

Interpretowanie stopnia zagęszczenia gruntów niespoistych na podstawie wyników sondowań statycznych i dynamicznych

Monika Ura¹, Marek Tarnawski^{1,2}



M. Ura



M. Tarnawski

Interpretation of relative density of non-cohesive soils on the grounds of static and dynamic penetrometer results. *Prz. Geol.*, 62: 715–720.

Abstract. Engineering geologists have at their disposal a series of penetrometers to investigate density of non-cohesive soils. Sometimes, however, they seem to give incompatible results for similar or same soils. Some researches argue that strength and compressibility of these soils are too complex phenomena to be described solely by the single parameter of relative density and they base their findings on sophisticated tests in calibration chambers. While it might be the case, one should still start from examining correlations between numerical results of field tests from various types of penetrometers. The earlier authors' studies have produced local correlations between the results of CPT (cone tip resistance) and DPSH (number of blows) as well as between CPT and MPT (pressuremeter limit pressure). New experiments

with all four continuous dynamic penetrometers: DPSH, DPH, DPM and DPL, have given encouraging results indicating possible directions of standard interpretation changes and further studies.

Keywords. non-cohesive soils, penetrometers, relative density

Szeroka gama typów sondowań pozwalających na badanie zagęszczenia gruntów niespoistych ułatwia, ale i komplikuje pracę geologów inżynierskich. Zdarza się, że zróżnicowanie zagęszczenia piasków na danym terenie zdaje się wynikać bardziej ze stosowania różnych typów sond (np. statycznych i dynamicznych) niż z faktycznej heterogeniczności badanych gruntów. Opisane w niniejszym artykule nowe porównania wyników sondowań dynamicznych stanowią kontynuację analiz porównawczych różnych typów badań polowych, w celu uzyskania wiarygodnej korelacji pomiędzy nimi. Dotychczasowe wyniki pozwoliły na stworzenie lokalnej korelacji pomiędzy wynikami sondowań CPT a badaniem sondą dynamiczną DPSH (Ura & Tarnawski, 2012) oraz pomiędzy sondowaniem CPT a badaniami presjometrycznymi (Tarnawski & Ura, 2011). Poletkiem doświadczalnym, na którym zrealizowano badania sondami dynamicznymi DPL, DPM, DPH i DPSH, a których wyniki po raz pierwszy przedstawiono poniżej, był fragment Nabrzeża Piastowskiego w Świnoujściu. Badane podłoże stanowiły drobne, kwarcowe piaski nasypowe oraz rodzime piaski morskie o niskim wskaźniku uziarnienia ($U < 3$).

KOMORY KALIBRACYJNE

Badania piasków w komorach kalibracyjnych (Holden, 1991), w których zarówno rodzaj gruntu, jak i jego gęstość oraz naprężenia pionowe i poziome są dokładnie określone, wykazują, że wytrzymałość i ściśliwość gruntu niespoistego to zjawisko zbyt złożone, żeby mogło być opisane wyłącznie za pomocą jego stopnia zagęszczenia I_D (Robertson & Campanella, 1983), a więc że korelacje łączące np. opór na stożku q_c statycznej sondy wciskanej CPT ze stopniem zagęszczenia są zbyt uproszczone. Są one jednak użyteczne do celów praktycznych (Lunne i in., 2001). Wyniki

badania wpływu modelowanych w komorach naprężeń skłaniają do proponowania we wzorach wiążących q_c i I_D poprawek związanych ze stanem i historią naprężenia w gruncie, czyli uwzględniających pionowe (grunty normalnie skonsolidowane) i/lub poziome (grunty prekonsolidowane) naprężenie efektywne (Houlsby & Hitchman, 1988; Jamiolkowski i in., 1988; Kulhavy & Mayne, 1990; Schnaid & Houlsby, 1990; Bolton & Gui, 1993; Hsu & Huang, 1999; Bałachowski & Kurek, 2008; Ahmadi & Karambakhsh, 2010). Analizie poddaje się również takie właściwości piasku, jak wielkość ziaren, ich kształt (obtoczenie), skład mineralny (Robertson & Campanella, 1983; Bałachowski & Kurek, 2008), a także strukturę gruntu, oraz zjawiska „starzenia się” i cementacji, które odróżniają piasek formowany w komorach od występującego w naturalnym złożu i tylko częściowo mogą być w komorach modelowane (Bałachowski, 2008). Przegląd takich propozycji zawiera czołowy współczesny podręcznik dotyczący sondowań CPT (Lunne i in., 2001), niemniej można znaleźć tam ostrzeżenia przed pochopnym stosowaniem ich w praktyce.

Powtarzalność wyników badań w komorach kalibracyjnych, w ściśle zdefiniowanych warunkach, jest tak duża, że można z nich w ogóle zrezygnować i symulować przebieg tych badań w wirtualnych komorach, zbudowanych jako trójwymiarowy model komputerowy (Butlanska i in., 2010). Szuka się takich rozwiązań, ponieważ komory to zaawansowane technologicznie, a więc kosztowne urządzenia (przypominające wielkowymiarowy aparat trójosiowego ściskania), dlatego ich liczba na świecie jest niewielka, a w Polsce dysponuje nią jedynie Politechnika Gdańska (Bałachowski, 2006a, b, 2008).

