Nr 1-2 2011

ADAM KRASIŃSKI[1)]

BADANIA TERENOWE PRZEMIESZCZENIOWYCH PALI I KOLUMN WKRĘCANYCH TYPU SDP I SDC

STRESZCZENIE. Przedmiotem pracy są badania pali i kolumn wkręcanych na terenowym poletku doświadczalnym, zorganizowanym na terenie Żuław Wiślanych przy okazji budowy obwodnicy drogowej Pruszcza Gdańskiego. Rozpatrywany rejon charakteryzuje się niekorzystnymi warunkami geotechnicznymi podłoża gruntowego, wymagającymi użycia pali lub kolumn betonowych. Na poletku wykonano dwie kolumny wkręcane SDC i dwa pale wkręcane SDP o średnicy 360 mm i o różnych długościach. Badania nośności kolumn i pali przeprowadzono z wykorzystaniem systemu pomiarowego do rejestracji pionowego rozkładu siły wzdłuż trzonów pali i kolumn, co następnie pozwoliło na oddzielne określenie oporów gruntu wzdłuż pobocznicy i pod podstawami. Badania kolumn i pali powiązano z badaniami CPTU podłoża gruntowego i pomiarami oporów wkręcania świdra formującego. W artykule opisano przebieg badań na rozpatrywanym poletku doświadczalnym oraz zaprezentowano uzyskane wyniki wraz z ich krótką analizą.

1. WPROWADZENIE

Pale i kolumny formowane w gruncie metodą wkręcania należą do grupy tzw. technik przemieszczeniowych wykonawstwa pali i kolumn. Oznacza to, że w procesie ich wykonywania urobek gruntowy nie jest wydobywany na zewnątrz, lecz przemieszczany głównie na boki. Dzięki temu poprawia się stan naprężenia i zagęszczenia w gruncie, co z kolei korzystnie wpływa na sztywność osiową oraz nośność pali i kolumn.

[1)] dr inż. – Katedra Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego, Politechnika Gdańska

Pomimo swojej atrakcyjności technologicznej, pale i kolumny wkręcane sprawiają jednak problemy projektantom i wykonawcom [1 - 3]. Głównym problemem są duże opory gruntu pojawiające się w czasie ich formowania, a dokładniej w czasie wkręcania świdra. Ten technologiczny problem sprawia, że w czasie projektowania pali wkręcanych konieczne jest uwzględnienie realnych możliwości ich wykonania. Niewystarczające jest tylko dobranie średnicy i długości pala w celu uzyskania potrzebnej nośności, tak jak to zwykle jest w przypadku innych rodzajów pali (np. wierconych). Należy dodatkowo uwzględnić lub dobrać parametry świdra i palownicy (głównie jej moc obrotową) oraz ocenić warunki gruntowe pod kątem zasadności zastosowania pali przemieszczeniowych wkręcanych. Kolejnym, jeszcze mało rozpoznanym, jest zagadnienie sposobu przenoszenia obciążeń przez pale wkręcane, tzn. udział pobocznicy i podstawy. Ogólnie przypuszcza się, że pale i kolumny wkręcane pracują bardziej pobocznicą niż podstawą. Są już pewne propozycje projektowania pali wkręcanych, np. przedstawione w [4, 5], jednak mało jest jeszcze w tym zakresie wyników badań ilościowych, szczególnie w warunkach polskich.

Doświadczenie pokazuje, że klasyczne metody projektowania pali w odniesieniu do pali wkręcanych są mało dokładne. Bardziej wskazane jest użycie metod opartych bezpośrednio na wynikach badań „in situ" podłoża gruntowego – głównie CPT(U) i PMT. Mając na względzie powyższe problemy i pilną potrzebę ich rozwiązania, uruchomiono projekt badawczy, którego celem była analiza trzech podstawowych zagadnień:

a) korelacji pomiędzy oporami q_c sondy CPT(U), a oporami pogrążania (wkręcania) świdrów formujących pale,
b) korelacji pomiędzy oporami q_c sondy CPT(U), a nośnością pali wkręcanych, jak również korelacji pomiędzy oporami wkręcania świdrów, a nośnością pali,
c) udziału podstawy i pobocznicy pali wkręcanych w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych.

W celu spełnienia powyższych zamierzeń podjęto badania modelowe i terenowe pali wkręcanych [6, 7], a także analizy teoretyczne i numeryczne. Podobne badania realizuje się w wielu krajach Europy i świata [8 - 12].

2. TECHNOLOGIA WYKONYWANIA PALI I KOLUMN WKRĘCANYCH

Proces wykonawstwa pala lub kolumny wkręcanej polega na zagłębieniu w podłoże gruntowe żerdzi zakończonej u dołu świdrem przemieszczeniowym, formującym w gruncie otwór o określonej średnicy. Zagłębianie świdra odbywa się techniką wkręcania z jednoczesnym wciskaniem. Do tego celu potrzebna jest ciężka wiertnica o dużym momencie obrotowym. Na rynku wykonawczym można spotkać co najmniej kilkanaście typów i odmian świdrów do wykonywania pali i kolumn wkręcanych o różnych nazwach i symbolach handlowych (kilka przykładowych pokazano na rys. 1).

a) b) c) d) e)

Rys. 1. Przykłady świdrów do pali przemieszczeniowych wkręcanych: a) „Atlas" , b) „Omega" – wersja oryginalna [13], c) SDP (FDP) [14], d) CMC [6], e) „Omega" – wersja fińska [3]
Fig. 1. Samples of screw displacement pile augers: a) "Atlas", b) "Omega" – original version [13], c) SDP (FDP) [14, d) CMC [6], e) "Omega" – Finnish version [3]

Różnią się one kształtem, długością, układem talerzy oraz kilkoma innymi detalami. Ogólna idea budowy wszystkich świdrów jest jednak taka sama. Składają się one z trzech odcinków. Pierwszy – to odcinek talerzowo-spiralny ułatwiający wkręcanie się świdra w grunt. Drugi odcinek ma kształt walca o średnicy przyszłego pala, którego zadaniem jest rozpieranie gruntu na boki i naprężanie go. Trzecim jest kolejny odcinek talerzowo-spiralny o przeciwnym kierunku spirali w stosunku do odcinka pierwszego, ułatwiający wykręcanie i powodujący wtórne rozpieranie gruntu w fazie wykręcania. Przejścia pomiędzy odcinkami są zazwyczaj zestopniowane lub stożkowe. Taki układ konstrukcyjny sprawia, że świdry przemieszczeniowe osiągają znaczne długości – przekraczające nawet 3 m. Wyjątek stanowi świder pala „Atlas", który jest bardzo krótki i składa się praktycznie z pojedynczego zwoju spirali talerzowej. Duża różnorodność kształtów i rodzajów świdrów wynika głównie z ciągłego poszukiwania ich optymalnej budowy.

Po wkręceniu w grunt i osiągnięciu zakładanej głębokości, kolejnym etapem wykonawstwa jest wycofywanie świdra z jednoczesnym betonowaniem trzonu pala lub kolumny. Wycofywanie odbywa się za pomocą siły wyciągającej z obracaniem świdra w tym samym kierunku co w czasie wkręcania. Taki kierunek obrotów ma, po pierwsze, uniemożliwić wydostawanie się gruntu z pomiędzy talerzy świdra i zanieczyszczanie nim mieszanki betonowej, po drugie, wtórnie rozpychać na boki grunt znajdujący się nad świdrem. Wyjątek tu stanowi ponownie technologia pali „Atlas", w której wykręcanie świdra odbywa się w kierunku przeciwnym do wkręcania, a ponadto w gruncie pozostaje tracone ostrze.

Mieszanka betonowa podawana jest z pompy pod zwiększonym ciśnieniem (do 600 kPa) i wydostaje się wylotem w końcówce świdra, wypełniając przestrzeń wydrążoną w gruncie. Po całkowitym wydobyciu świdra z gruntu i zabetonowaniu trzonu kończy się proces wykonywania kolumny lub pala niezbrojonego. W przypadku pala zbrojonego, niezwłocznie po zabetonowaniu, w świeżą mieszankę wprowadza się wibracyjnie szkielet zbrojeniowy. W zależności od warunków wykonawstwa, czas wykonania jednego pala lub kolumny wkręcanej wynosi od kilku do maksymalnie kilkunastu minut. Szczegółowy opis technologii poszczególnych rodzajów pali wkręcanych można znaleźć między innymi w pracach [15 - 17].

Wszystkie etapy wykonawstwa są automatycznie monitorowane i rejestrowane przez specjalne urządzenie, znajdujące się w kabinie operatora palownicy, które następnie tworzy metrykę pala lub kolumny. Zawarte są w niej najważniejsze informacje na temat parametrów wykonawstwa, takie jak długość pala (kolumny), wartości oporów i siły nacisku w czasie wkręcania świdra, ciśnienie i objętość betonu, czas wkręcania i wykręcania świdra oraz data i godzina wykonania pala lub kolumny. Wyposażenie palownic do pali wkręcanych we wspomniane wyżej urządzenie rejestrujące, jak również sporządzanie metryk jest z reguły wymagane przez nadzór budowy. Jest ono również, a nawet przede wszystkim korzystne dla samych wykonawców pali (kolumn). Umożliwia kontrolę i miarodajną ocenę jakości wykonywanych prac palowych oraz ich zgodności z założeniami projektowymi. Ocena ta wraz z wynikami próbnych obciążeń stanowi następnie podstawę odbioru robót.

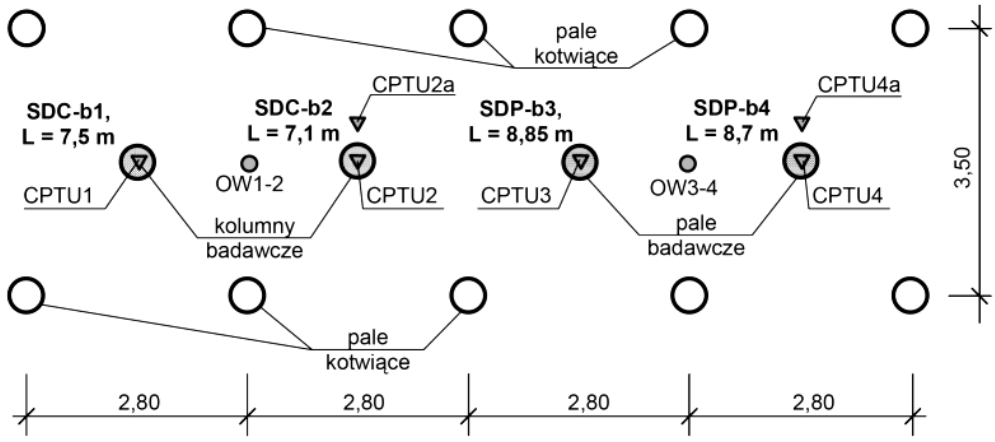
Opisane wyżej elementy technologiczne sprawiają, że pale i kolumny wkręcane są bardzo atrakcyjne pod względem ekonomicznym, jak również ekologicznym. Między innymi mogą być bez przeszkód wykonywane w terenie zabudowanym dzięki bezwstrząsowej technice, są bardzo efektywne dzięki szybkiemu wykonawstwu i nie powodują zanieczyszczenia terenu wydobywanym urobkiem. W ostatnim czasie przemieszczeniowe kolumny betonowe wkręcane typu np. CMC czy SDC zyskały dużą popularność we wzmacnianiu słabych podłoży gruntowych pod nasypy drogowe, kolejowe, parkingi i place składowe.

