczenia układanych konstrukcji ziemnych płyty VSS i płyty dynamicznej jest niewłaściwe. Przekazywana na powierzchnię warstwy energia, ze względu na zmienne reologiczne właściwości gruntu, rozprzestrzenia się sferycznie, powodując wielokierunkowe przemieszczanie się gruntu (rys. 3), a niewielkie drgania rejestrowano na poziomie terenu nawet w odległości do 10 m [3].

Następują wielokierunkowe przemieszczenia gruntu, a w przypadku płyty o średnicy 30 cm do deklarowanej głębokości skutecznej kontroli zagęszczenia 0,5 m przekazywane jest nie więcej niż 10% naprężenia przyłożonego do górnej części warstwy. Nie ma zatem ani równomiernego, ani kontrolowanego powiązania wywołanych płytą naprężeń ze stanem naprężeń na poziomach leżących w dolnych strefach kontrolowanej warstwy.

Przyjęcie w procedurze kontroli przed właściwym pomiarem trzech uderzeń ciężarka powoduje pewne dodatkowe dogęszczenie gruntu, co zmienia istniejący stan zagęszczenia warstwy, który ma być sprawdzany przed ingerencją skutku badania.

Nieliczne kontrolne porównania wskaźników zagęszczenia I_s uzyskanych metodą pomiaru gęstości na podstawie modułu E_{vd} (rys. 5, 6) wskazują, że różnice pomiarów wynoszą do 60%, co dyskwalifikuje przydatność płyty do kontroli zagęszczenia gruntów.

1. Badania i ustalenia zależności korelacyjnych dla oceny stanu zagęszczenia i nośności gruntów niespoistych płytą dynamiczną. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 2005.
2. Gosk W.: Problemy interpretacji wyników badań sztywności gruntu za pomocą lekkiej sondy dynamicznej. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 2, 2018, 99-105.
3. Gosk W., Czech K.: Drgania powierzchni podłoża gruntowego wywołane uderem spadającej masy – badania terenowe i identyfikacja sztywności. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3, 2015, 229-233.
4. Kumor K., Framas J., Kumor Ł.: Wybrane związki korelacyjne parametrów zagęszczenia określone metodami VSS i LFG. Civil and Environmental Engineering, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, nr 4, 2013, 271-279.
5. Pisarczyk S.: Badania laboratoryjne i polowe gruntów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993.
6. Norma BN-77/8931-12: Oznaczenie wskaźnika zagęszczenia gruntu.
7. Norma PN-B-04481:1988: Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
8. Norma PN-EN 1997-2: 2009 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne, Część 2. Rozpoznawanie i badanie podłoża gruntowego.
9. Parylak K.: Badania w drogownictwie i ich znaczenie. XIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, 2009, t. III, 75-122.
10. Roboty Ziemne. Warunki techniczne Wykonania i Odbioru (ziemnych budowli hydrotechnicznych). Ministerstwo Ochrony Środowiska Zasobów Naturalnych i Leśnictwa, Warszawa 1994.
11. Rogisz G.: Badanie nośności nasypów drogowych przy wykorzystaniu lekkiej płyty dynamicznej. Przegląd Budowlany 7-8/2015, 60-63.
12. Rolla S.: Badania materiałów i nawierzchni drogowych. WKiŁ Warszawa 1979.
13. Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadowienia obiektów budowlanych. DZ.U. 2012 poz. 464.
14. Sulewska M.: Sztuczne sieci neuronowe w ocenie parametrów zagęszczenia gruntów niespoistych. Studia z zakresu inżynierii, nr 64, IPPT PAN Warszawa-Białystok, 2009.
15. Witun Z.: Zarys geotechniki. Warszawa, 2001.