Doceniając zalety komór kalibracyjnych, należy mieć na uwadze wpływ na wynik badania ograniczonych wymiarów (średnicy) komory kalibracyjnej. Ocena wpływu warunków brzegowych rozpoczyna się od wyznaczenia współczynnika

¹ Przedsiębiorstwo Geologiczne „Geoprojekt Szczecin”, ul. Tartaczna 9, 70-893 Szczecin; m.ura@geoprojekt.szczecin.pl.

² Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Wydział Budownictwa i Architektury, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin; m.tarnawski@geoprojekt.szczecin.pl.

R_d , odnoszącego średnicę komory do średnicy narzędzia badawczego, np. stożka sondy (Parkin & Lunne, 1982; Houlby & Hitchman, 1988; Bałachowski & Kurek, 2008). Znaczenie tego problemu jest różnie oceniane i uważane za istotne co najmniej od $R_d = 30$, ale w pewnych przypadkach nawet przy $R_d = 100$ (Ahmadi & Robertson, 2008). W efekcie otrzymuje się wyniki (np. wartości q_c) inne niż w gruntach naturalnych o analogicznym stopniu zagęszczenia (Schnaid & Houlby, 1990). Ponieważ zdecydowana większość publikacji, omawiających wyniki sondowań w gruntach niespoistych formowanych w komorach kalibracyjnych, dotyczy badań sondą statyczną (CPT), podczas gdy bardziej popularnym narzędziem badania stopnia zagęszczenia tych gruntów są sondy dynamiczne, nie należy lekceważyć możliwości przeprowadzania studiów nad wynikami badań za pomocą różnych typów sondowań, także rutynowych, w terenie.

ZASADY INTERPRETACJI SONDOWAŃ DYNAMICZNYCH

Działanie sond dynamicznych polega na wbijaniu w podłoże kolumny żerdzi zakończonej znormalizowaną końcówką stożkową. Norma PN-B-04452:2002 wprowadziła ich cztery typy. Są to: sonda lekka DPL, sonda średnia DPM, sonda ciężka DPH i sonda bardzo ciężka DPSH. Nazwy wskazują na podstawową różnicę pomiędzy tymi typami, mianowicie na zróżnicowaną masę młota (odpowiednio: 10, 30, 50 i 63,5 kg). Pozostałe istotne parametry to wysokość swobodnego spadu młota (50 cm dla sond DPL, DPM i DPH oraz 75 cm dla DPSH) i powierzchnia podstawy stożka. Sondą dynamiczną jest też najstarsza ze znanych sond wbijanych: sonda cylindryczna SPT (parametry młota i wysokości spadu identyczne jak sondy DPSH). Jej pomiar ma jednak charakter punktowy, a nie ciągły, jak pozostałych sond. Wyniki sondowań dynamicznych interpretowane są zwykle w taki sposób, że danej liczbie uderzeń młota „ N ” na mierzony odcinek wępudy sondy „ k ” (10, 20 lub 30 cm) przypisywana jest pewna wartość stopnia zagęszczenia gruntu I_D , czyli:

$$I_D = f(N_k) \quad [1]$$

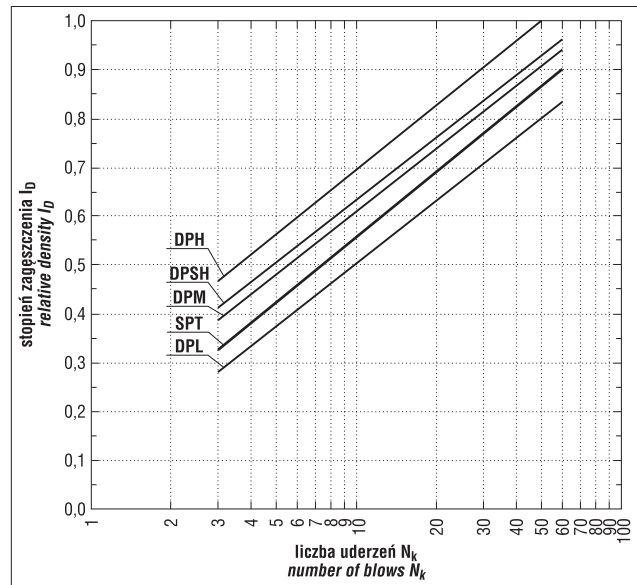
Norma PN-B-04452:2002 przyjmuje, że charakter zmienności zależności [1] odpowiada funkcji logarymicznej i można go zapisać jako:

$$I_D = b \lg N_k + a \quad [2]$$

Według PN-B-04452:2002 przebieg funkcji (wyrażony współczynnikiem nachylenia $b = 0,429 - 0,441$) tylko w znikomym stopniu zależy od typu sondowania. W związku z tym, wrysowane na logarymicznym wykresie zależności stopnia zagęszczenia I_D od liczby uderzeń N_k proste dotyczące poszczególnych typów sondowań są do siebie prawie równoległe (ryc. 1), przy czym wartości $N_k < 3$ i $N_k > 60$ zostały wyłączone z normowej interpretacji.

