

# Zastosowanie przemieszczeniowych pali wkręcanych w podłożu uwarstwionym na przykładzie realizacji obiektu w warunkach gruntowych delty Wisły

Od kilkunastu lat jest w Polsce rozpowszechniane stosowanie przemieszczeniowych pali wkręcanych [5, 6]. Do tego rodzaju pali można zaliczyć m.in. pale o handlowych nazwach „Atlas”, „Omega” i SDP (Soil Displacement Piles). Są to pale o wielu walorach technicznych, ekonomicznych i ekologicznych. Efektem ich stosowania jest również dogęszczenie podłoża gruntowego i zwiększenie w nim początkowego stanu naprężenia, dzięki czemu pale mają lepszą charakterystykę pracy i większą nośność niż pale wiercone o takich samych parametrach geometrycznych (średnica i długość). W czasie wykonywania pali wkręcanych nie ma wydobywania urobku, dzięki czemu są bardziej ekologiczne od pali wierconych. Ponadto podczas ich wykonania nie są generowane drgania, dzięki czemu na terenach zurbanizowanych są korzystniejsze od pali wbijanych.

W artykule przedstawiono przykład zastosowania pali wkręcanych do posadowienia budynku biurowego na terenie Gdańska, w warunkach silnie uwarstwowionego podłoża gruntowego obszaru delty Wisły. Przedstawiono również interesujące doświadczenia oraz spostrzeżenia dotyczące wykonawstwa i projektowania pali wkręcanych.

## Opis budynku i warunków gruntowych

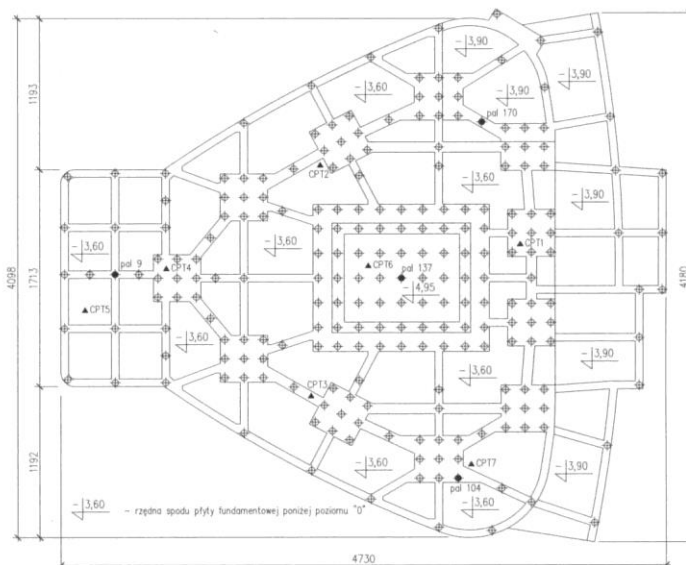
Prezentowany budynek biurowy ma 9 kondygnacji nadziemnych i jedną podziemną. Jego konstrukcja jest żelbetowa monolityczna szkieletowo-trzonowa. Fundament budynku stanowi żelbetowa płyta uźebrowana, posadowiona na palach. Ze względu na wysoki poziom wód gruntowych oraz założoną w projekcie sztywność, płytę fundamentową wraz ze ścianami podziemia wykonano w postaci szczelnej wanny z betonu wodoodpornego.

Budynek znajduje się w południowo-wschodnich obrzeżach Gdańska, które wchodzi już w obręb delty Wisły i Żuław Wiślanych. Tereny te charakteryzują się bardzo niekorzystną budową geotechniczną podłoża gruntowego. Podłoże jest niejednorodne i silnie uwarstwione. Występują w nim w kilku poziomach warstwy słabych gruntów organicznych, głównie namułów i torfów. Pomiędzy nimi występują układy piasków drobnych i średnich średniozagęszczonych i zagęszczonych. Warstwy gruntów słabych sięgają do głębokości nawet 22 m p.p.t. W miejscu lokalizacji omawianego budynku na głębokości od około 9 do około 20 m p.p.t. znajduje się znacznej miąższości warstwa piasków drobnych zagęszczonych, w której mogą być umieszczone podstawy pali fundamentu budynku.

