

Czesław SZYMANKIEWICZ
Instytut Badawczy Dróg i Mostów
Daniel SŁOWIKOWSKI
Polbud-Pomorze sp. z o.o.

PALE IS Z POWIĘKSZONYMI PODSTAWAMI

1. Wprowadzenie

Wraz z rozwojem infrastruktury oraz inwestycji zwiększa się zapotrzebowanie na nowe tereny inwestycyjne. Przekłada się to na konieczność projektowania obiektów na coraz trudniejszych do realizacji terenach, przy wykorzystaniu bardziej zaawansowanych technik posadawiania obiektów. Budowa dużych obiektów na terenach zurbanizowanych, na ograniczonej przestrzeni, często w niekorzystnych warunkach gruntowych, powoduje zwiększanie jednostkowych obciążeń fundamentu. Wymaga to stosowania specjalnych fundamentów palowych o dużych nośnościach pojedynczych pali i ich grup. Dopuszczalne obciążenie pala wierconego, wynikające z sumy zmobilizowanych oporów pobocznic i podstawy, umożliwiają z reguły przeniesienie znacznie mniejszych obciążeń, niż wynika to z wytrzymałości betonu zbrojonego. Tak więc najbardziej uniwersalne pale, jakimi są pale wielkośrednicowe, są jednocześnie najbardziej materiałochłonne. Dotychczas najlepszym sposobem na poszerzenie podstaw pali wielkośrednicowych było stosowanie mechanicznych narzędzi mocowanych do żerdzi palownicy. Sposób ten ma ograniczone zastosowania jedynie do poszerzania podstaw pali w jednorodnych gruntach spoistych, bez przewarstwień piaszczystych zawierających wodę.

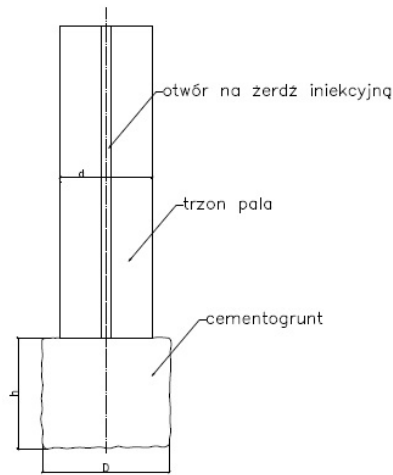
Obecnie najczęściej stosowanym w Polsce zabiegiem zwiększenia nośności pali wierconych jest wstępne naprężanie podłoża pod podstawami pali za pomocą zastrzyków cementowych [1]. Wynikiem tego zabiegu jest ograniczenie osiadań pali i zwiększenie jego nośności użytkowej [2], [4]. Nie wyczerpuje to jednak rezerw materiałowych pali. Stosuje się także pale o zwiększonych nośnościach w stosunku do tradycyjnych pali wielkośrednicowych np. pale formowane świdrem ciągłym CFA, wiercone pale przemieszczeniowe jak np. pale FDP, OMEGA itp. Odpowiedzią na tego rodzaju potrzeby są także pale z poszerzoną iniekcyjnie podstawą, tzw. pale IS. Poszerzenie podstawy pala za pomocą iniekcji strumieniowej powoduje zwiększenie pola powierzchni oddziaływania podstawy pala na grunt, poprzez uformowanie z cementogruntu bryły o średnicy większej, niż średnica trzonu pala.

Poszerzenie podstawy pala metodą IS może być stosowane praktycznie do wszystkich rodzajów pali. Najczęściej stosuje się tę metodę dla pali CFA formowanych świdrem ciągłym. Zastosowanie technologii poszerzenia pala metodą iniekcji strumieniowej jest potencjalnie najskuteczniejszym zabiegiem zwiększenia nośności, gdyż oprócz poszerzenia podstawy następuje jego lepsze zespolenie z podłożem, a pale IS można stosować praktycznie w każdych warunkach gruntowych, za wyjątkiem podłoża skalnego i zwartych gruntów spoistych. Ponadto poszerzenie podstawy pali można wykonywać w trudnych warunkach gruntowych, zarówno w strefie aeracji jak i saturacji, w tym w warunkach oddziaływania ciśnienia naporowego wód gruntowych (wody artezyjskie).

2. Wykonanie pala IS

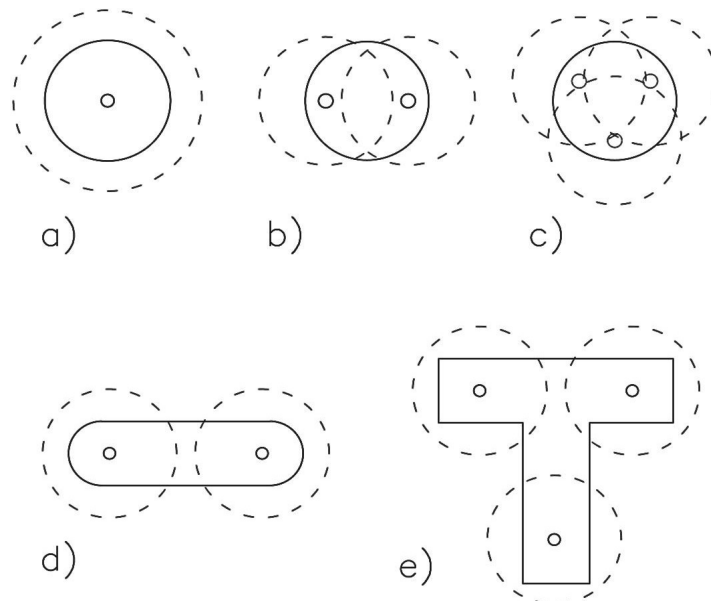
Pale IS mają żelbetowy trzon i podstawę z cementogruntu rysunek1. Poszerzenie podstawy pala za pomocą iniekcji strumieniowej polega na uformowaniu z cementogruntu, uzyskanego przez wymieszanie strumienia zaczynu cementowego z gruntem, bryły o średnicy większej, niż średnica trzonu pala. Wykonanie pala przebiega w dwóch etapach. Najpierw wykonuje się trzon pala z betonu zbrojonego za pomocą ogólnie znanych technologii na przykład pali wierconych w osłonie rurowej czy też formowanie świdrem ciągłym CFA. W trakcie formowania trzonu pala umieszcza się w nim zaślepioną od dołu rurę iniekcyjną, która ma średnicę większą od średnicy końcówki do iniekcji strumieniowej. Po kilku dniach, gdy beton pala osiągnie wystarczającą wytrzymałość, wprowadza się w rurę żerdź z końcówką iniekcyjną i po przewierceniu zaślepki wykonuje się iniekcję strumieniową pod podstawą trzonu pala. Właściwe wykonanie iniekcji jest elementem decydującym o nośności pala - przede wszystkim należy uzyskać zakładaną średnicę kolumny oraz odpowiednią wytrzymałość materiału kolumny tj. cementogruntu. Iniekcje wykonuje się standardowym zestawem przeznaczonym

do iniekcji strumieniowej. W skład zestawu wchodzi: wiertnica umożliwiającą wykonanie iniekcji na głębokości poniżej trzonu pała, zestaw mieszalnika zawiesziny iniekccyjnej oraz pompy wysokociśnieniowej.



