

Interpretacja sondowań statycznych CPTU wykonanych na obszarze Południowego Bałtyku. Sposób określania stopnia plastyczności

Mgr inż. Bożena Juskiewicz-Bednarczyk¹, prof. dr hab. inż. Maciej Werno¹², mgr Jakub Nocoń³

¹Geostab Sp. z o.o., ²Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji, ³LOTOS Petrobaltic S.A.

Sondowania statyczne CPTU stanowią już od kilkadziesiąt lat podstawowe narzędzie stosowane na Południowym Bałtyku w obszarze Morza Terytorialnego (MT) i Polskiej Wyłącznej Strefy Ekonomicznej (PWSE) w celu określenia warunków geotechnicznych na obszarze posadowienia konstrukcji pełnomorskich, w tym głównie platform wiertniczych należących do LOTOS Petrobaltic, a wcześniej do poprzednich organizacji PETROBALTIC, jak również gazociągów podmorskich i boi przelewowych.

W miejscu projektowanego posadowienia obiektu wykonuje się również wibrosondy i otwory badawcze, a pobrane próby gruntu poddaje się, już na lądzie, badaniom laboratoryjnym. Rozpoznanie dna morskiego, badania geotechniczne na morzu i towarzyszące im pomiary geofizyczne są wykonywane z pokładu Wielozadaniowego Statku Badawczego, aktualnie z pokładu r/v „St. Barbara” [2]. Zakres badań niezbędnych dla posadowienia konstrukcji morskich oraz stosowaną metodykę badań omówiono szczegółowo w pozycjach literaturowych [2, 3].

Do chwili obecnej ponad 90% posadowień konstrukcji pełnomorskich na Południowym Bałtyku dotyczy konstrukcji *jack-up*, tj. samopodnoszących się pływających platform wiertniczych, które na określonej pozycji pozostają zazwyczaj jedynie przez okres kilku miesięcy, niezbędnych do wykonania wierceń poszukiwawczych węglowodorów bądź też zaprojektowanych otworów wydobywczych oraz otworów zawadniających złożę. Następnie konstrukcję przemieszcza się na inne miejsce pracy. Posadowienie takich obiektów odbiega w sposób istotny od wszystkich innych konstrukcji, w których fundamenty projektowane są indywidualnie, tak aby zapewnić ich odpowiednią nośność przy ustalonej rzędnej posadowienia. Stopy fundamentowe platform samopodnoszących mają ustalony wymiar i określony kształt, który zazwyczaj nie ma płaskiej podstawy. W trakcie procesu posadowienia następuje przekroczenie nośności granicznej i fundament osiada aż do uzyskania stanu

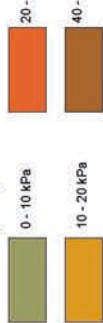
równowagi pomiędzy nośnością graniczną podłoża a naprężeniem pod fundamentem. W celu uniknięcia ponownego przekroczenia nośności granicznej i dalszego osiadania fundamentu przy wzroście obciążeń w warunkach sztormowych, stosuje się dodatkowo procedurę wstępnego obciążenia, wymuszającego dodatkowe osiadanie. Bezpieczne posadowienie konstrukcji wymaga zatem każdorazowo zarówno oszacowania całkowitego osiadania fundamentu posadowionego w podłożu dna morskiego, jak również wykonania prognozy osiadania fundamentu w czasie, poczynając od chwili dotknięcia dna. W tym celu, dla każdego fundamentu (zazwyczaj dla 3 fundamentów 3 nóg platformy) należy obliczyć nośność graniczną podłoża jako funkcję jego zagłębienia, co wymaga bardzo precyzyjnego określenia profili wytrzymałościowych podłoża w miejscu projektowanego posadowienia każdego fundamentu, podczas gdy nieistotny jest w tym przypadku podział podłoża na warstwy geotechniczne i wyznaczenie ich parametrów charakterystycznych, jak to ma miejsce przy określaniu warunków geotechnicznych dla posadowienia obiektów na lądzie.

