

Wykorzystanie sondowań statycznych do obliczania nośności i osiadań pali

■ **dr hab. inż. Kazimierz Gwizdała, prof. PG**, Wydział Inżynierii Łądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej
dr inż. Maciej Stępczniewski, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej
dr inż. Ireneusz Dyka, Wydział Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego

Stosowanie fundamentów głębokich, w tym pali, zawsze powinno być związane z rozpoznaniem podłoża gruntowego na znaczne głębokości, w tym kilka metrów poniżej podstawy elementu przekazującego obciążenie na grunt. Obecnie, słusznie, oprócz wierceń coraz szerzej stosowane są różnego rodzaju pomiary in situ. Powszechnie stosuje się sondy statyczne CPT (w różnych odmianach), sondy dynamiczne SD, SPT, presjometry PMT, dylatometry DMT.

Zalety tych urządzeń badawczych były wielokrotnie omawiane i obecnie są często wykorzystywane. Badanie statyczną sondą wciskaną, którą można uzyskiwać znaczne głębokości, w sposób szczególny predestynuje ją do projektowania pali. Bezpośrednie pomiary w miejscu przyszłego fundamentu palowego oraz korelacje z oporami na stożku sondy umożliwiają racjonalne, ekonomiczne i bezpieczne projektowanie.

1. Metody projektowania nośności pali

Nośność pojedynczego pala należy oceniać na podstawie pełnej charakterystyki obciążenie – osiadanie, określonej w badaniach terenowych lub na podstawie obliczeń. Obecnie wciąż jeszcze mówimy o sprawdzaniu stanu granicznego nośności i stanu granicznego użyteczności (patrz również Eurokod 7 [36]). Niedaleka perspektywa wdrożenia norm europejskich w Polsce wymaga właściwej oceny proponowanych rozwiązań i zastosowania sprawdzonych metod obliczeń. Zgodnie z PN-EN 1997-1 w projektowaniu pali należy stosować jedno z poniższych podejść:

- na podstawie wyników próbnego obciążenia statycznych, których zgodność z innym porównywalnym doświadczeniem została wykazana za pomocą obliczeń lub w inny sposób,
- na podstawie empirycznych lub analitycznych metod obliczeniowych, których wiarygodność została wykazana przez próbne obciążenia statyczne w podobnych sytuacjach,
- na podstawie wyników próbnego obciążenia dynamicznych, których wiarygodność została wykazana przez próbne obciążenia statyczne w podobnych sytuacjach,
- na podstawie obserwacji zachowania porównywalnych fundamentów palowych, jeżeli dane te są potwierdzone

wynikami badań w terenie i badań podłoża.

Należy zwrócić uwagę na bardzo ważną rolę próbnego obciążenia statycznych oraz pomiarów terenowych przemieszczeń całych fundamentów palowych.

W Polsce istnieje długoletnia tradycja stosowania wzoru statycznego do oceny nośności pionowej pali, według PN-83/B-02482. Jak wynika z punktu b), podobna metoda została dopuszczona w Eurokodzie 7 (patrz PN-EN 1997-1).

Wartość charakterystyczną oporu podstawy, $R_{b,k}$ oraz oporu poboczniczy, $R_{s,k}$ liczy się odpowiednio z następujących wzorów:

$$R_{b,k} = A_b \cdot q_{b,k} \quad \text{oraz} \quad R_{s,k} = \sum_i A_{s,i} \cdot q_{s,k,i}$$

gdzie:

- A_b oraz A_s oznacza powierzchnię podstawy i powierzchnię poboczniczy,
- $q_{b,k}$ oraz $q_{s,k}$ są wartościami charakterystycznymi oporów jednostkowych podstawy i poboczniczy, **określonymi na podstawie wyników badań podłoża.**

Podstawowy problem stanowi miarodajna ocena oporów $q_{b,k}$ oraz $q_{s,k}$. W tym celu można wykorzystać różne wyniki badań podłoża.

W artykule odniesiono się głównie do doświadczeń polskich z wykorzystaniem wyników badań sondą statyczną CPT oraz CPTU. Problem ten był wielokrotnie omawiany w publikacjach autorów już od roku 1984, niektóre publikacje zestawiono w spisie literatury.

Wyniki badań sondą statyczną wykorzystywane są do oceny nośności i (lub) przemieszczeń za pomocą metod bezpośrednich (bezpośrednia korelacja z oporem jednostkowym stożka sondy q_c) lub poprzez parametr wskaźnikowy (np. I_D , I_L) do określenia innych parametrów geotechnicznych (ϕ , c , E , M , G). Obecnie wyraźnie preferuje się metody bezpośrednie z elementami analizy statystycznej.

Innym ważnym elementem stosowania sondy statycznej jest ocena jakościowa podłoża uwarstwionego, szczególnie o bardzo zmiennej wytrzymałości i odkształcalności. Przewarstwienia w postaci namulów, torfów, spąg warstw gruntów słabonośnych (np. gytii), przewarstwienia piaszczyste o niedużej miąższości, wkładki i soczewki namulów mogą być łatwo rejestrowane i lokalizowane. Takie ukształtowanie podłoża ma decydujące znaczenie w doborze rodzaju i długości pali. Sondowanie statyczne bardzo często zapobiega przypadkowemu pozostawieniu gruntów bardzo odkształcalnych poniżej podstaw pali.

2. Obliczanie nośności pali

Od wielu lat do obliczeń nośności pali na całym świecie stosowane są metody bezpośrednie, z wykorzystaniem wyników badań sondowania statycznego.

Metody obliczania nośności pojedynczego pala na podstawie parametrów geotechnicznych uzyskanych z sondowań CPT wykorzystują statyczny wzór na nośność pala.

$$R_u = R_{bu} + R_{su} = A_b \cdot q_{bu} + \sum A_{si} \cdot q_{sui}$$

$$q_{bu} = \psi_1 \cdot \bar{q}_c$$

$$q_{sui} = \frac{\bar{q}_{csi}}{\psi_{2i}} \quad \text{lub} \quad q_{sui} = \frac{\bar{f}_{si}}{\psi_{3i}}$$

gdzie:

R_u – obciążenie graniczne w głowicy pala, odpowiadające najczęściej umownemu osiadowaniu pala [kN] (np. równemu 10% średnicy pala, $s = 0,1 D$),

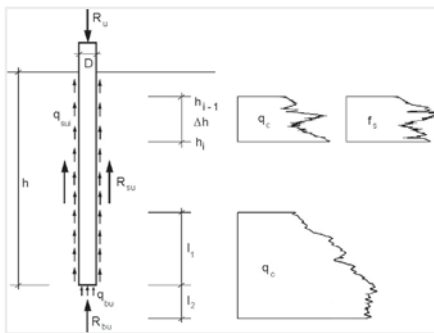
R_{bu} – graniczny opór gruntu pod podstawą pala [kN],

R_{su} – graniczny opór gruntu na poboczniczy pala [kN],

q_{bu} – jednostkowy, graniczny opór gruntu pod podstawą pala [kPa],

q_{sui} – jednostkowy, graniczny opór gruntu na poboczniczy pala w obrębie i-tej warstwy obliczeniowej [kPa],

\bar{q}_s – uśredniony, jednostkowy opór gruntu pod stożkiem sondy w strefie przy podstawie pala [kPa],
 \bar{q}_{csi} – uśredniony, jednostkowy opór gruntu pod stożkiem sondy w obrębie i-tej warstwy obliczeniowej [kPa],
 \bar{f}_{si} – uśredniony, jednostkowy opór gruntu na pobocznicy tulei sondy w obrębie i-tej warstwy obliczeniowej [kPa],
 A_b – powierzchnia podstawy pala [m²],
 A_s – powierzchnia pobocznicy pala [m²],
 Ψ_1 – współczynnik nośności podstawy,
 Ψ_{2i} – współczynnik nośności pobocznicy w obrębie i-tej warstwy obliczeniowej (przy uwzględnieniu oporu q_c),
 Ψ_{3i} – współczynnik nośności pobocznicy w obrębie i-tej warstwy obliczeniowej (przy uwzględnieniu oporu f_c),
 Δh – miąższość warstwy obliczeniowej [m], ryc. 1.