Rys.1. Schemat pala IS

W zależności od rodzaju i stanu gruntu stosuje się ciśnienie robocze iniekcji od 200 do 700 bar. Parametry iniekcji dobierane są odpowiednio do rodzaju i stanu gruntu oraz wymaganej średnicy poszerzenia. Poszerzenia wykonywane są zarówno w obrębie gruntów spoistych oraz niespoistych. Dla poprawnego wykonania poszerzenia podstawy pali IS konieczne jest stosowanie komputerowego systemu sterowania iniekcją oraz rejestracji parametrów technologicznych w postaci elektronicznej bazy danych. Po upływie czasu potrzebnego do ustabilizowania się mieszanki zawiesziny cementowej i gruntu, wykonywana jest iniekcja doprężająca, która ma na celu polepszenie współpracy podstawy pała z gruntem. Iniekcja ta jest wykonywana w kilku krokach do osiągnięcia wymaganej ilości spoiwa, zadanego maksymalnego ciśnienia roboczego iniekcji lub uniesienia trzonu pała. Z powodu konieczności uzyskania odpowiedniej wytrzymałości cementogruntu należy stosować iniekcję pojedynczą samym zaczynem cementowym. Taki sposób wykonania iniekcji ogranicza średnicę kolumny. Z tego powodu dla trzonów pali o średnicach większych niż 1 m lub w przypadku poszerzania podstaw baret można stosować 2, 3 lub nawet więcej rurek iniekcyjnych. Wymiary pojedynczych kolumn z cementogruntu są ograniczone możliwościami technologicznymi, ale należy zachować pewne proporcje – $D/d \leq 2,5$, $h/d \geq 0,9$. Schemat różnych możliwości rozmieszczenia kolumn iniekcyjnych pokazano na rys. 2.



Rys.2. Położenie kolumn IS pod trzonami pali

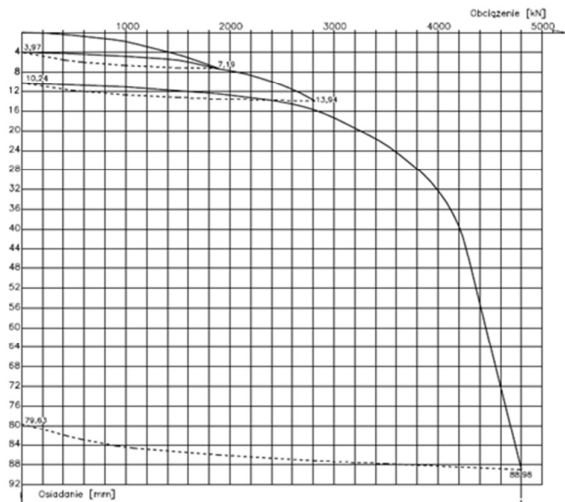
3. Badania pali IS

Pierwsze pale IS były wykonane jako doświadczalne w roku 2011 na budowie węzła Salomea drogi S8. Pale doświadczalne średnicy \varnothing 1000 mm, długości 16 m i 14 m wykonano w podporze 4 i 3 wiaduktu nad torami PKP, zamiast standardowych pali o tej samej długości i średnicy z iniekcją naprężającą podstawy wg rozwiązania IBDiM. Pod każdym palem doświadczalnym została wykonana iniekcja strumieniowa w celu uformowania z cementogruntu podstawy o wymiarach \varnothing 1500 mm i długości 2 m. Cztery inne pale doświadczalne wykonano na budowie dwóch obiektów mostowych przez rzekę Gostyń w Bieruniu. Wykonano tam pale doświadczalne \varnothing 1200 mm, długości 11 m z podwójną iniekcją pod trzonem pali. Ostatnie 2 pale doświadczalne, o identycznych wymiarach jak pale w Bieruniu, były wykonane na obiekcie nad drogą ekspresową S17 pod Lublinem. Wszystkie pale były tutaj osadzone w glinach pylastych. W podstawie każdego z nich wykonano, podobnie jak w Bieruniu, dwie iniekcje strumieniowe. Pale doświadczalne miały wbudowany system ekstensometrów do pomiaru odkształceń pala w czasie próbnego obciążenia. Z uwagi na spodziewaną dużą nośność konstrukcja do próbnego obciążenia była kotwiona do 8 pali rys. 3.

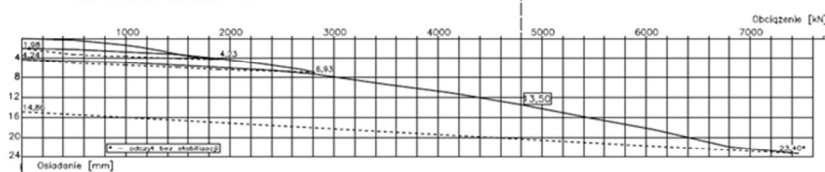


Rys.3. Próbné obciążenie pala IS \varnothing 1000/1500 węzła Salomea

Badania nośności 4 pali przebiegały nie bez pewnych trudności – w 3 przypadkach nie udało się osiągnąć obciążenia zbliżonego do nośności granicznej m. in. z powodu uszkodzenia głowicy pali. Dodatkowo wykonano także badania nośności pali zgodnych z projektem jako referencyjnych, w podobnych warunkach gruntowych. Wzdłuż pobocznic występowały na przemian grunty spoiste i niespoiste. W rejonie podstawy pala było podobnie z tym, że iniekcja strumieniowa była wykonana w piaskach drobnych i pylastych. Grunty niespoiste były w stanie średniozagęszczonym, a niżej zagęszczonym. Natomiast grunty spoiste były w stanie twaroplastycznym, a niżej półzwartym. Wykonano sondowania statyczne CPTu w rejonie pali doświadczalnych, które potwierdziły wysokie parametry wytrzymałościowe podłoża, szczególnie w dolnych warstwach. Maksymalna wartość oporów q_c dla piasków przekracza 50 MPa, a dla glin i pyłów wahała się w granicach 6 – 15 MPa. Na rys. 4 przedstawiono wykresy próbnego obciążenia pala IS \varnothing 1000 mm, długości 16 m oraz pala referencyjnego. Widać dużą różnicę w nośności pali. Pal referencyjny z iniekcją naprężającą podłoże pod podstawą pala ma nośność graniczną ok. 4900 kN, a przy tej sile pal IS ma osiadanie zaledwie 13.50 mm. Obciążenie dopuszczalne dla pala referencyjnego wynosi ok. 3000 kN, a obciążenie dopuszczalne dla pala doświadczalnego IS można określić w przybliżeniu na 6600 kN. Podobnie wyglądają krzywe osiadania następnej pary pali próbnie obciążonych w tej samej podporze. Opis wyników badań tych pali i innych pali doświadczalnych, w tym pali IS \varnothing 1200 mm z podwójną podstawą w gruntach spoistych zamieszczono w artykule [5]. Jak już wspomniano w czasie próbnego obciążenia

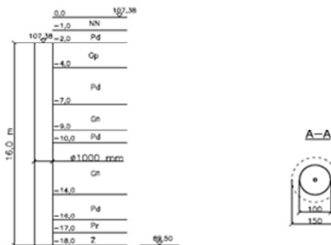


Rys.5 Wykres próbnego obciążenia pala nr 266
 Obiekt: WA-04A, podpora nr 1A, Droga Ekspresowa S-8 na odc. Salomea - Wolica
 Data badania: 05.08.2011 r.

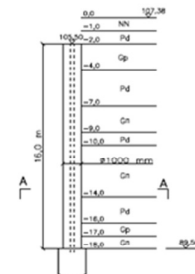


Rys.6 Wykres próbnego obciążenia pala nr 253
 Obiekt: WA-04A, podpora nr 1A, Droga Ekspresowa S-8 na odc. Salomea - Wolica
 Data badania: 10.08.2011 r.