W analogiczny sposób norma PN-B-04452:2002 zaproponowała interpretowanie wyników sondowań CPT w gruntach niespoistych:

$$I_D = 0,709 \lg q_c - 0,165 \quad [3]$$



Ryc. 1. Interpretacja sondowań dynamicznych wg PN-B-04452:2002 (Frankowski, 2003)

Fig. 1. Interpretation of dynamic penetrometers acc. to PN-B-04452:2002 (Frankowski, 2003); numer of blows N_k vs. relative density I_D

Po krótkim okresie zadowolenia z dysponowania pełną paletą interpretacji wyników sondowań w gruntach niespoistych zawartą w PN-B-04452:2002 zaczęto zwracać uwagę na niedoskonałości, a zwłaszcza niekompatybilności tych interpretacji (Tarnawski, 2010). Należy przypomnieć, że sposoby interpretacji sondowań dynamicznych były przedmiotem wielu badań (Tefferra, 1976; Dudycz, 1981; Borowczyk & Frankowski, 1981, 1985; Tarnawski, 1983; Milancej, 1997; Giżyński, 1998; Giżyński & Zadroga, 2001), które w Polsce dotyczyły przede wszystkim najpopularniejszego sprzętu, jakim obok sondy lekkiej SL (obecnie DPL) była sonda ciężka SC, obecnie „bardzo ciężka” DPSH. Wyniki tych badań znajdowały swe odbicie w normowych wytycznych. Zmieniające się interpretacje sondy DPSH przedstawiono w tabeli 1. Jeśli pominąć najstarszą interpretację Teferry zauważamy, że kolejne zalecane normami interpretacje są coraz mniej ostrożne. W PN-B-04452:2002 nawet zniknęły grunty luźne.

W najnowszej, obowiązującej i zastępującej normę PN-B-04452:2002 normie Eurokod 7 w ogóle nie zawarto

Tab. 1. Interpretacja sondowań DPSH
Table 1. Interpretation of DPSH results

Interpretacja według: Interpretation according to:	Liczba uderzeń na 20 cm wępudy sondy (N_{20}), przy charakterystycznych wartościach stopnia zagęszczenia I_D Number of blows per 20 cm of penetration (N_{20}) at some characteristic values of relative density I_D		
	0,33	0,67	0,80
Tefferra, 1976	1	15	50
PN-81/B-03020	8	25	40
Dudycz, 1983; Tarnawski, 1983	5	22	40
PN-86/B-02480	3	13	30
PN-B-04452:2002	2	11	24

wytucznych do interpretacji sondowań DPSH, a jedynie przykłady dotyczące interpretacji sondowań DPL i DPH wzięte z literatury z 1978 r. (Stenzel & Melzer, 1978). Mimo analogicznego sposobu interpretacji [wzór 2] przykłady te trudno odnieść do zaleceń normy PN-B-04452:2002, gdyż odnoszą się do gruntów o odmiennych wartościach współczynnika jednorodności uziarnienia.

SONDOWANIA STATYCZNE A DYNAMICZNE

Studia, których wynikiem były kolejne propozycje interpretacji sondowań dynamicznych, często dotyczyły porównań z wynikami sondowań CPT, ponieważ proponowana w instrukcjach i normach interpretacja sondowań statycznych, w aspekcie stopnia zagęszczenia gruntów niespoistych, praktycznie nie zmieniała się przez lata. Dopiero w Eurokod 7 zaproponowano niezobowiązująco (jako „przykład”) pewne modyfikacje (tab. 2).

„Geoprojekt Szczecin” prowadził badania geotechniczne na potrzeby realizowanego Terminalu LNG i Portu Zewnętrzny w Świnoujściu. W ramach tych prac wykonywano m.in. badania zagęszczenia gruntów w obrębie budowanej platformy przy falochronie Portu Zewnętrznego. W ramach przeprowadzonych prac wykonano 30 sondowań DPSH oraz 8 sondowań CPT, każde do głębokości 5 m. Cztery punkty stanowiły tzw. węzły badawcze, w których wykonano zarówno sondowanie dynamiczne, jak i statyczne. Wyniki niezbyt zachęcające, jeśli chodzi o jakość wykonanego nasypu, okazały się interesujące poznawczo, gdyż były bardzo zróżnicowane. Zestawiając (Ura & Tarnawski, 2012) wartości oporu na stożku oraz liczby uderów w poszczególnych przedziałach głębokości, uzyskano prostoliniową zależność pomiędzy wartością oporu na stożku q_c i liczbą uderów na 20 cm zagłębienia sondy DPSH N_{20} . Zależność ta, której współczynnik determinacji wyniósł $R^2 = 0,86$, czyli był zadawalający, wyraża się wzorem:

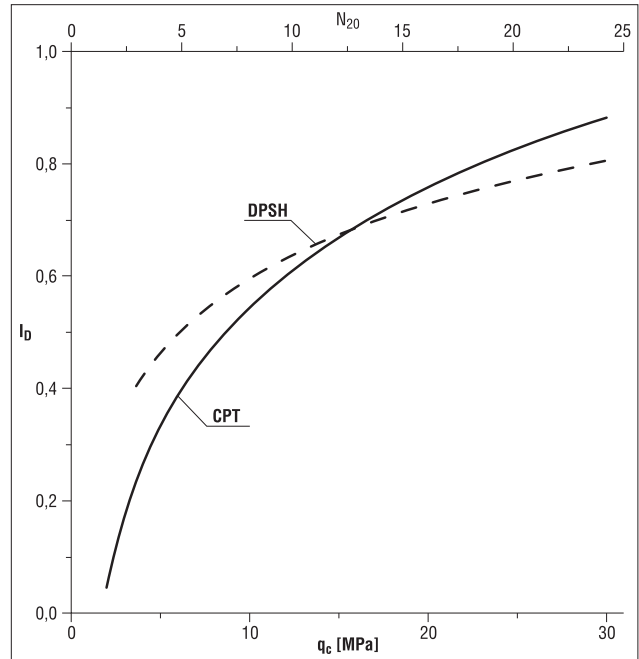
$$N_{20} = 0,7299q_c + 1,8811 \quad [4]$$

Korzystając z opisanej zależności, stworzono wykres porównawczy (ryc. 2), na którym zestawiono krzywe zależności wartości stopnia zagęszczenia od wyników obu sond według interpretacji zawartej w normie PN-B-04452:2002. Wykresy tych zależności krzyżują się i rozchodzą, a więc, mimo że pochodzą z tej samej normy nie są kompatybilne. Rozbieżności obserwujemy w domenach wysokich, a przede wszystkim niskich wartości N_{20} i q_c . Widać tu wyraźnie, jak mało ostrożna jest interpretacja sondowań dynamicznych wg PN-B-04452:2002.

Tab. 2. Interpretacja sondowań CPT
Table 2. Interpretation of CPT results

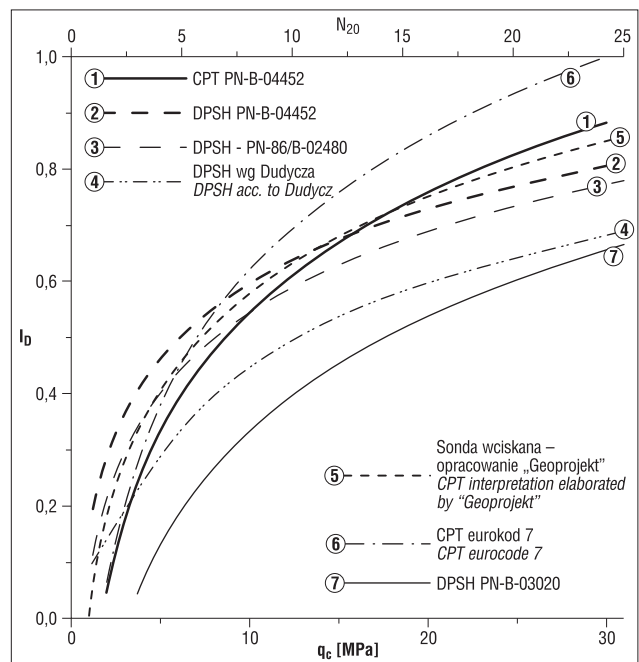
Interpretacja według: Interpretation according to:	Wartość oporu na stożku q_c [MPa] przy charakterystycznych wartościach stopnia zagęszczenia I_D Cone resistance value q_c [MPa] at some characteristic values of relative density I_D		
	0,35	0,65	0,85
„Geoprojekt”	4	14	26
PN-B-04452:2002	5	14	27
Eurokod 7 Eurocode 7	5	10	20

Na analogicznie, jak w przypadku ryciny 2, wyskalowanym wykresie (ryc. 3) zestawiono różne polskie interpretacje sondowań DPSH i CPT. Można zauważyć, że interpretacja sondy DPSH według normy PN-B-04452:2002 jest najmniej ostrożną ze wszystkich dotychczasowych, przede wszystkim w zakresie niskich wartości N_{20} . Jako najbardziej zbliżone do siebie interpretacje obu typów sond, wymienić można interpretację wyników sondowań statyczną sondą wciskaną, opracowaną przez „Geoprojekt”



Ryc. 2. Niezgodne interpretacje sond CPT i DPSH w normie PN-B-04452:2002 (Ura & Tarnawski, 2012)

Fig. 2. Incompatible interpretations of CPT and DPSH penetrometers in PN-B-04452:2002 (Ura & Tarnawski, 2012)



Ryc. 3. Znane polskie interpretacje sond CPT i DPSH skorelowane wzorem [4] (Ura & Tarnawski, 2012)

Fig. 3. Well-known Polish CPT and DPSH interpretations correlated by the formula [4] (Ura & Tarnawski, 2012)

oraz interpretację wyników sondowania sondą DPSH, według PN-86/B-02480, chociaż i one rozchodzą się w strefie wysokich zagęszczeń. Interpretacja wyników sondowań CPT zaproponowana w Eurokodzie 7, daje w strefie $q_c \gg 10$ MPa najwyższe wartości stopnia zagęszczenia, dochodząc do wartości $I_D = 1$, poniżej $q_c = 25$ MPa.