Ryc. 1. Założenia do obliczeń nośności pala na podstawie badań sondą statyczną CPT

Uzyskane z badań in situ parametry sondowania q_c i f_s są bezpośrednio wykorzystywane do określenia jednostkowych oporów pod podstawą i na pobocznicy pala. Najczęściej przyjmuje się empiryczne korelacje, potwierdzone wynikami próbnych obciążeń pali w skali naturalnej, pomiędzy q_{bu} i \bar{q}_{cs} dla podstawy oraz pomiędzy q_{sui} i \bar{q}_{csi} lub \bar{f}_{si} dla pobocznicy. Metody obliczania nośności pali różnią się przede wszystkim sposobem uśredniania wartości \bar{q}_c , \bar{q}_{csi} (lub \bar{f}_{si}) oraz wartościami współczynników Ψ_1 , Ψ_2 oraz Ψ_3 w zależności od rodzaju i stanu gruntu (najczęściej od q_c) oraz metody wykonania pala.

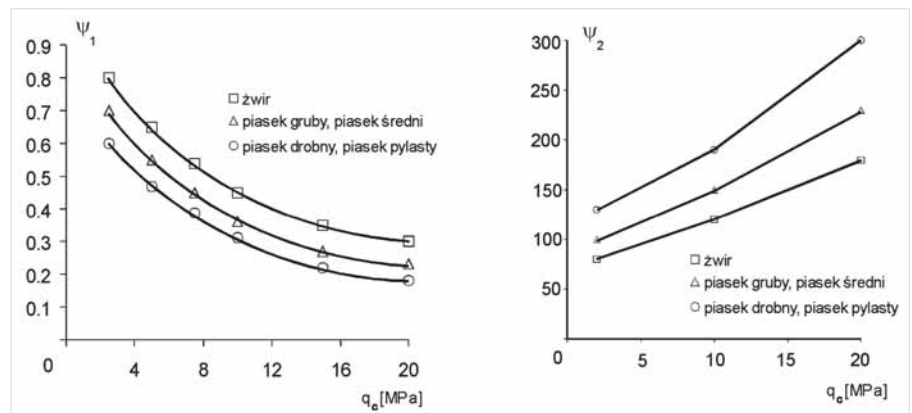
Zakres wartości Ψ_1 oraz Ψ_2 dla starszych metod przykładowo przedstawiono w tabeli 1.

Szczegółowe wartości współczynników, wzory i zakres stosowania można znaleźć w pracach autorów [19].

Z dawniejszych prac można przypomnieć analizy dla pali wielkośrednicowych, gdzie wartości Ψ_1 oraz Ψ_2 wyko-

Tab. 1. Przykładowe wartości Ψ_1 oraz Ψ_2

Autor	Ψ_1	Ψ_2	Rodzaj pala i gruntu
Van der Veen, Boersma, Mohan i inni [31]	0.67	50	wszystkie rodzaje pali i gruntów
Meyerhof [24]	1.00	200	pale wbijane, grunty niespoiste
Begemann [3]	1.00	200	pale wbijane, wszystkie rodzaje gruntu
Tassios [30]	0.67	100 – żwiry 200 – piaski 300 – piaski pylaste	pale wbijane, grunty niespoiste
Senneset [28]	0.50	100 ÷ 200 $\Psi_2 = f(\bar{q}_{cs})$	wszystkie rodzaje pali, piaski



Ryc. 2. Współczynnik oporu podstawy Ψ_1 i pobocznicy Ψ_2 (Gwizdała [8, 10])

Tab. 2. Współczynniki Ψ_1 oraz Ψ_2 według propozycji Bustamante, Gianselli [4]

Rodzaj gruntu	q_c [MPa]	Ψ_1		Ψ_2			
		Pale wiercone i iniektowane pod małym ciśnieniem	Pale wbijane, wciśnięte i iniektowane pod dużym ciśnieniem	Pale wiercone		Pale wbijane	
				Trzon betonowy	W rurze obsadowej	Trzon betonowy	Trzon stalowy
Iły miękkoplastyczne i namuły	< 1	0.4	0.5	30	30	30	30
Iły półzwarłe	1 ÷ 5	0.35	0.45	40	80	40	80
Gliny plastyczne i piaski luźne	≤ 5	0.4	0.5	60	150	60	120
Zwarłe iły i gliny	> 5	0.45	0.55	60	120	60	120
Kreda plastyczna	≥ 5	0.2	0.3	100	120	100	120
Żwiry i piaski średnio zagęszczone	5 ÷ 12	0.4	0.5	100	200	100	200
Kreda spękana do zwietrzałej (rumosz)	> 5	0.2	0.4	60	80	60	80
Żwiry i piaski zagęszczone	> 12	0.3	0.4	150	300	150	200

Tab. 3. Wartości oporów tarcia według De Beera i Van Impe [34]

Gлина	q_c [MPa]	0,075	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	≥ 3,0
	\bar{q}_{csi} [kPa]	5	10	18	31	44	58	70	82	q_c [kPa]/36.6
Piasek	q_c	≤ 10 MPa			10 MPa < q_c < 20 MPa				> 20 MPa	
	\bar{q}_{csi}	$q_c / 150$			liniowa interpolacja pomiędzy wartościami: $q_c / 200$ i $q_c / 150$				$q_c / 200$	

zystywano do określania pełnej krzywej obciążenie – osiadanie (Gwizdała [8, 10]), ryc. 2.

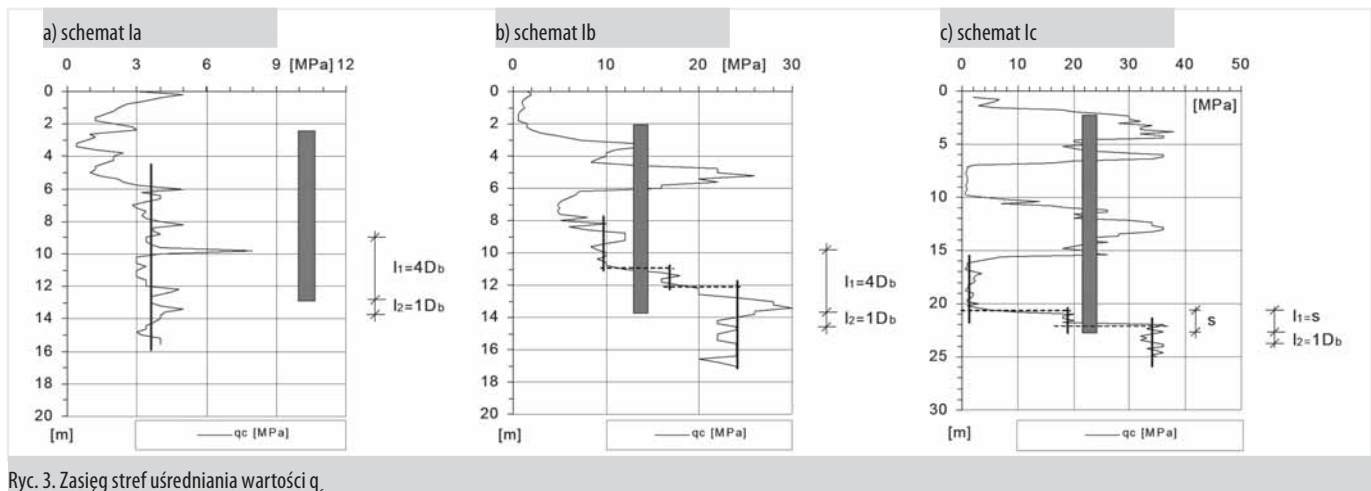
Wśród metod uznanych i stosowanych w świecie, również w komentarzu do EN 1997-1, należy wymienić propozycję Bustamante, Gianselli [4].

