

Charakterystyka badań i metod projektowania pali przemieszczeniowych wkręcanych

Dr inż. Adam Krasieński, mgr inż. Tomasz Kusio
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Technologia pali przemieszczeniowych wkręcanych na polskim rynku usług geotechnicznych jest stosunkowo nowa i ciągle znajduje się na etapie rozwoju. Skłoniło to autorów artykułu do przeanalizowania stanu wiedzy na temat tego rodzaju pali oraz zebrania doświadczeń badawczych i praktycznych z nimi związanych. Autorzy liczą, że informacje zawarte w pracy poszerzą wiedzę dotyczącą rozpatrywanej technologii palowania i przyczynią się do dalszego jej rozwoju w naszym kraju.

CHARAKTERYSTYKA PRACY PALI PRZEMIESZCZENIOWYCH WKREĆANYCH W GRUNCIE

Pale przemieszczeniowe wkręcane wykonywane są za pomocą świdra, który w czasie wkręcania w podłoże przemieszcza grunt na boki bez wydobywania go na powierzchnię. W efekcie następuje dogęszczenie i naprężenie gruntu wokół pala, co zasadniczo odróżnia tę technologię pali od różnych rodzajów pali wierconych. Niektóre rodzaje świerców do wykonywania pali przemieszczeniowych wkręcanych przedstawiono na rys. 1.

Z badań wynika, że praca pali przemieszczeniowych wkręcanych w gruncie polega na dużym udziale pobocznic w przenoszeniu obciążeń. Jest to efektem wspomnianego wyżej naprężenia i dogęszczenia gruntu, które występuje głównie wokół pobocznic, a także, lecz w mniejszym stopniu, pod podstawą pala. Większa nośność pali przemieszczeniowych wkręcanych w stosunku do pali wierconych o podobnych parametrach geometrycznych, wynika zatem z większej nośności pobocznic.

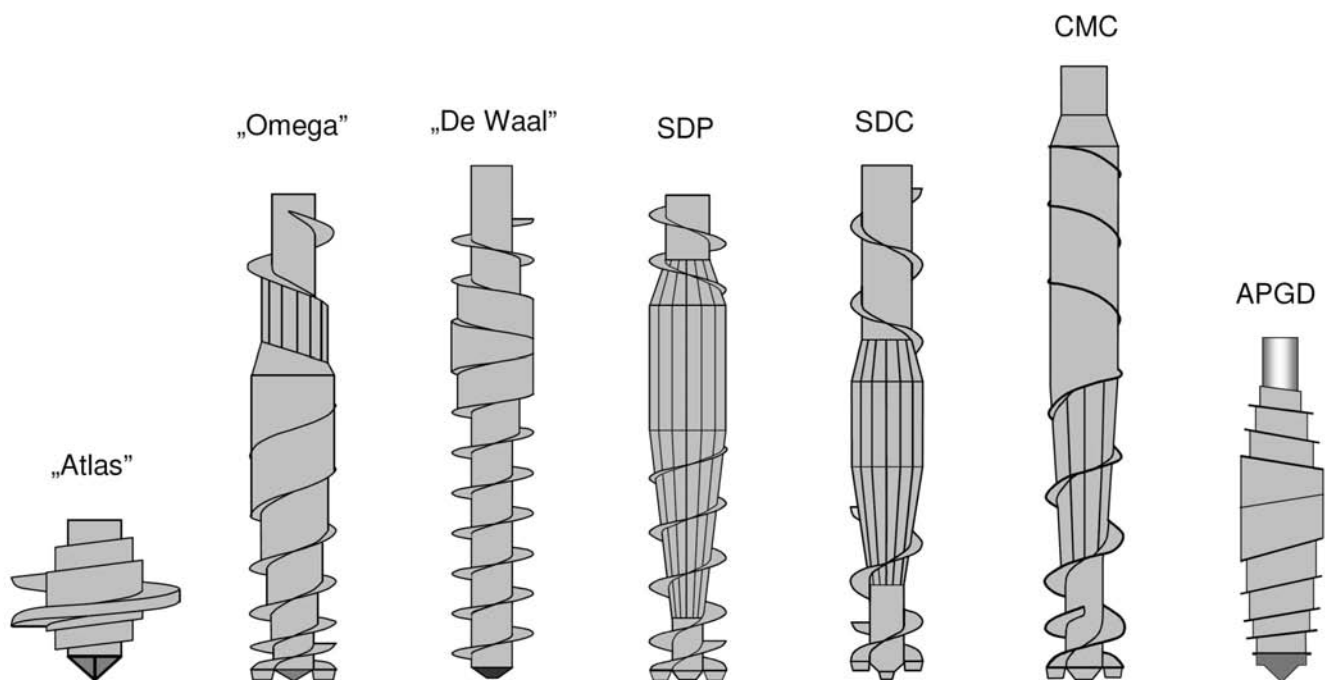
Szczegóły technologiczne różnych odmian pali przemieszczeniowych wkręcanych opisano już w wielu pozycjach literatury, między innymi w pracach [1, 8 ÷ 12, 22].

PRZEGLĄD DOTYCHCZASOWYCH BADAŃ PALI PRZEMIESZCZENIOWYCH WKREĆANYCH

Na świecie wykonano już dużą liczbę badań terenowych [4, 11 ÷ 20, 22] oraz badań modelowych pali przemieszczeniowych wkręcanych, tworząc odpowiednie bazy danych wyników takich badań [7].

Badania Bustamante i Ganeselliego

Wymienieni badacze, jako jedni z pierwszych, zajęli się tematyką pali przemieszczeniowych wkręcanych. Przeanalizowali wyniki własnych i obcych badań 26 pali „Atlas” [4] oraz kilku pali „De Waal”, „Omega” i „Spire” [5], zebranych z 22 poletek doświadczalnych. Badania nośności pali wykonywano metodą próbnych obciążeń statycznych, które przeprowadzano według zaleceń francuskich, belgijskich lub zaleceń międzynarodowych ISSMFE [26]. W większości przypadków obciążenia pali doprowadzano do osiągnięcia osiadań równych 10% średnicy pala. W pozostałych przypadkach krzywe obciążenie-osiadanie ekstrapolowano do wartości osiadań równych 10% średnicy pala. Część badań pali wykonano z oprzyrządowaniem do pomiaru



Rys. 1. Wybrane rodzaje świerców do wykonywania pali i kolumn przemieszczeniowych wkręcanych

rozkładu siły osiowej w palu. Należy tu wspomnieć, że Bustamante i Gianceselli byli jednymi z pierwszych, którzy w badaniach nośności pali zastosowali pomiary rozkładu siły wzdłuż trzonu, realizowane za pomocą układu czujników ekstensometrycznych [3].