3. OPIS POLETKA DOŚWIADCZALNEGO

3.1. UWAGI OGÓLNE

Badania pali i kolumn, stanowiące przedmiot niniejszego artykułu wykonano jesienią 2010 roku na specjalnie przygotowanym do tego celu terenowym poletku doświadczalnym, zorganizowanym przy okazji budowy obwodnicy drogowej Pruszcza Gdańskiego. Na niektórych odcinkach drogi, z niekorzystną budową geotechniczną podłoża gruntowego, zastosowano wzmocnienie za pomocą kolumn przemieszczeniowych wkręcanych typu SDC. Poletko doświadczalne przygotowano obok jednego z takich odcinków, w miejscu poza obszarem robót budowlanych. Dzięki temu badania naukowe na poletku nie kolidowały z procesem budowlanym, co dawało dużą swobodę w ich organizacji.

Na poletku wykonano 2 kolumny badawcze SDC, 2 pale badawcze SDP oraz 10 pali kotwiących do kotwienia stanowisk do próbnych obciążeń. Układ w planie poletka doświadczalnego przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Plan poletka doświadczalnego, kolumny i pale ϕ 356 mm
Fig. 2. Investigation site map, columns and piles of 356 mm diameter

Należy zaznaczyć, że określenie „pal" czy „kolumna" ma w tym przypadku charakter czysto umowny. Różnica polegała tylko na wielkości zagłębienia w gruncie nośnym - pale wykonano o większym zagłębieniu. Również w praktyce rozgraniczenie pomiędzy palami i kolumnami betonowymi nie jest zbyt ścisłe. Zazwyczaj kolumnami określa się elementy wykorzystywane do wzmocnienia słabych podłoży gruntowych, głównie pod nasypy. Kolumny są najczęściej niezbrojone, gęsto rozstawione w siatce kwadratowej lub trójkątnej, a ich głowice nie są wzajemnie powiązane oczepem. Trzony kolumn mogą być wykonywane z materiału mniej sztywnego (np. piasek, żwir lub inne kruszywa) lub bardziej sztywnego (beton). Pale natomiast, są elementami służącymi głównie do fundamentowania budynków i innych obiektów. Ich trzony są sztywne, wykonywane z betonu zbrojonego, rur lub innych profili stalowych, a głowice wzajemnie powiązane oczepem fundamentowym. W przypadku kolumn betonowych, ich charakter pracy w gruncie jest praktycznie taki sam jak pali. Kolumny są zwykle mniej obciążone niż pale, ale głównie z powodu mniejszego rozstawu. Stąd też wynikają ich mniejsze zagłębienia w gruncie nośnym. Zdaniem autora wyniki opisywanych w artykule badań można odnosić zarówno do betonowych (żelbetowych) pali wkręcanych, jak i do betonowych kolumn wkręcanych, niezależnie od ich zagłębienia w gruncie nośnym. Dalsze rozważania w artykule będą dotyczyć zarówno jednych, jak i drugich.

3.2. CHARAKTERYSTYKA I BADANIA PODŁOŻA GRUNTOWEGO

Podłoże gruntowe rejonu badań miało budowę geotechniczną typową do zastosowania kolumn lub pali. Wierzchnią warstwę o grubości około 1,5 m stanowiły piaski średnie i nasypy zawierające również platformę roboczą. Poniżej znajdowała się warstwa gruntów organicznych – torfów i namułów, które zalegały do głębokości około 4,5 m ppt. Bezpośrednio pod nimi występowały już grunty nośne, w postaci najpierw zagęszczonych pospółek, a głębiej piasków średnich i drobnych średniozagęszczonych. Swobodne zwierciadło wody gruntowej znajdowało się na głębokości około 0,8 m poniżej poziomu terenu.

Parametry podłoża gruntowego określono na podstawie dokumentacji przygotowanej do projektu budowy drogi, ale również na podstawie dodatkowych badań wykonanych bezpośrednio na poletku doświadczalnym. W ramach dodatkowych badań wykonano sondowania statyczne (CPTU) oraz otwory badawcze (OW). Badania wykonano sondą (rys. 3), wyposażoną w końcówkę z pomiarem elektrycznym.

Sondowania przeprowadzono w dwóch fazach. W pierwszej fazie wykonano 4 sondowania dokładnie w osiach przyszłych kolumn i pali badawczych, pokazanych na rysunku 2. Następnie, po upływie około 2 tygodni od wykonania kolumn i pali, wykonano dwa powtórne sondowania, obok kolumny SDC-b2 i obok pala SDP-b4, w odległości około 60 cm od ich osi (rys. 3b). Celem powtórnych sondowań było określenie zmian w podłożu gruntowym, spowodowanych wykonaniem kolumn i pali. Przykładowe wykresy sondowań przedstawiono na rysunku 4.

a) b)

Rys. 3. Sondowania CPTU: a) przed wykonaniem pali i kolumn, b) obok wykonanego pala
Fig. 3. CPTU tests: a) before piles and columns installation, b) near installed pile

W przypadku sondowań odpowiadających kolumnie SDC-b2 i palowi SDP-b4 nałożono na siebie wykresy oporów q_c i f_s przed i po wykonaniu pala lub kolumny. Wykresy oporów q_c z sondowń podano również informacyjnie na kilku dalszych rysunkach. Oprócz sondowań wykonano dwa otwory badawcze OW1-2 i OW3-4, których lokalizację zaznaczono na rys. 2.

3.3. WYKONYWANIE KOLUMN I PALI NA POLETKU DOŚWIADCZALNYM

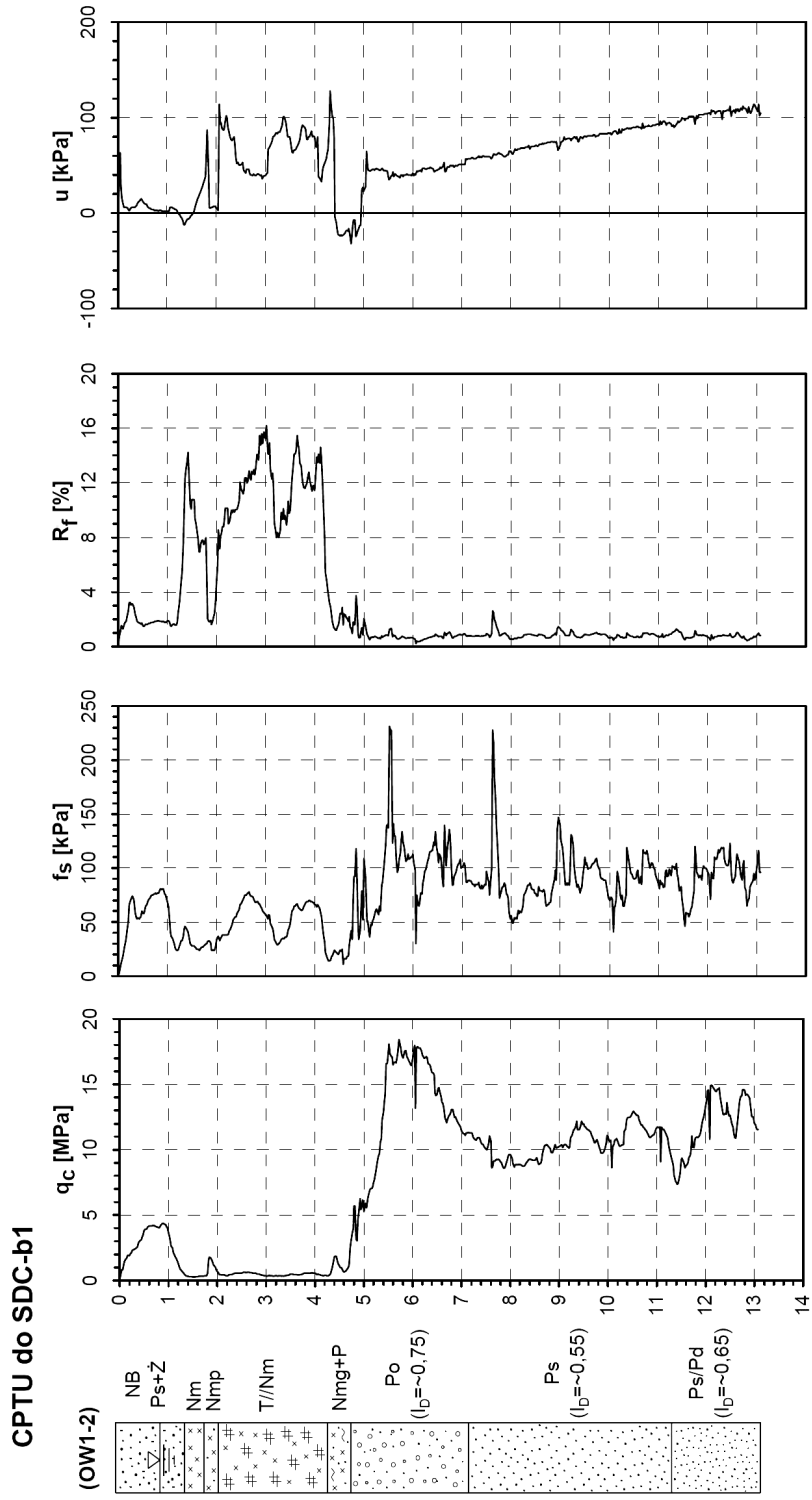
Do celów badawczych wykonano 2 kolumny: SDC-b1 i SDC-b2 i 2 pale: SDP-b3 i SDP-b4, a do celów pomocniczych – 10 pali kotwiących. Technika wykonania wszystkich była ogólnie taka sama. Użyto świdra typu SDP (rys. 5) o średnicy 360 mm oraz palownicy o maksymalnym momencie obrotowym 200 kNm. Parametry wykonywania kolumn były rejestrowane i uwidocznione na metrykach, z których dwie przykładowo pokazano na rysunku 6.