Odmienny przypadek stanowi posadowienie rurociągów podmorskich stanowiących obiekty liniowe, dla których znacznie bardziej istotna jest zmienność warunków gruntowych w kierunku poziomym. Określenie warunków geotechnicznych w takiej sytuacji polega na podziale podłoża na warstwy geotechniczne i zbudowaniu przekroju geotechnicznego w osi rurociągu. W szczególnych sytuacjach może być również wymagane opracowanie przekrojów poprzecznych. Podział podłoża na warstwy geotechniczne i wykonanie przekrojów należy przeprowadzić, gdy ze względów formalnych posadowienie konstrukcji, np. platformy stacjonarnej, wymaga wykonania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej. W takiej sytuacji interpretacja badań CPTU będzie obejmowała również określenie parametrów definiujących stan podłoża, takich jak stopień zagęszczenia w gruntach piaszczystych, bądź wskaźnik konsystencji / stopień plastyczności w gruntach spoistych.

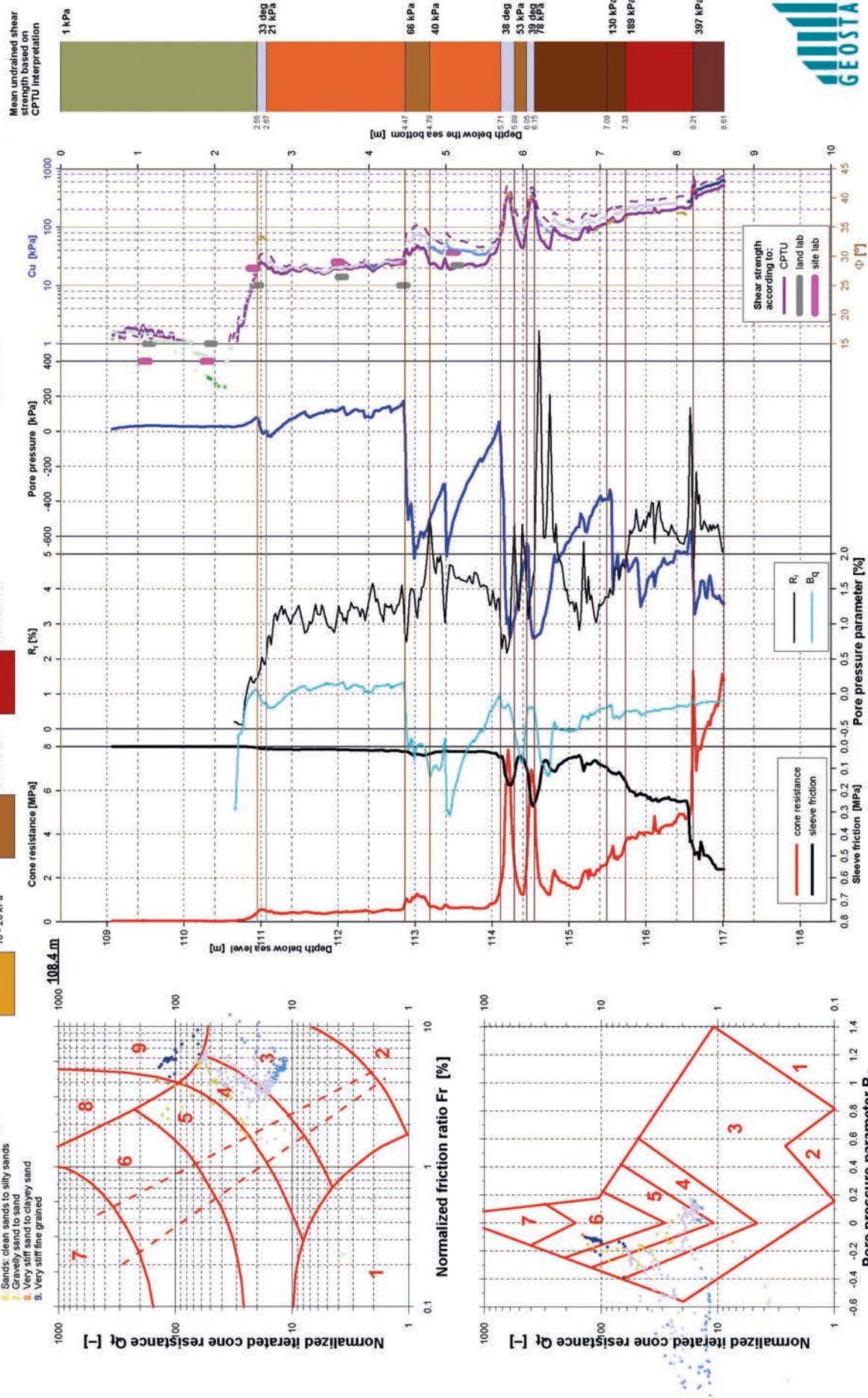
Soil Behavior Type based on CPTU results