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ RÓŻNYMI SONdami DYNAMICZNYMI

W interpretacji wyników różnych sond dynamicznych zaproponowanych w normie PN-B-04452:2002 można zauważyć, że różnicujący wpływ współczynnika kierunkowego b we wzorze [2] jest wręcz pomijalnie mały. Gdybyśmy przyjęli jego pośrednią wartość $b = 0,435$, to dla skrajnych wykresów z ryciny 1 (sondy DPL i DPH) otrzymalibyśmy odchylenia wartości I_D , w stosunku do wyników otrzymanych z $b = 0,429$ (sonda DPL), rzędu 1,13–1,28%, natomiast dla sondy DPH, dla której $b = 0,441$, w granicach 0,72–1,00%. Są to wartości mniejsze od błędów pomiaru podczas sondowania, więc stosując $b = 0,435$, możemy ustalić związki pomiędzy wartościami N_k czterech rodzajów sond, wynikające z zaleceń normowych. Celem tej operacji jest możliwość ustalenia jak, według normy PN-B-04452:2002, mają się różnić liczbowe wyniki sond DPL, DPM, DPH i DPSH. Sprowadza się to do wyznaczenia współczynnika przeliczeniowego α pomiędzy wartością N_k przyjętą za bazową sondy DPH ($\alpha = 1$), a wartościami N_k pozostałych typów sond dynamicznych, dla danego (dowolnego) stopnia zagęszczenia.

Przy podanych założeniach, np. dla badań sondami DPL i DPH, możemy zapisać równość:

$$0,435 \times g N_H + a_H = 0,435 \times g N_L + a_L \quad [5]$$

Wyrazy wolne równań obu prostych oczywiście są różne i wynoszą $a_H = 0,271$ i $a_L = 0,071$. Odpowiednio różne będą więc wartości logarytmów liczby uderzeń N . Chcąc zastąpić wartość N_L wartością N_H , musielibyśmy wprowadzić dodatkowy współczynnik, który nazwiemy α_L . Przekształcamy równanie [5]:

$$0,435 \times g N_H + 0,271 = 0,435 \times g (\alpha_L \times N_H) + 0,071 \quad [6]$$

i dalej:

$$0,435 \times g N_H + 0,271 = 0,435 \times g \square_L + 0,435 \times g N_H + 0,071 \quad [7]$$

oraz, po skróceniu:

$$0,271 - 0,071 = 0,435 \times g \square_L \quad [8]$$

Wyliczamy współczynnik α_L , który wyniesie $\alpha_L = 2,88$.

W analogiczny sposób wyliczamy współczynniki α_M i α_S (dla sond DPM i DPSH). Wynoszą one: $\alpha_M = 1,65$, a $\alpha_S = 1,49$.

Wspomniane we wstępie poletko doświadczalne, mające na celu porównanie wyników sondowań dynamicznych, zorganizowano w 2013 r. w Świnoujściu przy okazji rutynowych badań na potrzeby przebudowy Nabrzeża Piastowskiego. Był to jeden punkt badawczy, w którym

w narożach kwadratu o boku 1,5 m sondowano „do oporu” normowymi sondami DPL, DPM, natomiast do planowanej głębokości 16 m sondami DPH i DPSH. Podczas sondowania zachowywano wymogi norm PN-B-04452:2002 i PN-EN-ISO 22476-2 odnośnie wbijania w sposób ciągły i wykonywania 1,5 obrotu kolumną żerdzi, po zagłębieniu sondy o 1 m (podczas dokręcania kolejnej żerdzi). Po wykonaniu sondowań, w centrum poletka wykonano wiercenie, na podstawie którego ustalono następujący profil litologiczny:

- 0,0–2,8 m nasyp z narefulowanych piasków drobnych,
- 2,8–4,0 m nasyp: namuł przewarstwiony piaskiem,
- 4,0–4,6 m nasyp: piasek drobny przewarstwiony namulem,
- 4,0–9,6 m piasek drobny akumulacji deltowo-morskiej z domieszką humusu,
- 9,6–12,2 m piasek jw. lecz z domieszką muszli,
- 12,2–13,0 m piasek drobny akumulacji jeziornej przewarstwiony mułkiem (gliną pylastą),
- 13,0–14,2 m piasek drobny akumulacji jeziornej,
- 14,2–15,6 m mułek jeziorny (gлина pylasta zwięzła) przewarstwiony piaskiem drobnym,
- 15,6–16,0 m piasek średni akumulacji rzecznej.

Siedem analiz sitowych wykonanych w piaskach nasypanych i rodzimych wykazało, że grunty te charakteryzowały się wskaźnikiem uziarnienia $U = d_{60}/d_{10} = 1,82–4,45$. Jako typowe wartości można przyjąć $U = 2,2–2,9$.

Wyniki badań poddaje się obecnie różnym analizom, np. na rycinie 4 wyniki liczbowe sondowań zinterpretowano według zaleceń normy PN-B-04452:2002.