## Posadowienie budynku

Budynek posadowiono na palach żelbetowych wkręcanych, wykonywanych w gruncie. Za ich wyborem przemawiały następujące czynniki: 1) w bliskim sąsiedztwie znajdowały się istniejące budynki (biurowiec i przychodnia lekarska), wrażliwe na wstrząsy i wibracje od pali wbijanych, 2) pale zdecydowano się zakończyć w warstwie pośredniej piasków pomiędzy namułami, zakładając, że warstwa ta zostanie dodatkowo dogęszczona i wzmocniona, czego nie mogły zapewnić pale wiercone,

3) pale wkręcane okazały się bardziej ekonomiczne; koszt ich wykonania był zbliżony do pali CFA, natomiast dzięki większej nośności można było zastosować ich mniej niż pali CFA. Zaprojektowano posadowienie budynku na 227 palach wkręcanych średnicy 500 mm i długości 14,0 i 15,0 m. Nośności pali obliczono według klasycznych wzorów normowych, stosując współczynniki technologiczne pośrednie pomiędzy stosowanymi w odniesieniu do pali wierconych i wbijanych. Otrzymało wartości obliczeniowe nośności w zakresie od 1100 do 1300 kN. Rzut fundamentu z układem pali przedstawiono na rys. 1. Prace palowe i fundamentowe realizowano latem i jesienią 2005 roku [3], a budynek ukończono pod koniec 2006 roku.

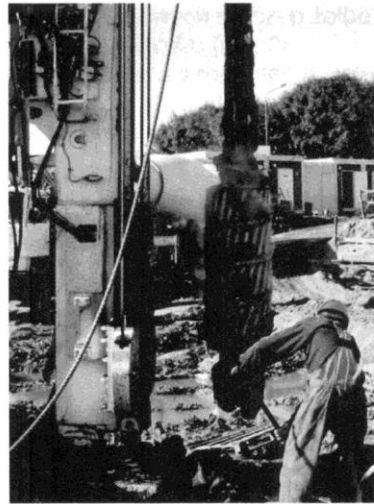
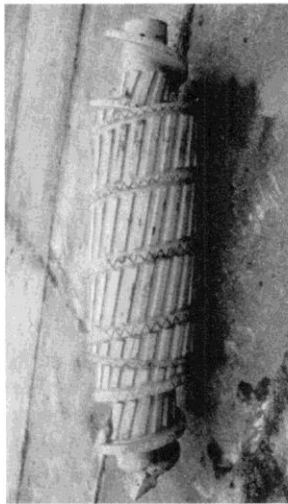


Rys. 1. Plan fundamentu palowego rozpatrywanego budynku biurowego w Gdańsku

## Opis wykonawstwa pali i zaobserwowanych problemów

Pale wykonywano przy użyciu świda formującego o nietypowym kształcie (rys. 2), zbliżonym do świda pali „Omega” [1]. Świdr wkręcano w grunt za pomocą uniwersalnej maszyny Soilmec R625. Po zakończeniu wkręcania, przez otwór wewnętrzny w żerdzi dostarczano mieszankę betonową pod ciśnieniem i wykręcano świder, unosząc go oraz obracając w tym samym kierunku co przy wkręcaniu. W zabetonowany w ten sposób pal wprowadzono wibracyjnie zbrojenie, podobnie jak w przypadku pali CFA. W czasie wykonywania pala rejestrowano m.in. prędkość wkręcania, moment obrotowy przy wkręcaniu, prędkość wykręcania, zużycie i ciśnienie mieszanki betonowej w czasie betonowania, dzięki czemu możliwe było zinterpretowanie kształtu pala (rys. 3 i 4).