- 1. Sensitive fine grained
- 2. Organic silts - peats
- 3. Clays: clay to silty clay
- 4. Silt mixtures: clayey silt to silty clay
- 5. Sand mixtures: silty sand to sandy silt
- 6. Sands: clean sands to silty sands
- 7. Gravelly sand to sand
- 8. Very stiff sand to clayey sand
- 9. Very stiff fine grained

Quaternary clays



Sandy silt with gravel and stones



CPTU TEST INTERPRETATION: CPTU3b – Vibrocorer 3. Port leg

Rys. 1. Przykład interpretacji sondowania statycznego CPTU dla potrzeb posadowienia platformy samopodnoszącej, wykonany programem własnym PB Geostab

INTERPRETACJA SONDOWAŃ CPTU W CELU POSADOWIENIA PLATFORM JACK-UP

Należy podkreślić, że na obszarze Południowego Bałtyku warunki gruntowe cechują się występowaniem licznych warstw i przewarstwień oraz dużą zmiennością właściwości wytrzymałościowych gruntów, a prowadzenie wierceń i poboru prób na morzu, zwłaszcza przy jego dużych głębokościach, w skrajnym przypadku przekraczających 100 m, charakteryzuje się nieporównywalnie większą skalą trudności niż w warunkach lądowych. Próby uzyskiwane za pomocą wibrosond są z reguły zbyt krótkie (maksymalnie do 6 m [2]) i zazwyczaj kończą się powyżej strefy posadowienia fundamentów. W zależności od rodzaju i stanu podłoża jakość prób może znacznie odbiegać od kategorii A, określonej w obowiązujących normach PN-B-04452:2002, PN-EN ISO 22475-1:2006 oraz PN-EN 1997-2:2009. Ponadto, w przypadku szczególnie słabonośnych osadów dna o miąższości większej od długości rury wibrosondy, może ona w wyniku wibracji niejako „tonąć” w dnie morskim, czemu towarzyszy zagęszczanie się słabonośnych osadów w górnej części pobieranego rdzenia. Skutkiem takiego zjawiska, które kilkakrotnie już zaobserwowano w dotychczasowej praktyce, może nastąpić zafałszowanie zarówno miąższości słabonośnych osadów, jak też ich rzeczywistych właściwości. Z kolei próby kategorii A uzyskiwane za pomocą wierceń z przyczyn technicznych (brak możliwości poboru prób w gruntach słabonośnych) są pobierane z reguły z gruntów o wyższych parametrach wytrzymałościowych znacznie poniżej poziomu posadowienia, przy czym występują trudności z precyzyjnym określeniem głębokości ich poboru w przypadku występowania przewarstwień gruntów gruboziarnistych. Dlatego właśnie sondowania statyczne CPTU stanowią niezastąpione narzędzie pozwalające określić z dużą precyzją zmienność parametrów gruntowych w całym badanym profilu dna, podczas gdy badania laboratoryjne prób gruntu pobranych za pomocą wiercenia i wibrosond wykonywanych w bezpośrednim sąsiedztwie sondowań mają przede wszystkim funkcję pomocniczą, umożliwiającą poprawną interpretację wyników sondowań. Dotyczy to głównie klasyfikacji gruntów, ich właściwości fizycznych oraz wartości parametrów wytrzymałościowych przy szybkim ścinaniu, stanowiących podstawę obliczeń nośności granicznej.

Przykład interpretacji sondowań statycznych CPTU (w warunkach bez odpływu) na potrzeby posadowienia platformy samopodnoszącej wykonany programem własnym PB Geostab, dedykowanym specjalnie dla środowiska morskiego, pokazano na rys. 1 (rysunek ten pochodzi bezpośrednio z raportu dotyczącego posadowienia jednej z platform należących do LOTOS Petrolbaltic na Morzu Bałtyckim, który jest wykonany standardowo w języku angielskim, stąd wszystkie opisy są po angielsku).