Na rysunku widać między innymi, że:

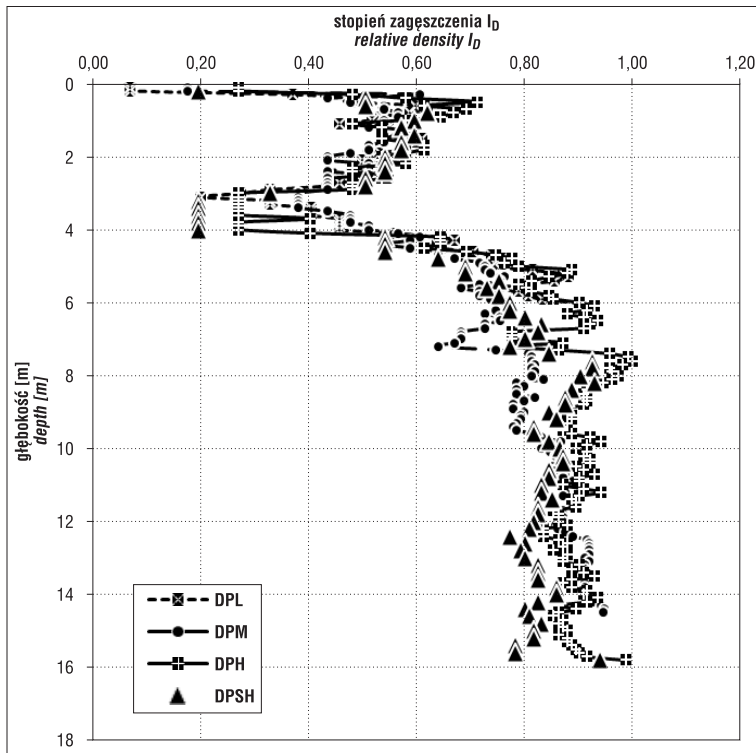
- zagęszczenie badanych gruntów jest zróżnicowane, a podobna zmienność wyników różnych sondowań wskazuje na poziomy układ warstw; oznacza to, że miejsce na poletko wybrano właściwie, przy czym w przelocie 2,8–4,0 m p.p.t., gdzie wartości I_D wydają się najniższe, sondowano nie w piaskach, lecz w namulach przewarstwionych piaskami (gdzie wpływ tarcia wydaje się pomijalny), zaś w przelocie 14,2–16,0 m p.p.t. w mułkach (tam możliwy wpływ tarcia gruntu o żerdzie na liczbę uderzeń w warstwie piasku leżącej poniżej); przeloty te wyłączono z dalszej interpretacji;

- lżejsze sondy „stawały” płycej (DPL – 6 m p.p.t., DPM – 14,5 m p.p.t.), natomiast sondami DPH i DPSH osiągnięto głębokość 16 m,

- do głębokości około 10 m obserwuje się, że według interpretacji normowej sondy DPM uzyskujemy relatywnie najniższe wartości I_D , najwyższe z sondy DPH, zaś pośrednie według DPSH, co z jednej strony oznacza, że zmienność wyników tych sondowań jest wzajemnie proporcjonalna, z drugiej zaś, że interpretacje według wzoru [1], proponowane przez normę PN-B-04452:2002, nie sprawdziły się dla badanych warunków, co nie musi dziwić, gdyż norma zastrzega stosowalność korelacji do piasków o $U > 3$;

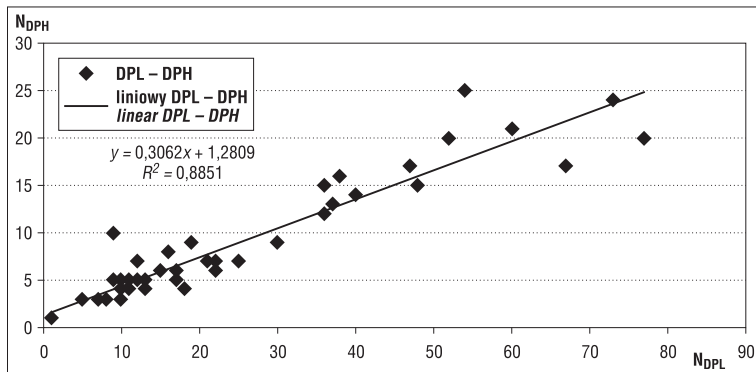
- głębiej opisany wyżej trend się zmienia: rośnie I_D według DPM i było relatywnie najwyższe, gdy zakończono to sondowanie.

Dalsza analiza wyników polegała na zestawianiu ze sobą liczbowych wyników różnych sondowań (przykład na ryc. 5). Z tego powodu nie korygowano wyników sondowań



Ryc. 4. Stopień zagęszczenia gruntów niespoistych badany różnymi sondami dynamicznymi, interpretowany wg PN-B-04452:2002

Fig. 4. Relative density of non-cohesive soils investigated by different dynamic penetrometers, interpreted acc. to PN-B-04452:2002



Ryc. 5. Zestawienie wyników liczbowych sond DPL i DPH uzyskanych na poletku doświadczalnym w Świnoujściu

Fig. 5. A summary of DPL and DPH numerical results obtained at experimental plot in Świnoujście

w przypowierzchniowej partii podłoża (głębokość krytyczna). Uwzględniając powyższe spostrzeżenia, z zestawień usunięto wyniki sondy DPM z głębokości większej niż 10 m oraz wszystkie wyniki uzyskane nie w piaskach, ale w gruntach organicznych i spoistych.

Współczynniki determinacji świadczą o dobrym dopasowaniu, gdy porównujemy wyniki „sąsiednich” typów sondowań, a o zadawalającym, gdy porównujemy sondy DPL lub DPM z DPSH. Zestawienie DPL i DPH dało dobre dopasowanie, ale powodem tego stanu rzeczy może być fakt, że większość par wyników dotyczyło gruntów słabiej zagęszczonych (ryc. 5).

