



LESZEK RAFALSKI¹⁾
 CZESŁAW SZYMANKIEWICZ²⁾
 DANIEL SŁOWIKOWSKI³⁾
 DARIUSZ PETYNYIAK⁴⁾

EVALUATION OF BEARING CAPACITY OF CFA PILES WITH BASES WIDENED BY MEANS OF JET GROUTING

OCENA NOŚNOŚCI PALI CFA Z PODSTAWĄ POSZERZONĄ METODĄ INIEKCJI STRUMIENIOWEJ

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono wyniki badań pali wierconych z podstawą poszerzoną metodą iniekcji strumieniowej. Na budowie obiektów mostowych drogi S8 na węźle Salomea w Warszawie wykonano doświadczalny pal i ustalono, że jego nośność była 1,5 razy większa od nośności pala bez poszerzonej podstawy, a obciążenie dopuszczalne tego pala było 1,65 razy większe od obciążenia dopuszczalnego pala bez poszerzonej podstawy. Stwierdzono, że całkowite opory podstawy tego pala zostają zmobilizowane przy przemieszczeniach odpowiadających w przybliżeniu 0,1 średnicy pala. Podczas budowy obiektów mostowych drogi S8 na odcinku obwodnicy Marek przeprowadzono próbną obciążenia 17 pali CFA z podstawą poszerzoną metodą iniekcji strumieniowej. Stwierdzono, że średnia wartość nośności obliczeniowej pali była 1,23 razy większa od projektowanego średniego obciążenia obliczeniowego, natomiast średnia nośność graniczna była 1,78 razy większa od projektowanego średniego obciążenia obliczeniowego. Średni wskaźnik nośności obliczeniowej wyznaczony na podstawie badania wynosił 1,23, a średni wskaźnik nośności granicznej wyniósł 1,89. Na podstawie badań doświadczalnych zdefiniowano zasady obliczania nośności pali CFA z podstawą poszerzoną metodą iniekcji strumieniowej.

SŁOWA KLUCZOWE: iniekcja strumieniowa, nośność, pal CFA, poszerzona podstawa.

ABSTRACT. The paper presents the results of tests of continuous flight auger (CFA) piles with bases widened by means of jet grouting. During construction of bridge structures of the S8 expressway at the Salomea interchange in Warsaw, an experimental CFA pile with a widened jet grouted base was constructed and its ultimate bearing capacity was 1.5 times greater than the bearing capacity of the reference pile, and its allowable load was 1.65 times greater than the allowable load of the reference pile. It was observed that the full base resistance of this pile was mobilized at displacements corresponding to approximately 0.1 of the diameter of the pile. During construction of bridge structures of the S8 expressway on the bypass of Marki, load tests were performed on 17 CFA piles with widened jet grouted bases. It was determined that the average design value of bearing capacity of the piles was 1.23 greater than the average design value of loading specified in the design documentation and the average ultimate bearing capacity was 1.78 greater than the average design load. The average ratio of design bearing capacity determined from the load test equaled 1.23 and the average ratio of the ultimate bearing capacity equaled 1.89. Based on the experimental trials, the principles for calculation of bearing capacity of CFA piles with widened jet grouted bases were formulated.

KEYWORDS: bearing capacity, CFA piles, jet grouting, widened base.

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, 03-302 Warszawa, ul. Instytutowa 1; lrafalski@ibdim.edu.pl

²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, 03-302 Warszawa, ul. Instytutowa 1; cszymankiewicz@ibdim.edu.pl (✉)

³⁾ Polbud-Pomorze Sp. z o.o., Łącko 18, 88-170 Pakość; dsłowikowski@polbud-pomorze.pl

⁴⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, 03-302 Warszawa, ul. Instytutowa 1; dpetyniak@ibdim.edu.pl