Wykonanie pali nie przebiegało jednak bez problemów. Większości pali nie udało się wkręcić na projektowaną głębokość. Powodem były duże opory gruntu przy wkręcaniu, prze-

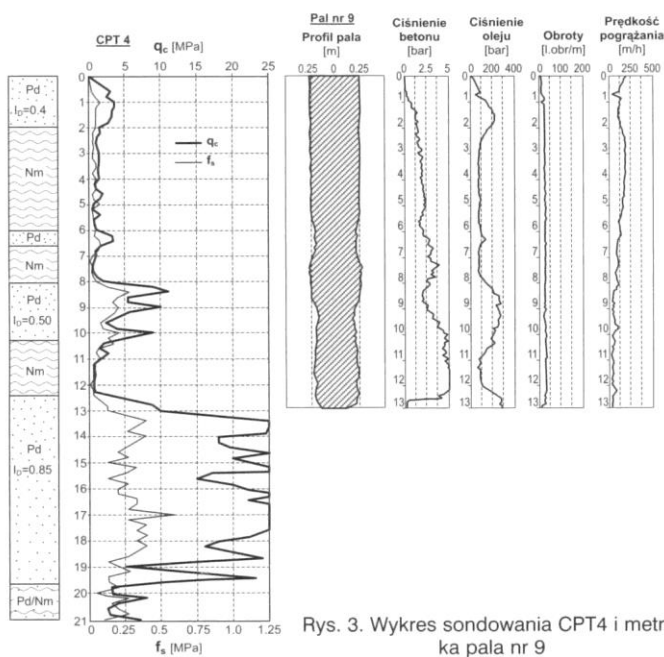


Rys. 2. Konstrukcja świda do wykonywania pali wkręcanych

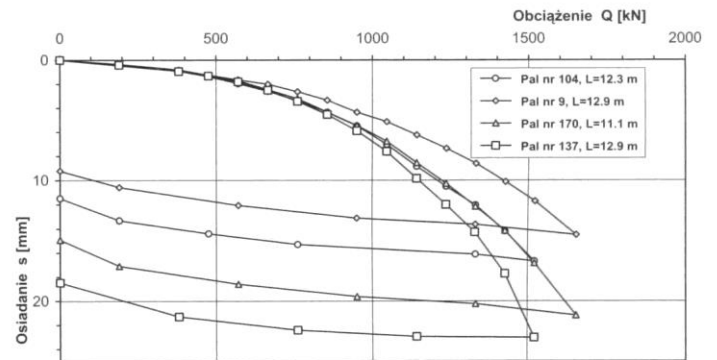
kraczące maksymalny moment obrotowy wywierany przez maszynę. Rzeczywiste długości pali wyniosły od 11,5 do 13,5 m, a zagłębienia podstaw pali w warstwie nośnej wyniosły od 1,2 do około 2,5 m. Zagłębienia te w przypadku każdego pala kontrolowano na podstawie parametrów rejestrowanych w metryce jego wykonania. Pomimo trudności w realizacji pali o długości zgodnej z projektem, kontynuowano prace palowe według założonego w projekcie układu w planie, przyjmując, że o dalszym postępowaniu zadecydują wyniki badań nośności pali.

### Wyniki badań nośności pali i ich analiza

Zgodnie z projektem wykonano badania nośności 4 pali, w wybranych różnych miejscach fundamentu (por. rys. 1). Pale poddano próbnym obciążeniom statycznym (SPLT), z wykorzystaniem stanowisk kotwionych do sąsiednich pali. Wyniki badań w formie wykresów obciążenie – osiadanie przedstawiono na rys. 5.