Interpretacja ta obejmuje klasyfikację gruntów, ustalenie ich miąższości, a także oszacowanie właściwości wytrzymałościowych gruntów, to jest: kąta tarcia wewnętrznego gruntów piaszczystych oraz wytrzymałości gruntów spoistych na ścinanie bez odpływu. Przy interpretacji wykorzystuje się:

- rozszerzony nomogram Robertsona (1990), umożliwiający klasyfikację gruntów pod względem ich zachowania [1], a po skorelowaniu z wynikami badań prób gruntu z sąsiednich wibrosond, szczegółowe określenie rodzaju gruntu,

- znane zależności na obliczanie wytrzymałości na ścinanie bez odpływu:

$$C_U = (q_c - \sigma_{vo}) / N_{kt}$$

$$C_U = (q_t - u_2) / N_{ke}$$

gdzie:

q_c – opór na stożku,

q_t – skorygowany opór stożka, uwzględniający wynikający z jego konstrukcji udział ciśnienia porowego w układzie sił,

σ_{vo} – całkowite naprężenie pionowe w gruncie,

u_2 – ciśnienie porowe wody mierzone za stożkiem,

a wartości N_{kt} i N_{ke} dobierane są dla danego obszaru Morza Bałtyckiego na podstawie korelacji otrzymywanych wartości C_U z wartościami wytrzymałości na ścinanie bez odpływu, mierzonej za pomocą laboratoryjnej sondy krzyżakowej w próbach gruntu pobranych ze rdzeni wibrosond wykonanych w bezpośrednim sąsiedztwie sondowań CPTU; dobór zależności następuje indywidualnie dla każdego punktu obliczeniowego (to jest dla każdej głębokości) danego sondowania, zależnie od uzyskiwanych wartości C_U i lokalizacji punktu na diagramie Robertsona,

- metody Robertsona i Campanelli (1983) oraz Senneseta i innych (1989) na obliczanie efektywnego kąta tarcia wewnętrznego [1].

INTERPRETACJA SONDOWAŃ CPTU DO CELÓW WYDZIELENIA WARSTW GEOTECHNICZNYCH

Na rys. 2 pokazano przykład interpretacji sondowania wykonanego na potrzeby dokumentacji geologiczno-inżynierskiej do celów posadowienia obiektu liniowego, jakim jest gazociąg układany w dnie morskim. W tym przypadku podział podłoża jest wykonywany nie tylko na podstawie klasyfikacji Robertsona i wytrzymałości gruntu, ale też stopnia zagęszczenia gruntów gruboziarnistych I_D i stopnia plastyczności I_L gruntów drobnoziarnistych. Ponadto jest wyznaczana ściśliwość gruntów, chociaż nie jest ona uwidoczniiona na przedstawionym wykresie. W tym celu program PB Geostab wykorzystuje:

- formułę na obliczanie stopnia zagęszczenia gruntów gruboziarnistych zgodnie z normą PN-B-04452:2002,
- formułę własną PB Geostab na określanie stopnia plastyczności opracowaną na podstawie 25-letniej interpretacji sondowań CPTU wykonywanych na Morzu Bałtyckim na potrzeby posadowienia platform wiertniczych:

$$I_L = -0,3187732441 \cdot \ln(C_U) + 1,442623488 \quad (1)$$

- uniwersalną formułę na styżny moduł ściśliwości dla stanu naprężenia *in situ* według metody Senneseta i innych (1988) dla gruntów przejściowych (od gruboziarnistych do drobnoziarnistych) [1].

FORMUŁA PB GEOSTAB DO OKREŚLANIA STOPNIA PLASTYCZNOŚCI W GRUNTACH SPOISTYCH POLSKIEJ STREFY EKONOMICZNEJ NA PODSTAWIE SONDOWAŃ CPTU

W warunkach Morza Bałtyckiego, odbiegających zasadniczo od warunków panujących na lądzie, jak również ze względu na mocny wpływ lodowca w osadach plejstocénskich i mocne



INŻYNIERIA MORSKA I GEOTECHNIKA, nr 1/2016

powierzchniowe przemieszanie osadów, nie sprawdziły się ani zależności dedykowane warunkom morskim, a opracowane głównie na podstawie badań wykonywanych w Morzu Północnym, ani też zawarte w normie PN-B-04452:2002. Z tego powodu, na podstawie wieloletnich doświadczeń z pomiarami CPTU na Morzu Bałtyckim, interpretację I_L oparto na:

- bardzo dobrej zgodności wartości wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odplywu S_U określanych *in-situ* na podstawie sondowań CPTU oraz wyznaczanych dla próbek pobranych z wibrosond wykonywanych w bezpośrednim sąsiedztwie sondowań statycznych za pomocą laboratoryjnej sondki krzyżakowej bądź ścinarki obrotowej. Pozwala to na postawienie znaku równości pomiędzy wartościami C_U i S_U . Zgodność ta, widoczna na przykładowym rys. 1, jest na tyle wyraźna, że pozwala również na dokonywanie korekty rzędnych położenia rdzeni wibrosond względem powierzchni dna, co jest istotne z uwagi na występujące nieraz w strefie przypowierzchniowej szczególnie słabonośne osady o znacznej miąższości, powodujące „tonięcie” wibrosondy;
- zależności pomiędzy wyznaczonymi laboratoryjnie wartościami I_L i S_U , określonej na podstawie wieloletnich badań prowadzonych w obrębie Polskiej Strefy Ekonomicznej Morza Bałtyckiego, głównie na potrzeby posadowiania platform wiertniczych *jack-up rig*.

W zależności tej nie uwzględniono podziału gruntów na mniej lub bardziej spoiste, ze względu na:

- charakter klasyfikacji gruntów na podstawie sondowań CPTU, odnoszący się do jego „zachowania”, a nie do-

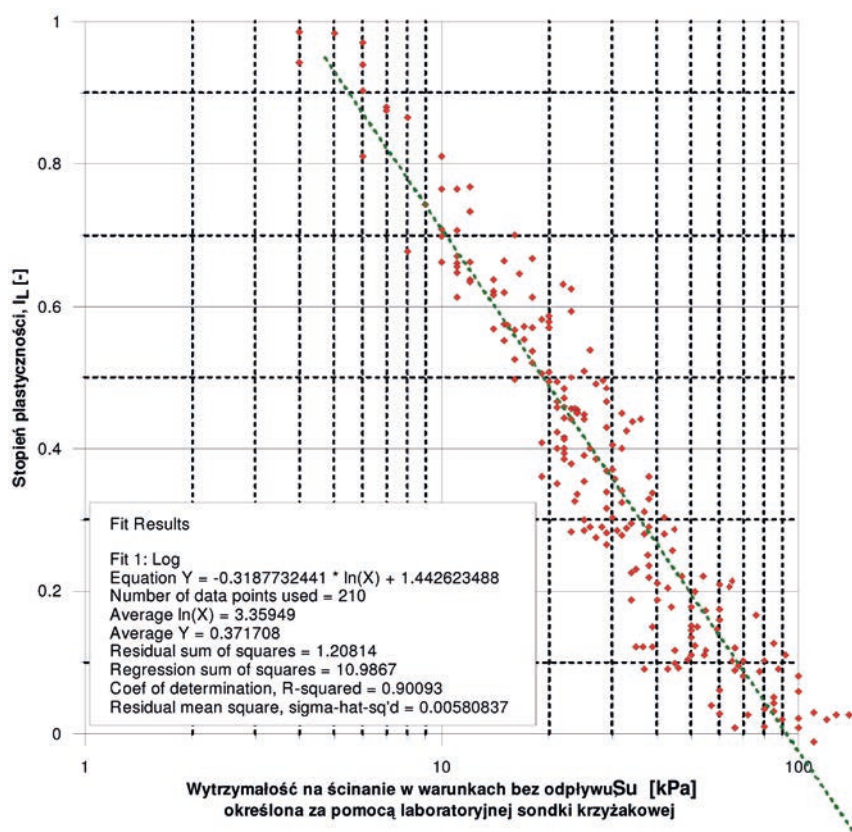
kładnej zawartości poszczególnych frakcji i wynikającą stąd trudność dokładnego określenia rodzaju gruntu w przypadku braku badań laboratoryjnych w bezpośrednim sąsiedztwie sondowań statycznych,

- znacznie mniejszy rozrzut wartości I_L dla konkretnej wartości wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odplywu niż analogiczny rozrzut dla określonego oporu stożka w innych związkach korelacyjnych, podanych przykładowo w normie PN-B-04452:2002.