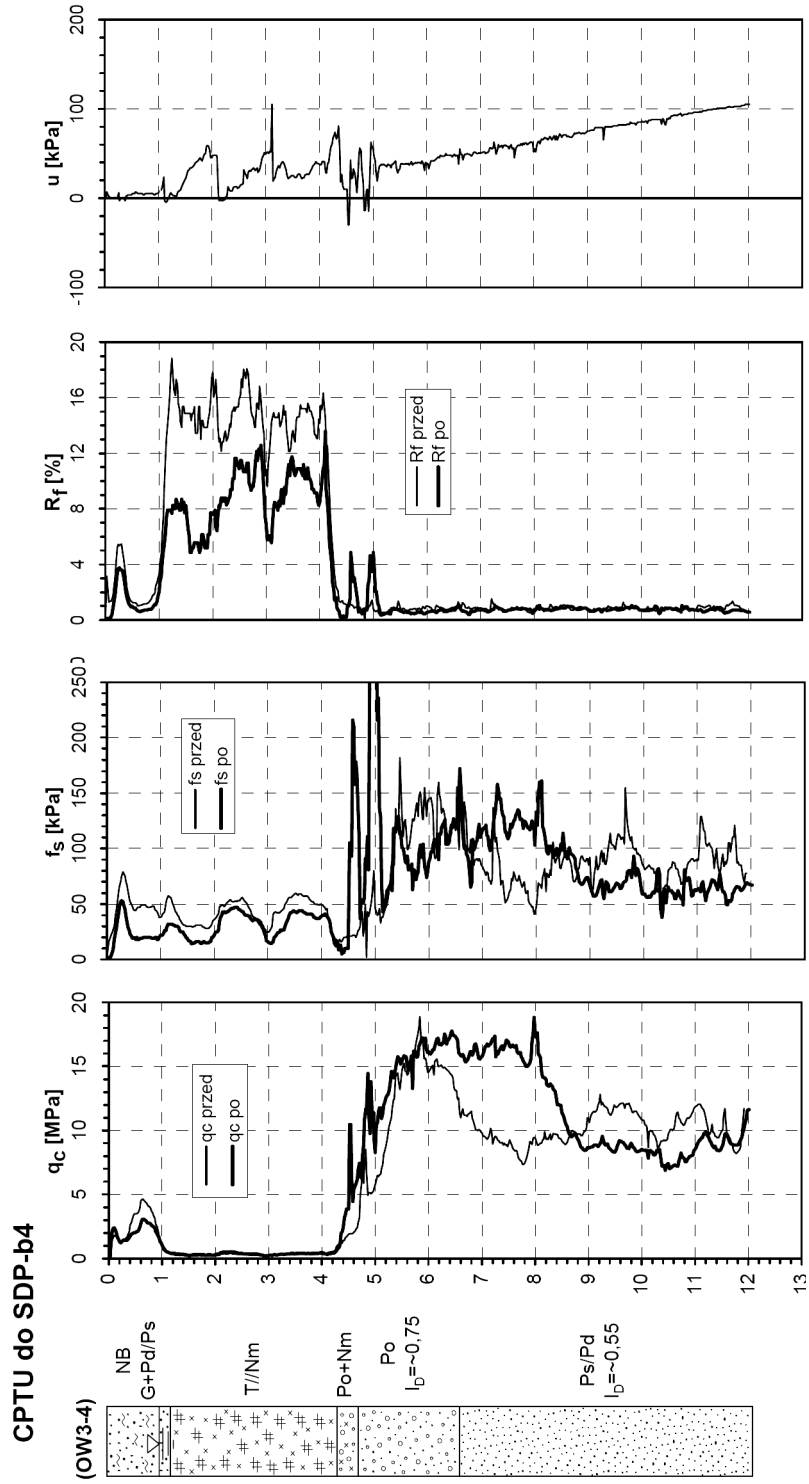
Zarówno pale, jak i kolumny badawcze wykonano bez zbrojenia, natomiast w osiach ich trzonów umieszczono stalowe rurki 57/2,9 mm do późniejszego zainstalowania w nich łańcucha czujników pomiarowych. Zrezygnowano ze zbrojenia pali głównie ze względu na obawy co do możliwości doprowadzenia go do końca pali, co z kolei znacznie utrudniłoby interpretację pomiarów czujnikami umieszczonymi wewnątrz rurek. Interpretacja ta bazuje na sztywności osiowej trzonu pala *EA* i najlepiej jak ta sztywność jest możliwie jednakowa na całej długości pala. Rurki, zaopatrzone w odpowiednie prowadnice dystansowe, wciskano w świeżą mieszankę betonową tuż po wykonaniu danego pala lub kolumny (rys. 7). Zamierzano je zagłębić aż do samych podstaw, jednak nie udało się tego w pełni wykonać, ze względu na duże opory, spowodowane prawdopodobnie szybkim odpływem wody zarobowej z mieszanki betonowej do gruntu piaszczystego. Fakt ten potwierdził wspomniane wcześniej obawy co do możliwości doprowadzenia do końca szkieletów zbrojeniowych. Należy zaznaczyć, że problem doprowadzania zbrojenia do końca pali metodą wibracyjną w takich technologiach jak CFA, SDP, FDP, OMEGA itp., a szczególnie wykonywanych w piaskach, nadal sprawia kłopot wykonawcom i nie został jeszcze, jak dotąd, jednoznacznie rozwiązany.

Pale i kolumny badawcze wyposażono ponadto we wzmocnione głowice (rys. 7).

Pale kotwiące zazbrojono dwuteownikami IP120, wprowadzanymi również wibracyjnie w świeżą mieszankę betonową pala. Także i w tym przypadku nie obeszło się bez problemów z doprowadzeniem profili stalowych do podstaw wszystkich pali.

Widok poletka doświadczalnego po wykonaniu wszystkich kolumn i pali przedstawia rysunek 8.


CPTU do SDC-b1
(OW1-2)
u [kPa]
200
100
0
-100
R_f [%]
20
16
12
8
4
0
f_S [kPa]
250
200
150
100
50
0
q_C [MPa]
20
15
10
5
0
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
NB
Ps+Ż
Nm
Nmp
T/Nm
Nmg+P
Po
(I_D=~0,75)
Ps
(I_D=~0,55)
Ps/Pd
(I_D=~0,65)

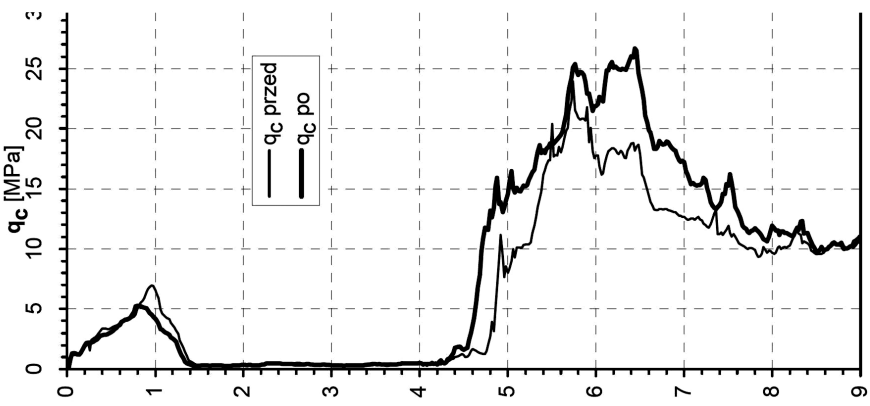


Rys. 4. Przykładowe wyniki sondowań CPTU (podobne wyniki otrzymano w pozostałych punktach)
Fig. 4. Sample CPTU test results (other results were very similar)

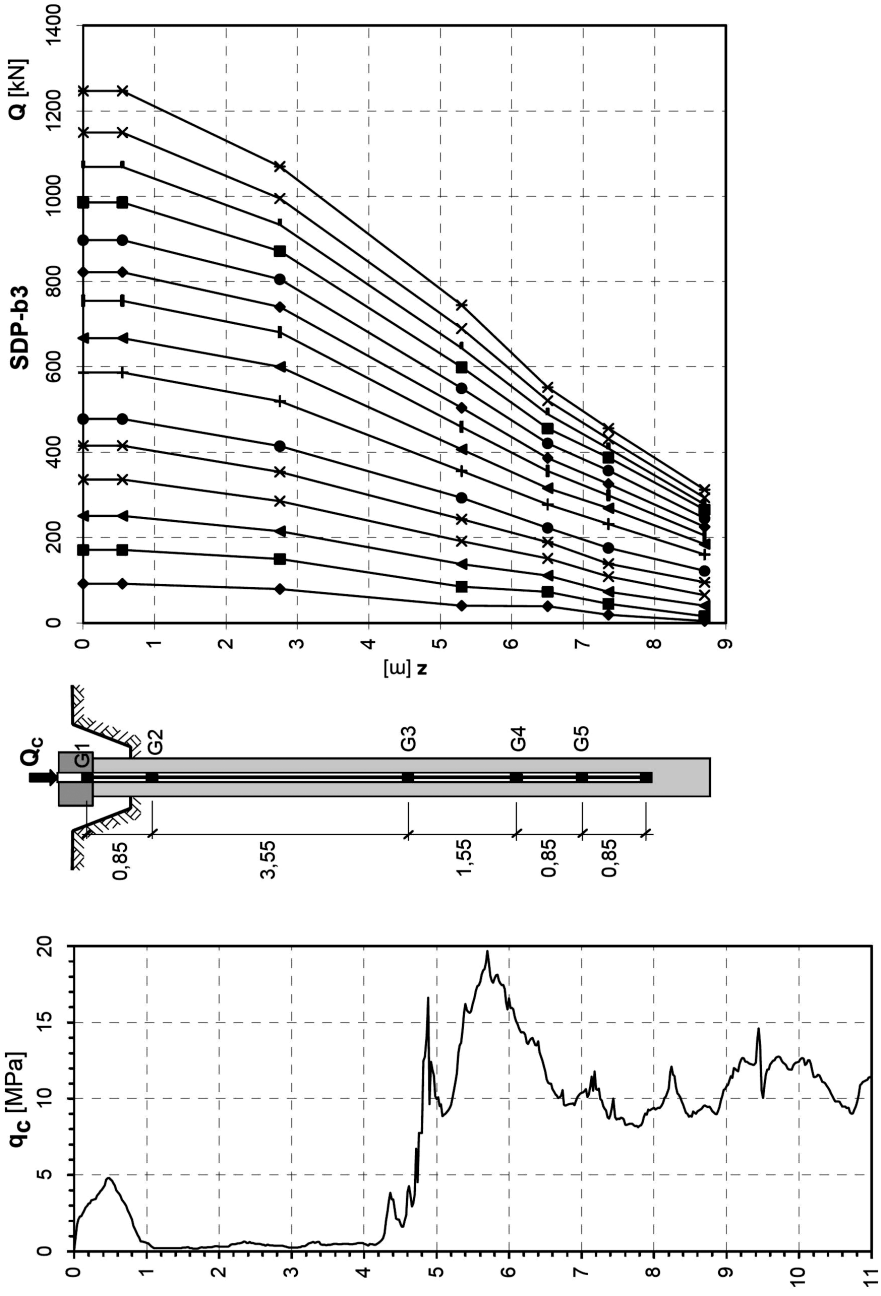
a)

b)

