

Kryteria kontroli jakości zagęszczania wgłębnego gruntów niespoistych

Dr inż. Norbert Kurek – Menard Polska Sp. z o.o.

Dr hab. inż. Lech Bałachowski – Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Kontrola jakości wzmocnienia gruntów niespoistych podanych różnego rodzaju zabiegom zagęszczania wgłębnego stanowi rozwojowy i interesujący problem pod względem praktycznym i naukowym. Problematyka ta łączy się z rozwojem technologii zagęszczania wgłębnego, pomiarów terenowych i badań polowych oraz metod ich interpretacji. Pomimo ogromnego postępu w tych dziedzinach zagadnienie kontroli jakości zagęszczania wgłębnego gruntów niespoistych jest nadal dalekie od rozwiązania. Otwarte pozostaje pytanie, jakich używać narzędzi i jak definiować kryteria odbioru prac związanych z procesem zagęszczania gruntów niespoistych.

METODY ZAGĘSZCZANIA GRUNTÓW NIESPOISTYCH

W skład grupy technologii zagęszczania wgłębnego należy zaliczyć metody dynamiczne oraz wibracyjne [16, 17]. Metody dynamiczne wykorzystują energię zewnętrzną generowaną za pomocą spadającej masy lub eksplozji materiału wybuchowego. W zależności od wielkości przykładanej energii oraz rodzaju

użytego sprzętu należy wyróżnić: zagęszczanie dynamiczne (z ang. *dynamic compaction*), zagęszczanie impulsowe (z ang. *rapid impact compaction*), zagęszczanie walcem dynamicznym (z ang. *square impact roller compaction*) oraz mikrowybuchy (z ang. *microblasting*).

Zagęszczanie gruntów niespoistych przy użyciu metod wibracyjnych polega na wprowadzeniu w podłoże sondy generującej wibracje. Standardowo nośnikiem urządzeń wibrujących są dźwigi lub innego rodzaju maszyny. W zależności od rodzaju urządzenia wibrującego, jego położenia i kierunku wibracji wyróżnia się kilka technik: wibroflotacja (z ang. *vibroflotation*, *vibrocompaction*), sondy wibracyjne (profile – H oraz bardziej wyrafinowane kształty, np. sonda Terra, Vibro – żerdź o profilu – Y).

NARZĘDZIA KONTROLI ZAGĘSZCZANIA WGŁĘBNEGO

Narzędzia kontroli jakości zagęszczania wgłębnego w technologii wibroflotacji oraz zagęszczania dynamicznego zestawiono w tabl. 1. Wyszczególniono cztery podstawowe grupy,

Tabl. 1. Narzędzia kontroli jakości zagęszczania wgłębnego gruntów niespoistych [10]

	Rejestracja parametrów zagęszczania	Dobór parametrów	Osiadania	Badania polowe
Zagęszczanie dynamiczne	– wartość przyłożonej energii	– rodzaj siatki – rozstaw siatki – masa ubijaka – głębokość zagęszczania – wielkość ubijaka – kształt ubijaka – wysokość spadania – liczba uderzeń – liczba faz – liczba przejazdów – badanie podnoszenia	– stabilizacja osiadań w czasie – wartość osiadań	– badania inwazyjne (sondowania) – badania geofizyczne
Wibroflotacja	– czas zagęszczania – natężenie prądu	– rodzaj siatki – rozstaw siatki – wielkość wibratora – amplituda drgań – rodzaj wibratora – rodzaj medium potrzebnego do penetracji i zagęszczania tj. woda, powietrze lub ich mieszanka	– objętość doziarnionego gruntu – wartość osiadań – stabilizacja osiadań w czasie	
Analiza	realizator	wykonawca lub ekspert	wykonawca lub ekspert	ekspert