Wyraży wolne uzyskanych równań prostych są nieznacznie różne od zera. Z fizyki zjawiska wynika jednak, że wykres powinien przecinać punkt 0;0 (przy zerowej licz-

bie uderów skutek będzie identyczny, niezależnie od rodzaju sondy: wpęd wyniesie 0 cm). Przekształcając w ten sposób uzyskane zależności, otrzymamy następujące wartości dyskutowanego wyżej współczynnika proporcjonalności α : $\alpha_L = 2,95$; $\alpha_M = 0,95$ i $\alpha_S = 1,04$. Wartość α_L okazuje się zbliżona do uzyskanej z przeliczeń z normy PN-B-04452:2002, natomiast pozostałe są wyraźnie niższe i wręcz zaskakująco bliskie jedności.

WNIOSKI

Na obecnym etapie programu badawczego „grunty niespoiste” prowadzonego przez autorkę niniejszego artykułu pod nadzorem współautora, a finansowanego przez „Geoprojekt Szczecin” można formułować następujące, wstępne wnioski:

1. Wyniki lżejszych sond dynamicznych (DPL, DPM) na pewnej głębokości (około 10 m dla sondy DPM, około 6 m dla DPL) przestają być proporcjonalne do wyników ciężkich sond (liczba uderów na 10 cm wpędu tych sond rośnie), czego przyczyną są najprawdopodobniej zbyt duże straty energii uderu wzdłuż długiej kolumny żerdzi. Jeśli tak, to sondy DPL i DPM nie powinny być używane na większych głębokościach (choć zapisy normy PN-B-04452:2002 są bardziej liberalne, odpowiednio 8 i 20 m);

2. Należy kontynuować badania porównawcze wyników różnych sondowań w różnych gruntach niespoistych (opisane badania dotyczyły piasków drobnych o niskim wskaźniku uziarnienia; $U < 3$) dla zoptymalizowania sposobów ich interpretacji tak, żeby zapewnić ich pełniejszą kompatybilność;

3. Należy sprawdzić hipotezę, że stosunkowo słabsze (zaledwie zadawalające) dopasowanie wyników liczbowych sondowań DPL i DPM z DPSH oznacza, że są one do siebie wprost proporcjonalne tylko w pewnym, w szczególności środkowym przedziale badanego związku, czyli w gruntach średnio zagęszczonych. W gruntach luźnych można oczekiwać nieproporcjonalnie niskich liczbowych wyników sondowań DPSH, w gruntach zagęszczonych niejako zbyt wysokich liczbowych wyników sondowań DPM i (zwłaszcza) DPL;

4. Obserwowana obecnie szeroka paleta możliwych interpretacji sodoowań statycznych i dynamicznych w gruntach niespoistych jako zależności pomiędzy wynikami sondowań a stopniem zagęszczenia (ryc. 3) oznacza, że żadnej sondy nie można traktować jako „wzorca” dającego „prawdziwe” wartości I_D . W takiej sytuacji celowe może być poszukiwanie korelacji wyników sondowań z wynikami badań wyznaczających bezpośrednio nośność gruntów niespoistych, takimi jak badania presjometyczne czy dylatometyczne (Tarnawski, 2010), uwzględniając jednocześnie postępy w poznaniu czynników wpływających na wytrzymałość gruntów niespoistych, jakie uzyskano dzięki badaniom w komorach kalibracyjnych i wirówkach geotechnicznych;

5. Niektóre interpretacje sondowań CPT (Eurokod 7) lub DPH (PN-B-04452:2002) stosunkowo łatwo osiągają wartość $I_D = 1$. Należy przypomnieć, że choć w praktyce stopień zagęszczenia ustala się na podstawie wyników badań polowych (sondowań), to definicja tego parametru pochodzi z procedury laboratoryjnej, według której stopień zagęszczenia wylicza się z wartości wskaźników porowatości gruntu: maksymalnego e_{max} , minimalnego e_{min} oraz naturalnego e_n oznaczonych w laboratorium. Można sobie wyobrazić warunki pozwalające uzyskać e_{min} niższe niż w laboratorium i spodziewać się wartości I_D wyższych od jedności, jak ma to już miejsce w przypadku wskaźnika zagęszczenia I_S . Problem ten będzie badany w ramach programu „grunty niespoiste”.