Badania pali przeprowadzono w powiązaniu z badaniami *in situ* podłoża gruntowego za pomocą presjometru Menarda PMT, sondowań statycznych CPT oraz, w niektórych przypadkach, sondowań dynamicznych SPT.

Na podstawie wyników badań, z których większość dotyczyła pali „Atlas”, sformułowano wnioski dotyczące charakteru pracy w gruncie pali przemieszczeniowych wkręcanych [5], stwierdzając, że:

- wykazują one dużą nośność nawet przy niewielkim zagłębieniu w gruntach nośnych,
- charakteryzują się dużą sztywnością we współpracy z gruntem, zbliżoną do pali wbijanych,
- pełna mobilizacja oporów tarcia na pobocznicę następuje przy zróżnicowanych przemieszczeniach trzonów pali, w przedziale od 2 do 15 mm.

Bustamante i Gianceselli opracowali również metodę projektowania pali przemieszczeniowych wkręcanych, przedstawioną w dalszej części.

Badania belgijskie

W Belgii prowadzi się od lat szeroko zakrojone prace badawcze nad różnymi nowymi technologiami pali. W latach 1998-2002 zrealizowano tam dwa duże projekty badawcze dotyczące pali przemieszczeniowych wkręcanych: projekt Sint-Katalijne-Waver [14] dotyczący pali zagłębionych w gruntach spoistych i projekt Limelette [15] dotyczący pali zagłębionych w grun-

tach niespoistych. Nazwy projektów pochodzą od nazw miejscowości, w pobliżu których zorganizowano terenowe poletki doświadczalne. W ramach projektów wykonano szereg badań statycznych metodą balastową, badań dynamicznych i kinetycznych nośności pali przemieszczeniowych wkręcanych wykonanych różnymi technologiami („Atlas”, „Omega”, „Fundex”, „De Waal” i „Olivier”), powiązanych z obszernymi badaniami *in situ* podłoża gruntowego (CPT, DMT, PMT, SPT).

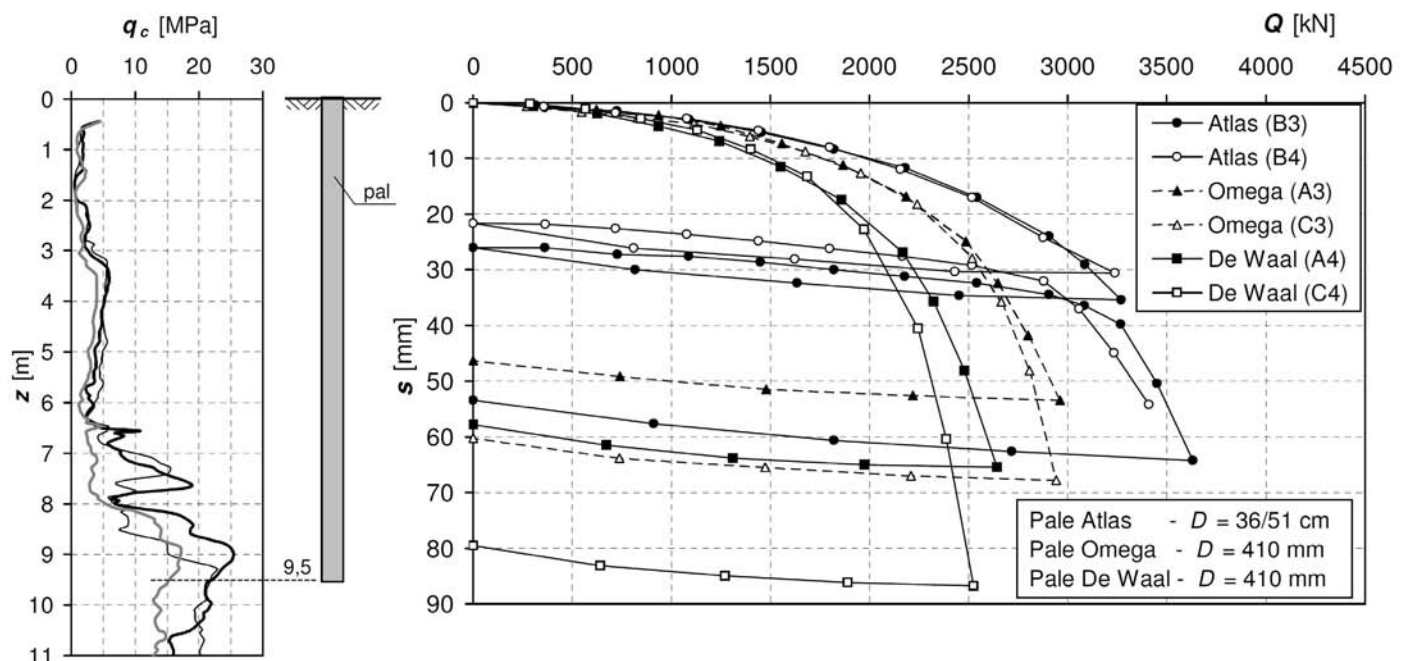
Wszystkie badania pali wykonywane metodą próbnych obciążeń statycznych przeprowadzono z pomiarem rozkładu siły osiowej wzdłuż pali z użyciem zestawu czujników strunowych. Pale obciążano aż do osiągnięcia osiadań głowicy równych co najmniej 10% średnicy pala.

Na rys. 2 przedstawiono porównawcze zestawienie wykresów $Q-s$ z badań statycznych nośności pali „Atlas”, „Omega” i „De Waal” wykonanych w projekcie badawczym Limelette. Porównawcze pale wykonano o jednakowej długości $L = 9,5$ m, blisko siebie, w bardzo podobnych warunkach gruntowych (zobacz wykresy przykładowych sondowań CPT na rys. 2). Maksymalna odległość między badanymi palami nie przekraczała 15 m. Najkorzystniej przedstawiają się wyniki badań pali „Atlas”, a najmniej korzystnie – pali „De Waal”.

Na podstawie wyników badań zrealizowanych w ramach opisanych projektów badawczych oraz wyników wielu innych badań pali przemieszczeniowych wkręcanych w Belgii opracowano metodę projektowania tego rodzaju pali, opisaną w dalszej części.

