

Porównanie oporów stożka sondy statycznej CPTU i sondy dynamicznej DPH

Dr inż. Irena Bagińska

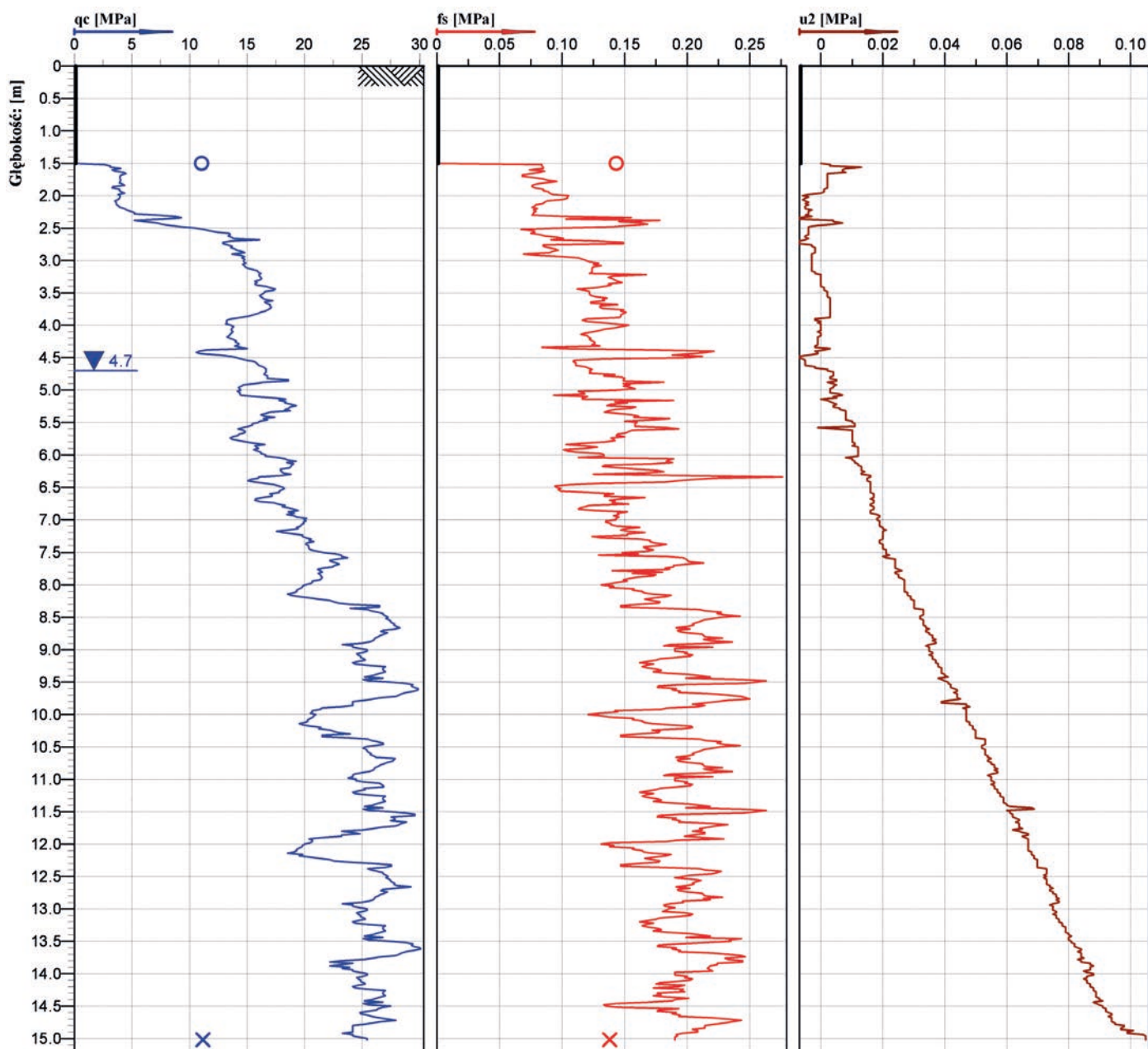
Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Sondowania statyczne CPTU oraz dynamiczne DPH mają mocno ugruntowaną tradycję stosowania w Polsce. Często są wykonywane równoległe z wierceniami, lecz rzadko zamiennie. Warto rozpatrzyć możliwość stosowania tych badań zamiennie szczególnie przy gruntach gruboziarnistych, w których sondowania statyczne są znacznie utrudnione poprzez duże opory penetracji.