Proponowane wartości współczynników przedstawiono w tabeli 2.

Inną szeroko stosowaną metodą w krajach Europy zachodniej jest propozycja De Beera i Van Impe (patrz również [34]).

Przykładowe wartości do obliczeń podano w tabeli 3.

Powyżej przedstawiono jedynie kilka propozycji z szerokiego zakresu prac. Daje to również pogląd zakresu stosowanych wartości Ψ_1 oraz Ψ_2 . Należy zwrócić



Ryc. 3. Zasięg stref uśredniania wartości q_c

uwagę, że większość metod odnosi się do wartości oporów pod stożkiem sondy statycznej q_{cs} , a nie do oporów na pobocznicy tulei czarnej, f_s .

Zwraca się również uwagę na fakt, że propozycje te odnoszą się do klasycznego pojęcia stanu granicznego nośności (ULS). W zasadzie nie charakteryzuje się osiadań, które odpowiadają tak określonej nośności granicznej oraz nie podaje się, jak wykorzystać te wartości do pełnej charakterystyki obciążenie – osiadanie.

3. Ocena krzywej osiadania

Pełną informację o pracy pała w podłożu gruntowym można uzyskać, jeżeli na etapie obliczeń analitycznych potrafimy wiarygodnie określić pełną krzywą osiadania. Poniżej przedstawiono takie możliwości z zastosowaniem wyników badań sondą statyczną w połączeniu z wykorzystaniem metody funkcji transformacyjnych, t-z oraz q-z [9, 12, 15, 20].

Uwzględniając wcześniejsze prace, wykorzystanie pomiarów sondą statyczną do oceny osiadań pali pojedynczych można podzielić na trzy zasadnicze grupy:

- metoda pośrednia – na podstawie zmierzonych in situ parametrów ustala się stan gruntu, a następnie moduły odkształcenia niezbędne do obliczenia osiadań,
- ocena modułów odkształcenia – wiarygodne korelacje, najczęściej z uwzględnieniem rodzaju gruntu, stanu naprężenia oraz stopnia przekonsolidowania
- metoda bezpośrednia – wyznaczenie nośności na podstawie wyników testu statycznego sondowania oraz zbudowanie pełnej krzywej osiadania pała przy wykorzystaniu funkcji transformacyjnych.

Nie oceniając w tym artykule dokładności i wiarygodności oceny w grupie a) oraz b), w dalszej części zostaną przedstawione przykłady jedynie z grupy c).

Podstawą otrzymania wiarygodnych pełnych krzywych osiadania jest trafna ocena jednostkowych oporów pod podstawą i na pobocznicy pała [patrz wzory (2), (3) oraz (4)].

Miąższość warstw obliczeniowych wyznaczana jest na podstawie testu statycznego sondowania (np. według procedury Hardera – Bloha).

3.1. Jednostkowy, graniczny opór gruntu pod podstawą pała

Uśredniony, jednostkowy opór gruntu pod stożkiem sondy w strefie przy podstawie pała q_c określany jest według wzoru:

$$\bar{q}_c = \frac{1}{l_1 + l_2} \int_{h-l_1}^{h+l_2} q_c(h) dh \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

Zasięg stref l_1 i l_2 (ryc. 1) określany jest na podstawie schematów zależnych od ułożenia warstw gruntu w okolicy podstawy pała. W metodzie wyróżniono trzy schematy:

- I schemat: $l_1 = 4D_b$; $l_2 = 1D_b$ (D_b – średnica podstawy pała);
Ia – grunt jednorodny, ryc. 3a
Ib – grunt niejednorodny, podstawa w gruncie o większych wartościach

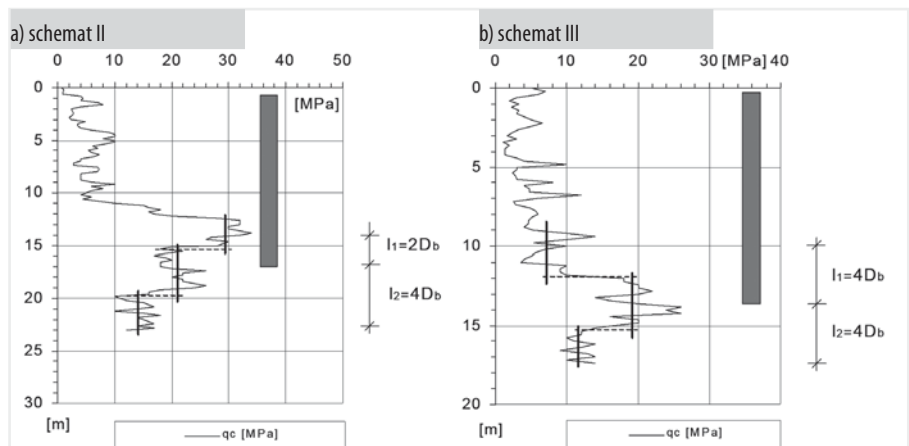
oporów stożka, powyżej zalega warstwa gruntu o mniejszych wartościach oporów stożka, ryc. 3b.

Ic – przypadek szczególny schematu I: podstawa w gruncie o większych wartościach oporów stożka, powyżej zalega warstwa gruntu nienośnego (namuł, torf). W takim przypadku zasięg strefy l_1 nie obejmuje gruntu nienośnego, ryc. 3c.