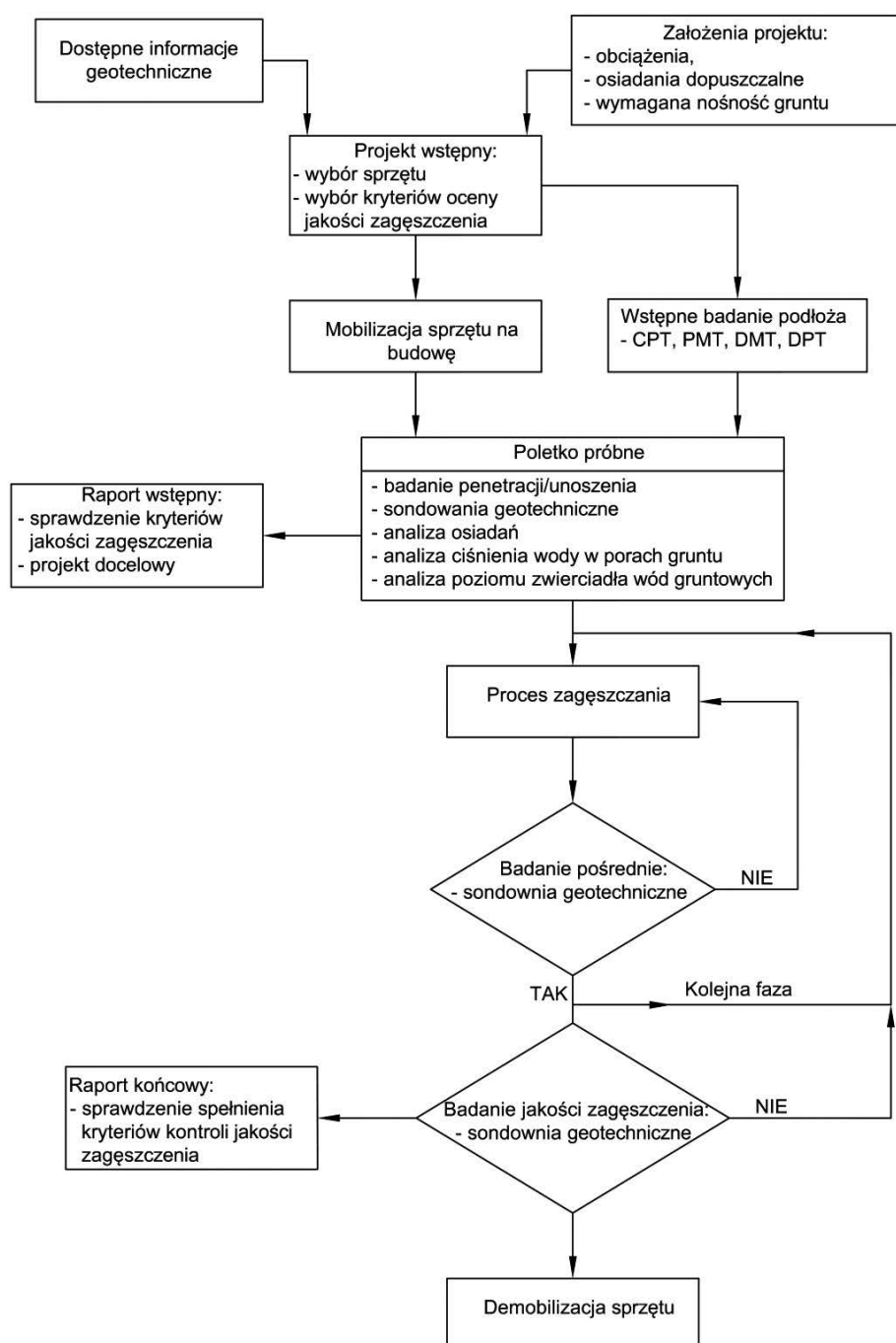
to jest: ocena na podstawie parametrów mierzonych w trakcie wykonywania zagęszczania, analiza parametrów wykonana na podstawie poletek próbnych, analiza osiadań wzmacnianego obszaru oraz interpretacja badań polowych.

Odpowiednie przygotowanie poletek próbnych pozwala na optymalne dobranie wielkości charakterystycznych wymiennych w tabl. 1. Projektując poletko próbne należy uwzględnić wyniki badań polowych oraz analizę osiadań powierzchni wzmacnianego obszaru. W przypadku zagęszczania dynamicznego analiza wyników na poletkach próbnych prowadzi do określenia wartości energii przykładanej na jednostkę powierzchni wzmacnianego obszaru. W przypadku wibroflotacji głównymi elementami określanymi na podstawie poletka próbnego są czas zagęszczania oraz natężenie prądu. Wartości wyznaczone na

poletkach próbnych, zarówno w przypadku zagęszczania dynamicznego, jak i wibroflotacji, pozwalają odpowiednio dobrać parametry procesu zagęszczania danego obszaru.