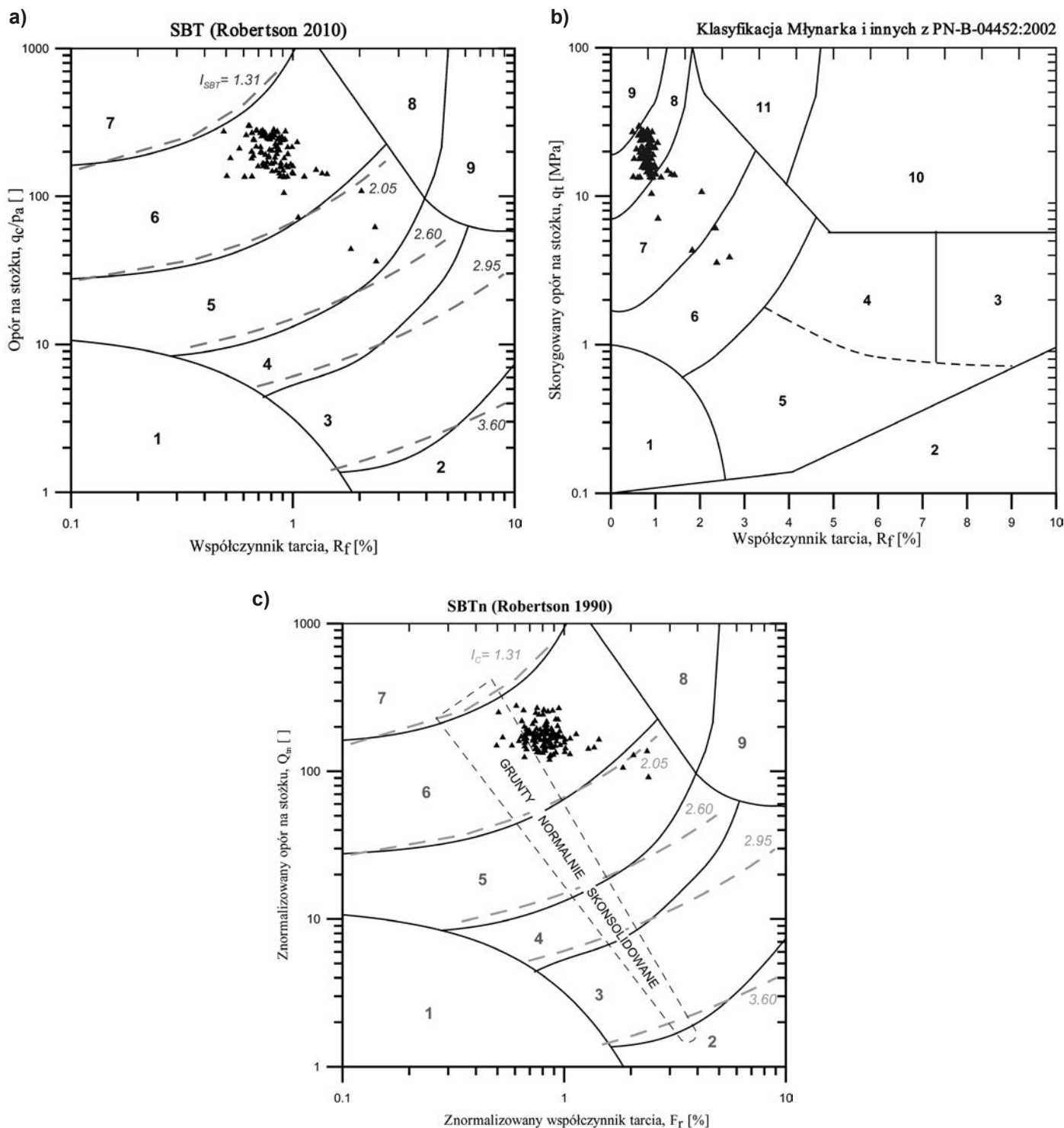
W Eurokodzie 7 część 2 w Załączniku G.4. dopuszcza się szacowanie oporu zagłębienia stożka q_c w piaskach i pospółkach na podstawie sondowań dynamicznych DPH. W tym celu w normie przytacza się nomogram zależności q_c sondowań CPT z po-

miarami $N10_H$ z badań DPH zaczerpnięty z literatury niemieckiej [13] oraz normy DIN 4094-3. Ustalony na tej podstawie przebieg zmienności q_c z głębokością może stać się podstawą do wyznaczenia nośności granicznej pali na podstawie korelacji określonych na podstawie wyników badań statycznych nośności pali [9].

Powstaje potrzeba weryfikacji nomogramu z Eurokodu 7 do lokalnych warunków gruntowych występujących na obszarze Polski [1, 14]. W tym celu na niewielkim obszarze przeprowadzono w okolicy Polkowic sondowanie statyczne CPTU (rys. 1), cztery sondowania dynamiczne DPH (rys. 3) oraz wiercenia w osi badań DPH celem weryfikacji rodzaju gruntu oraz



Rys. 1. Pomiar q_c , f_s i u_2 z badania CPTU



Rys. 2. Rozpoznanie rodzaju gruntu:

a) według klasyfikacji Robertsona 2010 [12], b) według klasyfikacji Młynarka i innych [6,8], c) według klasyfikacji Robertsona 1990 [5]

poboru prób gruntowych do analizy granulometrycznej. Rozstaw punktów badawczych był większy niż minimalne dopuszczalne odległości ustalone w normach branżowych wynikające z wzajemnych niekorzystnych oddziaływań badań [8, 9, 11]. Do analizy wybrano sondowania DPH, których maksymalna odległość względem CPTU wynosiła około 10 m. Sondowania statyczne i dynamiczne wykonano sondą typu GEOTECH 220. Badania CPTU wykonano piezostóżkiem elektrycznym zgodnie z [10], natomiast sondowania dynamiczne DPH sondą ciężką 50 kg zgodnie z [11]. Otrzymane wyniki poddano analizie i za-

prezentowano w pracy w postaci wykresów nawiązujących do Eurokodu 7 i innych prac poruszających podobną tematykę nie tylko z obszaru Polski [1, 3, 13, 14].

CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ ORAZ GRUNTU PODDANEGO ROZPOZNANIU

Pod względem morfologicznym teren badań stanowi fragment Nizin Środkowopolskich. Dokładniej, leży w południo-

wo-zachodnim skraju Wzgórz Dalkowskich stanowiących Wzgórza Polkowskie. Najpłycej występujące utwory są reprezentowane przez osady piaszczysto-żwirowe, gliny i pyły zaliczane do utworów zlodowacenia południowo-, środkowo-polskiego i północno-polskiego.

W sąsiedztwie prowadzonych badań znajdował się bardzo duży obiekt posadowiony bezpośrednio na głębokości 3,5 m p.p.t. Posadowienie wykonywano w wykopie szeroko-przestrzennym, a po pracach fundamentowych wykop zasypano gruntem rodzimym, co potwierdziły wiercenia i badania granulometryczne. Również sondowania statyczne i dynamiczne potwierdziły taką specyfikę budowy geologicznej.

Do analizy granulometrycznej pobrano 3 próby powyżej 3,5 m p.p.t. (poziomu posadowienia) i 7 poniżej. Badanie przeprowadzono metodą sitową zgodnie z normą [7]. Próby wykazywały występowanie w podłożu przewagę pospółek (grSa), a na mniejszych głębokościach piasków średnich (MSa). Średnia wartość wskaźnika różnoziarnistości C_u gruntu zasypowego wynosiła 3,29, natomiast rodzimego 3,27. Wskaźnik krzywizny uziarnienia C_c wynosił odpowiednio 1,11 i 1,15. Na podstawie uzyskanych wartości grunt sklasyfikowano jako jednofrakcyjny, czyli słabo uziarniony (SP według [11]). Na 4,7 m p.p.t. ustalono występowanie swobodnego zwierciadła wody gruntowej, co uwzględniono w interpretacji zarówno badań CPTU, jak i DPH.

Ocenę rodzaju gruntu na podstawie sondowania CPTU rozpatrywano, korzystając z dwóch klasyfikacji. Klasyfikacja Robertsona 2010 [12] oraz Robertsona 1990 [5] wskazuje na zdecydowaną przewagę w profilu SBT6 i SBTn6 (*Sands: clean*