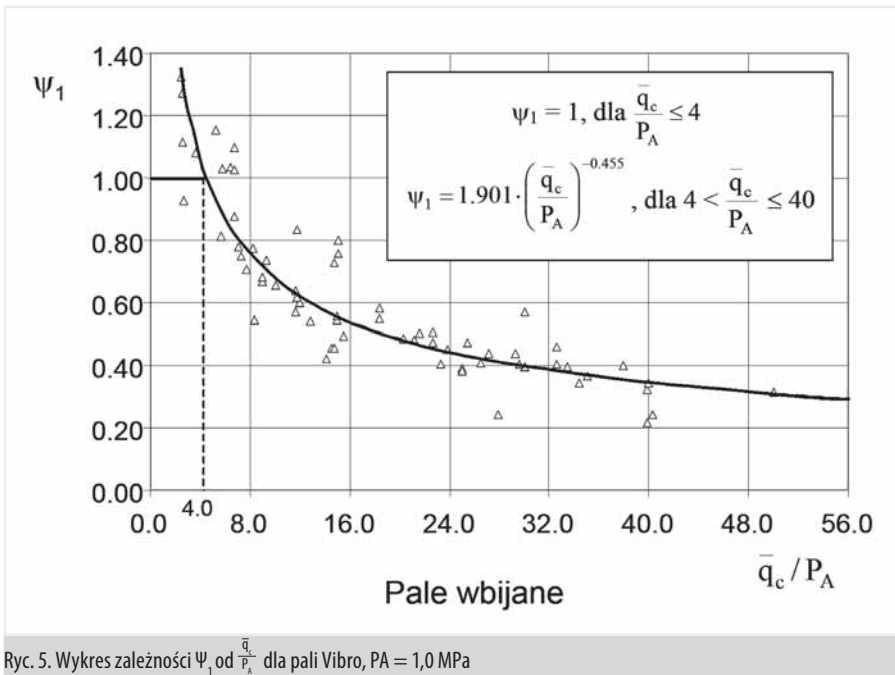
- II schemat: $l_1 = 2D_b$; $l_2 = 4D_b$; grunt niejednorodny, podstawa w gruncie o mniejszych wartościach oporów stożka, powyżej zalega warstwa gruntu o większych wartościach oporów stożka, ryc. 4a.

- III schemat: $l_1 = 4D_b$; $l_2 = 4D_b$; grunt niejednorodny, podstawa w gruncie o większych wartościach oporów stożka, powyżej i poniżej zalega warstwa gruntu o mniejszych wartościach oporów stożka, ryc. 4b.

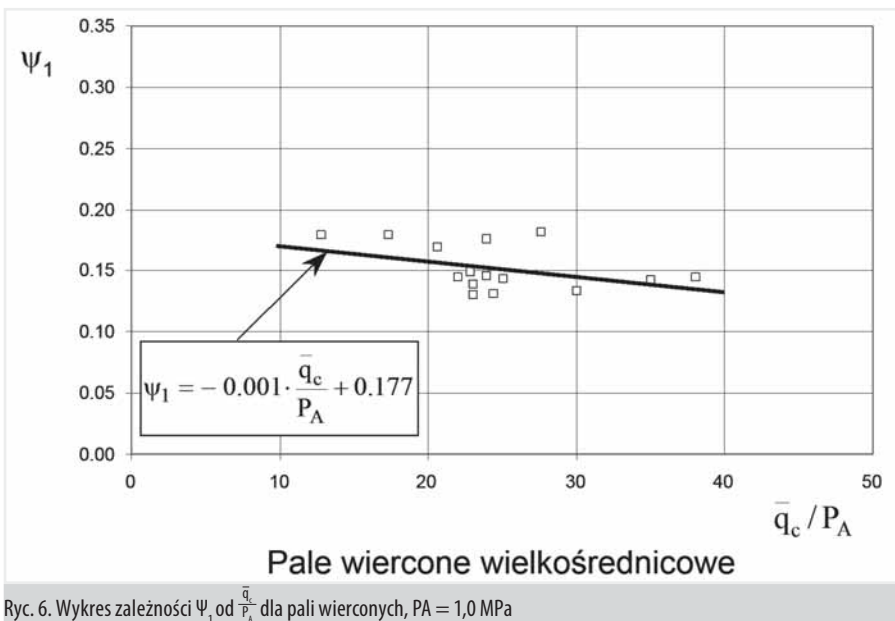
Przykładowe wartości współczynnika nośności podstawy Ψ_1 dla pali Vibro przedstawiono na rycinie 5, a dla pali wierconych wielkośrednicowych na rycinie 6. Przy ocenie przedstawionych zależności wykorzystano wyniki próbnych obciążeń statycznych.



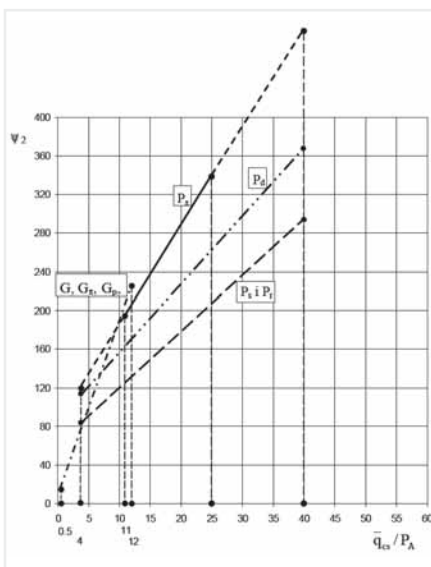
Ryc. 4. Zasięg stref uśredniania wartości q_c dla schematu II i III



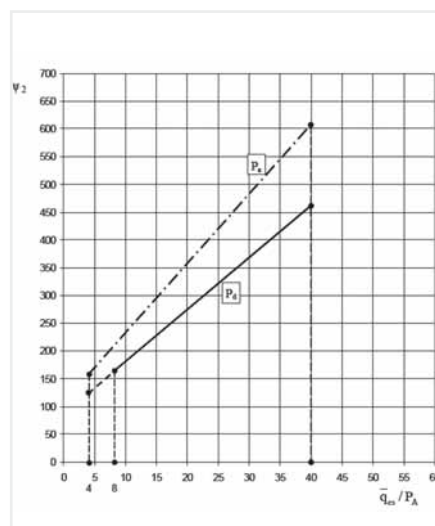
Ryc. 5. Wykres zależności ψ_1 od $\frac{\bar{q}_c}{P_A}$ dla pali Vibro, $P_A = 1,0$ MPa



Ryc. 6. Wykres zależności ψ_1 od $\frac{\bar{q}_c}{P_A}$ dla pali wierconych, $P_A = 1,0$ MPa



Ryc. 7. Zależności ψ_2 od $\frac{\bar{q}_{csi}}{P_A}$, pale Vibro, $P_A = 1,0$ MPa



Ryc. 8. Zależności ψ_2 od $\frac{\bar{q}_{csi}}{P_A}$, dla P_π i P_d , pale wiercone wielkośrednicowe, $P_A = 1,0$ MPa

3.2. Jednostkowy, graniczny opór gruntu na poboczniczy pala

Uśredniony, jednostkowy opór gruntu pod stożkiem sondy \bar{q}_{csi} określany jest w obrębie i-tej warstwy obliczeniowej według wzoru (6).

$$\bar{q}_{csi} = \frac{1}{\Delta h} \int_{h_{i-1}}^{h_i} q_c(h) \cdot dh \quad (6)$$

Wartość współczynnika nośności poboczniczy ψ_2 wyznaczono z wykorzystaniem wyników próbnych obciążeń statycznych. Przykładowe wartości ψ_2 przedstawiono na rycinach 7-9.

3.2. Określenie krzywej osiadania pala

W proponowanej metodzie do ustalenia pełnej krzywej osiadania pala w zależności od obciążenia wykorzystywane są krzywoliniowe funkcje transformacyjne opisujące zależność pomiędzy oporem na poboczniczy pala, a przemieszczeniem jego dowolnego punktu (krzywa t-z) oraz zależność pomiędzy oporem pod podstawą pala, a jej przemieszczeniem (krzywa q-z). Pełną krzywą osiadania można zbudować na podstawie znajomości funkcji t-z i q-z oraz odkształcalności własnej pala.