Badania amerykańskie

W USA badania terenowe pali przemieszczeniowych wkręcanych prowadził między innymi NeSmith [21]. Dotyczyły one pali wykonywanych świdrem APGD (rys. 1). Łącznie przeanaliz-



Rys. 2. Wykresy $Q-s$ z badań statycznych nośności pali „Atlas”, „Omega” i „De Waal” z wykresami sondowań CPT, wykonanych na polu badawczym Limelette (Belgia), [15]

Tabl. 1. Opis warunków gruntowych na poletkach badawczych NeSmitha, [21]

Liczba poletek doświadczalnych	Główne cechy geologiczne
7	Piaski od luźnego do zagęszczonego z domieszkami żwiru, różnoziarnisty, czysty z niewielką zawartością frakcji pylastych i ilastych
5	Piaski luźne średnio zapyłone i zailone
5	Piaski zagęszczone i bardzo zagęszczone, jednorodne, czyste
3	Piaski pylaste luźne i pyły piaszczyste,
1	Piaski luźne i średnio zagęszczone z drobnym żwirem, czyste, równoziarniste
1	Piaski luźne i średnio zagęszczone zapyłone i zailone
3	Piaski pylaste i piaski zaglinione średnio zagęszczone do bardzo zagęszczonych

zował wyniki 40 próbnych obciążeń statycznych pali z 25 poletek doświadczalnych. Zestawienie w tabl. 1 dotyczy pali zagłębionych w warstwach nośnych z gruntów niespoistych.

Badane pale miały średnice od 0,36 m do 0,46 m (większość 0,41 m) oraz różne długości – od 6 do 21 m. Piętnaście próbnych obciążeń pali przeprowadzono z pomiarem rozkładu siły osiowej wzdłuż pali za pomocą ekstensometrów.

W przypadkach, w których próbnych obciążeń nie przeprowadzono do osiągnięcia nośności granicznej pala, wykresy obciążenie-osiadanie ekstrapolowano metodą opisaną przez China [6]. Propozycję China wykorzystano również do określenia rozdziału obciążenia na pobocznicy i podstawę pala w przypadkach, w których nie prowadzono pomiarów ekstensometrycznych.

NeSmith zaobserwował, że pale przemieszczeniowe wkręcane zagłębione w gruntach niespoistych czystych (o małej zawartości frakcji pylastej i ilastej), różnoziarnistych i o nieregularnych kształtach ziaren wykazują wyższe opory podstawy i poboczniczy niż pale zagłębione w innych gruntach niespoistych. Po oszacowaniu ilościowym uwzględnił ten fakt w opracowanej przez siebie metodzie projektowania pali przemieszczeniowych wkręcanych.

Badania polskie

W Polsce pale przemieszczeniowe wkręcane zaczęto stosować w drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych XX wieku. Jako pierwsze na rynku pojawiły się pale „Atlas” [12, 22], następnie pale FDP, SDP, „De Waal” oraz kolumny SDC i CMC. W ciągu ostatnich kilkunastu lat zrealizowano w Polsce wiele inwestycji budowlanych z wykorzystaniem pali przemieszczeniowych wkręcanych. Wykonano również szereg badań nośności tego rodzaju pali. Były to badania przeprowadzane głównie w ramach procedur odbiorowych poszczególnych budów i wymogów stawianych przez odpowiednie normy. Mimo to, uzyskane wyniki i poczynione obserwacje dostarczyły wielu danych i informacji o charakterze poznawczym oraz uwidoczniły kilka zagadnień i problemów wymagających dokładniejszych analiz. Szczegółowe wyniki opisywanych badań i sformułowane na ich podstawie wnioski zamieszczono w kilku pozycjach literatury, między innymi w [12, 13, 16–18].

Doświadczenia zebrane z wykonawstwa oraz z badań pali przemieszczeniowych wkręcanych w Polsce pozwoliły na sformułowanie kilku następujących wniosków:

1. W czasie wykonywania pali przemieszczeniowych wkręcanych w gruntach niespoistych występują duże opory gruntu podczas zagłębiania świrdrów. Pokonanie tych oporów wymaga stosowania wiertnic palowych o dużym momencie obrotowym. Zagadnienie dużych oporów gruntu przy wykonawstwie powinno być uwzględniane w projektowaniu pali, przy określaniu ich średnic i długości.
2. Duże opory wkręcania świrdra w czasie wykonywania pala przemieszczeniowego często nie oznaczają dużej nośności pala. W tym przypadku nie może być zastosowana analogia do pali wbijanych.
3. Pale przemieszczeniowe wkręcane charakteryzują się większą podatnością w gruncie niż pale wbijane (zbliżoną bardziej do pali wierconych). Wynika to bezpośrednio z techniki wykonywania pali i działania świrdrów, które w czasie pograżania rozpierają grunt głównie na boki wokół poboczniczy, a w małym stopniu w dół pod podstawę pala, w przeciwieństwie do technologii pali wbijanych.
4. Pomimo charakterystyki pracy podobnej do pali wierconych, pale przemieszczeniowe wkręcane osiągają większe nośności niż pale wiercone o zbliżonych parametrach geometrycznych. Mało jest jednak doświadczeń porównawczych dla obu rodzajów pali, wykonanych obok siebie lub w podobnych warunkach gruntowych.
5. Tradycyjne metody projektowania pali, a głównie obliczania ich nośności (np. według PN-83/B-02482), nie są odpowiednie do pali przemieszczeniowych wkręcanych. Miarodajne metody projektowania tego rodzaju pali powinny opierać się bezpośrednio na wynikach badań *in situ* podłoża gruntowego – CPT(U) lub PMT.

W latach 2009-2011 zrealizowano w Politechnice Gdańskiej projekt badawczy dotyczący pali przemieszczeniowych wkręcanych (Nr N N506 432936), finansowany przez MNiSW. W ramach projektu wykonano między innymi na kilku terenowych poletkach doświadczalnych badania ponad 20 pali i kolumn wykonanych w technologii CMC, SDP i SDC w powiązaniu z ba-

daniami podłoża gruntowego metodą CPTU. Badania nośności pali przeprowadzano metodą próbnych obciążeń statycznych z pomiarem rozkładu siły wzdłuż pali za pomocą układu czujników ekstensometrycznych o konstrukcji strunowej. Rezultaty zakończonego projektu badawczego szczegółowo zebrano i opisano w sprawozdaniu końcowym [17]. Wybrane wyniki badań wykonanych w ramach tego projektu opublikowano również w pracach [16, 18]. W efekcie prac badawczych i analiz powstała między innymi autorska metoda projektowania pali przemieszczeniowych wkręcanych na podstawie wyników badań CPT podłoża gruntowego, której założenia i opis zamieszczono między innymi w [17 i 19].