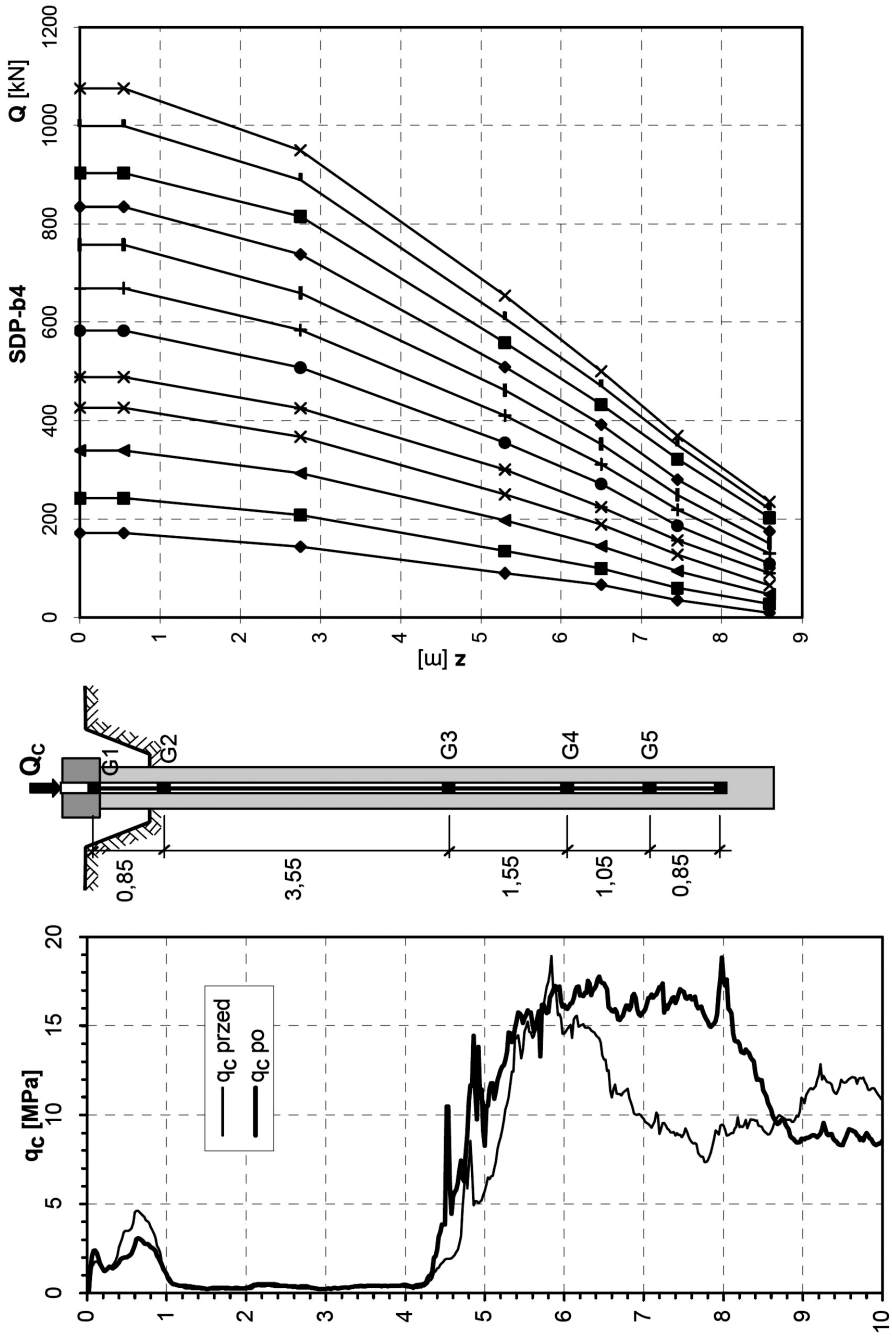
Rys. 5. Świder SDP ϕ 356 mm: a) widok, b) w czasie pracy
Fig. 5. The SDP auger of 356 mm diameter: a) view, b) during work



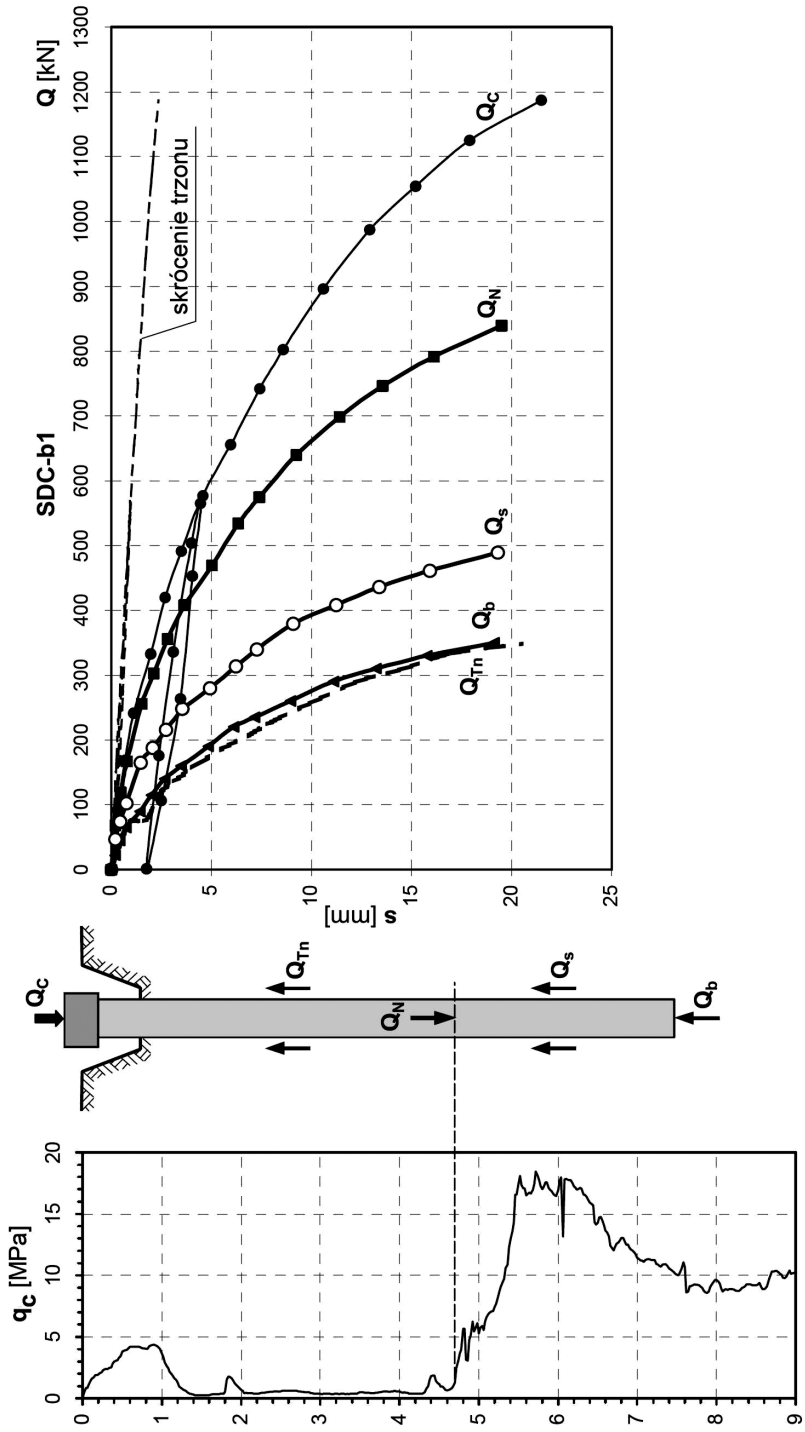
Rys. 13. Rozkłady pionowe siły w kolumnie SDC-b2 otrzymane z pomiarów odkształceń trzonu
Fig. 13. Vertical distribution of axial force along SDC-b2 column measured by extensometers



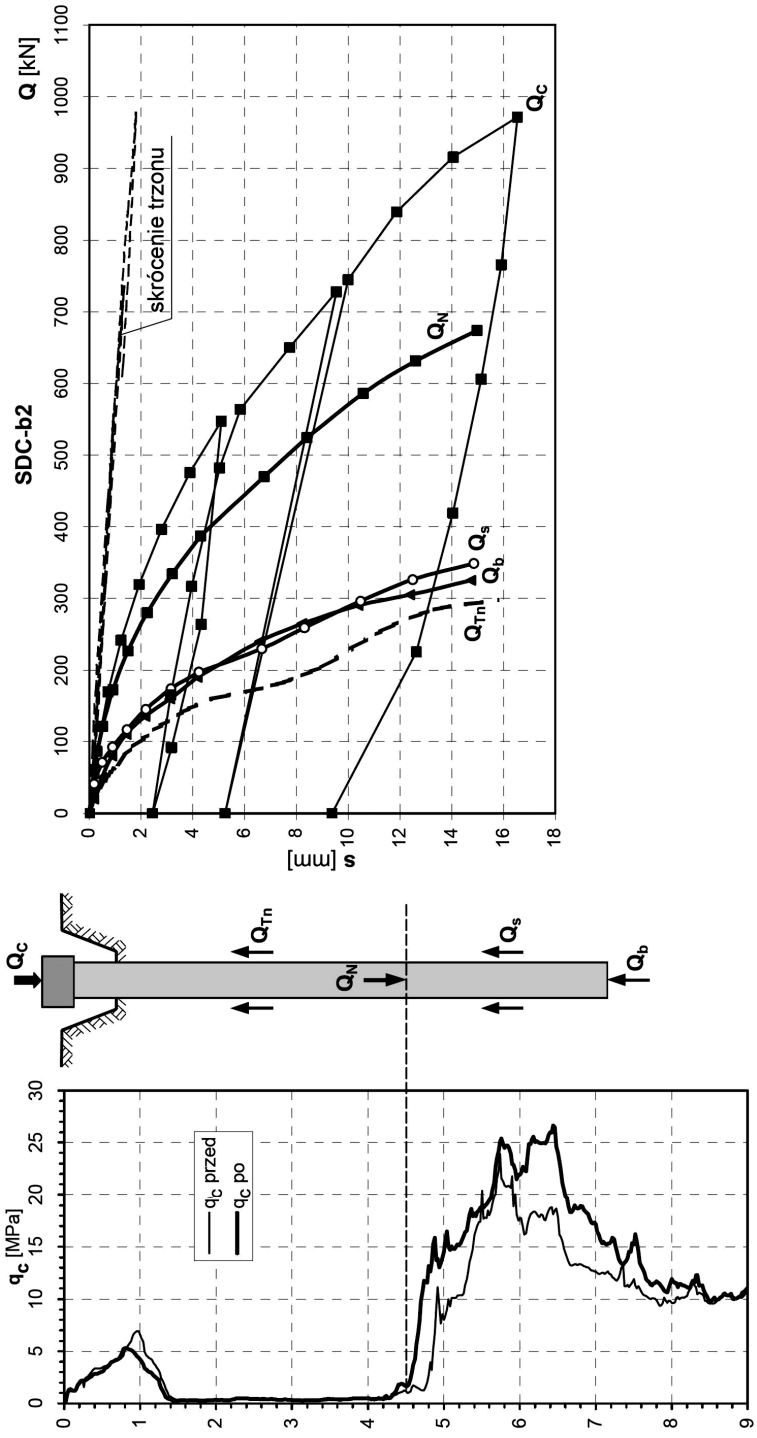
Rys. 14. Rozkłady pionowe siły w palu SDP-b3 otrzymane z pomiarów odkształceń trzonu
Fig. 14. Vertical distribution of axial force along SDP-b3 pile measured by extensometers