Dla podstawy pala przyjęto:

$$q = q_{bu} \cdot \left(\frac{z}{z_f}\right)^\beta \text{ dla } z \leq z_f \quad (7)$$

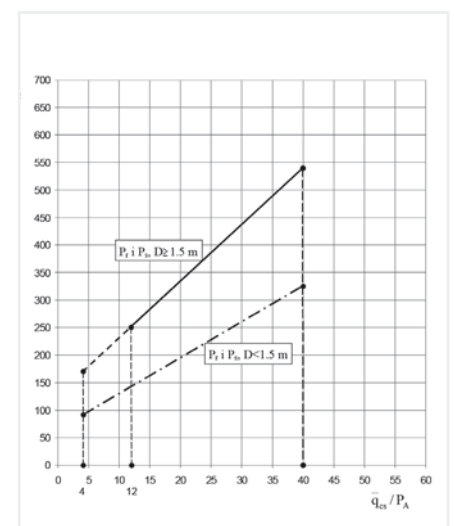
$$q = q_{bu} \text{ dla } z > z_f$$

gdzie:

q – opór podstawy

z – przemieszczenie podstawy

z_f – przemieszczenie podstawy pala, przy którym następuje mobilizacja oporów pod podstawą.



Ryc. 9. Zależności ψ_2 od $\frac{\bar{q}_{csi}}{P_A}$, dla P_r i P_s , pale wiercone wielkośrednicowe, $P_A = 1,0$ MPa

Dla poboczniczy pala przyjęto funkcję potęgową:

$$t = q_{su} \left(\frac{z}{z_v} \right)^{\mu} \quad \text{dla } z \leq z_v \quad (8)$$

$$t = q_{su} \quad \text{dla } z > z_v$$

gdzie:

- t – opór poboczniczy
- z – przemieszczenie poboczniczy
- z_v – przemieszczenie pala, przy którym następuje mobilizacja maksymalnych oporów tarcia na poboczniczy.

Założenia do metody funkcji transformacyjnych przedstawiono na rycinie 10 (patrz również Gwizdała [9]). W szczególnych obliczeniach inżynierskich wykorzystuje się także analizę statystyczną [15, 20].

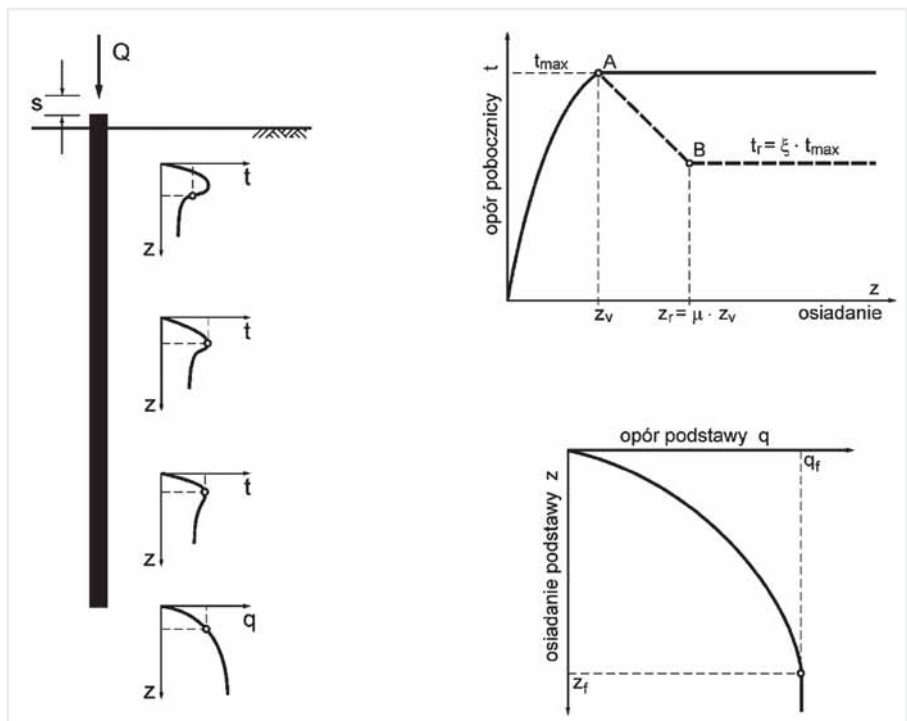
Do całości zagadnienia, w celu oceny parametrów istotnych oraz najlepszego przybliżenia do rzeczywistej krzywej osiadania, elementy analizy statystycznej są następujące:

- Estymacja parametrów
- Weryfikacja hipotez statystycznych:
 - parametrycznych (testy istotności),
 - nieparametrycznych (testy zgodności).
- Analiza regresji:
 - dobór modelu funkcji regresji,
 - szacowanie parametrów funkcji regresji.
- Analiza regresji wielokrotnej:
 - macierze współczynników korelacji par,
 - macierze korelacji cząstkowych,
 - regresja krokowa poszukiwania optymalnego modelu regresji wielokrotnej.
- Funkcje gęstości prawdopodobieństwa.

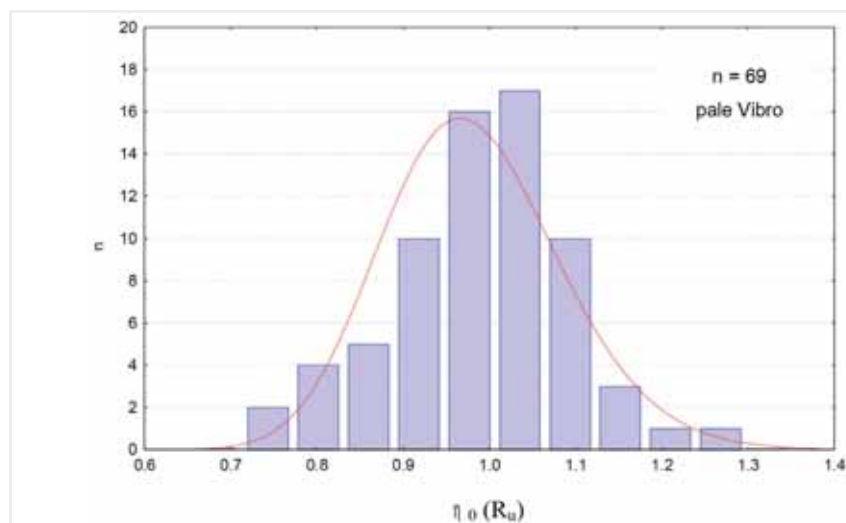
Zgodność otrzymanych wyników charakteryzuje funkcja gęstości współczynnika zgodności (ryc. 11).

Przykładowe, pełne krzywe osiadania, odpowiednio dla schematu I, II, III przedstawiono na rycinach 12–14.