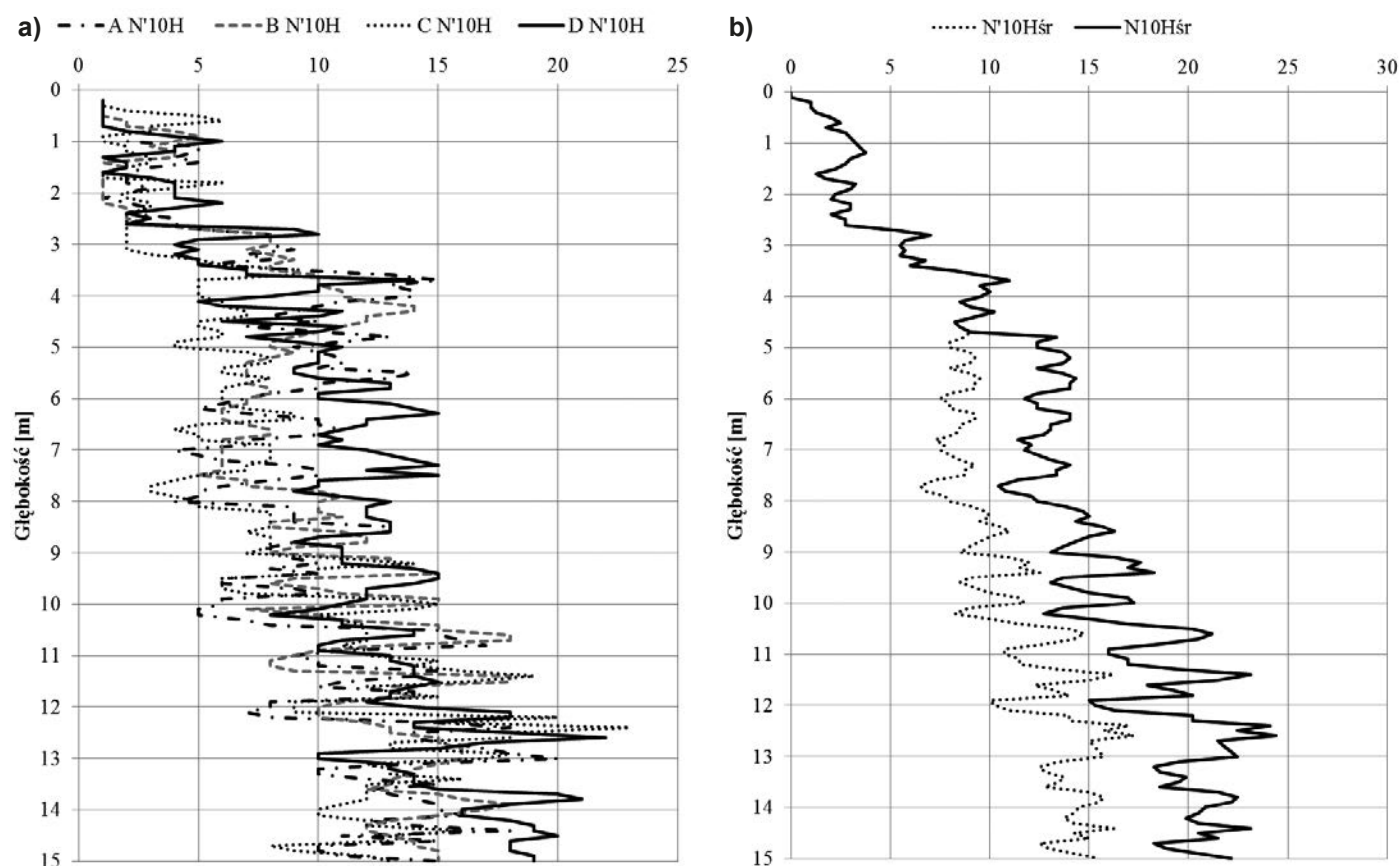
sands to silty sands), czyli piasków Sa do piasków pylastych siSa. Bliższe rozpoznanie wierceniom otrzymano z klasyfikacji Młynarka i innych [6, 8]. Tu ocena rodzaju gruntu wykazała zaleganie pospółek (grSa) do piasków drobnych (FSa). Rozpoznanie przedstawiono na nomogramach klasyfikacyjnych (rys. 2). Każdy punkt zaznaczony na obu nomogramach jest obrazem bieżących uśrednionych wielkości interpretacyjnych co każde 10 cm ciągłego pomiaru CPTU od 1,5 m do 15,0 m p.p.t. Większość punktów pomiarowych tworzy zwartą grupę świadczącą o dużej jednorodności ośrodka gruntowego poddanego badaniom. Na podstawie rys. 2c można określić, że grunty są na granicy gruntów normalnie skonsolidowanych i prekonsolidowanych. Fakt ten należy uwzględnić szczególnie przy wyznaczaniu cech mechanicznych oraz ocenie stratygrafii podłoża [4].

Pomiary z czterech sondowań DPH (rys. 3a) uśredniono i otrzymano przebieg N'_{10Hsr} z głębokością bez uwzględnienia zwiększonej liczby uderzeń poniżej zwierciadła wody gruntowej. Na rys. 3b przedstawiono N'_{10Hsr} przed uwzględnieniem oraz po uwzględnieniu wpływu wody gruntowej na każde 10 cm wpędu jako N_{10Hsr} . Wpływ wody na pomiar uwzględniono zgodnie z zaleceniami PN-EN [11], czyli zgodnie z zależnością (1).

$$N_{10H} = a_1 N'_{10H} + a_2 \quad (1)$$

Wartości a_1 i a_2 przyjęto odpowiednio równe 1,3 oraz 2,0 jak dla słabo uziarnionych piasków (SP) o $C_u \leq 3$.

Do oceny stanu zagęszczenia gruntu wykorzystano zarówno sondowania dynamiczne DPH, jak i sondowania statyczne CPTU. Zastosowano korelacje interpretacyjne zgodne z Eurokodem 7



Rys. 3. Przebieg rejestracji N'_{10H} z czterech pomiarów DPH (a); średnia wartość pomiaru bez uwzględnienia wpływu wody gruntowej N'_{10Hsr} oraz z jego uwzględnieniem N_{10Hsr} (b)

[9] do badania DPH, gdzie $I_D = 0,380 \cdot \log N_{10DPH} + 0,23$. Natomiast do CPTU zgodne z [5], gdzie $I_D \cong -98 + 66 \cdot \log \left(\frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_{vo}}} \right)$.

Zagadnienie to szczegółowo przedstawiono w pracy [1]. Do głębokości 5,0 m p.p.t. stan zagęszczenia wzrasta z głębokością od średnio zagęszczonego do zagęszczonego. Poniżej 5,0 m p.p.t. stopień zagęszczenia stabilizuje się w przedziale od 0,65 do 0,85, klasyfikując grunt do stanu zagęszczonego.