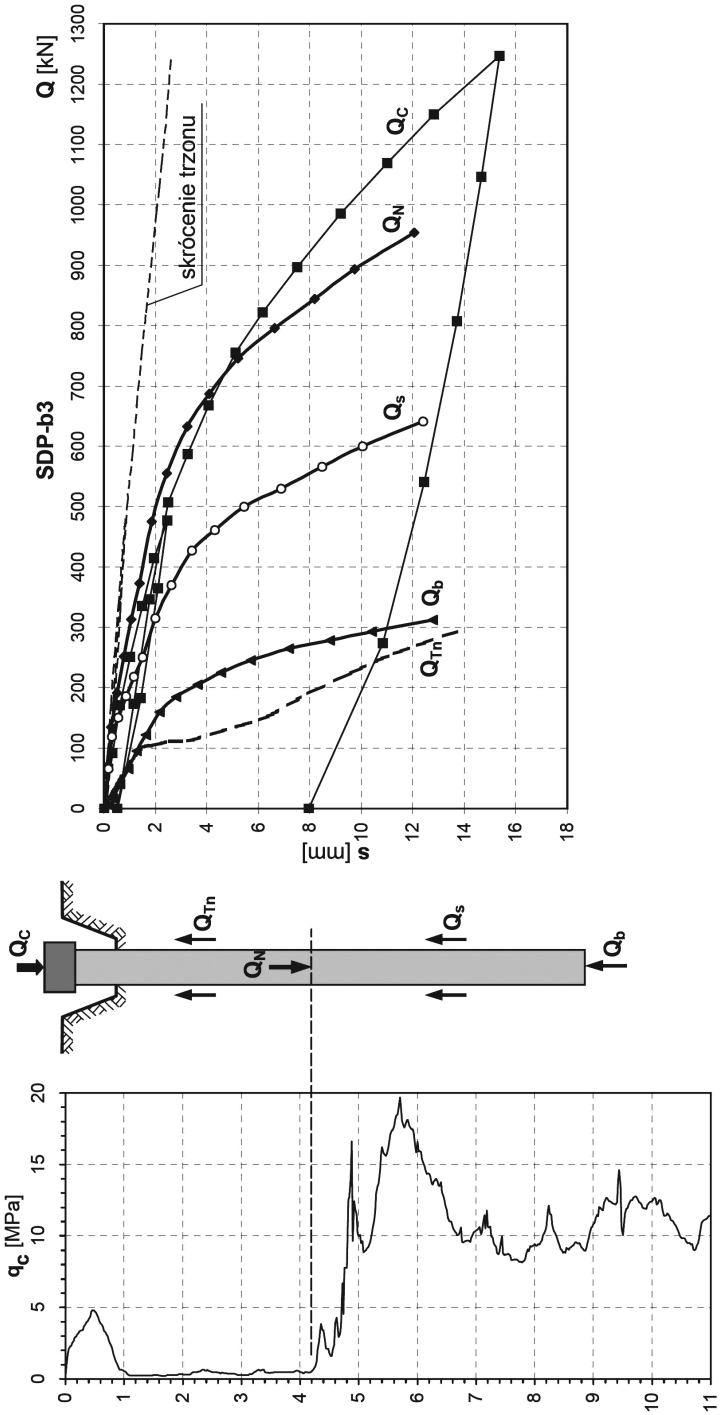
Rys. 15. Rozkłady pionowe siły w palu SDP-b4 otrzymane z pomiarów odkształceń trzonu
Fig. 15. Vertical distribution of axial force along SDP-b4 pile measured by extensometers



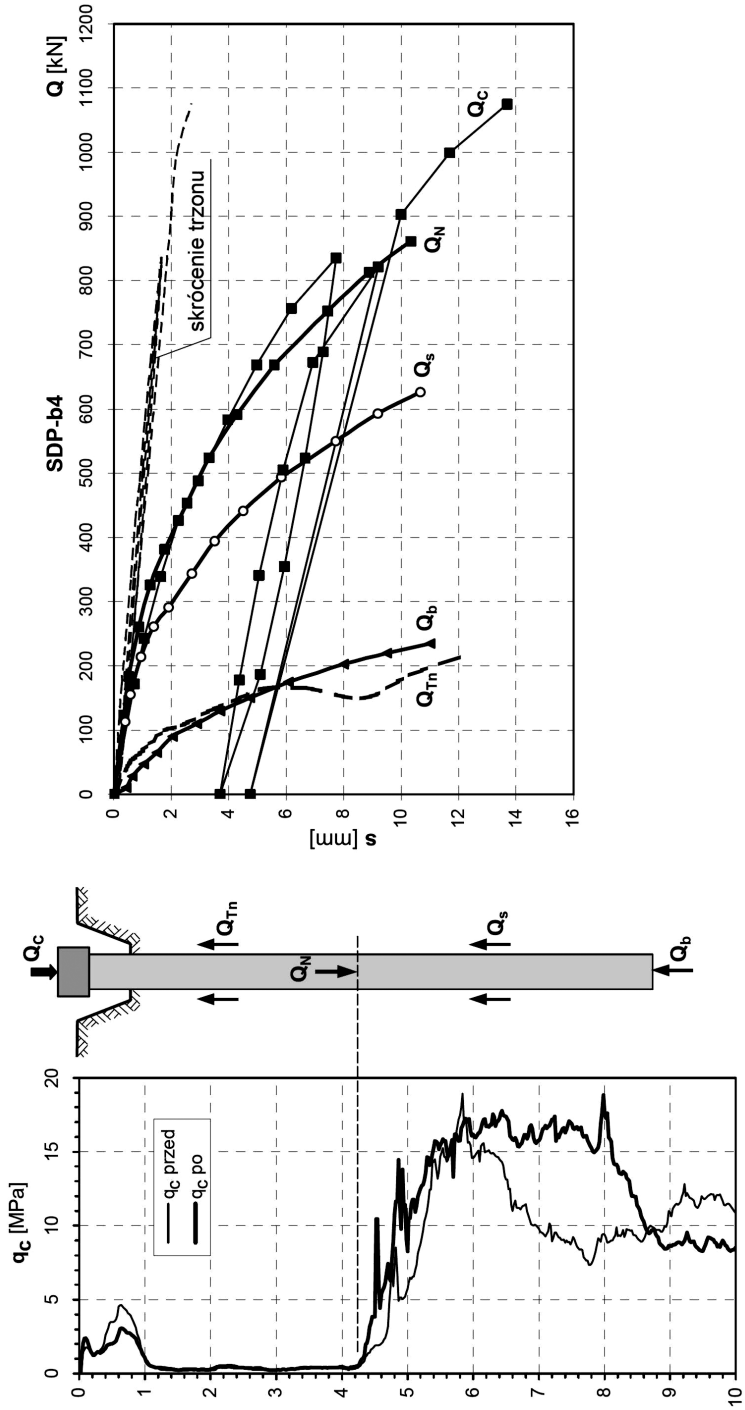
Rys. 16. Wykresy sił przejmowanych przez poszczególne partie gruntu dla kolumny SDC-b1
Fig. 16. Mobilization of Q_b, Q_s and Q_{Tn} resistances in SDC-b1 column test



Rys. 17. Wykresy sił przejmowanych przez poszczególne partie gruntu dla kolumny SDC-b2
Fig. 17. Mobilization of Q_b, Q_s and Q_{Tn} resistances in SDC-b2 column test



Rys. 18. Wykresy sił przejmowanych przez poszczególne partie gruntu dla pala SDP-b3
Fig. 18. Mobilization of Q_b, Q_s and Q_{Tn} resistances in SDP-b3 pile test



Rys. 19. Wykresy sił przejmowanych przez poszczególne partie gruntu dla pala SDP-b4
Fig. 19. Mobilization of Q_b, Q_s and Q_{Tn} resistances in SDP-b4 pile test

7. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

7.1. ANALIZA SONDOWAŃ CPTU

Wykonane, zaawansowane badania terenowe pali i kolumn, obejmujące sondowania CPTU, monitorowanie i rejestrację parametrów wykonawstwa oraz próbne obciążenia statyczne z rozszerzonym systemem pomiarowym, dostarczyły wielu cennych informacji, które posłużyły jako materiał do różnego rodzaju analiz.

Sondowania CPTU pozwoliły stwierdzić między innymi, że grunty nośne zalegające pod warstwą namułów mają parametry fizyczne i mechaniczne zmieniające się z głębokością. Początkowo, w górnej części o miąższości około 2,5 m notuje się wyższe opory q_c rzędu 18 - 22 MPa, co odpowiada zagęszczeniu o $I_D \approx 0{,}75$. Jak wykazały wiercenia, podwyższone opory q_c są dodatkowo spowodowane występowaniem warstwy pospółki na tym poziomie. Następnie opory sondy maleją do wartości q_c rzędu 10 MPa, co w przybliżeniu odpowiada zagęszczeniu o $I_D \approx 0{,}55$, i co jest też spowodowane przejściem pospółki w piaski średnie i drobne. Podane wartości I_D należy traktować jako orientacyjne, gdyż jak wiadomo zależą one też od metody interpretacji. Trzeba zauważyć, że podłoże gruntowe o takiej budowie i parametrach jest przydatne do zastosowania pali lub kolumn przemieszczeniowych. Dolne warstwy piasków o oporach q_c rzędu 10 MPa wymagają jeszcze dogęszczenia do dobrej współpracy z palami. Problematyczne mogło być przejście świdrem przez leżące wyżej przewarstwienie pospółek. Jak się jednak okazało, zastosowany świder i palownica poradziły sobie z tym problemem.