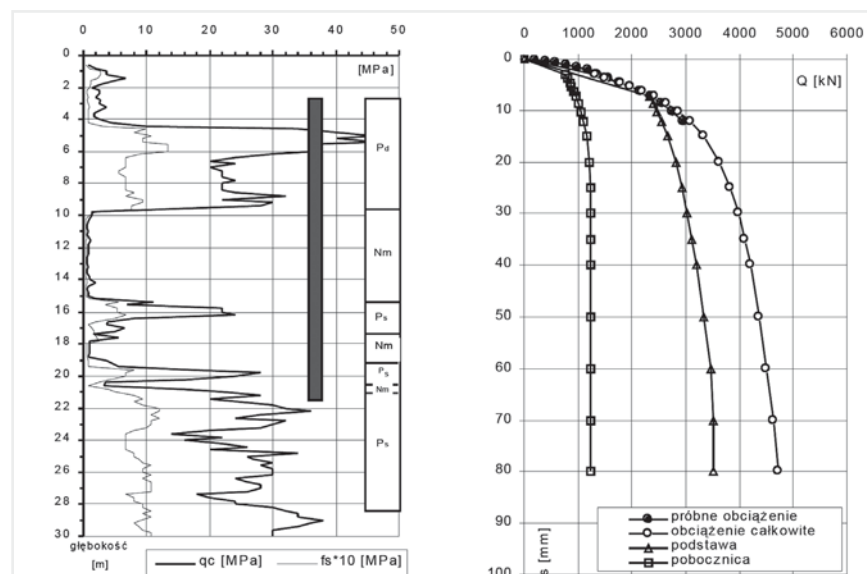
Inne podejście z zastosowaniem funkcji transformacyjnych przedstawiono w pracy [12]. Głównym parametrem decydującym o wielkości prognozowania osiadania jest moduł ścinania G lub moduł odkształcenia ogólnego E_0 ($E_0 = 2G(1 + \nu)$). Wartości modułów odkształcenia gruntów można wyznaczać na podstawie badań laboratoryjnych i/lub terenowych oraz wykorzystując empiryczne korelacje uzyskane w badaniach terenowych, np. sonda statyczna – CPT, CPTU, sonda dynamiczna – SPT, dylatometr – DMT, presjometr – PMT lub w wyniku analizy wstecznej z próbnych obciążeń pali. Szerszą analizę tego zagadnienia można znaleźć w pracy [15]. Uwzględniając silną nieliniowość modułu ścinania G od od-



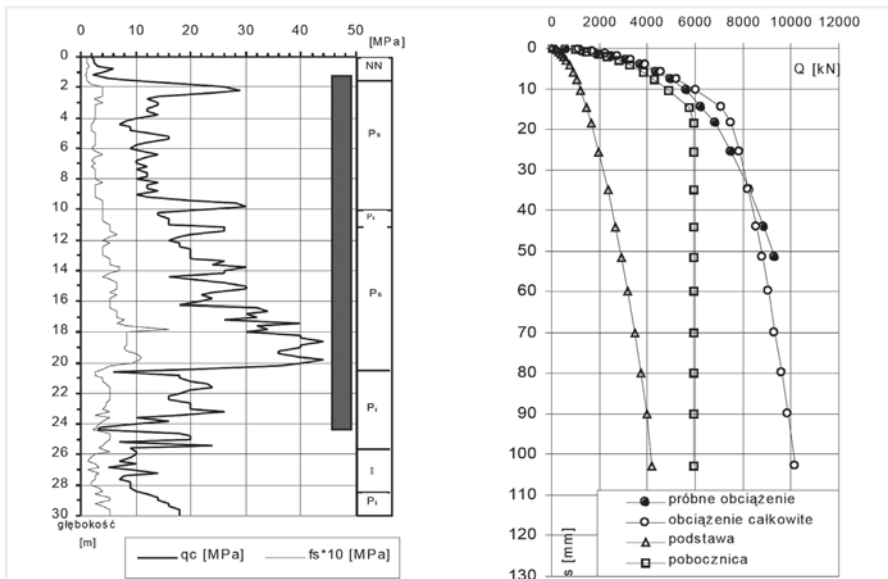
Ryc. 10. Założenia do metody funkcji transformacyjnych [9]



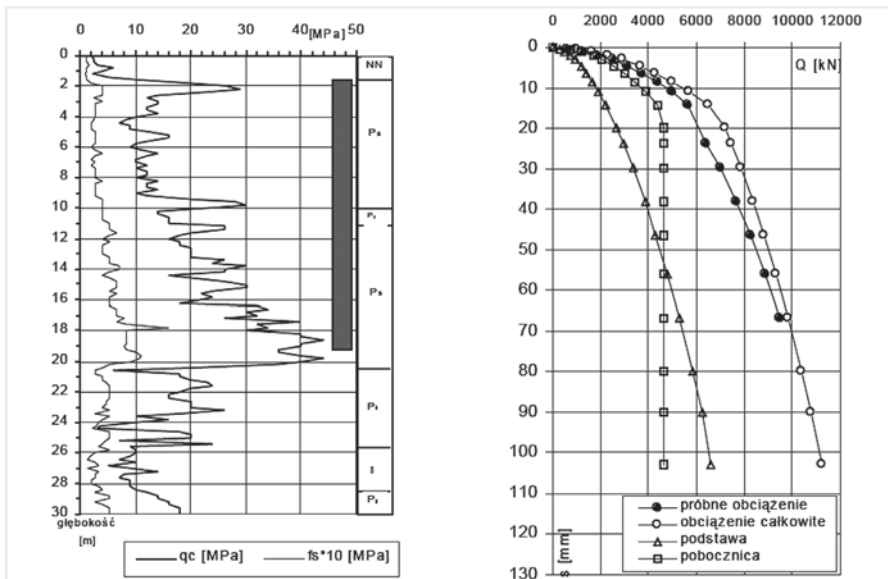
Ryc. 11. Histogram wartości współczynników zgodności η dla obciążenia granicznego, pale Vibro



Ryc. 12. Pal Vibrex, L = 18.3 m, D = 0.457 m, D_b = 0.650 m, schemat I



Ryc. 13. Pal wiercony wielkośrednicowy, L=23,1 m, D=1,5 m, schemat II



Ryc. 14. Pal wiercony wielkośrednicowy, L=17,7 m, D=1,5 m, schemat III

kształceń oraz metodę obliczeń osiadania przedstawioną w [9, 12, 15], można wykorzystać związki korelacyjne z oporami stożka sondy q_c .

W omawianej metodzie [12] uwzględniono nieliniowo sprężysto-plastyczny model pracy pala w gruncie, zależną od odkształcenia wartość modułu odkształcenia postaciowego G oraz moduł początkowy dla małych odkształceń G_{max} .

Rix i Stokoe [27], analizując piaski oraz dodatkowo grunty piaszczyste z trzech miejsc w Stanach Zjednoczonych, przedstawili dla gruntów niespoistych następującą zależność:

$$G_{max} = 1634(q_c)^{0,250} (\sigma'_{vo})^{0,375} \quad (9)$$

gdzie:

$$G_{max}, q_c, \sigma'_{vo} \text{ w kPa}$$

Analizując pomiary terenowe z 31 regionów, obejmujących USA, Kanadę,

Meksyk, Włochy, Norwegię, Szwecję, Wielką Brytanię i Grecję, Mayne i Rix sformułowali następującą zależność dla gruntów spoistych:

$$G_{max} = 2,87(q_c)^{1,335} \quad (10)$$

gdzie:

$$G_{max}, q_c, \text{ w kPa}$$

Lepszą korelację autorzy uzyskali przy dodatkowym uwzględnieniu zależności funkcyjnej ze wskaźnikiem e_0 : $G_{max} = 406(q_c)^{0,695} (e_0)^{-1,130}$.