Rys. 3. Wykres sondowania CPT4 i metryka pala nr 9



Rys. 5. Wykresy z badań statycznych nośności pali (SPLT)

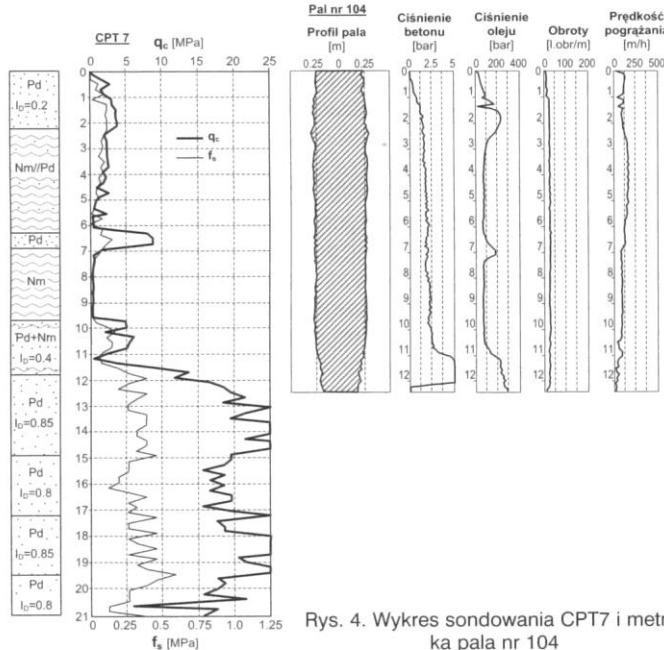
Na uwagę zasługuje fakt, że wykresy wszystkich 4 pali są bardzo podobne. Zjawisko takie jest rzadko spotykane w przypadku zarówno pali wbijanych, jak i wierconych. Bardzo zbliżone charakterystyki pali wkręcanych autorzy zaobserwowali również na kilku innych budowach [10, 11, 13]. Jest to dodatkowa zaleta pali wkręcanych, dzięki której praca pali pod fundamentem jest wyrównana, co korzystnie wpływa na pracę oczepu fundamentowego i nadbudowy.

Drugim istotnym elementem, jaki można zaobserwować jest kształt krzywych  $Q - s$  rozpatrywanych pali, a głównie wartości osiadań. Pale wkręcane, pomimo że są w pełni przemieszczeniowe, tak jak pale wbijane, to jednak cechują się innym charakterem pracy. Ich sztywność w gruncie jest mniejsza i znajduje się pomiędzy palami wbijanymi i wierconymi.

### Pomiary osiadań budynku

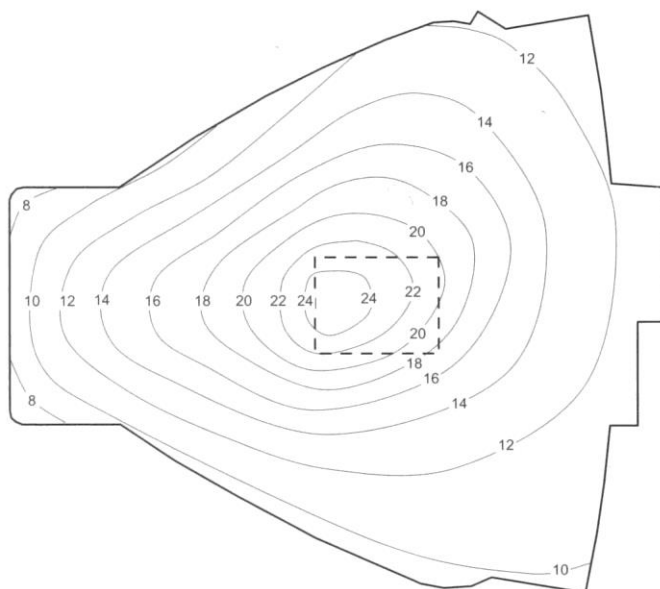
Na konstrukcji fundamentu zainstalowano 19 reperów do pomiaru osiadań budynku. Wyniki ostatniej serii pomiarów, po oddaniu budynku do użytku, w formie izolacji przedstawiono na rys. 6. Wskazują one na ogólnie dobrą pracę fundamentu posadowionego na wykonanych palach wkręcanych. Osiadania wynoszą około 22 – 24 mm w środkowej części budynku i około 11 mm na obrzeżach. Jak wynika z planu palowania i analizy obciążeń, obciążenia są skoncentrowane głównie w środkowej części budynku. Rejestrowane wartości i rozkład osiadań potwierdzają ponadto ogólnie znaną z teorii i praktyki prawidłowość wygięcia fundamentu, ze zwiększonymi osiadaniami w części środkowej.