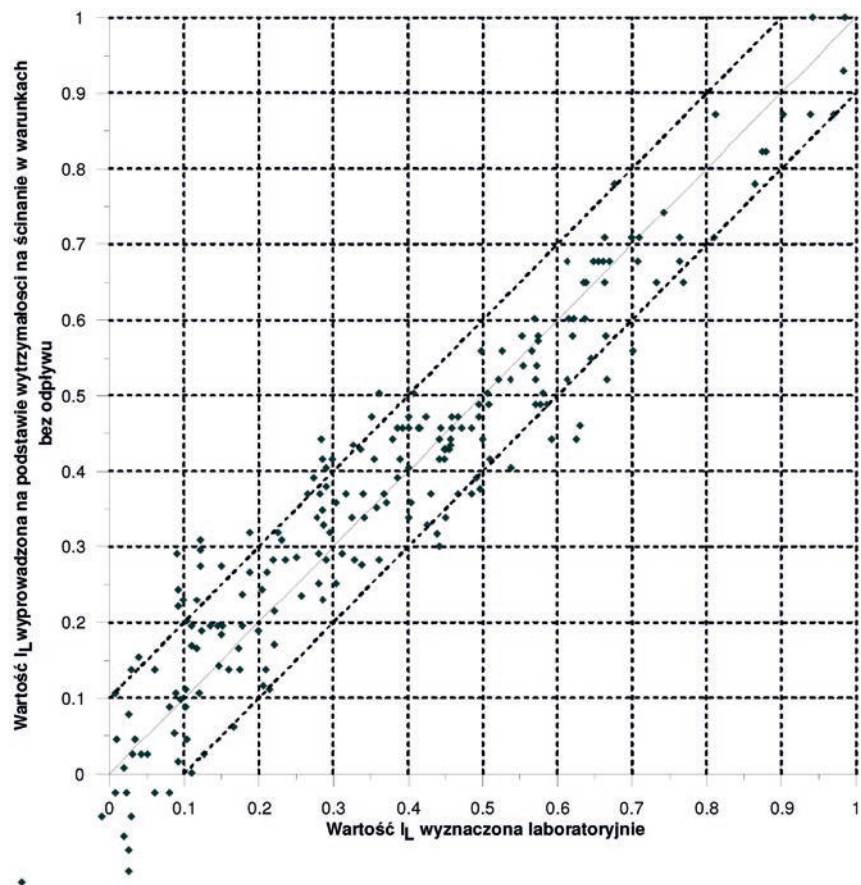
Zależność tę, opracowaną na podstawie 210 badań prób gruntu pobranych w różnych miejscach Polskiej Strefy Ekonomicznej Morza Bałtyckiego w czasie ostatnich 25 lat badań, pokazano na rys. 3. Należy podkreślić, że tak mała liczba oznaczeń I_L , mimo przeprowadzonych w tym czasie ponad 80 posadowień platform na dnie morskim, wynika z faktu, jak wspomniano powyżej, że parametr ten nie miał istotnego znaczenia w zaprojektowaniu posadowienia platformy i stanowił jedynie funkcję pomocniczą. Ponadto, ze względów praktycznych, nie wyznaczano na ogół dokładnej wartości wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odplywu powyżej 100 kPa, jak również nie określano wartości I_L dla gruntów miękkoplastycznych o wartościach $S_U < 10$ kPa.

Na rys. 4 pokazano korelację pomiędzy wartością I_L wyznaczoną laboratoryjnie a wyprowadzoną za pomocą przedstawionej na rys. 3 zależności uzyskanej na podstawie zbadanej wartości wytrzymałości na ścinanie bez odplywu.

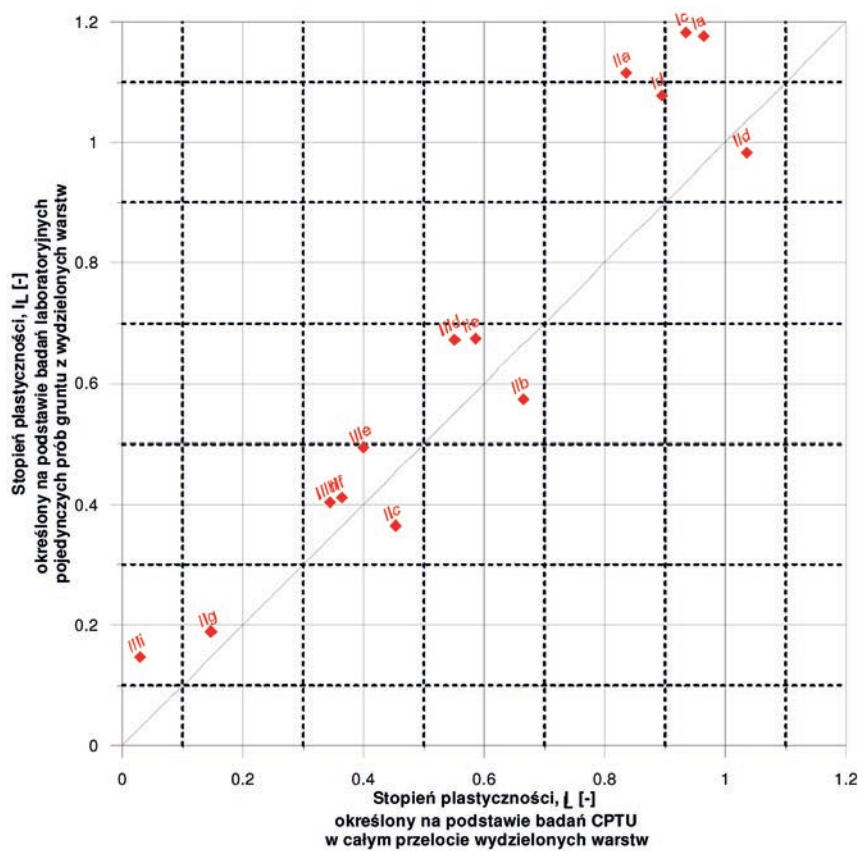
Formułę (1), określoną wyłącznie na podstawie badań laboratoryjnych, poddano weryfikacji w czasie badań prowadzonych w 2015 roku w ramach dokumentacji geologiczno-inżyn-