Rys. Warunki geologiczne pala nr 266

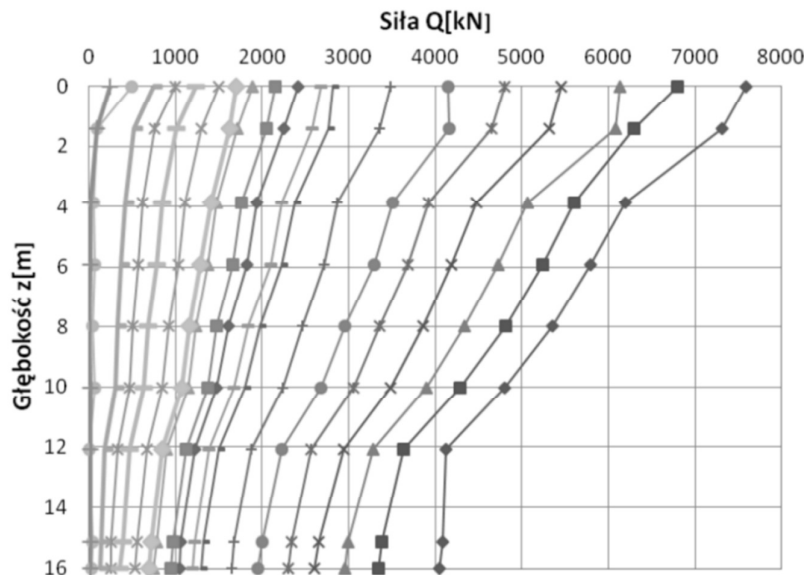


Rys. Warunki geologiczne pala nr 253



Rys.4. Wykres próbnego obciążenia pala IS Φ 1000/1500 i pala Φ 1000 węzła Salomea

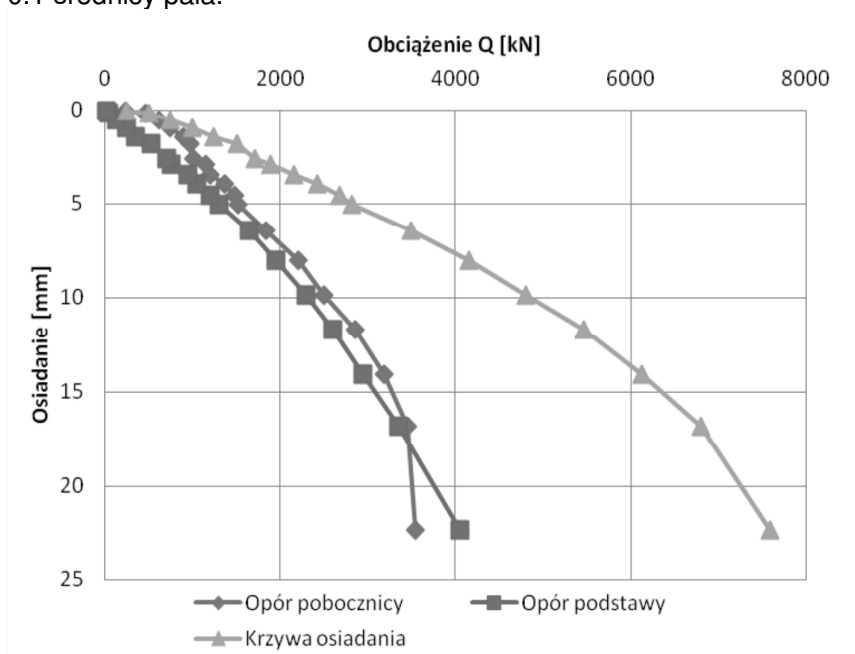
były odczytywane i rejestrowane odkształcenia trzonu pala na różnych głębokościach za pomocą ekstensometrów. Na tej podstawie określono przebieg sił w trzonie pala przedstawiony na rys. 5.



Rys. 5. Rozkład sił wzdłuż trzonu pala IS Φ 1000/1500

Z krzywych przedstawiających rozkład sił w trzonie pala można zaobserwować, że od pewnej wartości obciążenia nachylenie ich się niewiele zmienia. Świadczy to o tym, że w kolejnych stopniach obciążenia nie następuje już przyrost oporów na poboczniczy, a jedynie wzrasta opór podstawy. Lepiej obrazuje to zjawisko wykres oporów na poboczniczy (rys. 6), gdzie dochodzi on do pewnej granicznej wartości i dalej przebiega prawie pionowo. Natomiast przyrosty oporów podstawy wraz ze wzrostem obciążenia są w przybliżeniu proporcjonalne, co oznacza, że nie

nastąpiło wyczerpanie możliwości przyrostu oporów pobocznic. Potwierdza to ogólnie znane zjawisko, że opory pobocznic wzbudzone są znacznie szybciej niż opory podstawy pała [1], [2]. Całkowite opory podstawy pała zostają zmobilizowane przy przemieszczeniach odpowiadających w przybliżeniu 0.1 średnicy pała.



Rys. 6. Opór podstawy i opór pobocznic pała IS Φ 1000/1500

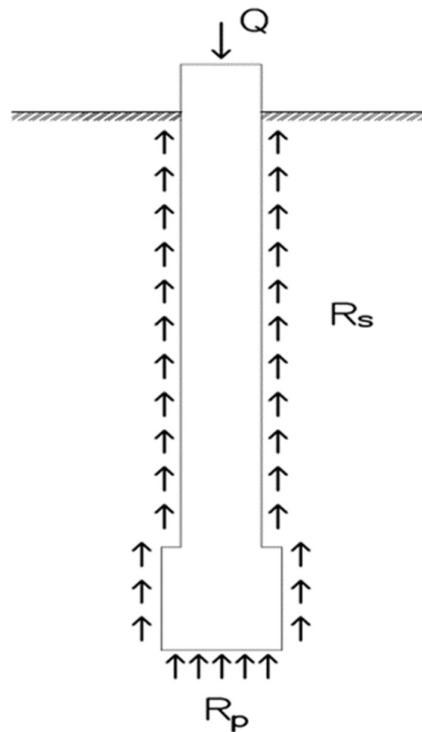
Omówione wyżej wyniki badań pali doświadczalnych na węźle Salomea oraz na innych obiektach, opisane w artykule [5] potwierdziły podstawowe założenie, że zastosowanie iniekcji strumieniowej do poszerzenia podstawy pała spowoduje duży wzrost jego nośności. Wzrost ten zależy od wielkości poszerzenia oraz rodzaju zalegających pod podstawą pała gruntów. Największych efektów, zgodnie z oczekiwaniami, można się spodziewać w gruntach niespoistych. Wynika to z łatwiejszego urabiania takich gruntów strumieniem zaczynu cementowego, lepszym wymieszaniem oraz uzyskaniem cementogruntu o większej wytrzymałości na ściskanie. W glinach i iłach wytrzymałość próbek cementogruntu wynosiła od 2.8 MPa do 14.0 MPa. Natomiast w piaskach od 8.0 MPa do 16.0 MPa. Decydujące znaczenie ma tutaj dobór parametrów iniekcji strumieniowej. W miarę nabierania doświadczenia udało się dopracować sposób na zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości cementogruntu, przy czym zrezygnowano z wykonywania iniekcji podwójnej z powietrzem. Dla celu poszerzenia podstaw pali zaleca się stosowanie iniekcji pojedynczej. Innym bardzo ważnym pytaniem, przed rozpoczęciem badań, była kwestia uzyskania właściwego kontaktu na styku beton pała i cementogruntu. Z przeprowadzonych badań pali wynika jednoznacznie, że zastosowane technologie w palach doświadczalnych gwarantują uzyskanie właściwego styku. Potwierdzeniem tego są przebiegi krzywych osiadań wszystkich pali doświadczalnych, z których wynika, że przyrosty osiadań są od początku niewielkie, co najmniej tak małe, jak dla pali z tradycyjną iniekcją podstaw.