Osiadanie dużej grupy palowej (227 pali) należy również odnieść do osiadań pali pojedynczych w czasie próbnego obciążenia statycznego. W przedziale obciążeń  $Q_f$  od 900 do 1050 kN można przyjąć, że osiadanie pala pojedynczego wynosi około 7 mm. Osiadanie całego budynku (dużej grupy pa-



Rys. 4. Wykres sondowania CPT7 i metryka pala nr 104





Rys. 6. Izolinie osiadania fundamentu budynku

lowej) jest mniejsze niż wynikałoby to z ogólnie znanych zależności [8, 9]. Niezależnie od innych czynników, należy uwzględnić fakt, że już na etapie projektu oraz później w czasie realizacji fundamentu zwracano szczególną uwagę na dogęszczenie podłoża gruntowego przed ułożeniem betonu podkładowego pod płytą fundamentową. Takie podejście do projektowania i wykonawstwa przynajmniej w części zapewniło pracę fundamentu jako płytowo-palowego (pomimo małej nośności podłoża bezpośrednio pod płytą; por. sondowania CPT – rys. 3 i 4).

#### Analiza i próba wyjaśnienia zaobserwowanych zjawisk

Zdaniem autorów podobne charakterystyki analizowanych pali wkręcanych są związane z energią włożoną w ich pogrążenie w grunt. Ponieważ prawie wszystkie pale wykonano do momentu zatrzymania się pogrążania, można powiedzieć, że wszystkie pale zostały wkręcane z taką samą energią – maksymalną w przypadku zastosowanej palownicy. W czasie wkręcania głowicy formującej były mobilizowane i pokonywane opory graniczne gruntu. Z analizy techniki wkręcania i kształtu świda można przypuszczać, że głównie są mobilizowane opory na pobocznicy, tym bardziej że zastosowana maszyna nie wywiera zbyt dużego nacisku pionowego. Po wykonaniu pala i stwardnieniu betonu, a następnie po wystąpieniu obciążenia zewnętrznego, mobilizuje się opór tego samego gruntu, który pracował przy wkręcaniu. Wartości oporów gruntu w czasie wkręcania świda oraz w czasie pracy gotowego pala są zatem ściśle ze sobą związane. Jeżeli więc dwa przykładowe pale zostaną wykonane z użyciem takiej samej (np. maksymalnej) energii wywieranej przez maszynę, to oba te pale będą się zachowywać podobnie w czasie pracy pod obciążeniem.

Odnosząc się do sztywności w gruncie pali wkręcanych, można ocenić, że ich mniejsza sztywność w stosunku do pali wbijanych wynika również z technologii wykonania. Podczas wkręcania głowicy o rozpatrywanym kształcie są mobilizowane opory tarcia gruntu głównie na pobocznicy. Grunt pod podstawą jest w mniejszym stopniu mobilizowany. Z powodu kształtu głowicy, która w dolnej części ma świder talerzowy, podobnie jak w palach CFA, grunt pod podstawą świda (pala) jest raczej urabiany, jak w palach wierconych, i rozpierany na boki dopiero w strefie znajdującej się wyżej. W palach wbijanych są mobilizowane zarówno opory gruntu pod podstawą, jak i wokół pobocznicy – stąd większa sztywność tych pali.