Rys. 3. Zależność pomiędzy stopniem plastyczności gruntu a wytrzymałością na ścinanie w warunkach bez odplywu określona za pomocą laboratoryjnej sondki krzyżakowej na podstawie 210 badań prób gruntu pobranych z różnych miejsc Polskiej Strefy Ekonomicznej Morza Bałtyckiego w okresie 25 lat badań



Rys. 4. Korelacja pomiędzy stopniem plastyczności gruntu wyznaczonym laboratoryjnie a wyprowadzonym za pomocą zależności pokazanej na rys. 3 na podstawie znanej wartości wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu laboratoryjną sondką krzyżakową



Rys. 5. Korelacja pomiędzy stopniem plastyczności gruntu wydzielonych warstw geotechnicznych wyznaczonym laboratoryjnie a wyprowadzonym za pomocą zależności (1)

Tabl. 1. Podział na warstwy geotechniczne i porównanie stopnia plastyczności I_L określonego na podstawie badań laboratoryjnych i na podstawie sondowań CPTU, przy zastosowaniu formuły (1)

Seria geologiczno-inżynierska	Opis serii geologiczno-inżynierskiej	Numer warstwy geotechnicznej	Symbol gruntu	Stopień plastyczności I_L określony na podstawie			
			według EN ISO 22688-2:2006	sondowań statycznych CPTU	łączna długość, [m]	badań laboratoryjnych	liczba badań
Qhgm	Holocenijskie osady głębokowodne: namuły, ropy z częściami organicznymi, ropy	Ia	clOr; Or; Orcl	0,96	82,0	1,18	8
		Ic	Cl; siCl; siCl; Clor; siClor; orCl; orsiCl; Or	0,93	81,7	1,18	6
		Id	Cl; siCl; siClfsaSi; Clmsa; Clor; Or; grsacSi	0,90	35,7	1,08	4
Qh+Qp	Nie rozdzielone osady holocenu i plejstocenu wykształcone w postaci ropy, gliny pylaste i pyły	IIa	Cl; ClsacSi; Clclsi; Clfsa; Clor; coCl; fsaCl; grCl; siCl; sasiCl; siClfsa; siClor; sasiCl	0,83	140,6	1,12	10
		IIb	Cl; grCl; csaCl; sasiCl; siCl	0,66	80,6	0,57	1
		IIc	grCl	0,45	9,7	0,36	1
		IId	fsaCl; grsasiCl; grsiCl; sasiCl; fsasiCl; fsamsiCl; sasiCl; siCl; saCl; sacSi	1,04	8,9	0,98	1
		IIf	cosasiCl; grsasiCl; saCl; sasiCl; siCl; grsiCl; grsacSi	0,59	15,7	0,67	8
		IIg	grfsaCl; grsaCl; cosasiCl; sasiCl; grsiCl; siCl; saCl; sasiCl; grsacSi	0,36	56,7	0,41	9
		IIh	cosasiCl; grsasiCl; sasiCl; saSi	0,15	13,4	0,19	2
Qp	Plejstocenijskie osady morenowe:	IIIa	Cl	0,18	2,2	–	–
		IIIb	clfSa; sisaCl; fsasiCl	0,07	2,0	–	–
Qpj	Plejstocenijskie osady jeziorne: ropy, pyły, gliny, piaski pylaste i piaski drobne	IIIc	Cl; Clsi; siCl	0,55	0,8	0,67	2
		IIId	Cl; Clsi; siClfsa	0,40	4,7	0,49	1
		IIIe	clSi; Siel	0,58	2,2	–	–
		IIIg	fsacCS; orfsacSi; sacSifsa; fsaSi	0,34	9,8	0,40	2
		IIIh	clSi; fsacMSi; orfsacSi; orclfSa; fsacMSi	0,03	14,9	0,15	3
K	Osady Kredy: gliny, piaski gliniaste, piaski glaukonitowe drobne i pylaste	IVa	sasiCl; clfSa	0,02	31,9	–	–