Inny wzór, na podstawie analiz porównawczych wyników badań CPTU w terenie i pomiarów G_{max} za pomocą różnych metod (pomiarów geofizycznych w otworach, sondowanie SCPT, badania laboratoryjne w kolumnie rezonansowej i aparacie trójosiowego ściskania), przedstawili Simoni i Cola [29]:

$$G_{max} = 49,2(q_c)^{0,51} \quad (11)$$

gdzie:

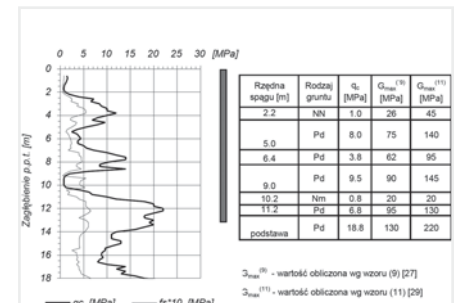
$$G_{max}, q_c, \text{ w MPa}$$

Wzór ten został opracowany dla gruntów czwartorzędowych zalegających na terenie weneckiej laguny. Profil gruntowy zbudowany jest z gruntów spoistych i niespoistych (gliny, pyły, piaski). Nieco lepsze dopasowanie tej zależności uzyskano przy uwzględnieniu wskaźnika porowatości e_0 , a najlepszą korelację uzyskano uwzględniając parametr ciśnienia porowego według Skemptona B_q (badanie CPTU).

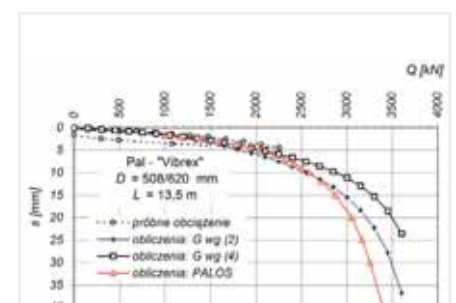
Przykładowe obliczenia przedstawiono dla pala Vibrex o średnicy trzonu $D = 508$ mm, średnicy podstawy $D_b = 620$ mm i długości 13,5 m (ryc. 15, 16). Porównanie krzywych osiadania na rycinie 16 wskazuje na dobrą zgodność obliczeń z wynikami próbnymi obciążen statycznych.

Stosowane obecnie coraz częściej pale przemieszczeniowe Atlas oraz typu Omega były analizowane w pracach [17, 18]. Wykorzystano wyniki badań sondą statyczną oraz wykonano obliczenia z zastosowaniem funkcji transformacyjnych. Przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono na rycinach 17 i 18. Dla wszystkich analizowanych krzywych osiadania uzyskano dobrą zgodność obliczeń z wynikami statycznych badań pali [17, 18].

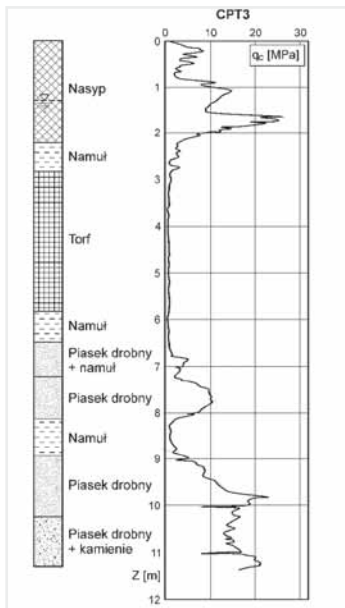
Analiza ta pozwoliła również na określenie wartości współczynników Ψ_1 oraz Ψ_2 [patrz (3) oraz (4)] dla tego rodzaju pali pod obiekty zrealizowane w kraju (ryc. 19, 20).



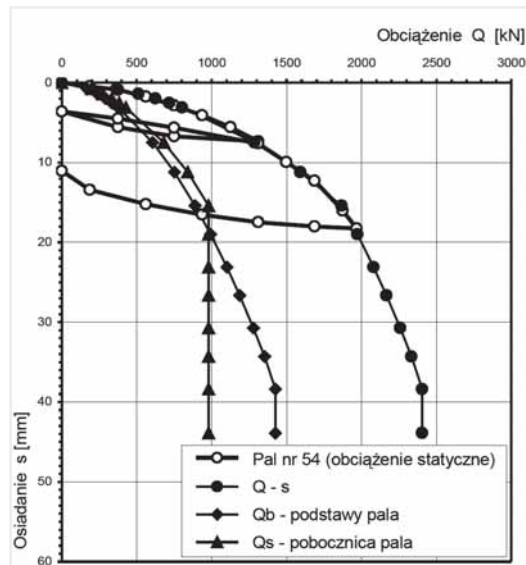
Ryc. 15. Wynik sondowania CPT w rejonie fundamentu silosów Fabryki Stodu w Gdańsku oraz profil geotechniczny i określone parametry



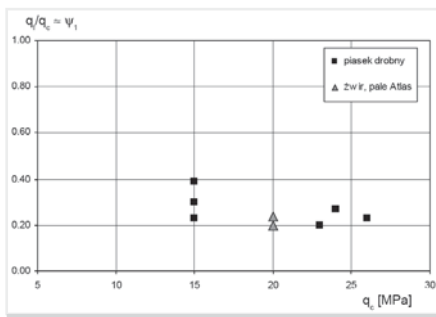
Ryc. 16. Porównanie wyników próbnego obciążenia i obliczeń krzywej osiadania dla pali pojedynczych pod silosami Fabryki Stodu



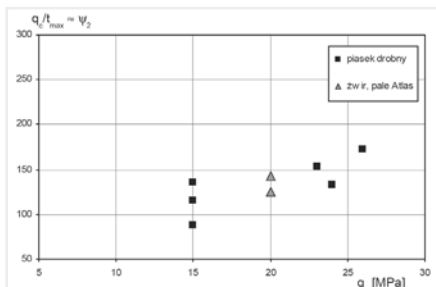
Ryc. 17. Warunki geotechniczne



Ryc. 18. Krzywe obciążenie-osiadanie dla pala Atlas nr 54 ($\phi 510/720$ mm, $L = 11,0$ m)



Ryc. 19. Zależność oporu pod podstawą pala q_f od q_c dla pali Atlas i pali typu Omega



Ryc. 20. Zależność oporu tarcia na pobocznicy od q_c dla pali Atlas i pali typu Omega

4. Podsumowanie

1. Badania terenowe in situ są bardzo przydatne do projektowania fundamentów głębokich, wciskana sonda statyczna (CPT, CPTU) jest szczególnie predysponowana dla obliczeń fundamentów palowych.

2. Przedstawione powyżej przykłady różnego wykorzystania wyników badań sondą statyczną potwierdzały możliwość zastosowania podstawowego wzoru statycznego, zawartego w PN-EN 1997-1, do obliczeń pali. Wymagana jest jednak rzetelna analiza z wykorzystaniem wyników

próbnych obciążeń pali oraz statystyczną oceną obliczeń porównawczych.

3. Należy dążyć do opracowania metod obliczeń, które pozwolą w stosunkowo prosty, ale wiarygodny dla praktyki inżynierskiej sposób obliczyć pełną krzywą osiadania. Wykazano w artykule, że wykorzystanie wyników badań terenowych sondą statyczną daje możliwość wiarygodnej oceny pełnej zależności obciążenia – osiadania.