METODY OBLICZANIA NOŚNOŚCI PALI PRZEMIESZCZENIOWYCH WKRĘCANYCH

Dostępne w literaturze metody projektowania pali przemieszczeniowych wkręcanych mają głównie charakter empiryczny i opierają się bezpośrednio na wynikach badań *in situ* podłoża gruntowego. Jedyną metodą opracowaną na podstawie analiz teoretycznych z wykorzystaniem MES, opierającą się na klasycznych parametrach gruntu (głównie na stopniu zagęszczenia I_p) jest propozycja Basu i Prezzi [1], która jednak ogranicza się tylko do obliczania nośności pobocznic. W dalszej części pracy scharakteryzowano metody empiryczne.

Metoda LCPC

Metodę LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) projektowania pali przemieszczeniowych wkręcanych została opracowana przez Bustamante i Gianeselli na podstawie wyników wcześniej opisanych badań.

Nośność graniczną podstawy pała, odpowiadającą osiadaniu o wartości 10% średnicy, oblicza się z wzoru:

$$R_{b,u} = K \cdot A_b \cdot \alpha \quad (1)$$

gdzie:

K – współczynnik bezwymiarowy zależny od rodzaju gruntu i rodzaju badania podłoża gruntowego *in situ* (tabl. 2),

A_b – pole powierzchni podstawy pała, obliczane na podstawie nominalnej średnicy świdra formującego,

α – wartość oporu wynikająca ze stanu gruntu i związana z uśrednioną wartością wyniku badania *in situ* w strefie wpływu podstawy pała, sięgającej od wysokości a powyżej poziomu podstawy do głębokości a poniżej poziomu podstawy (tabl. 3).

Nośność graniczną pobocznic w i -tej warstwie gruntu oblicza się z wzoru:

$$R_{s,u} = q_{s,i} \cdot A_s \quad (2)$$

$q_{s,i}$ – jednostkowy opór na pobocznicę w i -tej warstwie gruntu wyznaczany na podstawie krzywych projektowych (rys. 3) i zgodnie z tabl. 4,

A_s – pole powierzchni pobocznic w i -tej warstwie gruntu, obliczane na podstawie średnicy nominalnej świdra formującego (w przypadku pali „Atlas” przyjmuje się średnicę zewnętrzną świdra, zredukowaną o 10%).

Autorzy metody zaproponowali ogólny współczynnik bezpieczeństwa równy 2,0, przy którym wyznacza się obliczeniową nośność pała:

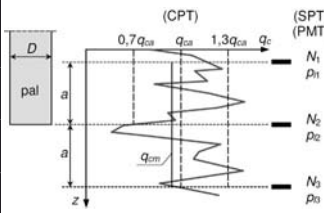
$$R_{c,d} = R_{b,u} / 2 + R_{s,u} / 2 \quad (3)$$

Tabl. 2. Wartości współczynnika K w zależności od rodzaju gruntu i badania *in situ* [4]

Rodzaj gruntu	Badanie <i>in situ</i>		
	PMT	CPT	SPT
Il	1,6 ÷ 1,8	0,55 ÷ 0,65	0,9 ÷ 1,2
Piasek	3,6 ÷ 4,2	0,50 ÷ 0,75	1,8 ÷ 2,1
Żwir	≥ 3,6	≥ 0,5	–
Margiel	2,0 ÷ 2,6	≥ 0,7	≥ 1,2
Kreda	≥ 2,6	≥ 0,6	≥ 2,6

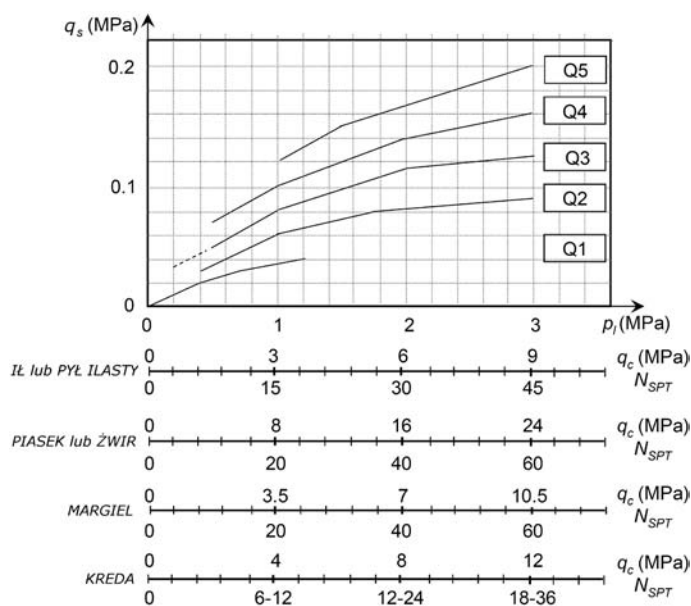
Tabl. 3. Wartości parametru α oraz wymiaru a w zależności od badania *in situ* [4]

Badanie <i>in situ</i>	α [MPa]	a
SPT	$1000 \cdot \sqrt[3]{N_1 \cdot N_2 \cdot N_3}$	0,5 m
CPT	Wartość średnia q_{cm}	1,5D
PMT	$\sqrt[3]{p_{l1} \cdot p_{l2} \cdot p_{l3}}$	0,5 m



Tabl. 4. Tabela do wyboru krzywej projektowej na rys. 3 [4]

Rodzaj gruntu	p_1 (MPa)	q_c (MPa)	Wykresy
Il / pył ilasty / il piaszczysty	< 0,3	< 1,0	Q1
	> 0,5	> 1,5	Q3
	≥ 1,0	≥ 3,0	Q4
Piasek / żwir	< 0,3	< 1,0	Q1
	> 0,5	> 3,5	Q4
	≥ 1,2	> 8,0	Q5
Margiel	< 1,2	< 4,0	Q4
	≥ 1,5	≥ 5,0	Q5
Kreda	> 0,5	> 1,5	Q4
	≥ 1,2	> 4,5	Q5



Rys. 3. Krzywe do obliczania jednostkowych oporów tarcia gruntu na pobocznicę pała, [4]

Metoda belgijska

W belgijskiej metodzie projektowania pali przemieszczeniowych wkręcanych [14, 15, 23, 24, 25] nośność graniczną podstawy pala oblicza się z wzoru:

$$R_{b;u} = \alpha_b \cdot \varepsilon_b \cdot \lambda \cdot A_b \cdot q_b \quad (4)$$

gdzie:

q_b – jednostkowy opór gruntu pod podstawą pala, określany na podstawie reprezentatywnej wartości oporu stożka $q_{c,b}$ w strefie wokół podstawy pala; wartość $q_{c,b}$ oblicza według propozycji De Beera [2] lub Van Impe i De Beera [24], bądź według zaleceń NEN 6743 [27],