4. Nośność pali IS

Ogólnie na pał poddany osiowemu obciążeniu pionowemu oddziałują siły oporu ośrodka gruntowego na pobocznicę i w podstawie pała., schematycznie pokazane na rysunku 7

$$Q = R_s + R_p$$

W czasie pracy pała następuje przekazywanie obciążenia trzonu na poszerzenie z cementogruntu. Wynika stąd, że obciążenie przekazywane na kolumnę jest równe sumie oporów powstałych na pobocznicę i w podstawie kolumny.



Rys. 7. Siły działające na pal

Nośność pionową wciskanego pala IS, można wyznaczyć analogicznie do normy PN-83/B-02482, przyjmując układ sił, gdzie nośność pala jest sumą oporów na pobocznicę żelbetowego trzonu, oporu podstawy kolumny z cementogruntu i oporu na pobocznicę kolumny:

$$N_t = N_s + N_{pp} + N_{sp} = \sum S_{si} t_i^{(r)} A_{si} + S_{pp} q_p^{(r)} A_p + S_{sp} t_p^{(r)} A_{sp}$$

N_t - obliczeniowa nośność pala wciskanego, kN,

N_{pp} - opór podstawy kolumny z cementogruntu, kN,

N_s - opór pobocznic trzonu pala, kN,

N_{sp} - opór pobocznic kolumny z cementogruntu, kN,

A_p - pole przekroju poprzecznego kolumny z cementogruntu, m^2 ,

A_s - pole pobocznic pala zagłębionego w gruncie m^2

A_{sp} - pole pobocznic podstawy kolumny z cementogruntu, m^2 ,

$q_p^{(r)}$ - jednostkowy opór gruntu pod podstawą kolumny z cementogruntu, kPa

$t_i^{(r)}$ - jednostkowy opór gruntu wzdłuż pobocznic trzonu pala, w warstwie i , kPa

$t_p^{(r)}$ - jednostkowy opór gruntu wzdłuż pobocznic kolumny z cementogruntu, kPa

S_{pp} , S_{sp} , S_s - współczynniki technologiczne

Jednostkowy opór gruntu $q_p^{(r)} = \gamma_m \cdot q$

Współczynnik materiałowy dla pali IS dla podstawy kolumny z cementogruntu, z uwagi na niejednorodność materiału i niepewność co do średnicy, przyjmuje się równy 0,7, taki sam w gruntach niespoistych jak i spoistych. Jednostkowy opór gruntu q pod podstawą, zgodnie m. in. z monografią [6] można obliczyć na podstawie oporu q_c stożka sondy CPT:

$$q = q_c \cdot \Psi_1$$

q_c – wyznacza się jako średnią z wyrównanych wartości zawartych w strefach $(h-1,5D)$ i $(h+1,5D)$. Analogicznie wyznacza się jednostkowy opór na poboczniczy kolumny z cementogruntu i poboczniczy trzonu pala. Uwzględniając te wartości nośność pala wyznacza się wzorem:

$$N_t = \sum S_{si} \cdot \gamma_m \cdot \frac{\bar{q}_{ci}}{\psi_2} \cdot A_{si} + S_{pp} \cdot \gamma_m \cdot \bar{q}_c \cdot \psi_1 \cdot A_p + S_{sp} \cdot \gamma_m \cdot \frac{\bar{q}_c}{\psi_{p2}} \cdot A_{sp}$$

Wartości współczynników technologicznych oraz współczynników Ψ_1 , Ψ_2 , Ψ_{p2} zostały wstępnie określone na podstawie wyników próbnych obciążeń pali doświadczalnych z uwzględnieniem rozkładu oporów na poboczniczy i oporów podstawy uzyskanych z badań ekstensometrycznych. Opracowano wstępne wytyczne projektowania pali IS, ale w miarę zdobywania nowych doświadczeń i wyników próbnych obciążeń dokonywane są korekty niektórych współczynników.

5. Zastosowanie pali IS

Pale IS są stosowane w budownictwie mostowym oraz przemysłowym dla posadowienia ciężkich obiektów. Przykładem może być posadowienie silosu 60.000 t na cukier w Skidlu na Białorusi.



Rys. 8. Wykonywanie pali CFA IS na terenie cukrowni

Projekt obiektu przewidywał posadowienie silosu na 406 palach Φ 660 mm długości 14,5 – 15,5 m, z czego 140 pali miało poszerzoną podstawę do średnicy Φ 1000 mm. Ostatecznie zostały

wykonane pale w technologii CFA oraz pale CFA IS. Na rys. 8 widać wiertnicę do pali CFA oraz wiertnicę do iniekcji strumieniowej, a na rysunku 9 zestaw do iniekcji strumieniowej.



Rys. 9. Zestaw do iniekcji strumieniowej na terenie cukrowni

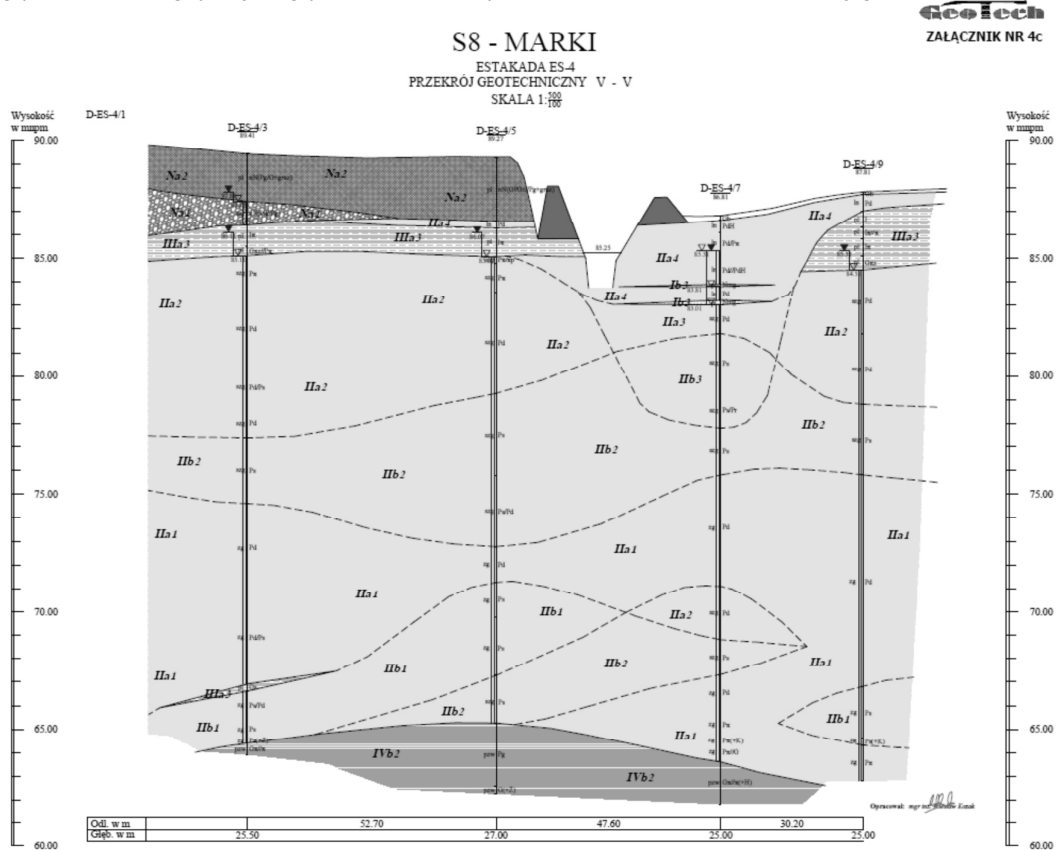
Przed przystąpieniem do wykonywania pali CFA IS wykonano próbne kolumny z cementogruntu, a także krótkie, próbne pale CFA IS. Na rysunku 10 widoczny jest odkopany pal próbny z wyraźnie widoczną, uformowaną metodą iniekcji strumieniowej, podstawą o średnicy dużo większej od trzonu pala. Roboty były prowadzone w okresie czerwiec – wrzesień i pomimo trudności z dostawami betonu przebiegały bez większych zakłóceń. Próbne obciążenie pali wykazało ich dobrą nośność – pal CFA Φ 660 miał nośność 2904 kN (obciążenie 2700 kN), a pal CFA IS Φ 660/1000 mm 3842 kN (obciążenie 3800 kN).