Właściwie zaprojektowane poletko próbne wymaga przeprowadzenia całej serii badań, takich jak:

- uziarnienie gruntu,
- geodezyjna niwelacja poletka próbnego na każdym etapie badań,
- badania polowe przed i po zagęszczaniu: sondą statyczną wciskaną, dylatometrem lub presjometrem,
- pomiary wahań poziomu zwierciadła wody gruntowej za pomocą piezometrów.



Rys. 1. Typowy program zapewnienia jakości zagęszczania w technologiach wibroflotacji oraz zagęszczania dynamicznego [10]

Podstawowymi narzędziami wykorzystywanymi do kontroli jakości zagęszczenia wglębnego są badania polowe oparte na penetracji w grunt różnego rodzaju urządzenia pomiarowych, takich jak: końcówka CPTU, dylatometr DMT, presjometr PMT oraz końcówka sondy dynamicznej DPT. Metody geofizyczne nie są powszechnie stosowane do oceny jakościowej i ilościowej zagęszczania wglębnego.

Wady i ograniczenia poszczególnych metod badań *in situ* powodują, że nie można jednoznacznie zarekomendować jednej techniki badania gruntu jako odpowiedniej i najlepszej do oceny jakości zagęszczenia wglębnego gruntów niespoistych. Przyjęcie kryterium kontroli jakości zagęszczenia gruntu niespoistego narzuca dobór narzędzi oraz metodykę interpretacji wyników badań.

Głównymi podmiotami biorącymi udział w ocenie stanu zagęszczenia są wykonawca wzmocnienia podłoża oraz ekspert (tabl. 1). Wykonawca w głównej mierze wykorzystuje jako narzędzia kontroli parametry rejestrowane w trakcie zagęszczania. Doświadczony wykonawca jest w stanie samodzielnie dobrać parametry technologiczne oraz przeprowadzić analizę opartą na obserwacji osiadań powierzchni zagęszczanej. W przypadku braku doświadczenia oraz braku znajomości mechanizmów towarzyszących technologii wibroflotacji oraz zagęszczania dynamicznego należy zdefiniować rolę eksperta, który jest odpowiedzialny za odpowiednie przeprowadzenie badań na poletkach próbnych oraz interpretację ich wyników.

Typowy program zapewnienia jakości zagęszczania wglębnego gruntów niespoistych w technologiach wibroflotacji oraz zagęszczania dynamicznego przedstawiono na rys. 1. W celu zapewnienia osiągnięcia przez grunt parametrów minimalnych, zdefiniowanych na etapie projektu wstępnego, przeprowadza się kontrolę na różnych etapach procesu zagęszczania. Pierwszym etapem jest wcześniej opisane poletko próbne, gdzie następuje ostateczne dobranie odpowiedniej technologii zagęszczania oraz jej podstawowych parametrów. Kolejnym etapem jest kontrola zagęszczenia stref poza poletkiem próbnym. Ze względu na znaczną zmienność przestrzenną gruntu, przy bardzo dużym obszarze zagęszczanym, może być konieczna korekta założeń potwierdzonych na poletku próbnym. Ostateczny etap kontroli jakości zagęszczenia następuje po zakończeniu procesu zagęszczania: przygotowywany jest raport końcowy, który zazwyczaj stanowi dokumentację odbiorową.

KRYTERIA KONTROLI ZAGĘSZCZANIA WGLĘBNEGO

Zagadnienie kryteriów kontroli jakości zagęszczania wglębnego gruntów niespoistych jest elementem, który powinien być rozważony na etapie projektu posadowienia fundamentów konstrukcji. Określenie narzędzi kontroli jest uzależnione w głównej mierze od warunków brzegowych pracy konstrukcji oraz parametrów potrzebnych do wykorzystania w przyjętej metodologii obliczania posadowienia konstrukcji. Bardzo ważnym elementem jest znajomość zagadnień związanych z mechanizmami zagęszczania gruntów niespoistych w technologiach zagęszczania dynamicznego i wibroflotacji, a także ich wpływ na parametry wytrzymałości, odkształcenia, stanu i historii obciążenia, które odgrywają istotną rolę w interpretacji zmodyfikowanych parametrów gruntu.