α_b – empiryczny współczynnik przyjmowany według tabl. 5,

ε_b – współczynnik dla zwartych iłów trzeciorzędowych, przyjmowany z zależności:

$$\varepsilon_b = \max \left\{ 1 - 0,01 \cdot \left(\frac{D_b}{d_{CPT}} - 1 \right); 0,476 \right\} \quad (5)$$

a dla pozostałych gruntów $\varepsilon_b = 1,0$;

λ – współczynnik stosowany do pali Fundex, który należy przyjmować w zależności od stosunku średnicy podstawy D_b pala, równej średnicy traconego ostrza świdra, do średnicy pobocznic D_s , równej średnicy rury osłonowej:

$\lambda = 1,0$ dla $(D_b/D_s)^2 \leq 1,5$

$\lambda = 1,0 - 0,429 \cdot [(D_b/D_s)^2 - 1]$ dla $1,5 < (D_b/D_s)^2 \leq 1,7$

$\lambda = 0,7$ dla $(D_b/D_s)^2 > 1,7$

w przypadku pozostałych pali przyjmuje się $\lambda = 1,0$,

A_b – pole powierzchni podstawy pala, wynikające ze średnicy nominalnej świdra.

Nośność graniczną pobocznic pala oblicza się z wzoru:

$$R_{s;u} = \sum (\alpha_{s,i} \cdot A_{s,i} \cdot q_{s,i}) \quad (6)$$

Tabl. 5. Wartości współczynników α_b oraz $\alpha_{s,i}$ w zależności od rodzaju gruntu i technologii pala [25]

Rodzaj pala	α_b		$\alpha_{s,i}$	
	Trzeciorzędowe iły	Inne grunty	Trzeciorzędowe iły	Inne grunty
Pal betonowy w gruncie	0,8	0,7	0,9	1,0
Pal wkręcany z trzonem z rury stalowej	0,8	0,8	0,6	0,6

Tabl. 6. Wartości $q_{s,i}$ w zależności od rodzaju i parametrów gruntu [25]

Rodzaj gruntu	$q_{c,i}$ [MPa]	$q_{s,i}$ [MPa]
Iły	1 ÷ 4,5	0,033 · $q_{c,i}$
	> 4,5	0,150
Pyły	1 ÷ 6	0,0167 · $q_{c,i}$
	> 6	0,100
Iły piaszczyste, Pyły piaszczyste, Piaszki zailone i zapyłone	1 ÷ 10	0,0125 · $q_{c,i}$
	> 10	0,125
Piaszki pylaste, Piaszki drobne, Piaszki średnie	1 ÷ 10	0,0111 · $q_{c,i}$
	10 ÷ 20	0,110 + 0,004 · ($q_{c,i} - 10$)
	> 20	0,150

gdzie:

$A_{s,i}$ – powierzchnia pobocznic pala w warstwie i , obliczona na podstawie nominalnej średnicy świdra formującego,

$\alpha_{s,i}$ – empiryczny współczynnik przyjmowany według tabl. 5,

$q_{s,i}$ – jednostkowy opór gruntu wzdłuż pobocznic pala w warstwie nośnej i określany na podstawie uśrednionej wartości oporu stożka sondy CPT w przeliczeniu na grubość warstwy (tabl. 6).

Wartość obliczeniową nośności całkowitej pala oblicza się z wzoru:

$$R_{c;d} = R_{c;k} / \gamma_{Rd} = R_{b;k} / \gamma_{Rd} + R_{s;k} / \gamma_{Rd} \quad (7)$$

Autorzy metody zaproponowali współczynnik bezpieczeństwa jednakowy do oporu podstawy i pobocznic $\gamma_{Rd} = 1,45$. W propozycjach Eurokodu 7 podaje się zwykle różne wartości współczynników częściowych do nośności podstawy i nośności pobocznic. Zamieszczone są jednak tabele współczynników tylko do pali wbijanych, wierconych i CFA, a nie ma propozycji do pali przemieszczeniowych wkręcanych.

Metoda amerykańska

Metodę opracował NeSmith na podstawie wyników wcześniej opisanych badań i dotyczy ona pali zagłębionych w gruntach niespoistych.

Wartość jednostkowego oporu granicznego gruntu pod podstawą pala oblicza się z zależności:

– przy obliczaniu na podstawie sondowań CPT

$$q_b = 0,4 \cdot q_{cm} + w_t, \text{ przy spełnieniu warunku: } q_{cm} \leq 19 \text{ MPa} \quad (8)$$

– przy obliczaniu na podstawie sondowań SPT

$$q_b = 0,19 \cdot N_m + w_t, \text{ przy spełnieniu warunku: } N_m \leq 50 \quad (9)$$

gdzie:

q_{cm}, N_m – reprezentatywne wartości oporu stożka q_c w badaniu CPT oraz liczby uderzeń bijaka N w badaniu SPT w strefie od $4D_b$ powyżej podstawy pala do $4D_b$ poniżej podstawy pala, określane według [8],

w_t – stała zależna od zawartości frakcji drobnych i kształtu ziaren w gruncie (tabl. 7),

Tabl. 7. Wartość składnika w_t w zależności od uziarnienia gruntu [21]

Grunty niespoiste z ziarnami o obłych kształtach zawierające od 10% do 40% frakcji pylastych i ilastych	Grunty niespoiste różnoziarniste z ziarnami o nieregularnych kształtach, zawierające mniej niż 10% frakcji pylastych i ilastych
$w_t = 0$ MPa	$w_t = 1,34$ MPa
$q_b \leq 7,2$ MPa	$q_b \leq 8,62$ MPa
Dla gruntów pośrednich wartości w_t przyjmujemy na podstawie interpolacji	

Jednostkowy opór graniczny gruntu wzdłuż pobocznic dla i -tej warstwy geotechnicznej oblicza się z zależności:

– przy projektowaniu na podstawie sondowań CPT

$$q_{s,i} = 0,01 \cdot q_{ci} + w_s, \text{ przy spełnieniu warunku: } q_c \leq 19 \text{ MPa} \quad (10)$$

– przy projektowaniu na podstawie sondowań SPT

$$q_{s,i} = 0,005 \cdot N_i + w_s, \text{ przy spełnieniu warunku: } N_m \leq 50 \quad (11)$$

gdzie:

q_{ci}, N_i – reprezentatywne wartości parametrów q_c oraz N dla i -tej warstwy geotechnicznej,

w_s – stała zależna od zawartości frakcji drobnych i kształtu ziaren w gruncie (tabl. 8).