LITERATURA

- AHMADI M.M. & KARAMBASH P. 2010 – K_0 determination of sand using CPT calibration chamber. Vol. 2: 2–14. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'10), Huntington Beach, CA, USA.
- AHMADI M.M. & ROBERTSON P.K. 2008 – A Numerical Study of Chamber Size and Boundary Effects on CPT Tip Resistance in NC Sand. *Scientia Iranica*, 15 (5): 541–553.
- BAŁACHOWSKI L. 2006a – Komory kalibracyjne – przegląd rozwiązań konstrukcyjnych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 6: 345–350.
- BAŁACHOWSKI L. 2006b – Penetration Resistance of Lubiatowo Sand in Calibration Chamber Tests. *Arch. Hydro-Engineer. Environment. Mechanics*, 53 (4): 311–329.
- BAŁACHOWSKI L. 2008 – Physical modeling in sands in a wide range of stress level: Application to the calibration of CPTU and DMT tests. *Wyd. Politechniki Gdańskiej*.
- BAŁACHOWSKI L. & KUREK N. 2008 – Influence of boundary conditions in calibration chamber. *Archives of Civil Engineering*, 54 (4): 653–668.
- BOLTON M.D. & GUI M.W. 1993 – The study of relative density and boundary effects for cone penetration tests in centrifuge. EEC Science Contract SCI-CT91-0626 entitled “Improvement of model testing in the geotechnical field”.
- BOROWCZYK M. & FRANKOWSKI Z. 1981 – Dynamic and static sounding interpretation. *Proc. 10th ISCMFE vol. 2*, Stockholm.
- BOROWCZYK M. & FRANKOWSKI Z. 1985 – Problemy interpretacji wyników sondowań dynamicznych w gruntach niespoistych. *Inżynieria i Budownictwo*, 7–8.
- BUTLANSKA J., ARROYO M. & GENS A. 2010 – Virtual Calibration Chamber CPT on Ticino sand. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA.
- DUDYCZ D. 1981 – Udoskonalenie metody badań i interpretacji wyników sondowań udarowych i statycznych. Specjalistyczny ośrodek koordynacji technicznych badań podłoża gruntowego „Geoprojekt”. Warszawa.
- FRANKOWSKI Z. 2003 – Interpretacja wyników sondowań dynamicznych i badań presjometrycznych. Nowoczesne metody badań gruntów. Sympozjum ITB, Warszawa.
- GIŻYŃSKI T. 1998 – Metodyka cechowania sondy dynamicznej ciężkiej. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 19, 4: 186–193.
- GIŻYŃSKI T. & ZADROGA B. 2001 – Zastosowanie sondowań dynamicznych do oceny nośności niespoistego podłoża gruntowego obciążonego fundamentem bezpośrednim lub na palach. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 22 (2): 76–82.
- HOLDEN J.C. 1991 – History of the first six CRB calibration chambers, *Proceedings of the 1st International Conference on Calibration Chamber Testing*, Clarkson Univ. Potsdam, USA.
- HOULSBY G.T. & HITCHMAN R. 1988 – Calibration chamber tests of cone penetrometer in sand, *Géotechnique*, 38 (1): 39–44.
- HSU H-H. & HUANG A-B. 1999 – Calibration of Cone Penetration Test in Sand. *Proc. Natl. Sci. Council. ROC(A)*, 23 (5): 579–590.
- JAMIOLKOWSKI M., GHIONNA V.N., LANCELOTTA R. & PASQUALINI E. 1988 – New correlations of penetration tests for design practice. *Proceedings of the First International Symposium on Penetration Testing (ISOPT-1)*. Orlando, FL, USA.
- KULHAVY F.H. & MAYNE P.W. 1990 – Manual on estimating soil properties for foundation design. *Cornell University Ithaca, New York*.
- LUNNE T., ROBERTSON P.K. & POWELL J.J.M. 2001 – Cone penetration testing in geotechnical practise. *Spon Press*.
- MILANCEJ P. 1997 – Charakterystyka sond dynamicznych i metod interpretacji sondowań stosowanych w Polsce. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 18 (6): 364.
- PARKIN A.K. & LUNNE T. 1982 – Boundary effects in the laboratory calibration of a cone penetrometer for sand, *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing Vol. 2*, Amsterdam.
- PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli.
- PN-86/B-02480 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-B-04452:2002 Geotechnika. Badania polowe.
- PN-EN-ISO 22476-2 Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania polowe – Część 2: Sondowanie dynamiczne
- PN-EN 1997-2 Eurokod 7 Projektowanie geotechniczne; Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- ROBERTSON P.K. & CAMPANELLA R.G. 1983 – Interpretation of cone penetration tests. Part I (Sand). *Canadian Geotech. J.*, 20 (4): 718–733.
- SCHNAID F. & HOULSBY G.T. 1990 – Calibration chamber test of the cone-pressuremeter in sand. *Proceedings of The Third International Symposium on Pressuremeters*, British Geotechnical Society, Oxford.
- STENZEL G. & MELZER K.J. 1978 – Soil investigation by penetration testing according to DIN 4094. *Tiefbau*, 20: 155–160; 240–244.
- TARNAWSKI M. 1983 – Interpretacja wyników sondowań w gruntach niespoistych. *Inżynieria Morska*, 4 (1): 202–204.
- TARNAWSKI M. 2010 – O potrzebie weryfikacji interpretacji wyników sondowań dynamicznych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 31, 3: 441–443.
- TARNAWSKI M. & URA M. 2011 – Wyniki sondowań i badań presjometrycznych w bardzo zagęszczonych piaskach. *Materiały na XIX Seminarium Naukowe Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska*. Szczecin: 95–101.
- TEFERRA A. 1976 – Bestimmung der Lagerungsdichte aus Sondierungen. *Bauingenieur*, 9: 329–331.
- URA M. & TARNAWSKI M. 2012 – Porównanie wyników sondowań statycznych CPT i dynamicznych DPSH w gruntach niespoistych; *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 33 (1): 38–42.