Stopień zagęszczenia I_D jest powszechnie wykorzystywany przez projektantów do oceny stanu gruntów niespoistych. Stopień zagęszczenia I_D wyznacza się na podstawie wyników badań polowych, w szczególności wyników sondowań statycznych CPT oraz sondowań dynamicznych DPT. Rozbieżne propozycje interpretacji powyższego parametru mogą doprowadzić do niedoszacowania lub do przeszacowania uzyskanej wartości zagęszczenia. Wynika to głównie z tego, że propozycje te opracowano dla masywu piasku świeżo uformowanego, niescementowanego i o określonej ściśliwości [5, 8, 12] na podstawie badań w komorze kalibracyjnej. Istotnym elementem interpretacji takich badań jest odpowiednie uwzględnienie wpływu warunków brzegowych wokół masywu gruntowego w komorze kalibracyjnej [2, 4, 5, 7]. Hamidi i in. [6] stwierdzili, że nie należy stosować stopnia zagęszczenia jako kryterium zagęszczania wglębnego gruntów niespoistych. Za słusznością powyższego stwierdzenia przemawia fakt, że relacje pomiędzy stopniem zagęszczenia a parametrami z badań polowych są uzależnione nie tylko od np. oporu stożka q_c lub liczby uderzeń N na jednostkę wpędu, ale również od zawartości frakcji drobnych, wielkości i kształtu ziaren, kształtu krzywej uziarnienia, składu mineralogicznego, ściśliwości i podatności ziaren na kruszenie oraz cementacji. Znajac mechanizmy zagęszczania w technologiach wibroflotacji i zagęszczania dynamicznego należy dodatkowo wymienić: wielkości składowych pionowej σ'_{0v} i poziomej σ'_{0h} naprężenia, wskaźnik prekonsolidacji oraz zjawisko starzenia gruntu (z ang. *aging*). Szczególną uwagę należy zwrócić na prekonsolidację, gdyż przy tym samym I_D grunt normalnie skonsolidowany będzie zachowywał się inaczej niż grunt prekonsolidowany [9, 11, 12].

Sondowania dynamiczne pozwalające określić wartość stopnia zagęszczenia I_D na podstawie liczby uderzeń N na jednostkę wpędu nie są narzędziem odpowiednim do określania wartości przyrostu zagęszczenia gruntu, który poddano wibroflotacji lub zagęszczeniu dynamicznemu. Bałachowski i Kozak [1] wykazali, że na podstawie sondowań dynamicznych przeprowadzonych sondą średnią w piasku drobnym (poletko w Gdyni), który poddany był procesowi wibroflotacji, wyznaczona wartość stopnia zagęszczenia I_D była znacznie wyższa niż określona na podstawie sondowań statycznych metodą CPTU. Autorzy zwrócili uwagę na to, że przy znacznych głębokościach tarcie na żerdzi powoduje przyrost liczby uderzeń N_{10} , co bezpośrednio przekłada się na interpretację stopnia zagęszczenia. Wyznaczanie stopnia zagęszczenia I_D za pomocą sondowań statycznych CPT jest również obarczone błędem interpretacji. Błędy te mogą wynikać z niewłaściwego oszacowania ściśliwości piasku i zastosowania nieodpowiednich korelacji $q_c - \sigma'_{0v} - I_D$ [8, 9, 14]. Wibroflotacja, jak i zagęszczanie dynamiczne powodują nie tylko przemieszczenia ziaren gruntu do stanu o większym upakowaniu, ale również zwiększają wartość składowej poziomej naprężenia efektywnego σ'_{0h} . Wpływa to na wybór propozycji interpretacji stopnia zagęszczenia, która powinna uwzględniać średnie naprężenie efektywne σ'_{0m} lub składową poziomą naprężenia efektywnego σ'_{0h} [9, 14]. W przypadku wykorzystania do interpretacji stopnia zagęszczenia propozycji opartych na wartości składowej pionowej naprężenia efektywnego σ'_{0v} oraz oporu stożka q_c uzyskane wartości stopnia zagęszczenia będą znacznie wyższe niż zagęszczenie rzeczywiście istniejące w podłożu

gruntowym. Należy zwrócić również uwagę na fakt, że bardzo trudno jest określić wartość składowej poziomej naprężenia efektywnego na podstawie badań sondą statyczną CPT. W celu wykorzystania kryterium stopnia zagęszczenia I_D należy posłużyć się bardziej kompleksowymi badaniami polowymi z równoległe przeprowadzonymi sondowaniami statycznymi CPT oraz badaniami dylatometrycznymi DMT [9, 11, 13].