Rys. 10. Próbnny pal CFA IS

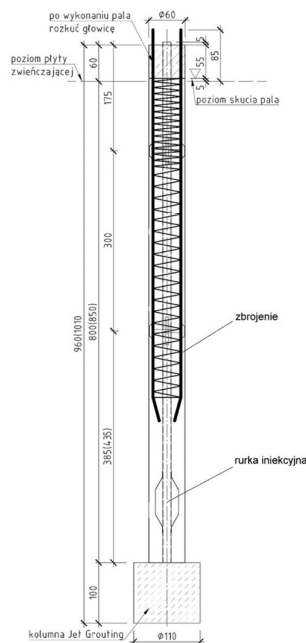
Innym przykładem jest zastosowanie pali CFA IS dla posadowienia trzech obiektów mostowych na budowie obwodnicy Marek trasy S8. Projekt posadowienia podpór we współpracy z IBDiM

opracowało biuro Promost Consulting z Rzeszowa. Pale IS zastosowano zamiast pierwotnie zaprojektowanych pali prefabrykowanych. Podłoże budują głównie piaski drobne, pylaste i średnie, średniozagęszczone, a głębiej zagęszczone. Na rys. 11 przedstawiono przekrój geotechniczny



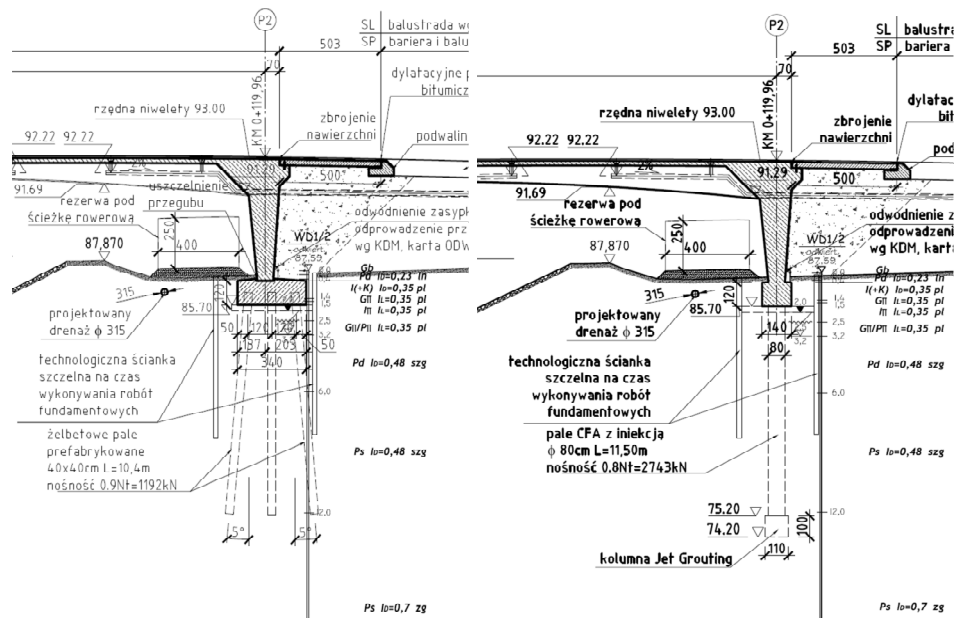
Rys. 11. Przekrój geotechniczny w rejonie estakady DES-4

w rejonie estakady ES-4. Przed przystąpieniem do robót uzupełniono badania sondowaniem



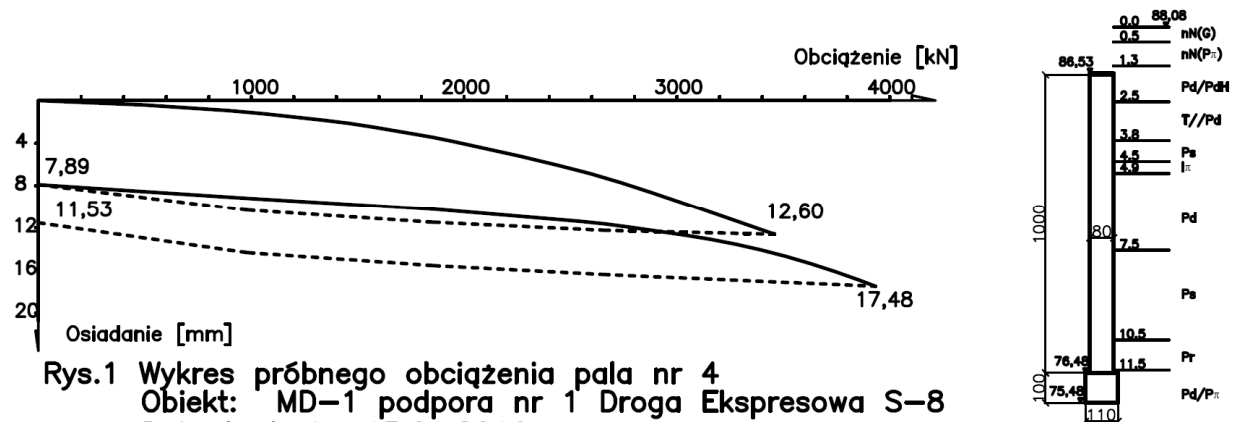
Rys. 12. Pal CFA IS Φ 600/1100

CPT wszędzie tam, gdzie rozpoznanie było zbyt skromne lub były wątpliwości co do stanu gruntów. Wszystkie zaprojektowane pale miały podstawy zagłębione w piaskach. Na rysunku 12 pokazano projekt typowego dla tej budowy pala CFA IS.



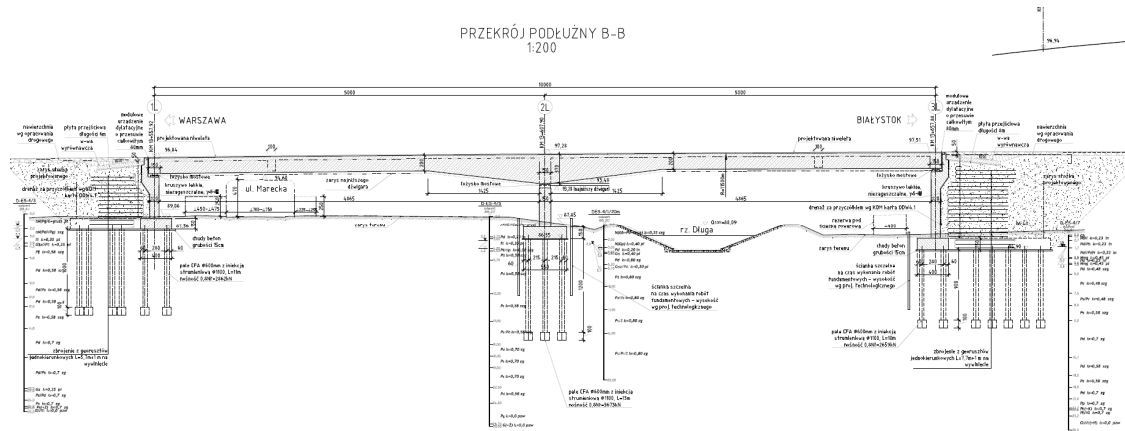
Rys. 13. Posadowienie wiaduktu MD-1 w wersji pierwotnej i na Palach CFA IS Φ 800/1100