nierskiej na potrzeby projektowanego gazociągu podmorskiego o długości 75 km. Wzdłuż całej trasy gazociągu wykonywano, co 300 m, jedną wibrosondę VKG-6. Co trzeciej wibrosondzie towarzyszyło sondowanie statyczne CPTU sięgające aż do podłoża nośnego, pomimo że posadowienie gazociągu jest przewidziane na głębokości od 1 do 3 m poniżej dna morza [4]. Jedno z takich sondowań pokazano na rys. 2. Na podstawie przeprowadzonych badań w obrębie podłoża drobnopiękistego wydzielono ogółem 18 warstw geotechnicznych. Ich opis oraz zestawienie stopnia plastyczności wyznaczonego w sposób klasyczny w laboratorium oraz wyłącznie na podstawie sondowań statycznych pokazano w tabl. 1. Trzeba zwrócić uwagę, że mimo trzykrotnie większej liczby wibrosond, stopień plastyczności niektórych warstw był wyznaczany zaledwie na podstawie 1 lub 2 badań, co wiązało się z faktem, że długość wibrosondy była zbyt mała do dostarczenia większej liczby prób gruntu z warstw zalegających głębiej. Nie uzyskano również żadnej próby gruntu z osadów Kredy (warstwa IVa), z plejstocenijskich osadów morenowych (warstwy IIIa i IIIb) oraz z części plejstocenijskich osadów jeziornych (warstwa IIIg). W tej sytuacji brak możliwości prawidłowej interpretacji stopnia plastyczności na podstawie sondowań CPTU uniemożliwiłby całkowicie jego określenie dla

tych warstw. Wartość I_L z sondowań CPTU dla danej warstwy określano poprzez uśrednienie zinterpretowanych wartości I_L w obrębie całego przelotu. Łączną długość przelotu sondowania przez każdą warstwę przedstawiono w tabl. 1.

Korelację pomiędzy wartościami I_L , wyznaczonymi dla wydzielonych warstw dwiema metodami, przedstawiono na rys. 5. Największe rozbieżności występują dla gruntów bardzo miękkoplastycznych, dla których stopień plastyczności I_L jest większy od jedności. Wynika to z faktu, że w interpretacji sondowań CPTU pomijano wszystkie wartości $I_L > 1,2$ jako mało miarodajne, z uwagi na to że mierzone w takich gruntach wartości oporu na stożku q_c znajdowały się na granicy błęd pomiarowego. Gruntów w takim stanie praktycznie nie spotyka się w warunkach lądowych, podczas gdy występują one powszechnie w zalegających w obszarze głębokowodnym powierzchniowych osadach holocenijskich.

ZAKOŃCZENIE

Wypracowana przez lata procedura określania stopnia plastyczności na podstawie sondowań statycznych, która jest zalecana dla gruntów zalegających w dnie Południowego Bałtyku

może być zastosowana do identyfikacji tych gruntów na potrzeby posadowienia konstrukcji pełnomorskich, a także hydrotechnicznych konstrukcji brzegowych.

LITERATURA

1. Lunne T., Robertson P. K., Powell J. J. M.: Cone penetration testing in geotechnical practice. Blackie Academic & Professional, London 1997.
2. Werno M. i inni: Zasady dokumentowania geologiczno-inżynierskich warunków posadowienia obiektów budownictwa morskiego i zabezpieczeń brzegu morskiego. Państwowy Instytut Geologiczny. Warszawa 2009.
3. Werno M., Juskiewicz-Bednarczyk B.: Przegląd metod i sprzętu do badań geotechnicznych na morzu. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 5/2009, 61-69.
4. Werno M.: Warunki posadowienia gazociągu podmorskiego ze złoża B8 do Władysławowa. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 5/2015, 696-700.