Kryterium nośności gruntu

Kolejna grupa kryteriów jest oparta na określeniu minimalnej nośności podłoża. Nośność ta jest definiowana poprzez parametr mierzony w badaniach polowych lub interpretowany na jego podstawie. W zależności od rodzaju badań polowych uwzględniono:

- opór stożka q_c sondy statycznej CPTU,
- efektywny kąt tarcia wewnętrznego ϕ' wyznaczony na podstawie zależności korelacyjnych z badań CPTU i DMT [9, 14],
- wartości ciśnienia granicznego p_1 otrzymywanego z badań presjometrem PMT.

Jako podstawowe narzędzie należy wymienić metodę sondowań statycznych CPTU, gdzie jest rejestrowany ciągły profil oporu stożka. Kryterium oporu stożka q_c zdefiniowane jako wartość stała w profilu lub wartość zmienna wraz z głębokością przedstawiono na rys. 2. W przypadku stałej wartości q_c w profilu następuje spadek zagęszczenia gruntu wraz z głębokością. Tak opisane kryterium powoduje, że w górnej części wzmacnianej warstwy grunt jest znacznie bardziej zagęszczony niż w warstwach niższych. Wykorzystując wzór Jamiolkowskiego i in. [4], wykazano, że przy stałej wartości oporu stożka (rys. 2a) stopień zagęszczenia przy powierzchni jest równy 0,95 i maleje do wartości 0,55 na głębokości 11 m. Należy jednoznacznie stwierdzić, że tak zdefiniowane kryterium jest nieekonomiczne. Kryterium zakładające zmienny opór stożka

(rys. 2b), który odpowiada stałej wartości stopnia zagęszczenia jest podejściem słusznym, które pozwala na równomierne efektywne zagęszczenie całej warstwy. Złe zdefiniowane kryterium oparte na wartości q_c , które nie bierze pod uwagę technologii zagęszczania wglębnego, może okazać się niemożliwe do spełnienia. Przykładem złe zdefiniowanego kryterium, pomijającego technologię zagęszczania, jest przyjęcie w warstwie przypowierzchniowej takiej samej wartości oporu q_c , jak w warstwach na większej głębokości.

Wymaganą wartość oporu stożka q_c można wyznaczyć bezpośrednio z wzoru określającego opór graniczny podłoża z gruntu niespoistego obciążonego fundamentem bezpośrednim q_f . W tym celu można wykorzystać propozycję Meyerhofa [15]:

$$q_f = \bar{q}_c \left(\frac{B_f}{C_z} \right) \cdot \left(1 - \frac{D_z}{B_f} \right) \cdot \frac{1}{\eta} \quad (1)$$

gdzie:

- $\bar{q}_c$ – uśredniony opór stożka w przedziale głębokości ($D_z; D_z + B_f$),
- B_f – szerokość ławy lub stopy fundamentowej,
- D_z – głębokość posadowienia mierzona od powierzchni terenu,
- C_z – współczynnik empiryczny równy 12,2,
- η – współczynnik bezpieczeństwa.