W trakcie projektowania pojawiły się nowe możliwości ekonomicznego rozwiązania posadowienia. Wykorzystując duże nośności pali IS zastosowano posadowienie podpór wiaduktu na jednym rzędzie pali, dzięki czemu uzyskano oszczędności nie tylko na palach, ale także na znacznym zmniejszeniu oczepów pali. Na rys. 13 pokazano schematycznie posadowienie podpory przed i po zmianie. Nośność pali sprawdzono obciążeniami statycznymi. Wykonano w sumie 21 próbnych obciążeń pali. Na rysunku 14 pokazano wykres osiadania pala CFA IS Φ 800/1100 długości 11 m. Na rysunku 15 pokazano przekrój podłużny mostu DES-4, a na rysunku 16 rzut podpory pośredniej i pal CFA IS Φ 800/1100

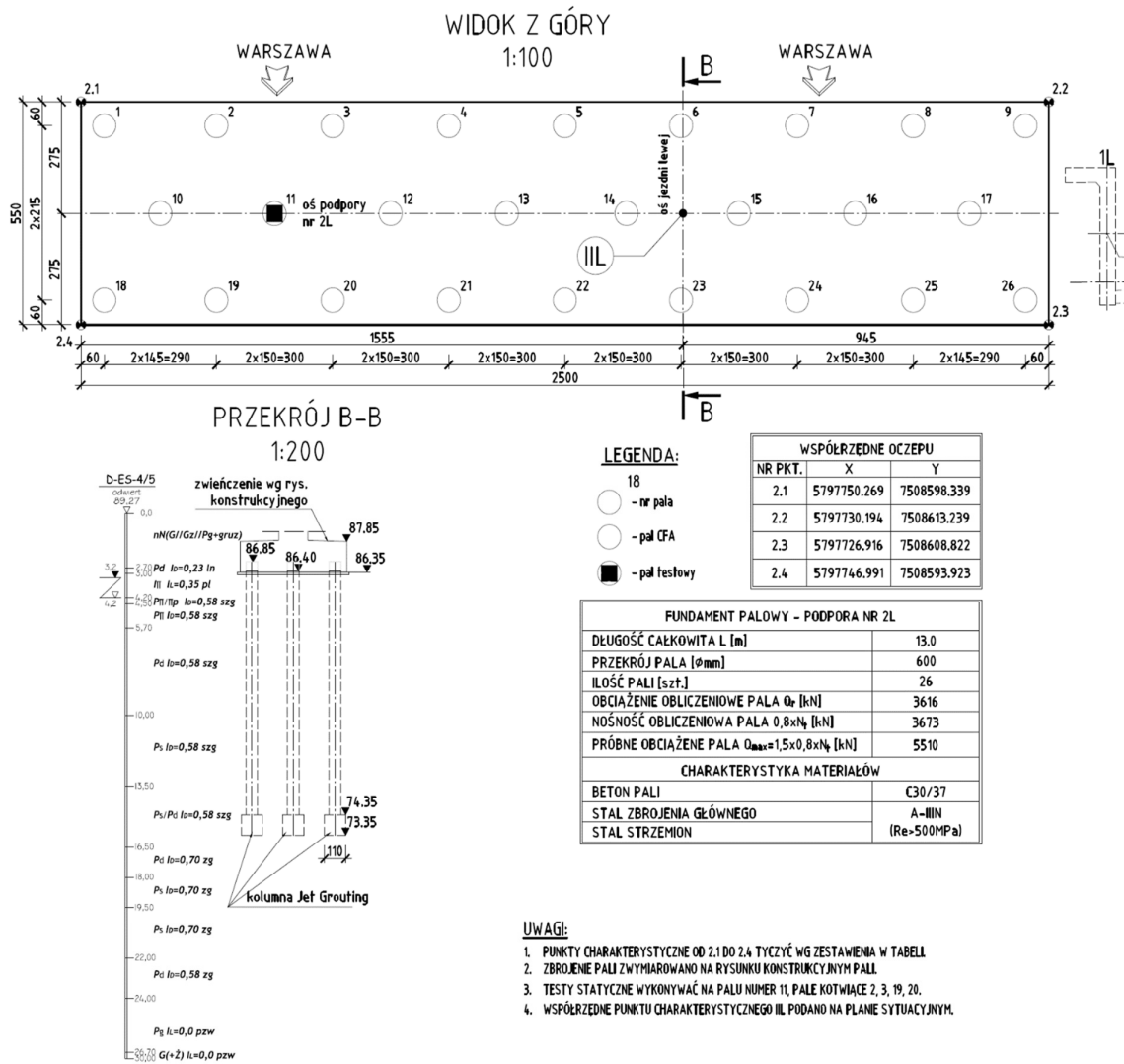


Rys. 1 Wykres próbnego obciążenia pala nr 4
 Obiekt: MD-1 podpora nr 1 Droga Ekspresowa S-8
 Data badania: 13.01.2016 r.

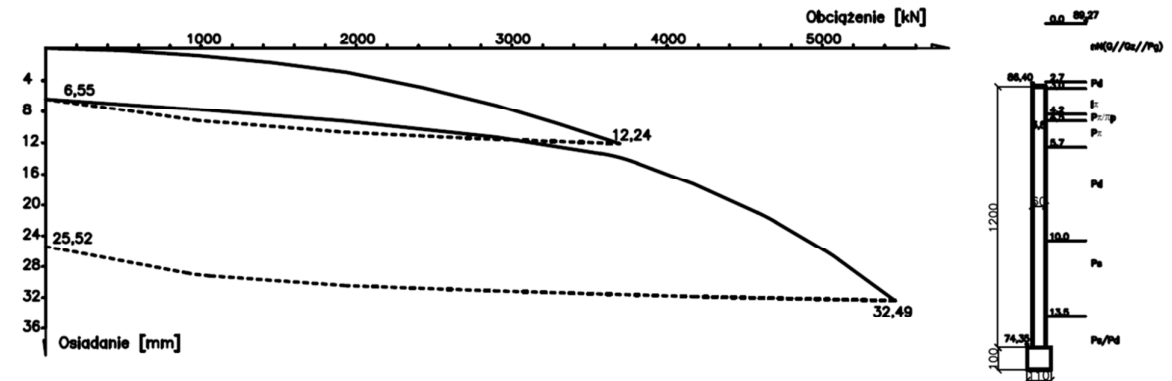
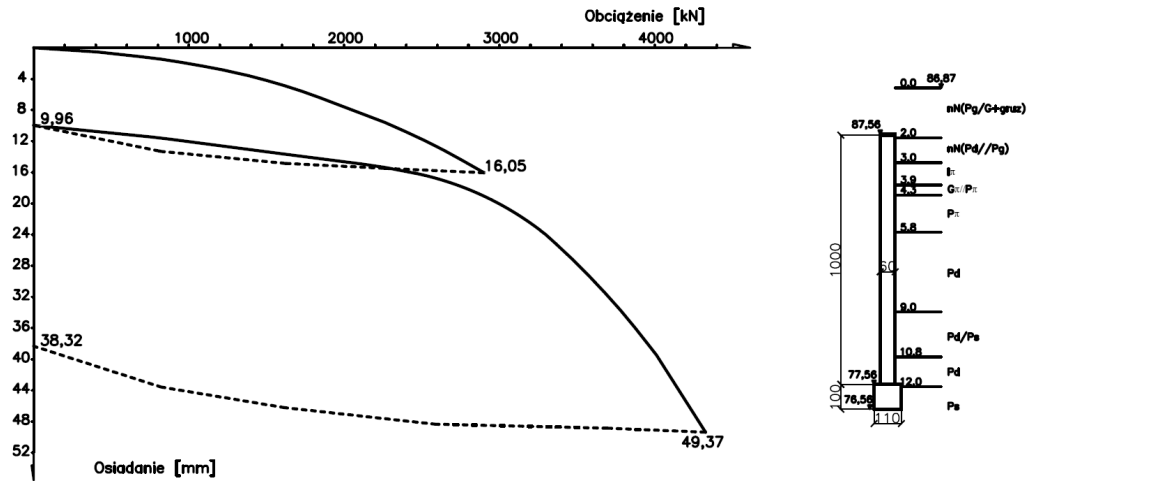
Rys. 14. Osiadanie pala CFA IS Φ 800/1100 wiaduktu MD-1