Tabl. 8. Wartości parametru w_s w zależności od uziarnienia gruntu [21]

Grunty niespoiste z ziarnami o obłych kształtach zawierające od 10% do 40% frakcji pylistych i ilastych	Grunty niespoiste różnoziarniste z ziarnami o nieregularnych kształtach, zawierające mniej niż 10% frakcji pylistych i ilastych
$w_s = 0$ MPa	$w_s = 0,05$ MPa
$q_s \leq 0,16$ MPa	$q_s \leq 0,21$ MPa
Dla gruntów pośrednich wartości w_s przyjmujemy na podstawie interpolacji	

Autor metody nie określa sposobu wyznaczania nośności obliczeniowych pali. Metodę zaleca stosować jedynie do gruntów wodoprzepuszczalnych, w których podczas badania sondą statyczną nie jest generowana nadwyżka ciśnienia wody w porach gruntu ponad ciśnienie hydrostatyczne.

PORÓWNANIE I WERYFIKACJA METOD OBLICZENIOWYCH Z WYNIKIEM BADAŃ PALA W TERENIE

Do porównania posłużył wynik badania pala przemieszczeniowego wkręcane go rodzaju SDC wykonanego w ramach projektu badawczego [17]. Pal wykonano świdrem o średnicy nominalnej $D = 360$ mm. Długość pala wynosiła $L = 7,5$ m. W miejscu lokalizacji pala, przed jego wykonaniem, przeprowadzono sondowanie gruntu metodą CPTU, którego wynik przedstawiono na rys. 4.

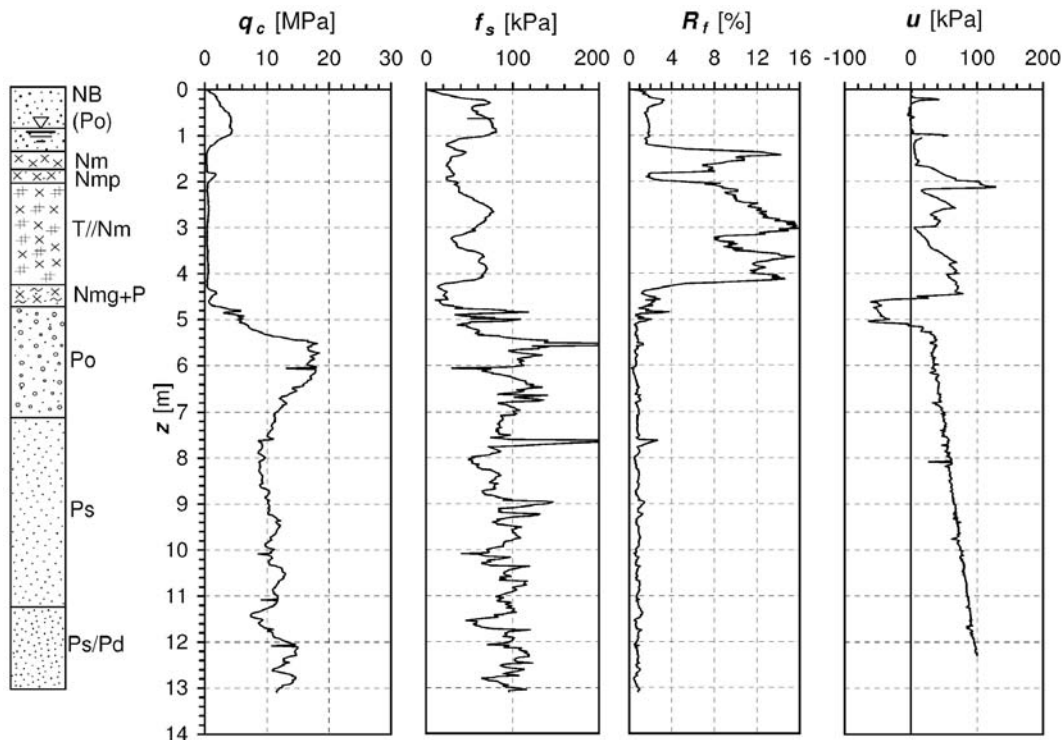
W analizach i obliczeniach przyjęto, że warstwy nośne z gruntów niespoistych zalegają od głębokości 4,7 m p.p.t. Ze względu na to, że w czasie badania część obciążenia przenosiły zalegające powyżej warstwy gruntów organicznych i przypowierzchniowe warstwy nasypów (na co wskazują wyniki badania na rys. 5 – siła Q_{s1}), obliczone nośności graniczne pala $R_{c,u}$ na-

leży odnosić do wykresu siły Q_N na rys. 5., a nośności składowe $R_{b,u}$ i $R_{s,u}$ – odpowiednio do wykresów sił Q_s i Q_b . Z wyników badania określono graniczną wartość oporu pobocznic $Q_{s,u}$, odpowiadającą przemieszczeniu pala $s = 15$ mm oraz graniczną wartość oporu podstawy $Q_{b,u}$, którą oszacowano ekstrapolacyjnie przy przemieszczeniu podstawy równym 10% średnicy pala. Ekstrapolacji dokonano przez aproksymację wykresu rzeczywistego siły Q_b funkcją transformacyjną, a następnie przedłużenie wykresu funkcji do wartości przemieszczeń $s = 36$ mm ($0,1D$).