DYNAMICZNE OPORY SONDOWANIA DPH

Już w normie PN-B-04452:2002 [8] pojawia się termin jednostkowego dynamicznego oporu sondowania, czyli granicznej wytrzymałości gruntu pod stożkiem q_d . Większe znaczenie tak określanemu oporowi nadaje się w normie PN-EN ISO 224676-2 [11]. Przedstawiono w funkcji głębokości przebieg zmienności q_d nie tylko gruntów gruboziarnistych, ale również drobnoziarnistych prekonsolidowanych. Do ustalenia dynamicznego oporu sondowania służy tzw. wzór holenderski (2) [11]:

$$q_d = \left(\frac{m}{m + m'} \right) \cdot r_d \quad (2)$$

gdzie:

m – masa młota (dla DPH 50 kg);

m' – masa całkowita kowadła, prowadnicy młota oraz wzrastającej z głębokością kolumny żerdzi,

r_d – jednostkowy dynamiczny opór stożka.

Jednostkowy dynamiczny opór stożka ustalono na podstawie energii uderzenia młota E_{theor} w odniesieniu do powierzchni przekroju stożka A oraz głębokości wpędu przypadającego na jedno uderzenie ($e = 0,1/N_{10H}$):

$$r_d = \frac{E_{theor}}{A \cdot e} = \frac{m \cdot g \cdot h}{A \cdot e} \quad (3)$$

gdzie:

g – przyspieszenie ziemskie,

h – wysokość swobodnego opadania młota.

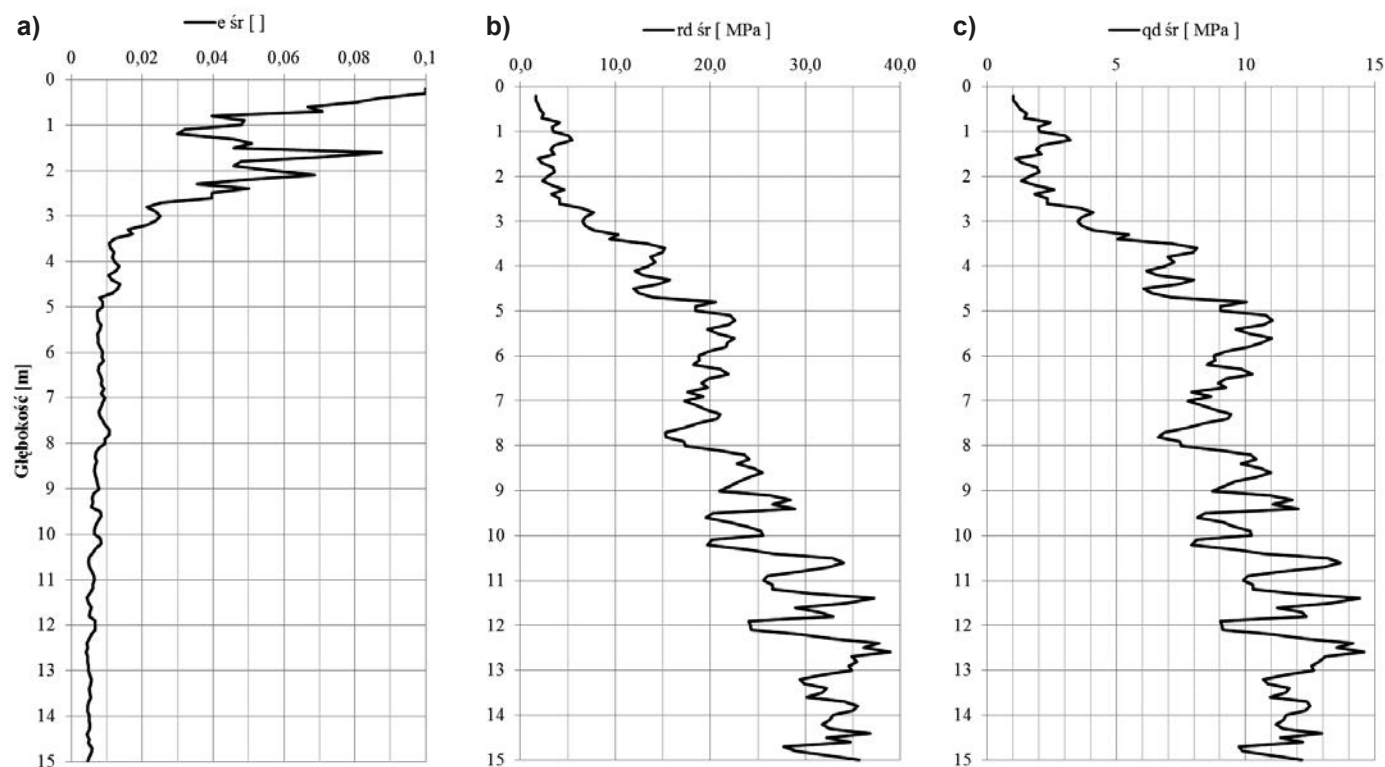
Głębokość wpędu przypadająca na pojedyncze uderzenie e_{sr} , jednostkowy dynamiczny opór stożka r_{dsr} oraz dynamiczny opór stożka q_{dsr} przedstawiono przy średniej wartości N_{10Hsr} ustalonej z czterech pomiarów DPH (rys. 4).