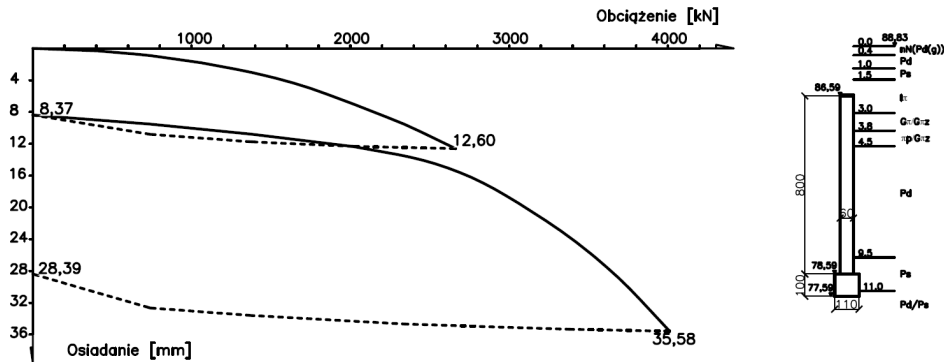
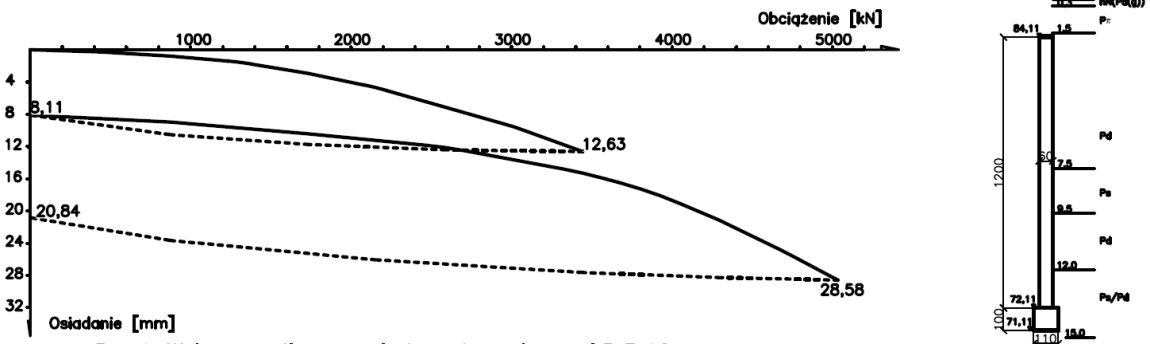
Rys. 15. Przekrój podłużny mostu DES-4



Rys. 16. Podpora pośrednia mostu DES-4



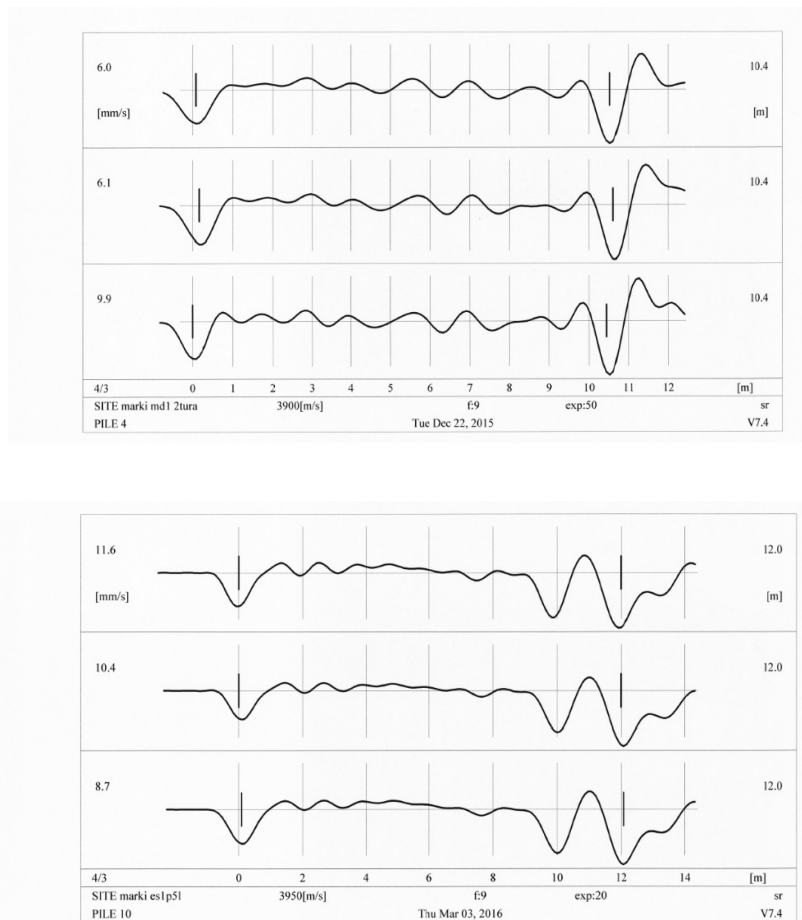
Rys. 17. Krzywe osiadania pali mostu DES-4



Rys. 18. Krzywe osiadania pali estakady ES-1

W każdej podporze obiektów było wkonane po 1 próbnym obciążeniu. Przykładowe wyniki krzywych osiadań pokazano na rysunku 17 dla mostu DES-4 i rysunku 18 dla pięcioprzęstowej estakady ES-1

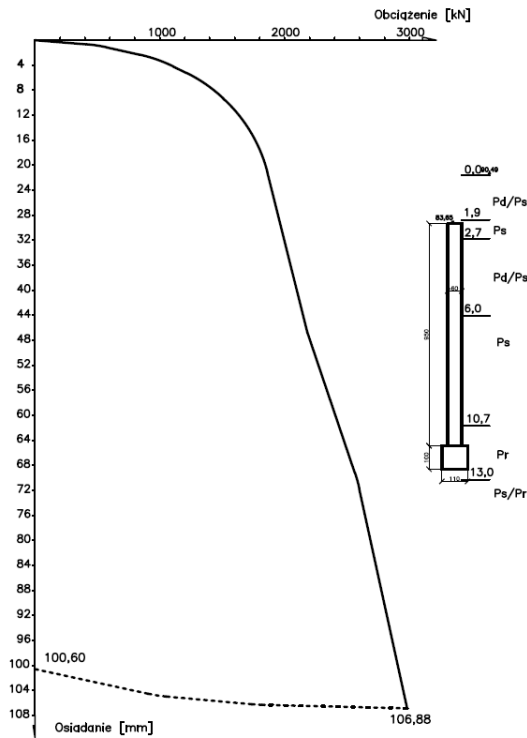
Z porównania krzywych osiadania pali CFA Φ 600/1100 różnie obciążonych o różnej długości wynika, że ich zachowania pod obciążeniem są podobne. Osiadania przy obciążeniu zbliżonym do obciążenia obliczeniowego wynoszą 12 – 16 mm. Maksymalna siła obliczeniowa wynosi 3600 kN, a najmniejsza 2750 kN. Wynika stąd, że pale były dobrze zaprojektowane i osiągnięto powtarzalność technologii CFA oraz wykonania poszerzenia podstaw pali metodą iniekcji strumieniowej. Uwagę zwraca też bardzo duża nośność pali CFA IS – przykładowo pal CFA IS Φ 600/1100 długości 13 m osiągnął w przybliżeniu nośność 3800 kN. Potwierdza się również założenie, że w piaskach wytrzymałość na ściskanie cementogruntu jest wysoka. Z badań próbek pobranych z wypływu wynika, że wytrzymałość ta wynosi od 16 MPa do nawet 30 MPa. Zbadano również ciągłość wszystkich pali. Na rysunku 19 pokazano dwa charakterystyczne wykresy. Na jednym widać „podwójną podstawę” to znaczy widać poszerzenie podstawy. Na drugim nie ma tego efektu, ale długość pala wynikająca z badania wynosi tyle ile długość trzonu razem z poszerzoną podstawą. Świadczy to o dobrym kontakcie betonowego trzonu pala z podstawą z cementogruntu.