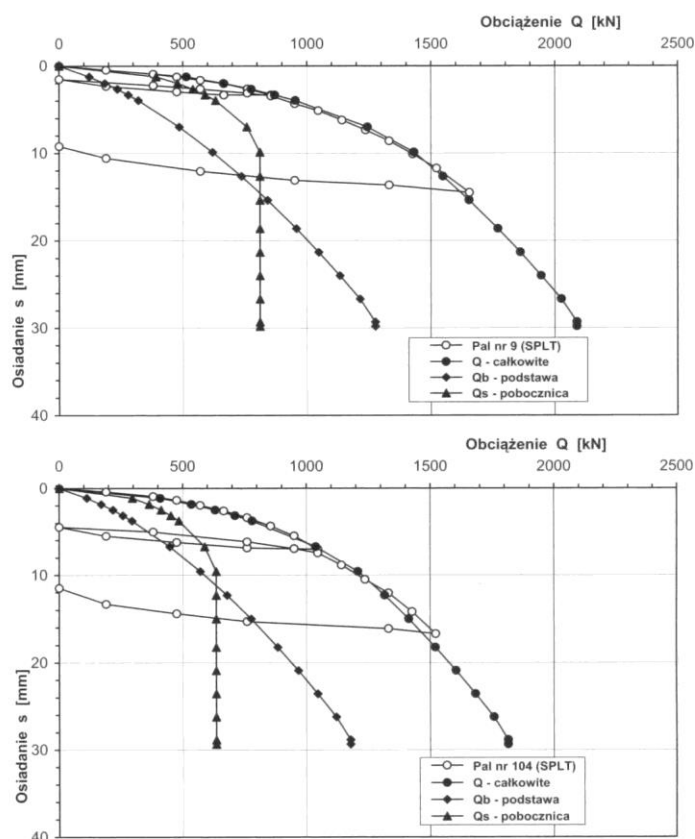
### Interpretacja pracy pali za pomocą funkcji transformacyjnych

Współczesne analizy pracy pala w podłożu gruntowym powinny uwzględniać analityczne lub półempiryczne sposoby przewidywania całej zależności obciążenie–osiadanie pala. W omawianej analizie przyjęto, że jedną z takich możliwości daje zastosowanie funkcji transformacyjnych  $t - z$  do oporów na pobocznicy i  $q - z$  do oporu pod podstawą. Zagadnienie to było omawiane w pracach autorów, np. [4, 11]. Praktyczna ocena krzywych osiadania wymaga znajomości następujących parametrów:

- granicznych jednostkowych oporów na pobocznicy  $t_{\max}$  oraz pod podstawą pala  $q_f$ ,
- początkowej nieliniowej sztywności i funkcji transformacyjnych  $t - z$  oraz  $q - z$ ,
- osiadań  $z_v$  oraz  $z_f$ , odpowiadających osiągnięciu oporów granicznych  $t_{\max}$  oraz  $q_f$ .

W wyniku interpretacji krzywych rzeczywistych rozpatrywanych pali przyjęto następujące parametry:  $z_v = 0,015D$ ,  $z_f = 0,05D$ ,  $\alpha = 0,3$ ,  $\beta = 0,6 \div 0,7$ , gdzie  $D$  jest średnicą pala, a  $\alpha$  i  $\beta$  – współczynnikami funkcji transformacyjnych (według [4]). Zestawienie przykładowych krzywych osiadania, teoretycznych i rzeczywistych, przedstawiono na rys. 7.

Oszacowane wstecznie wartości  $t_{\max}$  oraz  $q_f$  odniesiono następnie do oporów gruntu pod stożkiem sondy CPT (tablica).



Rys. 7. Aproxymacja krzywych osiadania pali nr 9 i 104 za pomocą funkcji transformacyjnych

#### Odniesienie oporów gruntu $t_{\max}$ i $q_f$ do oporów $q_c$ sondy CPT

Pal	CPT	$q_c$ MPa	$t_{\max}$ kPa	$q_f$ MPa	$q_f/t_{\max}$	$q_f/q_c$
Nr 9	CPT4	24,0	180	6,5	133	0,27
Nr 104	CPT7	26,0	150	6,0	172	0,23
Nr 137	CPT6	23,0	150	4,5	154	0,20
Nr 170	CPT1	15,0	170	5,8	88	0,39



Uzyskane wartości są w ogólnie dobrej zgodności z dotychczasowymi wynikami uzyskanymi za granicą [2] i w Polsce [11]. Należy zaznaczyć, że nie we wszystkich przypadkach sondowania CPT były wykonywane w bezpośredniej bliskości badanych pali (np. w przypadku pala nr 170). Tak postawione zagadnienie jest w zgodzie z założeniami Eurokodu 7 [15] oraz zaleceniami wykorzystywania doświadczeń krajowych do szczegółowej oceny nośności pali z wykorzystaniem wzoru statycznego oraz wyników badań „in situ” (CPT, CPTU).