Literatura

- Adamczyk J.: *Określenie udźwigu pali wierconych za pomocą sondy statycznej*. „Inżynieria i Budownictwo” 1978, nr 7.
- Baldi G., Bellotti R., Ghionna V.N., Jamiolkowski M., LO Presti D.C.F.: *Modulus of sands from CPT and DMT*. Proc. 12-th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro 1989. Balkema, Rotterdam, vol. 1, s. 165–170.
- Begemann H.K.: *The use of the static soil penetrometer in Holland*. „New Zealand Engineering” 1963, vol. 18, no. 2.
- Bustamante M., Giasaselli L.: *Określenie nośności pala pojedynczego na podstawie badań in situ*. „Archiwum Hydrotechniki” 1983, t. XXX, z. 1.
- Bustamante M., Giasaselli L.: *Design of Auger displacement piles from in situ tests*. *Deep Foundations on Bored and Auger Piles*. Balkema, Rotterdam 1993.
- Dyka I.: *Analiza i metoda obliczeń osiadania grupy pali*, praca doktorska. Politechnika Gdańska, czerwiec 2001.

- Frank R.: *Designers' Guide to en 1997-1 Eurocode 7. Geotechnical Design – General Rules*. Thomas Telford.
- Gwizdała K.: *Large diameter bored piles in non-cohesive soils. Determination of the bearing capacity and settlement from results of static penetration test (CPT) and standard penetration test (SPT)*. Swedish Geotechnical Institute, Report no 26, 1984.
- Gwizdała K.: *Analiza osiadań pali przy wykorzystaniu funkcji transformacyjnych*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Budownictwo Wodne” 1996, t. XLI.
- Gwizdała K.: *Wykorzystanie badań in situ do oceny nośności pali wielkośrednicowych*. Konferencja Naukowo-Techniczna: Mosty w drodze do XXI wieku. Gdańsk-Jurata, 3–5 września 1997.
- Gwizdała K.: *Projektowanie fundamentów na palach*. Materiały XX Jubileuszowej Ogólnopolskiej Konferencji: Warsztat pracy projektanta konstrukcji. Wisła – Ustroń, marzec 2005.
- Gwizdała K., Dyka I.: *Analizy i metoda prognozowania krzywej osiadania pala pojedynczego*. „Inżynieria i Budownictwo” 2001, s. 729–733.
- Gwizdała K., Dyka I.: *Osiadanie dużych grup palowych, obliczenia i pomiary terenowe*. Materiały II Problemowej Konferencji Geotechniki: Współpraca budowlanej z podłożem gruntowym. Białystok – Białowieża, czerwiec 2004.
- Gwizdała K., Dyka I.: *Osiadanie pali i fundamentów palowych*. Materiały Seminarium: Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych. Gdańsk, czerwiec 2004.
- Gwizdała K., Dyka I., Stępczński M.: *Sondowanie statyczne w projektowaniu fundamentów palowych*. XLVIII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB. Krynica 2002.
- Gwizdała K., Krasiński A., Brzozowski T.: *Experience gained at the Application of Atlas piles in Poland*. 10th International Conference on Piling and Deep Foundations, Amsterdam, June 2006.
- Gwizdała K., Krasiński A., Brzozowski T.: *The assessment of load-settlement curve for Atlas piles correlated with CPT tests*. Proceedings of International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger piles, BAP V. Ghent 2008.
- Gwizdała K., Krasiński A.: *Zastosowanie przemieszczeniowych pali wkręcanych w podłożu uwarstwowionym na przykładzie realizacji obiektu w warunkach*

- gruntowych delty Wisły. „Inżynieria i Budownictwo” 2009, nr 3.
19. Gwizdała K., Stęczniewski M.: *Charakterystyka metod określania nośności pali przy wykorzystaniu sondy statycznej CPT*. „Inżynieria Morska i Geotechnika” 1998, nr 6.
 20. Gwizdała K., Stęczniewski M.: *Obliczanie nośności pali na podstawie wyników badań sondą CPT*. XLIV Konferencja Naukowa. Krynica 1998.
 21. Kłos J.: *Obliczanie nośności pojedynczego pala na podstawie wyników sondowań statycznych*. „Inżynieria Morska” 1983, nr 3.
 22. Kościak P., Sukow J., Gwizdała K.: *Pale wkręcane ATLAS*. Materiały XX Jubileuszowej Ogólnopolskiej Konferencji: Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji. Wisła – Ustroń, marzec 2005.
 23. Krasieński A., Gwizdała K.: *Doświadczenia ze stosowania pali wkręcanych Atlas*. Materiały Konferencji Naukowej KILiW PAN i PZITB. Krynica 2007.
 24. Meyerhof G.G.: *Compaction of Sands and Bearing Capacity of Piles*. Proc. Amer. Society of Civ. Eng. Journal Soil Mech. Found 1959, Div. 85, SM 6.
 25. Mohan D. et al.: *Load Bearing Capacity of Piles*. “Geotechnique” 1963, vol. 13.
 26. *Nośność i osiadanie fundamentów palowych*. Praca zbiorowa. Monografia, Politechnika Gdańska, Katedra Geotechniki, 2001.
 27. Rix G.J., Stokoe K.H.: *Correlation of Initial Tangent Modulus and Cone Penetration Resistance. Coliabrlation Chamber Testing, proc. ISOCCT-1*. A.B. Huang (ed.). Elsevier Publishing. New York 1991, s. 351–362.
 28. Senneset K.: *Penetration Testing in Norway. State of the Art Report*. Proc. Europ. Symp. on Penetration Testing. Stockholm 1974.
 29. Simonini P., Cola S.: *Use of Piezocone to Predict Maximum Stiffness of Venetian Soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, April 2000, s. 378–382.
 30. Tassios T.: *Penetration Testing in Greece. State of the Art Report*. Proc. Europ. Symp. on Penetration Testing. Stockholm 1974.
 31. Van der Veen C., Boersma L.: *The Bearing Capacity of a Pile Predetermined by a Cone Penetration Test*. Proc. 4 Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Zurich 1957.
 32. Van Impe W.F.: *Screw piling: still a challenging discussion topic*. Proceedings of International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger piles. Ghent 2003, s. 3–8.
 33. Wiłun Z.: *Zarys geotechniki*. WKiŁ. 1987.
 34. *Design of Axially Loaded Piles European Practice. Reports of different countries*. Proceedings of the ERTC3 Seminar Brussels, Belgium, 17–18 April 1997.
 35. *Instrukcja przewidywania nośności pali w oparciu o badania presjometryczne i sondowania statyczne*. Centralny Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Budownictwa Hydrotechnicznego ENERGOPOL. Warszawa 1979.
 36. PN-EN 1997-1:2005. *Eurokod 7, Projektowanie geotechniczne*. PKN. Warszawa 2005.
 37. EN1997-2:2007. *Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża*.
 38. PN-83/B-02482. *Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych*.

REFERAT ZOSTAŁ WYGŁOSZONY NA SEMINARIUM FUNDAMENTY PALOWE 2009 ORAZ WYDRUKOWANY W MATERIAŁACH KONFERENCYJNYCH

R E K L A M A

ZABEZPIECZANIE GŁĘBOKICH WYKOPÓW

- Ścianki szczelne
- Ścianki berlińskie
- Palisady z pali żelbetowych
- Kotwy gruntowe

FUNDAMENTOWANIE POŚREDNIE

- Pale wiercone CFA
- Pale wiercone w rurze obsadowej
- Pale wbijane

WWW.GOLLWITZER.PL

Gollwitzer Polska Sp. z o.o.

ul. Jaworska 6, 53-612 Wrocław

tel: +48 71 787 97 57, fax: +48 71 787 97 58

e-mail: biuro@gollwitzer.pl

ZAPEWNIAMY INNOWACYJNE, PROFESJONALNE I PRZYJAZNE DLA OTOCZENIA TECHNOLOGIE