Sondowania powtórne wykazały wzrost oporów q_c gruntu w sąsiedztwie wykonanych kolumn i pali. Został on spowodowany zarówno dogęszczeniem, jak i wzrostem naprężeń w gruncie. Wzrost oporów q_c jest mniejszy w tych partiach, w których grunt już pierwotnie miał duże zagęszczenie, natomiast większy w niższych partiach o pierwotnie mniejszym zagęszczeniu gruntu. Wynika stąd, że w gruntach o odpowiednio dużym zagęszczeniu świdry przemieszczeniowe nie powodują już wyraźnego wzrostu tego zagęszczenia i stosowanie pali wkręcanych w takich warunkach może być mało efektywne, a dodatkowo sprawiać kłopoty z wkręceniem świdra. Nieco inaczej jest z kolumnami, których ideą jest niewielkie zagłębienie w gruntach nośnych (oparcie głównie podstawą) i wówczas, im mocniejsze i bardziej zagęszczone są te grunty, tym lepiej.

Z wykresów powtórnych sondowań można ponadto wywnioskować, że zasięg wzrostu oporów q_c sięga niewiele poniżej podstaw wykonanych pali i kolumn, co świadczy o tym, że technika zagłębiania świdra przez wkręcanie oddziaływuje istotnie na grunt w otoczeniu świdra, a wyraźnie mniej w strefę pod świdrem.

7.2. ANALIZA OPORÓW WKRĘCANIA ŚWIDRA

Opory wkręcania świdrów w metrykach wyrażone są wykresami ciśnienia oleju w układzie hydraulicznym napędzającym głowicę obrotową. Wykresy te ogólnie pokrywają

się z wykresami oporów q_c sondy wciskanej, jednak trzeba tu jeszcze uwzględnić długość świdra i przelicznik ciśnienia oleju na moment obrotowy M_T. Według danych technicznych wiertnicy, maksymalny moment obrotowy o wartości 200 kNm uzyskiwany jest przy ciśnieniu oleju 300 barów i prędkości obrotowej 7 obrotów na minutę. Analizując metryki wykonania pali i kolumn można zauważyć, że w przypadku kolumn SDC-b1 i SDC-b2 zagłębienie świdra w końcowej fazie wymagało użycia około 60 - 80% mocy maszyny, a w przypadku pali SDP-b3 i SDP-b4 było to około 90 - 100% mocy maszyny. Ze względu na złożoność i obszerność zagadnienia, szczegółowa analiza oporów wkręcania świdrów będzie przedmiotem odrębnych opracowań i publikacji autora.

7.3. ANALIZA WYKRESÓW Q–S Z PRÓBNYCH OBCIĄŻEŃ PALI I KOLUMN

Kształt wykresów *Q–s* przedstawionych na rysunku 11 jest typowy dla pali i kolumn wkręcanych. Podobne kształty wykresów uzyskiwano z badań różnego typu pali wkręcanych (Atlas, Omega, SDP itp.), wykonywanych na wielu budowach Polski [2, 3, 14 - 17]. Wykresy charakteryzują się wyraźnym zakrzywieniem, większym niż się obserwuje w przypadku pali wbijanych, lecz mniejszym niż w palach wierconych. Potwierdza to opinię, że pale wkręcane pod względem nośności i sztywności mieszczą się pomiędzy wbijanymi i wierconymi. Krzywe *Q–s* potwierdzają ponadto zależność sztywności od długości – im dłuższy pal lub kolumna tym większa sztywność. Znaczne zakrzywienie wykresów może świadczyć o stosunkowo powolnym mobilizowaniu się oporów gruntu zarówno wzdłuż pobocznic jak i pod podstawami badanych pali i kolumn.

7.4. ANALIZA WYKRESÓW OPORÓW Q_s, Q_b ORAZ Q_{Tn}

Z wykresów zależności poszczególnych oporów gruntu wyrażonych siłami: Q_s, Q_b i Q_{Tn} od przemieszczeń, przedstawionych na rysunkach od 16 do 19 wynika, że dużą część obciążeń całkowitych badane pale i kolumny przenoszą przez opór pobocznicy Q_s. Opór ten jest tym większy, im większe jest zagłębienie pala lub kolumny w gruncie nośnym. Jest to fakt oczywisty, ale ważne jest, że potwierdza wiarygodność wykonanych pomiarów czujnikami odkształceń. Na uwagę zasługuje fakt, że opory Q_s, chociaż coraz wolniej, ale cały czas wzrastają z przemieszczeniami, co jest zjawiskiem raczej nietypowym. Zwykle uważa się, że opory gruntu wzdłuż pobocznicy pala szybko się wzbudzają i osiągają maksymalną wartość przy przemieszczeniach około 5 mm. Przy dalszym wzroście przemieszczeń ulegają stabilizacji lub nawet maleją. Być może zaobserwowany nietypowy przebieg mobilizacji oporów Q_s gruntu ma związek ze zmianami w stanie naprężenia i zagęszczenia gruntu, jakie powoduje technika wykonywania pali i kolumn wkręcanych. Wyjaśnienie tego zagadnienia jest nadal tematem otwartym i wymaga analizy większej liczby badań.

W odniesieniu do oporów gruntu pod podstawą Q_b należy stwierdzić, że ich udział w przenoszeniu całkowitych obciążeń z pala (kolumny) nie jest zbyt duży i praktycznie nie wzrasta z głębokością, a nawet maleje. W rozpatrywanym przypadku można to jednak dodatkowo wytłumaczyć obniżeniem się z głębokością parametrów mechanicznych gruntu, na co zwracano uwagę przy analizie sondowań CPTU. Mobilizacja oporów Q_b przebiega ponadto bardzo wolno z przemieszczeniami, co świadczy o niezbyt dużej sztywności gruntu pod podstawami pali (kolumn). Z analizy wykresów wynika, że opory Q_b w końcowej fazie obciążenia zbliżają się już do wartości granicznych.

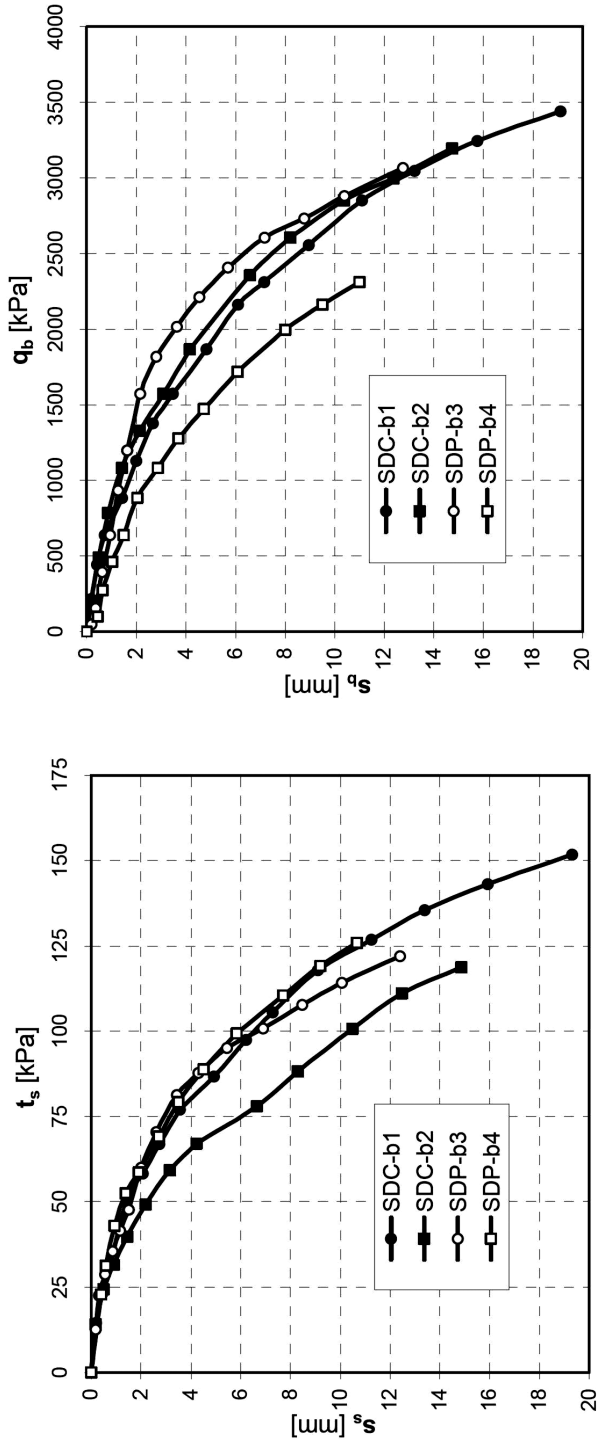
Na szczególną uwagę zasługują duże wartości sił Q_{Tn}, czyli oporów stawianych przez górne partie podłoża gruntowego, zawierające głównie warstwy słabych gruntów organicznych. Wynoszą one od 250 kN do nawet ponad 300 kN, co w przeliczeniu na średnie opory jednostkowe daje wartości rzędu 50 do 70 kPa. Tak duże wartości mogą zastanawiać. Zwykle uważa się, że opory tarcia słabych gruntów organicznych osiągają wartości rzędu 10 do 20 kPa. Możliwe, że tak duże wartości oporów, zinterpretowane z przeprowadzonych pomiarów, wynikają z dużych prędkości obciążania i przemieszczania się badanych pali lub kolumn. Mogło to powodować ciągłą mobilizację tych oporów. Po zatrzymaniu się przemieszczeń pali (kolumn) prawdopodobnie uległyby one dużej redukcji. Niemniej, jak się okazuje, udział warstw słabych w przenoszeniu sił wywieranych na pale w czasie próbnych obciążeń może być znaczący i orientacyjne przyjmowanie wartości tego udziału, bądź pomijanie go, przy analizie wyników badań może być obarczone dużym błędem.

7.5. ANALIZA WARTOŚCI JEDNOSTKOWYCH OPORÓW t_s ORAZ q_b

Wartości sił Q_s i Q_b przeliczono na uśrednione wartości jednostkowe gruntu t_s i q_b. Zestawione dla wszystkich 4 badanych pali i kolumn wykresy mobilizacji oporów t_s i q_b pokazano na rysunku 20.