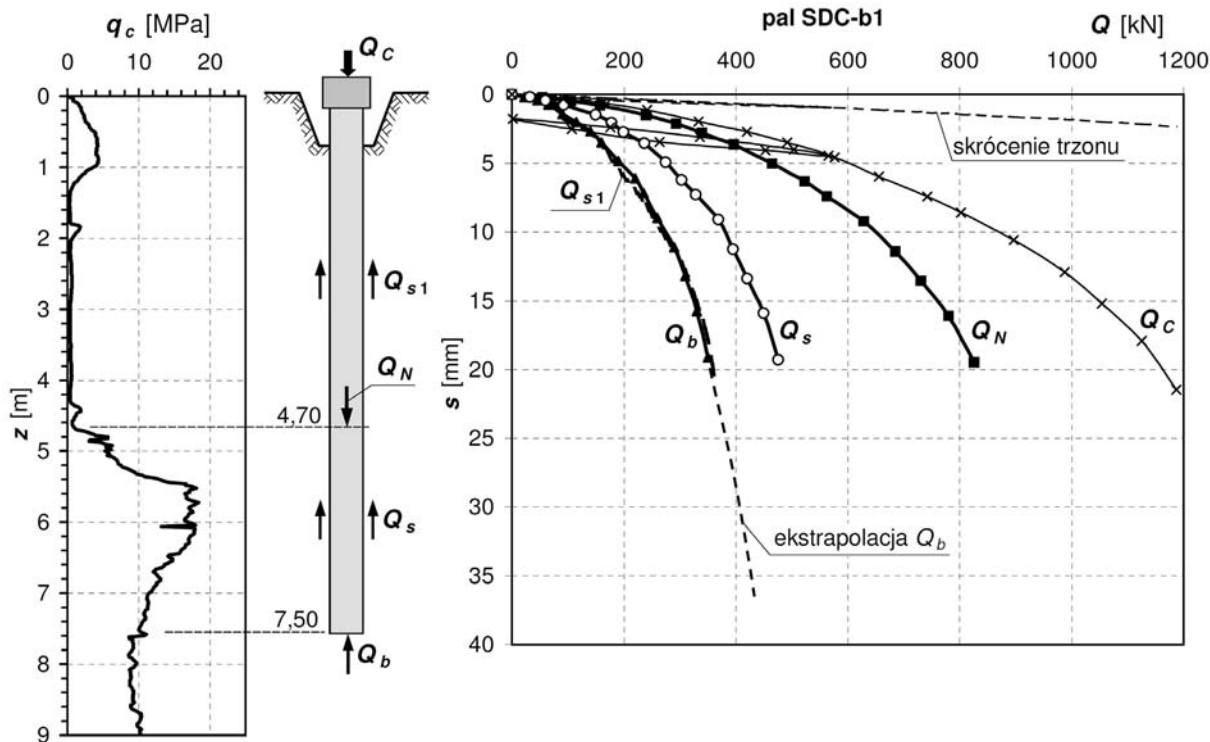
Wyniki przeprowadzonych obliczeń i porównań zestawiono w tabl. 9.

Analizując zestawienie w tabl. 9 można zauważyć, że całkowite nośności graniczne pala obliczone trzema analizowanymi metodami są zbliżone do siebie. Wartości nośności składowych – podstawy i pobocznic wykazują większe rozbieżności między metodami.

Na uwagę zasługuje fakt, że wartości nośności granicznych pala, całkowitych i składowych, obliczone analizowanymi metodami otrzymano większe niż nośności wyznaczone z badania, z wyjątkiem nośności pobocznic w metodzie belgijskiej. Z drugiej strony, w metodzie belgijskiej otrzymano najbardziej zawyżoną w stosunku do wyniku badania wartość nośności granicznej podstawy pala. W metodzie amerykańskiej otrzymano z kolei zawyżoną wartość nośności pobocznic pala. W przypadku metody LCPC, zawyżone wartości nośności można wytłumaczyć faktem, że metodę opracowano na podstawie wyników głównie badań pali „Atlas”, a analizowany przykładowy pal był wykonany w technologii SDC (SDP). Natomiast duża nośność podstawy pala wyliczona metodą belgijską wynika, zdaniem autorów, z metody Van Impe i De Beera [2, 23 ÷ 25] wyznaczenia wartości oporu gruntu q_b , w której przy zagłębieniu pala większym od głębokości krytycznej otrzymuje się $q_b \approx q_{c,b}$. Zależności tej nie potwierdzają jednak wyniki badań terenowych pali.



Rys. 4. Wyniki sondowania statycznego w miejscu wykonania pala SDC-b1, [16, 17]



Rys. 5. Wynik badania nośności pala SDC-b1, [16, 17]

Tabl. 9. Zestawienie wyników obliczeń metod projektowania pali wkręcanych

Nośność podstawy, graniczna i obliczeniowa $R_{b,u}$, $R_{b,d}$	Nośność poboczniczy $R_{s,u}$, $R_{s,d}$	Nośność całkowita $R_{c,u}$, $R_{c,d}$
Metoda LCPC Bustamante i Gianeselli'ego		
$R_{b,u} = 676$ kN, $R_{b,d} = 338$ kN $K = 0,50$; $q_{cm} = 13,3$ MPa (przeliczone na stożek mechaniczny); $A_p = 0,102$ m ²	$R_{s,u} = 515$ kN $R_{s,d} = 257$ kN Dla $q_c > 3,5$ MPa krzywa Q4 Dla $q_c > 8,0$ MPa krzywa Q5	$R_{c,u} = 1191$ kN $R_{c,d} = 595$ kN
Metoda belgijska		
$R_{b,u} = 728,13$ kN, $R_{b,d} = 502$ kN $\alpha_b = 0,7$; $\epsilon_b = 1,0$; $\lambda = 1,0$; $q_{cb} = 10,22$ MPa; $A_p = 0,102$ m ²	$R_{s,u} = 361,06$ kN $R_{s,d} = 180$ kN $\alpha_{s,i} = 1,0$; q_s zgodnie z tabl. 9	$R_{c,u} = 1089,19$ kN $R_{c,d} = 751$ kN
Metoda amerykańska NeSmith'a		
$R_{b,u} = 552,46$ kN, $w_t = 1,34$ MPa; $q_{cm} = 10,22$ MPa; $A_p = 0,102$ m ²	$R_{s,u} = 541,82$ kN $w_s = 50$ kPa $q_s \leq 0,21$ MPa	$R_{c,u} = 1094,28$ kN
Wyniki otrzymane z badań rzeczywistych		
$Q_{b,u} = 450,00$ kN (ekstrapolacja)	$Q_{s,u} = 440,00$ kN	$Q_{N,u} = 890,00$ kN

Odnosząc obliczeniowe wartości nośności pali $R_{c,d}$ otrzymane z analizowanych trzech metod do wykresu siły Q_N z badania terenowego pala należy stwierdzić, że wynik tego odniesienia jest ogólnie pozytywny dla wszystkich trzech metod. Obliczone nośności $R_{c,d}$ odpowiadają wartościom siły Q_N , przy których osiadanie pala zawiera się w przedziale od 5 do 10 mm.

PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule studia literaturowe wykazały, że problematyce pali przemieszczeniowych wkręcanych poświęcono na świecie szczególnie dużo uwagi i wykonano dużą liczbę zaawansowanych badań terenowych. Jest to podyktowane fak-

tem, że technologia wykonywania tego rodzaju pali wywołuje w gruncie bardzo złożone procesy mechaniczne, które są trudne w opisie teoretycznym. Wiele zagadnień i problemów związanych z palami przemieszczeniowymi wkręcanych rozwiązywanych jest metodami eksperymentalnymi. Również przedstawione w pracy metody projektowania tego rodzaju pali mają charakter głównie empiryczny, co z jednej strony gwarantuje ich wiarygodność, ale z drugiej strony ogranicza zakres stosowania do określonych warunków gruntowych i określonych odmian technologii wykonawstwa, co potwierdziła zawarta w pracy analiza porównawcza.

Mimo ponad 30 lat stosowania w praktyce budowlanej i dużej liczby wykonanych badań, problem pali przemieszczeniowych wkręcanych jest nadal otwarty. Należy zatem nadal rozwijać badania nad tego rodzaju palami i ulepszać metody ich projektowania. Większej uwagi wymaga problem dużych oporów gruntu niespoistego podczas zagłębiania świrdrów przemieszczeniowych, ponieważ brakuje dobrej metody prognozowania tych oporów.

Dalszych badań wymaga także zagadnienie zachowania się pali przemieszczeniowych w grupie – wzajemnego oddziaływania pali na siebie w czasie ich wykonywania oraz współpracy w czasie przenoszenia obciążeń. Zagadnienie to będzie przedmiotem wystąpienia autorów z wnioskiem o kolejny projekt badawczy.

LITERATURA

1. Basu, P., Prezzi, M.: Design and Application of Drilled Displacement (Screw) Piles. Publication FHWA/IN/JTRP-2009/28. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2009.
2. De Beer, E.: Méthodes de deduction de la capacité portante d'un pieu à partir des resultats des essais de penetration. Jurnal des Travaux publics des Belgique. vol. 72, nr. 4, 5, 6, 1971, 191-268, 321-353, 351-405.
3. Bustamante, M., Doix, B.: A new model of LCPC removable extensometer. Fourth International Conference on Piling and Deep Foundations, Balkema, Rotterdam 1991.
4. Bustamante, M., Gianceselli, L.: Design of auger displacement piles from in situ tests. Proceedings of International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, BAP II, s. 21-34, Balkema, Rotterdam 1993.
5. Bustamante, M., Gianceselli, L.: Installation parameters and capacity of screwed piles. Proceedings of International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, BAP III, s. 95-108, Balkema, Rotterdam 1998.
6. Chin, F. K.: Estimation of unit load on piles not carried to failure. Proceedings of the 2nd Southeast Asia Conference on Soil Engineering, 1970, 81-90.
7. De Cock, F. A.: A database approach to overview pile loading tests on displacement screw piles in Western Europe – 1970-2000. Screw Piles Installation and Design in Stiff Clay. Holeyman, A. (ed.), Balkema, Bruksela 2001, 89-125.
8. Fleming, W. G., Thorburn, S.: Recent piling advances, state of the art report. Proceedings of the International Conference of Advances in Piling and Ground Treatment for Foundations, 1983, 1-16.

9. Gwizdała K.: Współczesne technologie pali. Materiały Seminarium „Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych”, Gdańsk, czerwiec 2004, 7-32.
10. Gwizdała K.: Współczesne technologie wykonawstwa pali. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 6/2004.
11. Gwizdała, K.: Fundamenty palowe. Tom 1: Technologie i Obliczenia, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
12. Gwizdała, K., Krasieński, A., Brzozowski, T.: Experience gained at the application of Atlas piles in Poland. Proceedings of: 10th International Conference on Piling and Deep Foundations, Amsterdam June 31s May – 2nd June (2006), 460-464.
13. Gwizdała, K., Krasieński, A.: Zastosowanie przemieszczeniowych pali wkręcanych w podłożu uwarstwionym na przykładzie obiektu w warunkach gruntowych delty Wisły. Inżynieria i Budownictwo, nr 3/2009, 133-136.
14. Huybrechts, N. et al.: Pile testing campaign on the Limelette test site & Installation techniques of screw piles. Belgian Screw Pile Tehnology - design and recent developments. Balkema, Bruksela 2003, 71-105.
15. Huybrechts, N.: Test campaign at Saint-Katalijne-Waver and installation techniques of screw piles. In: Holeyman, A. (ed.) Screw Piles Installation and Design in Stiff Clay. Balkema, Bruksela 2001, 151-176.
16. Krasieński, A.: Badania terenowe przemieszczeniowych pali i kolumn wkręcanych typu SDP i SDC. Drogi i Mosty, nr 1-2/2011.
17. Krasieński, A.: Nośność i praca w gruncie pali wkręcanych. Raport końcowy z projektu badawczego MNiSW nr N N506 432936, Gdańsk, grudzień 2011.
18. Krasieński, A.: Wyniki badań terenowych pali i kolumn wkręcanych. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 6/2011, 510-530.
19. Krasieński, A.: Proposal for calculating the bearing capacity of screw displacement piles in non-cohesive soils based on CPT results. Studia Geotechnika et Mechanika, Vol. XXXIV, No 4, 2012.
20. Maertens, J., Huybrechts, N.: Results of the static pile load tests at the Limelatte site. Belgian Screw Pile Tehnology – design and recent developments. Maertens, J. and Huybrechts, N. (eds.), Balkema, Lisse (2003), 167-214.
21. NeSmith, W.M.: Design and Installation of Pressure – Grouted, Drilled Displacement Piles. Ninth International Conference on Piling and Deep Foundations, DFI, Nicea 2002, 561-567.
22. Tejchman A., Gwizdała K., Brzozowski T.: Pale Atlas w Polsce. Inżynieria i Budownictwo, nr 11/1998, 616-619.
23. Van Impe, W.F.: Consideration in the auger pile design. Proceedings of International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, BAP I, s. 193-217, Rotterdam 1988.
24. Van Impe, W.F. et al.: Prediction of the single pile bearing capacity in granular soils out if CPT results. Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing, ISOP, Orlando 1988, 1-34.
25. De Vos, M. et al.: The current draft of the application rules of Eurocode 7 in Belgium for the design of pile foundations. Belgian Screw Pile Tehnology – design and recent developments. Maertens, J. and Huybrechts, N. (eds.), Balkema, Bruksela 2003, 303-322.
26. ISSMFE Sub-committee on Field and Laboratory testing. Axial Pile Loading Test-Part 1: Static Loading. ASTM Geotechnical Testing Jurnal, 1985, 79-90.
27. Nederlands Normalisatie Instituut. Geotechniek. Berekeningsmethode voor funderingen op palen, drukpalen, 1991.