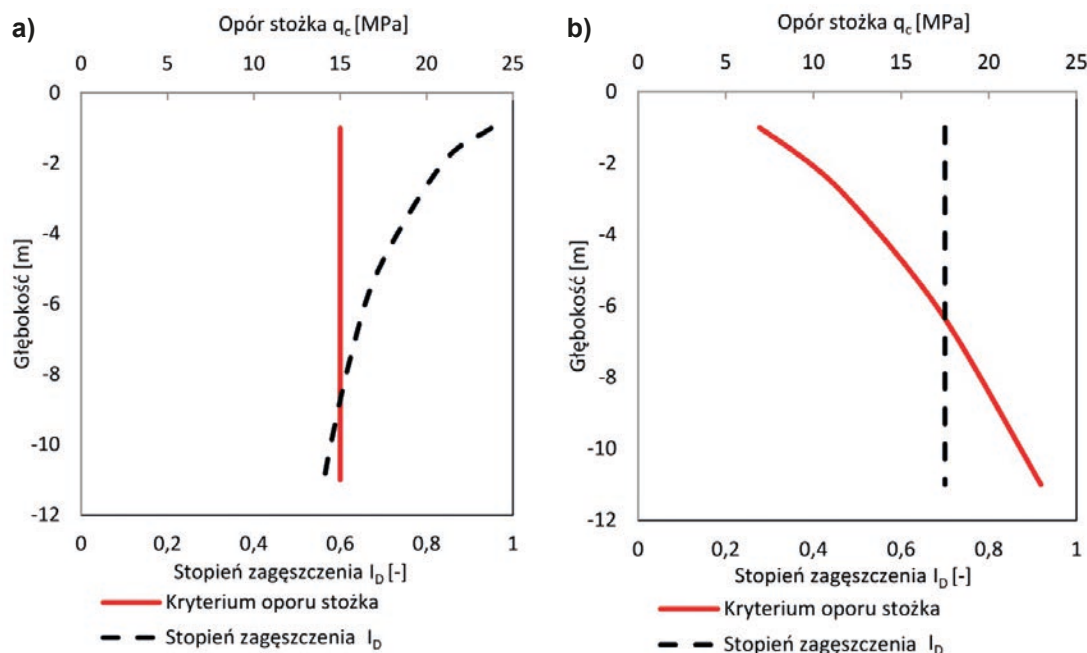
Kryterium nośności oparte na wartości ciśnienia granicznego p_1 wyznacza się w badaniu presjometrem PMT. Nośność graniczną podłoża q_1 pod fundamentem Baguelin i in. [3] określili wzorem:

$$q_1 = q_0 + k(p_1 - p_0) \quad (2)$$

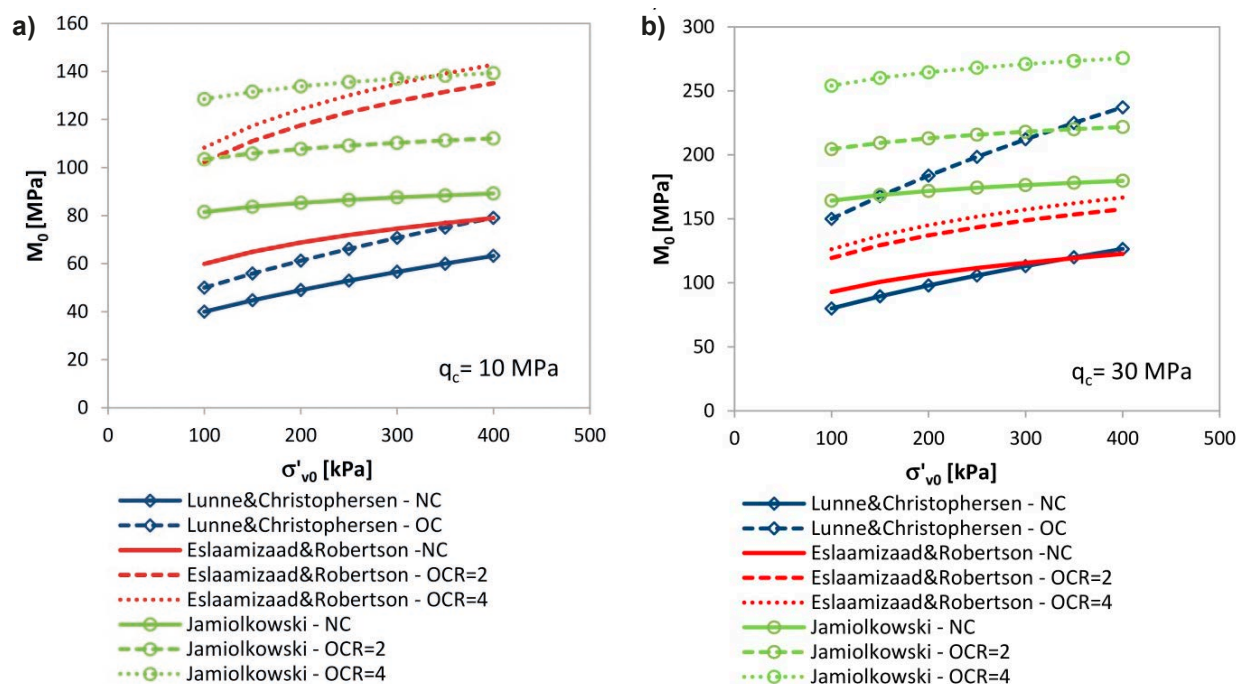
gdzie:

- q_1 – nośność graniczna gruntu,
- q_0 – naprężenie od nadkładu w poziomie posadowienia,
- p_1 – ciśnienie graniczne wyznaczone w badaniu presjometrem PMT,
- p_0 – składowa pozioma naprężenia pierwotnego,
- k – współczynnik nośności zależny od rodzaju gruntu, głębokości posadowienia oraz rodzaju i kształtu fundamentu w przedziale od 0,8 do 9.

Zastosowanie kryteriów nośności do oceny jakości zagęszczenia wglębnego gruntów niespoistych jest związane zazwyczaj z przyjętą na etapie analiz projektowych metodologią obliczania posadowienia fundamentów na podstawie wyników badań polowych (projektowanie bezpośrednie).



Rys. 2. Kryterium oporu stożka q_c : a) wartość q_c stała w profilu, b) wartość q_c zmienna w profilu [10]



Rys. 3. Porównanie wyników oszacowań wzorami empirycznymi edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej M_0 gruntów normalnie skonsolidowanych oraz prekonsolidowanych ($OCR = 2$ i 4) na podstawie sondowań statycznych CPTU [10]

Kryterium odkształcalności gruntu

Kryterium odkształcalności należy rozumieć jako kryterium oparte na modułach odkształcenia lub pomiarze osiadań. Każda z metod badań polowych pozwala na mniej lub bardziej dokładne oszacowanie modułu odkształcenia gruntu. Rodzaj uzyskanego modułu oraz jego jakość są zależne w głównej mierze od metody badawczej. Najczęściej stosuje się sondę statyczną CPTU, dylatometr DMT oraz presjometr PMT. Kryterium odkształcalności sprowadza się do określenia na etapie projektu minimalnej wartości modułu ścisłości gruntu M lub modułu odkształcenia E . Moduł ścisłości może być zdefiniowany jako stały bądź zmienny w profilu. Należy pamiętać, że moduł odkształcenia zależy od historii obciążenia, poziomu odkształcenia oraz poziomu naprężenia, co powoduje jego wzrost wraz z głębokością. W związku z powyższym, definiując kryterium odkształcenia za pomocą zmiennego modułu ścisłości, charakteryzuje się jego równomierną zmianę wraz z głębokością lub jego stopniowy wzrost.

Analiza porównawcza (rys. 3) wykazała, że trudno jest jednoznacznie wskazać interpretację, która w każdych warunkach będzie dostarczała wiarygodnych wartości edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej na podstawie wyników sondowań statycznych. Trudności w oszacowaniu historii obciążenia oraz wartości składowej poziomej naprężenia efektywnego sprawiają, że interpretacja odkształcalności gruntu na podstawie sondowań statycznych jest bardzo utrudniona i może powodować liczne błędy. Należy podkreślić, że poziom odkształceń w gruncie wywołanych wciskaniem końcówki sondy CPTU odpowiada zagadnieniom związanym z określaniem nośności granicznej czy analizie stateczności konstrukcji i znacznie przewyższa typowy poziom odkształcenia pod prawidłowo zaprojektowanymi fundamentami. Sondowanie statyczne metodą CPTU jest również mniej wrażliwe na wpływ prekonsolidacji czy przyrost składo-

wej poziomej naprężenia w gruncie wywołanej zagęszczaniem podłoża [11, 13]. Ciekawą alternatywą, w przypadku stosowania kryterium odkształcalności, jest użycie modułu ścisłości M_{DMT} z badania dylatometrem. Moduł ten jest wyznaczany w zakresie odkształceń typowych dla zagadnień osiadań i przemieszczeń fundamentów – poziom odkształcenia postaciowego rzędu $0,1\%$ [13]. Biorąc pod uwagę sposób zadawania obciążeń podczas odkształcania membrany dylatometr, moduł M_{DMT} jest wrażliwy na zmianę składowej poziomej naprężenia w gruncie [9, 11, 13, 14]. Uzyskane wartości modułu ścisłości z badania DMT można zatem bezpośrednio porównać z zadaniem kryterium odkształcalności gruntu [1].