Rys. 19. Wyniki badania ciągłości pali

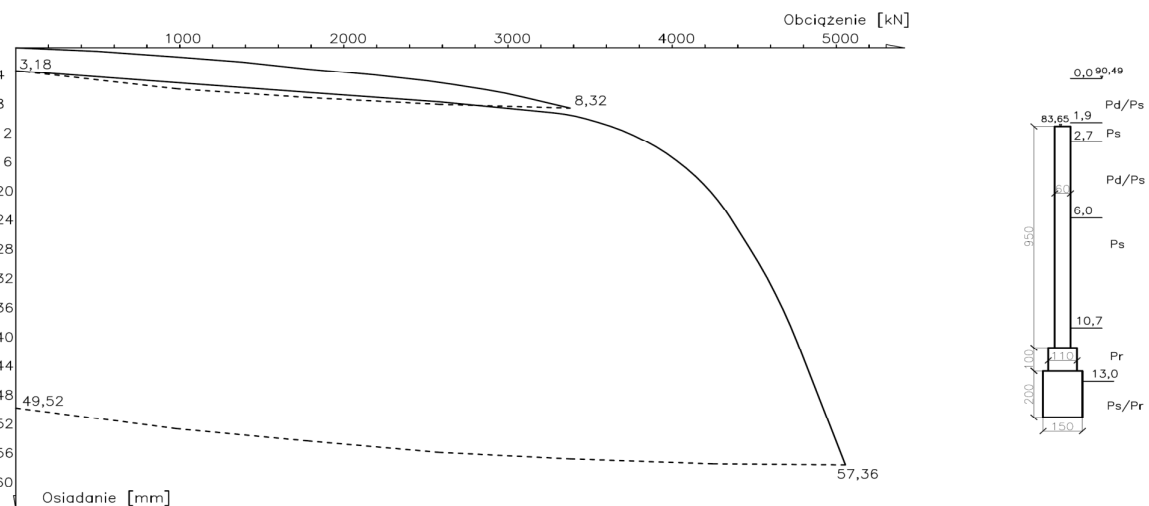
W jednym przypadku wynik próbnego obciążenia był niezadawalający – pal osiągnął nośność graniczną o wartości mniejszej niż obciążenie obliczeniowe. Krzywą osiadania dla tego pala pokazano na rys. 20. Dotyczyło to podpory nr 2 estakady. Podjęto decyzję o wykonaniu dodatkowych sondowań. Okazało się, że w dokumentacji geotechnicznej był błąd – piaski na

głębokości posadowienia nie miały $q_{c} \geq 22$ MPa, ale 8-10 MPa. W związku z tym niezbędne było zwiększenie nośności pali. Dokonano tego przez wykonanie dodatkowej iniekcji strumieniowej



Rys. 20. Wyniki badania nośności pala podpory 2 estakady

poniżej poprzednio wykonanej tak, aby osiągnąć lepsze podłoże i dodatkowo zwiększono średnicę kolumny z cementogruntu do $\Phi 1500$ mm. Wykonanie takiego wzmocnienia okazało się stosunkowo łatwe, przewiercano pał wewnątrz rury iniekcyjnej co nie nastręczało większych trudności i pod istniejącą podstawą formowano nową o powiększonych wymiarach. Na rysunku 21 pokazano



Rys. 21. Wyniki badania nośności wzmocnionego pala podpory 2 estakady

wynik osiadania pała wzmocnionego. Jak widać efekt wzmocnienia jest bardzo dobry – pał przy obciążeniu zbliżonym do obciążenia obliczeniowego osiadł jedynie 8,3 mm. Na rysunkach poniżej pokazano kilka zdjęć z budowy obwodnicy Marek.



Rys. 22. Wykonanie pali CFA IS



Rys. 23. Głowice pali CFA IS (przed skuciem) na Obwodnicy Marek

Łącznie na budowie obwodnicy Marek wykonano ponad 380 szt. pali CFA IS Φ 600/1100 i 800/1100 mm. Badania nośności ogólnie potwierdziły metodę obliczania nośności pali, a także technologię wykonania.

Pale IS zastosowano także na budowie 4 obiektów drogi ekspresowej S-6 pod Kołobrzegiem. Wykonano tam 226 pali CFA IS Φ 600/1100, 700/1300, 800/1400 mm. Podstawy pali na części obiektów były zagłębione w twaroplastyczne gliny, a w innych w piaski średnie średniozagęszczone. Wykonano 12 próbnych obciążeń pali, które potwierdziły przyjęte założenia.

6. Podsumowanie

Dotychczasowe doświadczenia z zastosowaniem pali IS, a w szczególności pali CFA IS potwierdzają dużą nośność oraz prawidłowość przyjętych metod projektowania i technologii. Pale te są szczególnie przydatne przy dużych obciążeniach fundamentów, w gruntach niespoistych i małospoistych, a także w gruntach spoistych twaroplastycznych. Są w takich warunkach oszczędną metodą posadowienia dużych obiektów przemysłowych, mostów i obiektów kolejowych. Bardzo istotne jest prawidłowe rozpoznanie podłoża z zastosowaniem m. in. sondowania statycznego CPT na którym opiera się metoda obliczania nośności pali. Pale CFA IS wykonywane są stosunkowo szybko, iniekcję podstawy można wykonywać po 7 dniach od zabetonowania pala. Bogate doświadczenia oraz wyniki ponad 40 próbnych obciążeń posłużą do analizy i korekty współczynników stosowanych do obliczania nośności pali.

Piśmiennictwo

[1] Gwizdała K. Współczesne technologie pali. Seminarium - Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych, Gdańsk 25 czerwca 2004 r.

[2] Kłosiński B., Szymankiewicz Cz. Wpływ iniekcyjnego naprężania podstaw pali na ich nośność. Inżynieria i Budownictwo, nr 12/2001.

[3] Rybak Cz, Borys L., Noga L.1993). Iniekcja strumieniowa – nowoczesna technologia wzmocnienia podłoża i posadowień budowli. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 4.

[4] Szymankiewicz Cz.: Iniekcyjne naprężanie podstaw pali wierconych i baret. Seminarium - Fundamenty palowe i specjalne, 2 marca 2004 r.

[5] Szymankiewicz Cz.: Poszerzanie podstaw pali metodą iniekcji strumieniowej – Inżynieria i Budownictwo nr 3/2013 r.

[6] Gwizdała K.: Fundamenty palowe. Technologie i obliczenia – Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2011 r.