W odniesieniu do oporów tarcia na pobocznicy t_s można zauważyć, że w fazie końcowej badań przyjmują one wartości od 120 do 150 kPa. Na uwagę zasługuje fakt, że wykresy tych oporów przebiegają generalnie blisko siebie. Jedynie wykres t_s dla kolumny SDC-b2 nieznacznie odbiega od pozostałych, ale może to być też wynikiem niedoskonałości pomiarów. Zbliżone przebiegi i wartości oporów t_s świadczą o tym, że zagłębianie świdra przemieszczeniowego powoduje ogólne wyrównywanie się parametrów przylegającego gruntu. Jest to korzystne zjawisko, gdyż wpływa na równomierną pracę wszystkich pali lub kolumn wykonywanych tą samą maszyną i tym samym świdrem. Małe jest niebezpieczeństwo trafiania się pali słabych, jak i pali zbyt mocnych.

Na podstawie wykresu na rysunku 20 można przyjąć, jako bezpieczną do projektowania, średnią wartość t_s = 100 kPa, która odpowiada przemieszczeniu około 6,0 mm. Przyrównując następnie ją do wartości *t* zalecanych w normie PN-83/B-02483 (tabl. 2 i 4 normy) dla zbliżonego rodzaju gruntu (piasek średni i pospółka) można zauważyć, że odpowiadają one w przybliżeniu palom wbijanym Vibro (współczynnik technologiczny $S_s = 1{,}1 \div 1{,}2$).



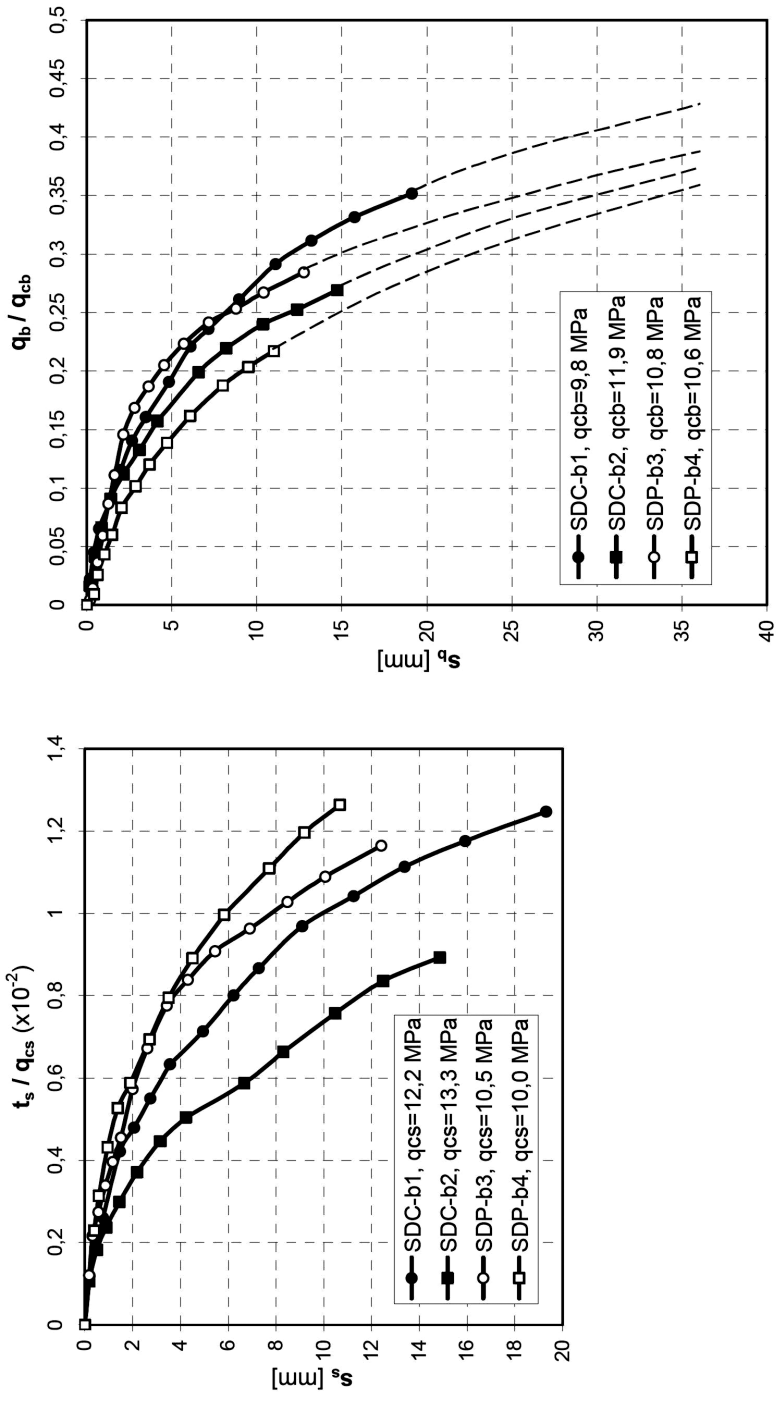
Rys. 20. Mobilizacja jednostkowych oporów gruntu wzdłuż pobocznicy t_s i pod podstawą q_b
Fig. 20. Mobilization of unit t_s and q_b resistances for all pile and column tests

W odniesieniu do oporów jednostkowych q_b gruntu pod podstawami badanych pali i kolumn można zauważyć, że w końcowej fazie badań przyjmują one wartości od 3000 kPa do 3500 kPa. Tym razem od ogólnej tendencji odbiega wykres q_b dla pala SDP-b4, dla którego końcowa wartość q_b wynosi około 2300 kPa. Podobnie jak wyżej, może to być efektem błędów pomiarowych. Wykresy q_b także przebiegają blisko siebie i zmierzają do podobnej wartości granicznej. Świadczy to o wyrównanej pracy również podstaw badanych pali i kolumn. Podobnie jak w przypadku oporów t_s, w odniesieniu do oporów q_b określono bezpieczną wartość projektową, którą na podstawie wykresu na rysunku 20 przyjęto jako q_b = 2500 kPa. Jest ona mobilizowana przy przemieszczeniach od 6 mm do 9 mm. W odniesieniu do zaleceń normy PN-83/B-02483 powyższa wartość q_b odpowiada w przybliżeniu palom wierconym (współczynnik technologiczny S_p = 0,8 ÷ 1,0).

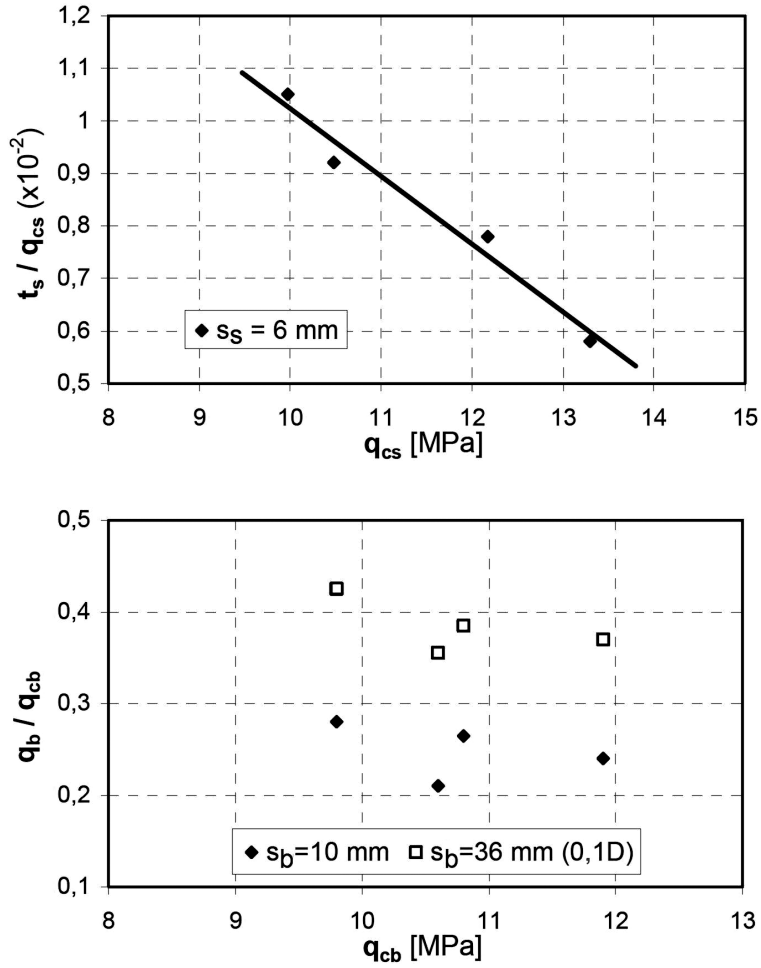
7.6. ANALIZA RELACJI BEZWYMIAROWYCH t_s/q_c ORAZ q_b/q_c

Według obecnej tendencji, nowoczesne i efektywne metody projektowania pali i prognozowania ich nośności powinny bezpośrednio wykorzystywać wyniki badań „in situ" podłoża gruntowego. Pozwala to wyeliminować wiele błędów wynikających z różnego rodzaju korelacji i przeliczeń pośrednich. Wyniki sondowań CPTU, ale również badania presjometryczne, wyznaczają rzeczywiste wartości oporów gruntu, w których zawarty jest już wpływ wielu czynników, takich jak rodzaj gruntu, uziarnienie, zagęszczenie, poziom naprężenia, sztywność, wytrzymałość na ścinanie, warunki zalegania w podłożu itd. Dlatego bardzo przydatne jest poszukiwanie bezpośrednich relacji pomiędzy oporami gruntu t_s wzdłuż pobocznicy i q_b pod podstawą pala, a oporami q_c pod stożkiem sondy CPT(U). Relacje takie utworzono także z wyników przeprowadzonych badań, które przedstawiono w funkcji przemieszczeń na rysunku 21. W relacji t_s/q_{cs}, jako q_{cs} przyjęto uśrednioną wartość q_c z całej długości pobocznicy w gruncie nośnym, natomiast w relacji q_b/q_{cb} wartość q_{cb} przyjęto jako uśrednioną z przedziału głębokości od poziomu równego jednej średnicy pala (kolumny) nad podstawą do poziomu dwóch średnic poniżej podstawy pala (kolumny).

Jak można zauważyć, wykresy relacji t_s/q_{cs} wykazują większy rozrzut w porównaniu z wykresami wartości bezwzględnych t_s. W celu znalezienia jakiejś prawidłowości przeanalizowano następnie zależność pomiędzy relacją względną t_s/q_{cs} odpowiadającą przemieszczeniu równemu 6 mm, a wartością oporu gruntu pod stożkiem sondy q_{cs}, co przedstawiono na rysunku 22a. Otrzymano prawidłowość, że relacja t_s/q_{cs} maleje ze wzrostem q_{cs} w przybliżeniu liniowo. Jest to kolejny dowód na to, że technika wykonawstwa pali wkręcanych wpływa na ogólne wyrównywanie się warunków współpracy gruntu z pobocznicą pala. Może to być efektem nie tylko procesu wkręcania świdra, ale również fazy betonowania pala (kolumny) mieszanką podawaną pod określonym ciśnieniem.