### Propozycje dotyczące projektowania i wykonawstwa pali wkręcanych

Opisane w artykule zjawiska oraz wyniki rozważań teoretycznych pozwoliły na sformułowanie kilku wniosków i zaleceń dotyczących projektowania i wykonawstwa pali wkręcanych. Główne z nich wymieniono niżej.

1. Pale wkręcane mają nośność, która jest ściśle związana z energią potrzebną do ich zagłębienia (wkręcenia). Maksymalna energia, jaką można uzyskać, wynika z mocy i parametrów maszyny (palownicy): momentu obrotowego i siły nacisku. W przypadku typowych maszyn, maksymalna nośność pali wkręcanych, przy średnicach 400 – 600 mm, wynosi 1000 – 1500 kN.

2. Pali wkręcanych nie można projektować o dowolnej średnicy i długości, gdyż pale o zbyt dużej średnicy lub długości mogą okazać się niemożliwe do wykonania. Analizowane w artykule pale, zbliżone do pali „Omega”, udawało się wkręcać do wartości oporów  $q_c$  sondy CPT równych około 20 – 25 MPa.

3. Pale wkręcane powinny się projektować metodami bezpośrednimi, na podstawie badań gruntu „in situ”, np. CPT lub presjometrycznych [2, 13, 14]. Tylko takie badania umożliwiają pomiar rzeczywistych oporów gruntu, a następnie prognozę oporów gruntu przy wkręcaniu pali i podczas ich pracy pod obciążeniem. Sama znajomość rodzaju gruntu i jego stanu ( $I_D$  lub  $I_L$ ), tak jak jest dotychczas stosowane w praktyce, może być niewystarczająca.

4. Projektowanie pali wkręcanych powinno się sprowadzać głównie do przyjmowania liczby i układu pali pod fundamentem, przy znanej orientacyjnie ich nośności. W fazie projektowania powinny być znane również parametry maszyny oraz wyniki badań nośności pali wykonywanych wcześniej tą maszyną. Długość i średnicę pali, w fazie projektowania, powinno się określać w sposób przybliżony, natomiast ich weryfikacja ostateczna powinna się odbywać metodą prób dopiero na budowie, z zastosowaniem metody obserwacyjnej, uznawanej również w [15].

5. Pale wkręcane w technologii zbliżonej do „Omega” lub SDP (podobne kształty świrdrów) charakteryzują się dobrą pracą pobocznicy. Praca podstaw jest zbliżona do pali wierconych, co wynika z kształtu świrdrów, a co potwierdzają wyniki badań nośności pali oraz analiz za pomocą funkcji transformacyjnych. Przy ewentualnym zastosowaniu normowej metody klasycznej projektowania tego rodzaju pali proponuje się więc stosować współczynniki technologiczne do nośności podstawy  $S_p$  zbliżone do przyjmowanych w przypadku pali wierconych, a do nośności pobocznicy  $S_s$  zbliżone do pali wbijanych.

### Podsumowanie

Przedstawione w artykule zaobserwowane zjawiska i wyniki rozważań dotyczące pali wkręcanych pozwalają na lepsze poznanie charakteru pracy tych pali w gruncie i zagadnień związanych z technologią ich wykonywania. Zwrócenie uwagi na pewne ograniczenia oraz trudności związane z tego rodzaju palami nie miało na celu umniejszenia ich walorów lub znie-