WNIOSKI

Kontrola jakości zagęszczania wgłębnego gruntów niespoistych obejmuje analizę danych na różnych etapach prac, to jest: ocenę przydatności gruntu do zagęszczenia, odpowiednie zaplanowanie oraz przygotowanie poletka i badań na poletku doświadczalnym, ocenę danych rejestrowanych, ocenę wyników badań polowych, weryfikację projektu wykonawczego zagęszczania wgłębnego gruntu oraz pomiarów osiadań powierzchni obszaru zagęszczanego. Jako główne narzędzia kontroli zagęszczanego wgłębnego gruntu przyjęto badania polowe za pomocą sondy statycznej CPTU, dylatometr DMT oraz presjometr PMT.

Analiza kryteriów kontroli jakości zagęszczania wgłębnego gruntów niespoistych pozwoliła scharakteryzować trzy główne kryteria odbioru zagęszczenia oparte na stopniu zagęszczenia, nośności gruntu oraz odkształcalności gruntu. Przyjęcie właściwego kryterium kontroli zagęszczenia wymaga współpracy projektanta, doświadczonego wykonawcy oraz eksperta geotechnika.

LITERATURA

1. Bałachowski L., Kozak P.: Compaction control at Gdynia Port with CPTU and DMT. International Symposium on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Vibratory Compaction, Transvib 2006, Paris, September 2006, LCPC, 121-129.
2. Bałachowski L.: Analysis of dilatometer test in calibration chamber. 2nd International Conference on the Flat Dilatometer. 2-5 April 2006, Washington, 307-312.
3. Baguelin F., Jézéquel J. F., Shields D. H.: The pressuremeter and foundation engineering. Trans Tech Publications, 1978.
4. Foray P.: Scale and boundary effects on calibration chamber pile tests. Conference on calibration chamber testing. Clarkson, 1991, 147-160.
5. Ghionna V. N., Jamiolkowski M.: A critical appraisal of calibration chamber testing of sands. Conference on calibration chamber testing, Clarkson, 1991, 13-36.
6. Hamidi B., Nikraz H., Varaksin S.: Ground improvement acceptance criteria. 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Solutions, Hong Kong, China, May 2011. The Hong Kong Geotechnical Society, 6 stron.
7. Houlsby G. T., Hitchman R.: Calibration chamber tests of cone penetrometer in sand, *Géotechnique*, 38(1), 1988, 39-44.
8. Jamiolkowski M., Ghionna V. N., Lancellotta R., Pasqualini E.: New correlations of penetration tests for design practice. 1st International Symposium on Penetration Testing, Rotterdam, March 1988, 20-24.
9. Jamiolkowski M., Lo Presti D.C.F., Manassero M.: Evaluation of Relative Density and Shear Strength of Sands from CPT and DMT. Symposia in Honor of C.C. Ladd. Soil Behavior and Soft Ground Construction. Geotechnical Special Publications No. 119, 5-6 October, 2001, Cambridge, Massachusetts, USA.
10. Kurek N.: Kontrola jakości zagęszczania wglębnego gruntów niespoistych. Rozprawa doktorska. Politechnika Gdańska, grudzień 2013.
11. Lee M-J., Choi S-K., Kim M-T., Lee W.: Effect of stress history on CPT and DMT results in sand. *Engineering Geology*, 117, 2011, 259-265.
12. Lunne T., Robertson P. K., Powell J. J. M.: Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Blackie Academic and Professional, 1997.
13. Marchetti S., Monaco P., Totani G., Calabrese M.: The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations. A report by the ISSMGE Committee TC16. Proc. In-situ 2001, Bali, May 21, 2001.
14. Mayne P. W.: Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests. International Conference on In-situ Measurements of Soil Properties and Case Histories, Bali, Indonesia, 2001, 27-48.
15. Meyerhof G. G.: Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, 82, 1956, 1-19.
16. Mitchell J. K.: State of the art – Soil Improvement. 10th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 4, Stockholm, 1981, 509-565.
17. Moh Z-Ch. Moderator's Report on Soil Improvement. 7th South Asian Geotechnical Conference, Vol. 2, Hong Kong, November 1982, South Asian Geotechnical Society, 325-343.