Rys. 21. Opory t_s i q_b w relacjach względnych do oporów q_c sondy statycznej
Fig. 21. Unit t_s and q_b resistances in dimensionless relations to q_c resistances of CPTU test



Rys. 22. Zależność t_s/q_{cs} od q_{cs} oraz q_b/q_{cb} od q_{cb}
Fig. 22. Relations between t_s/q_{cs} and q_{cs} and between q_b/q_{cb} and q_{cb}

W przypadku relacji q_b/q_{cb} można zauważyć zjawisko właściwie odwrotne w stosunku do relacji t_s/q_{cs}. Wykresy q_b/q_{cb} w funkcji przemieszczeń na rysunku 21b uległy wzajemnemu zbliżeniu w porównaniu z pierwotnymi wykresami wartości q_b z rysunku 20b. Relacje q_b/q_{cb} dla projektowych wartości q_b odpowiadających przemieszczeniom $s_b \cong 10$ mm zawierają się w przedziale od 0,21 do 0,28, a więc są zbliżone i wykazują również tendencję spadkową chociaż, dużo mniejszą niż w przypadku relacji t_s/q_{cs} (rys. 22b). Po ekstrapolacji do poziomu granicznych przemieszczeń (10% średnicy pala) relacje q_b/q_{cs} dążą do wartości z przedziału od 0,35 do 0,42. Wynika stąd, że opory gruntu pod podstawami pali wkręcanych są bliżej związane z początkowymi wynikami sondowań CPTU niż opory pobocznicy t_s.

Do wyprowadzania uogólnień dotyczących wzajemnych relacji pomiędzy oporami gruntu wokół pali i kolumn wkręcanych, a oporami q_c pod stożkiem sondy wciskanej potrzebna jest jednak większa liczba badań pali i kolumn pracujących w różnorodnych warunkach gruntowych.

8. WNIOSKI

Podstawowe wnioski, jakie można wyciągnąć z przebiegu i wyników przeprowadzonych badań terenowych pali i kolumn wkręcanych SDP i SDC, są następujące:

- Zastosowanie w czasie próbnych obciążeń statycznych rozszerzonego systemu pomiarowego zbudowanego np. z łańcucha czujników odkształceń, umożliwiającego rejestrację zmian osiowych odkształceń trzonu pala po jego długości, jest bardzo korzystne, gdyż dostarcza wielu cennych informacji na temat charakterystyk współpracy pala lub kolumny z ośrodkiem gruntowym.
- Pale i kolumny betonowe wkręcane główną część obciążeń przejmują przez opór gruntu nośnego wzdłuż pobocznicy Q_s. Opór pod podstawą Q_b przejmuje stosunkowo niewielką część obciążenia. Jest to efektem techniki wkręcania świdra, który rozpiera i naprężа grunt głównie w strefach bocznych, natomiast w niewielkim stopniu w strefie pod podstawą. Potwierdzają to również wyniki powtórnych sondowań CPTU wykonanych obok pali.
- Opory Q_s przeliczone na uśrednione jednostkowe tarcie t_s gruntu wzdłuż pobocznicy, dały wartości uznane za miarodajne do projektowania rzędu 100 kPa. W odniesieniu do proponowanych w normie są one zbliżone do wartości tarcia jak dla pali Vibro. Tymczasem opory jednostkowe q_b gruntu pod podstawą, uznane za miarodajne do projektowania, dały wartości rzędu 2500 kPa, które w odniesieniu do propozycji normowych odpowiadają oporom jak dla pali wierconych.
- Relacje względne t_s/q_{cs} dla projektowych wartości t_s odpowiadających przemieszczeniom $s_t \cong 6$ mm zawierają się w przedziale od 0,0055 do 0,01 i wykazują tendencję malejącą ze wzrostem oporów q_{cs}. Taka tendencja jest logiczna, gdyż wskazuje, że wokół pali i kolumn wkręcanych w gruntach mniej zagęszczonych następuje większy względny wzrost zagęszczenia niż w gruntach bardziej zagęszczonych. W przypadku niejednorodnego pierwotnego stanu zagęszczenia gruntu, po wykonaniu pala wkręcanego (kolumny wkręcanej) stan gruntu wokół pala (kolumny) staje się bardziej jednorodny.
- Relacje względne q_b/q_{cb} dla projektowych wartości q_b, odpowiadających przemieszczeniom $s_b \cong 10$ mm zawierają się w przedziale od 0,21 do 0,28. Dla granicznych wartości q_b, odpowiadających przemieszczeniom $s_b = 0{,}1D = 36$ mm relacje q_b/q_{cb} zawierają się w przedziale od 0,35 do 0,42, przy czym oszacowano je metodą ekstrapolacji. Należy stwierdzić, że relacje q_b/q_{cb} nie osiągają zbyt dużych wartości i zawierają się w dość wąskim przedziale. Świadczy to o tym, że opory q_b gruntu pod podstawą są w przybliżeniu proporcjonalne do oporów q_c sondy wciskanej. Wszystko to razem dowodzi, że technologia wykonywania pali wkręcanych w małym stopniu oddziałuje na stan zagęszczenia i naprężenia gruntu pod podstawą. Podstawy pali wkręcanych pracują podobnie jak pali wierconych.

- Powyższe wnioski dotyczą warunków konkretnych badań opisanych w artykule. W celu wyprowadzenia miarodajnych uogólnień oraz propozycji dotyczących projektowania pali i kolumn wkręcanych potrzebna jest większa liczba badań oraz bardziej dogłębne i szczegółowe analizy ich wyników.

BIBLIOGRAFIA

[1] *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, 3 - 8

[2] *Gwizdała K.*, *Krasiński A.*, *Brzozowski T.*: Experience gained at the application of Atlas piles in Poland. Proceedings of 10th International Conference on Piling and Deep Foundations, Amsterdam, 31st May - 2nd June, 2006, 460 - 464

[3] *Gwizdała K.*, *Krasiński A.*: Zastosowanie przemieszczeniowych pali wkręcanych w podłożu uwarstwionym na przykładzie realizacji obiektu w warunkach gruntowych delty Wisły. Inżynieria i Budownictwo nr 3/2009, 133 - 136

[4] *Bustamante M.*, *Gianeselli L.*: Installation parameters and capacity of screwed piles. Proceedings of International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, BAP III. Balkema, Rotterdam, 1998, 95 - 108

[5] *Van Impe W. F.*: Influence of screw pile installation parameters on the overall pile behaviour. Workshop "Piled Foundations: full scale investigations, analysis and design", Naples, 1994

[6] *Krasiński A.*: Model tests of screwed piles. Proc. of the XIV Danube-European Conf. on Geotechnical Engineering "From Research to Design in European Practice", Bratislava, Slovak Republic, 2 - 4 June 2010, 237 + CD

[7] Krasiński A.: Advanced field investigations of screw piles and columns. XVth Polish-French Colloquium, Gdansk, 7 - 9 October 2010 and Archives of Civil Engineering (w druku)

[8] *Huybrechts N.*, *Maertens J.*, *Holeyman A.*: Ground displacement screw piles project in Belgium - 72 pile load testing at two different sites. Proceedings of the 13th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Praha, Czech Republic, 25 - 28 August 2003

[9] *Maertens J.*, *Huybrechts N.*: Belgian screw pile technology. Design and recent developments. Swets & Zeitlinger B.V., Lisse, The Netherlands, 2003, 372

[10] *Holeyman A.*: Screw Piles - Installation and design in stiff clays. Lisse, Balkema Publishers, 2001, 323

[11] *Saeki E.*, *Ohki H.*: A study of the screwed pile – The results of installation and loading tests and analysis of penetration mechanisms. Proceedings of International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger piles, Ghent, 2003, 259 - 266

[12] *Slatter J.W.*, *Seidel J.P.*, *Kingwell W.*: A proposed model for soil/auger interaction during installation of screw piling augers. Proceedings of the 25th Annual Members' Conference and Eighth International Conference and Exposition, New York 2000

[13] *Bottiau M.*, *Imbo R.*: Recent evolution in piling technologies in Western Europe. Materiały seminarium „Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych", PKG O/Gdańsk, Gdańsk 25 czerwca 2004

[14] *Rogowski R.*, Franczak P.: Zastosowanie pali FDP (Full Displacement Piles) w budownictwie mostowym. Seminarium IBDiM i PZWFS „Fundamenty palowe 2009", Warszawa 22 kwietnia 2009

[15] *Gwizdała K.*, *Krasiński A.*: Posadowienie obiektów mostowych na palach przemieszczeniowych formowanych w gruncie. Obiekty inżynierskie nr 2/2010, 70 - 85

[16] *Gwizdała K.*: Fundamenty palowe. Tom 1: Technologie i obliczenia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010, 297

[17] *Gwizdała K.*: Współczesne technologie pali. Materiały Seminarium „Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych", Gdańsk, czerwiec 2004, 7 - 32

[18] *Krasiński A.*, *Sieńko R.*: Pomiar pionowego rozkładu siły w palu podczas testów statycznych. Mat. 56 Konf. Nauk. KILiW PAN oraz KN PZITB, Kielce - Krynica, 19 - 24 września 2010, 161 - 168

[19] *Krasiński A.*, *Sieńko R.*: Wykorzystanie pomiaru pionowego rozkładu siły w palu do interpretacji testów statycznych. Magazyn Autostrady nr 11/2010, 24 - 28

INFORMACJE DODATKOWE

Badania przeprowadzono w ramach projektu badawczego nr N N506 432936 „nośność i praca w gruncie pali wkręcanych", finansowanego przez MNiSW.

PODZIĘKOWANIA

Autor pragnie podziękować partnerom z przemysłu, firmom: Keller Polska, Strabag oraz Hydrobudowa Gdańsk za współpracę i wkład w zorganizowaniu i przeprowadzeniu badań na opisywanym poletku doświadczalnym oraz za pomoc techniczną i życzliwość w stosunku do podjętej inicjatywy naukowo-badawczej.

FIELD INVESTIGATIONS OF SCREW DISPLACEMENT SDP PILES AND SDC COLUMNS

Abstract

The paper presents the screw piling technology, which is gaining a wide acceptance and still requires a better understanding from the scientific point of view. In the paper the field investigation of screw piles and columns performed on the road currently under construction near Pruszcz Gdański is reported. Tests were carried out on two screw SDP piles and two SDC columns, which were instrumented with a special measuring equipment consisted of vibrating wire extensometers. This equipment allows for the pile shaft and base resistances to be assessed separately. The results of pile and columns tests were analyzed together with CPTU tests and measurements of pile installation parameters (torque, concrete pressure etc.). Results of tests presented in this paper and performed analysis provide some new information regarding loaded screw pile behaviour in the soil.