ANALIZA PORÓWNAWCZA OPORÓW SONDOWANIA DPH I CPTU

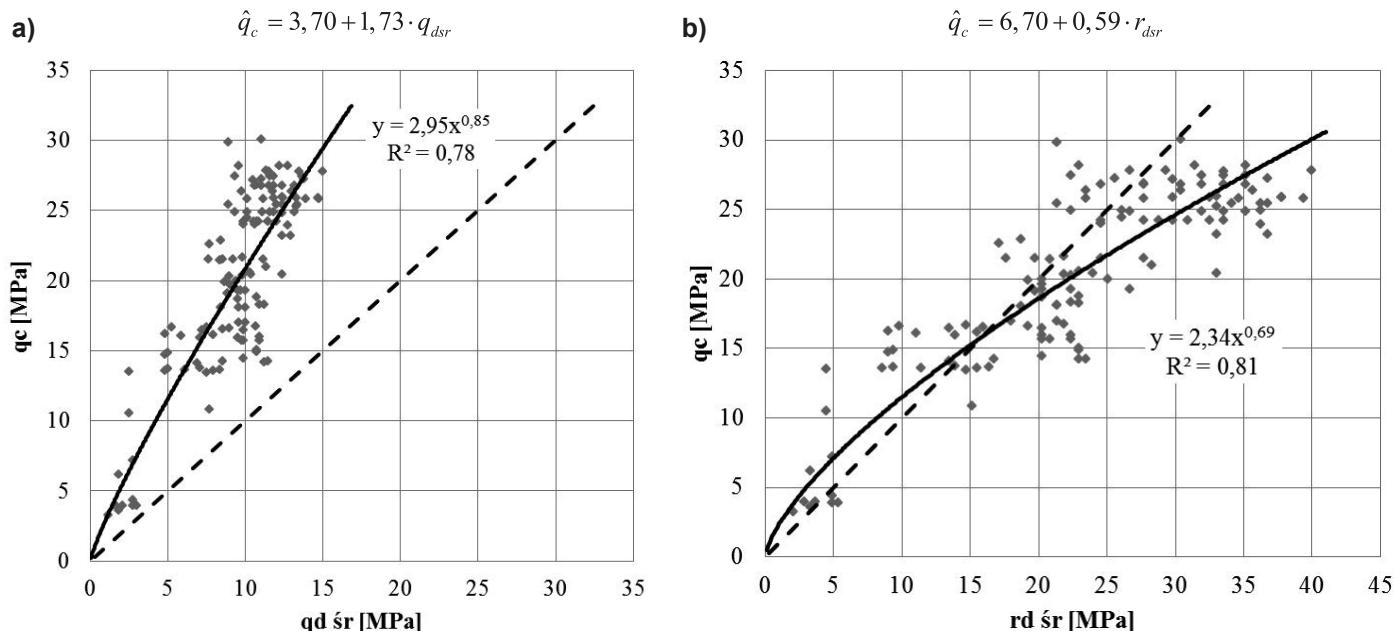
W pracy skupiono się na określeniu q_d oraz r_d gruntów gruboziarnistych celem odniesienia do pomiarów statycznych q_c z badania CPTU.

Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 5. Najlepszą korelację pomiędzy q_c a q_d oraz q_c a r_d opisuje się funkcjami podanymi na wykresach wraz z współczynnikiem determinacji na poziomie około 0,8, dającym zadowalające dopasowanie funkcji wykładniczej do punktów pomiarowych.

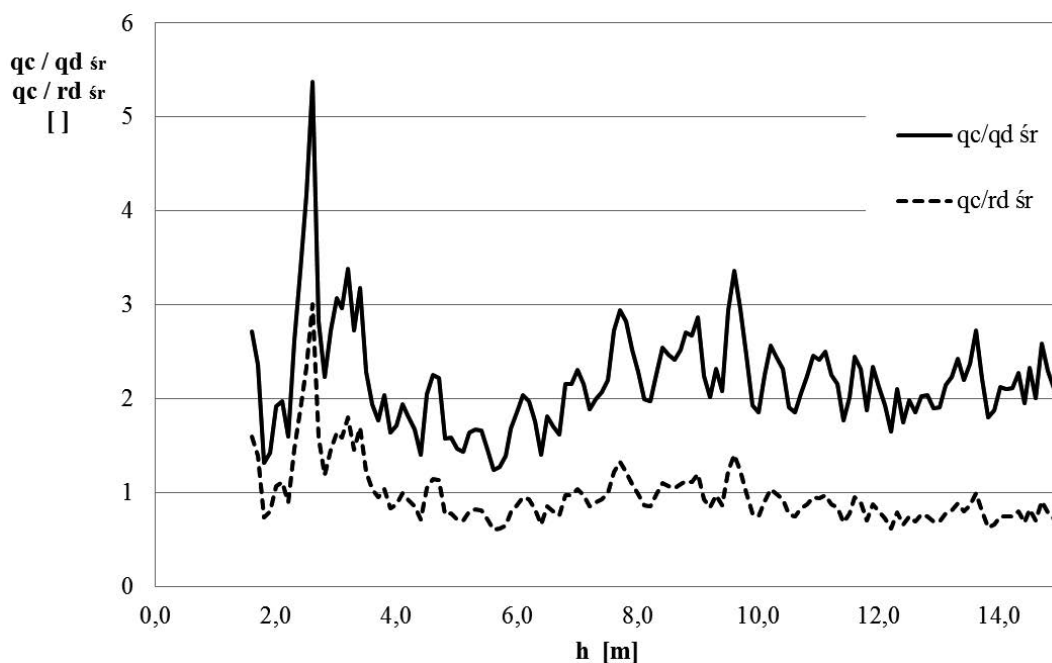
Współczynnik korelacji liniowej Pearsona pomiędzy q_c i q_d wyniósł 0,82, natomiast pomiędzy q_c i r_d 0,86. Świadczy to o dużym skorelowaniu porównywanych wielkości i możliwości wnioskowania, że jeśli rośnie q_d i r_d , będzie również rosło q_c . Dodatkowo wartości q_d i r_d z badania DPH mogą posłużyć szacowaniu wartości q_c z sondowania CPTU, nie tylko za pomocą funkcji wykładniczej, ale również funkcji regresji liniowych:



Rys. 4. Głębokość wpędu przypadająca na pojedyncze uderzenie e_{sr} (a); jednostkowy dynamiczny opór stożka r_{dsr} (b); dynamiczny opór stożka q_{dsr} (c)



Rys. 5. Wyniki badań zależności pomiędzy oporem statycznym q_c a dynamicznym q_d (a) oraz oporem statycznym q_c a jednostkowym oporem dynamicznym r_d (b)



Rys. 6. Zależność ilorazów q_c/q_{dsr} oraz q_c/r_{dsr} w funkcji głębokości

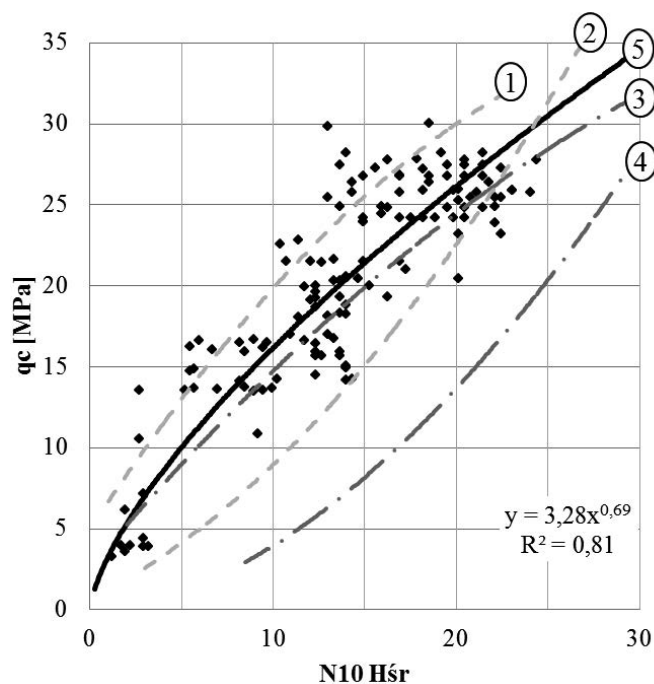
Porównanie oporów stożków statycznych oraz dynamicznych można również przedstawić za pomocą ilorazów q_c/q_{dsr} oraz q_c/r_{dsr} w zależności od głębokości pomiaru (rys. 6). W tym przypadku jest widoczne, że poniżej głębokości posadowienia (3,5 m p.p.t.), gdzie grunt jest znacznie bardziej jednorodny, wartości ilorazów charakteryzują się mniejszą zmiennością niż powyżej. Średnia wartość q_c/q_{dsr} poniżej 3,5 m p.p.t., stabilizuje się na poziomie 2,10 przy odchyleniu standardowym 0,39, natomiast q_c/r_{dsr} wynosi 0,88 przy odchyleniu standardowym równym 0,16.

Prezentowane wyniki wpisują się pomiędzy wyniki z innych prac, gdzie q_c/q_d uzyskano dla gruntów gruboziarnistych na poziomie 2,3 [3] oraz 1,85 [1].

PODSUMOWANIE

W Eurokodzie 7 dopuszcza się możliwość szacowania q_c na podstawie pomiarów DPH. W normie jest zawarty nomogram pomocny w szacowaniu q_c na podstawie N_{10H} prezentowany na rys. 7.