chęcenia projektantów czy inwestorów do ich stosowania. Przeciwnie, artykuł ma na celu rozpowszechnienie wiedzy na temat pali wkręcanych i zapewnienie inżynierów budowlanych o tym, że wiedza na temat pracy tych pali jest coraz głębsza. Dzięki temu zakres stosowania w praktyce pali wkręcanych będzie większy niż dotychczas. Zalety pali wkręcanych przewyższają ich ograniczenia [3, 5, 6, 10, 11, 13]. Są one szczególnie pożądane w budownictwie kubaturowym na terenach zabudowanych. Rozpowszechnienie ich w praktyce, przy jednoczesnym racjonalnym projektowaniu, pozwoli na uzyskanie dużych oszczędności dzięki mniejszemu zużyciu betonu, stali zbrojeniowej i mniejszej łącznej długości pali niż w przypadku pali wierconych, co zostało już potwierdzone na kilkunastu budowach.

Przedstawione w artykule wyniki analiz dotyczą pali wkręcanych zbliżonych do pali „Omega” i zagłębionych w gruntach niepoistych, takich jakie występują przykładowo w rejonie Deltę Wisły. Nie należy ich odnosić do podobnych pali w gruntach spoistych, ze względu na brak wystarczającej liczby doświadczeń oraz większą komplikację zagadnień.

Bardzo ważnym elementem przyszłościowym jest rozpowszechnienie i opracowanie procedur projektowania oraz prognozowania pracy pali wkręcanych na podstawie badań CPT (CPTU) lub presjometrycznych. Procedur takich, jak dotąd, w Polsce nie ma. W zespole autorów jest prowadzony program badawczy mający na celu opracowanie takich procedur. Jednym z elementów tego programu będą również badania pali wkręcanych w gruntach spoistych.

### PIŚMIENNICTWO

- [1] Bottiau M., Cortvrindt G.: Recent experience with the Omega-Pile, Proceedings of the Fifth International Conference on Piling and Deep Foundations, 13-15 June, Bruges, 1994.
- [2] Bustamante M., Gianaselli L., Design of Auger displacement piles from in situ tests. Deep Foundations on Bored and Auger Piles. Rotterdam, Balkema, 1993.
- [3] Grygier W.: Pale przemieszczeniowe formowane w gruncie w technologii SDP. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne”, nr 3 (18), 2008.
- [4] Gwizdała K.: Analiza osiadań pali przy wykorzystaniu funkcji transformacyjnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 532. Budownictwo Wodne XLI, Gdańsk 1996.
- [5] Gwizdała K.: Współczesne technologie wykonawstwa pali. „Inżynieria Morska i Geotechnika”, nr 6/2004.
- [6] Gwizdała K.: Współczesne technologie pali. Materiały Seminarium „Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych”, Gdańsk, czerwiec 2004.
- [7] Gwizdała K.: Projektowanie fundamentów na palach. Materiały XX ogólnopolskiej konferencji „Warsztat pracy projektanta konstrukcji”. Wisła – Ustroń, marzec 2005.
- [8] Gwizdała K., Dyka I.: Osiedlenie dużych grup palowych, obliczenia i pomiary terenowe. Materiały II problemowej konferencji geotechniki „Współpraca budowli z podłożem gruntowym”. Białystok – Białowieża, czerwiec 2004.
- [9] Gwizdała K., Dyka I.: Osiedlenie pali i fundamentów palowych. Materiały seminarium „Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych”, Gdańsk, czerwiec 2004.
- [10] Gwizdała K., Krasieński A., Brzozowski T.: Experience gained at the Application of Atlas piles in Poland. 10<sup>th</sup> International Conference on Piling and Deep Foundations, Amsterdam, June 2006.
- [11] Gwizdała K., Krasieński 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.
- [12] Kościak P., Sukow J., Gwizdała K.: Pale wkręcane ATLAS. Materiały XX ogólnopolskiej konferencji „Warsztat pracy projektanta konstrukcji”. Wisła – Ustroń, marzec 2005.
- [13] Krasieński A., Gwizdała K.: Doświadczenia ze stosowania pali wkręcanych Atlas. Materiały Konferencji Naukowej KILiW PAN i PZITB, Krynica 2007.
- [14] 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.
- [15] PN-EN 1997-1:2005. Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne.