Na rys. 7 krzywe 1, 2, 3, 4, przedstawiają propozycje zaczerpnięte z Eurokodu 7 dla gruntów nawodnionych i nienawodnionych dobrze uziarnionych i źle uziarnionych piasków oraz piasków i żwirów. Autorskie wyniki pokazują punkty pomiarowe z uśrednionych wartości q_c co 10 cm (CPTU) oraz odpowiadające im na tej samej głębokości średnie wartości pomiarowe N_{10Hsr} z czterech pomiarów (DPH). Czarna ciągła



Rys. 7. Korelacja pomiędzy oporem sondowania stożka q_c a liczbą uderzeń N_{10Hsr} na podstawie Eurokodu 7 [9]

krzywa 5 jest obrazem funkcji wykładniczej najlepiej opisującej korelację pomiędzy rozpatrywanymi wielkościami q_c i N_{10Hsr} . Na wykresie zamieszczono również równanie funkcji wykładniczej krzywej 5 wraz z współczynnikiem determinacji R^2 . Charakter krzywej otrzymanej z wyników autorskich jest zbliżony do krzywych 1 i 3, którymi opisuje się grunty źle uziarnione w postaci piasków poniżej i powyżej zwierciadła wody gruntowej [9].

Chcąc uchwycić siłę korelacji pomiędzy q_c i N_{10Hsr} , określono również współczynnik korelacji liniowej Pearsona, który w tym przypadku wyniósł 0,86. Funkcja regresji liniowej użyta postać $\hat{q}_c = 6,70 + 0,96 \cdot N_{10Hsr}$.

Podsumowując, otrzymane wyniki pomiarów i analizy posłużyły do wyznaczenia empirycznej, lokalnej zależności korelacyjnej pomiędzy wielkościami oporów sondowań z różnych metod badawczych (CPTU, DPH). Mogą one, z zachowaniem wszelkich zasad ostrożności, służyć do szacowania oporów stożka q_c w źle uziarnionych gruntach gruboziarnistych (SBT6, SBTn6, pospółki (*grSa*) / piaski średnie (*MSa*)) poniżej zwierciadła wody gruntowej na podstawie sondowań dynamicznych DPH. Otrzymane wyniki wpisują się w zawarty w Eurokodzie 7 nomogram (rys. 7), który proponuje się do szacowania „oporu zagłębienia stożka (q_c) w piaskach i pospółkach na podstawie wyników badania sondą dynamiczną DPH, w celu wyprowadzenia nośności granicznej pali na podstawie odpowiednich korelacji ustalonych w oparciu o wyniki badań statycznego obciążenia pala” [9].

LITERATURA

1. Bagińska I.: Ocena stopnia zagęszczenia gruntu sondą dynamiczną DPH i sondą statyczną CPTU, Przegląd Komunikacyjny, nr 3/2015.
2. Czado, B., Pietras, J.S.: Rozpoznanie geotechniczne podłoża przez sondowania statyczne i dynamiczne – porównanie oporów penetracji stożka. Czasopismo Techniczne. Budownictwo, Zeszyt 20, Rok 109, s. 21-33, 2012.

1. Źle uziarniony piasek poniżej zwierciadła wody gruntowej [9];
2. Dobrze uziarniony piasek i żwir poniżej zwierciadła wody gruntowej [9];
3. Źle uziarniony piasek powyżej zwierciadła wody gruntowej [9];
4. Dobrze uziarniony piasek i żwir powyżej zwierciadła wody gruntowej [9];
5. Poddany badaniom źle uziarnione pospółki (*grSa*) / piaski średnie (*MSa*) poniżej zwierciadła wody gruntowej

3. Gadeikis S., Žaržojus G., Urbaitis D.: Comparing CPT and DPSH in Lithuanian soils, 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA. Volume 2&3: Technical Papers, Session 3: Applications, Paper No 3-22, 2010.
4. Jamiolkowski M., Lo-Presti D. C. F., Manassero M.: Evaluation of Relative Density and Shear Strength of Sands from CPT and DMT. C.C. Ladd Symposium, October 2001, M.I.T., Cambridge, Mass.
5. Lunne T., Robertson P.K., Powell J. J. M.: Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, 1997.
6. Młynarek Z., Tschuschke W., Wierzbicki J.: Klasyfikacja gruntów podłoża budowlanego metodą statycznego sondowania. XI Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania. Geotechnika w budownictwie i transporcie. Gdańsk 1997.
7. PKN_CEN ISO/TS 17892-4:2009 Badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 4: Oznaczanie składu granulometrycznego
8. PN-B-04452:2002. Geotechnika-Badania polowe.
9. PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego
10. PN-EN ISO 22476-1:2013-03 Rozpoznanie i badania geotechniczne. Badania polowe. Część 1: Badania sondą statyczną ze stożkiem elektrycznym oraz piezo-elektrycznym
11. PN-EN ISO 22476-2:2005 Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania polowe – Część 2: Sondowanie dynamiczne
12. Robertson P. K.: Soil behaviour type from the CPT: an update. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, USA, 9-11 may 2010.
13. Stenzel G., Melzer K. J.: Soil investigations by penetration testing according to DIN 4094. Tiefbau 20, 1978, 155-160, 240-244 (In German).
14. Ura M., Tarnawski M.: Porównanie wyników sondowań statycznych CPT i dynamicznych DPSH w gruntach niespoistych, Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 1/2012.