1. WSTĘP

Pale wiercone i formowane ciągłym świdrem ślimakowym nazywa się CFA (od ang. continuous flight auger piles), a skrót ten przyjął się także w Polsce. Technologia pali CFA polega na wwierceniu w grunt ciągłego świdra ślimakowego na głębokość odpowiadającą długości pala. Wiercenie odbywa się w jednym cyklu, bez wyjmowania narzędzia. Dzięki temu ilość wynoszonego urobku w stosunku do objętości otworu jest niewielka. Urobek wypełnia przestrzeń między zwojami świdra, a część jego zostaje rozepchnięta w otaczający grunt, chroniąc otwór przed zasypaniem. Po osiągnięciu zamierzonej głębokości świder podciąga się z równoczesnym wtlaczaniem przez jego rurę rdzeniową mieszanki betonowej o odpowiedniej konsystencji i granulacji kruszywa oraz zawartości cementu. Obecnie metodą tą wykonuje się pale o średnicach od 500 mm do 1200 mm [1, 2].

Nośność pali wierconych może być zwiększana różnymi metodami. Często stosowanym w Polsce zabiegiem jest wstępne naprężanie podłoża pod podstawą pala zastrzykiem cementowym według rozwiązania opisanego w [3], którego zaletą jest ograniczenie osiadania pala i zwiększenie jego nośności. Inną metodą zwiększenia nośności pali wierconych jest poszerzenie ich podstaw za pomocą mechanicznych narzędzi mocowanych do żerdzi palownicy. Sposób ten może być zastosowany do poszerzania podstaw pali w jednorodnych gruntach spolistych, bez przewarstwień piaszczystych zawierających wodę.

Jedną z metod wzmocnienia podłoża gruntowego jest iniekcja strumieniowa, polegająca najczęściej na rozdrobnieniu gruntu przez dynamicznie działający strumień zaczynu cementowego i utworzeniu kolumny cementogruntu. Technologia ta może być wykorzystywana do poszerzania podstaw pali w sposób opisany w [4], a także do innych celów [5-7]. Jednym z zastosowań tej metody są pale CFA z podstawą poszerzoną iniekcją strumieniową [8, 9]. 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 betonowego. Wykonanie takiej konstrukcji przebiega w dwóch etapach. Najpierw wykonuje się świdrem ciągłym trzon pala CFA z betonu zbrojonego. Po uformowaniu trzonu pala umieszcza się w świeżej mieszance betonowej 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 wykonuje się iniekcję strumieniową pod podstawą trzonu pala. Iniekcję wykonuje się zestawem do iniekcji strumieniowej. W skład zestawu wchodzi: wiertnica umożliwiająca wykonanie iniekcji na głębokości poniżej trzonu pala,

1. INTRODUCTION

Bored piles constructed using continuous flight auger are referred to as CFA piles (this abbreviation is also widely used in Poland). The CFA technology consists in introducing a rotating continuous flight auger into the soil to the designed depth. The intended depth is reached in one cycle, without intermittent removal of the tool. Therefore, the quantity of spoil is low in relation to the volume of the bored cavity. While the spoil fills the spaces between the coils of the auger, part of the spoil is displaced outwards into the surrounding soil, thus preventing its collapse. After reaching the intended depth, the auger is slowly extracted as concrete mixture of appropriate consistency, aggregate gradation and cement content is pumped through its hollow stem. This method is currently used for construction of piles with diameters ranging from 500mm to 1200 mm [1, 2].

Bearing capacity of bored piles may be increased by various methods. A measure frequently used in Poland consists in initial stressing of the soil under the designed base of the pile by means of cement grout injection using the solution described in [3], whose advantages include reduction of settlement and an increase in bearing capacity of the pile. Another method of increasing the bearing capacity consists in widening the bases of the piles using mechanical tools mounted on the bar of the piling rig. This method may be used for base widening in homogeneous cohesive soils, without sandy intrusions containing water.

Soil improvement methods also include jet grouting, which consists in injecting the soil with a jet of cement grout, dynamically eroding the in-situ soil and creating a column of cemented soil. This technology may be used for widening of pile bases in the manner described in [4], as well as for other applications [5-7]. The uses of the method include CFA piles with widened jet grouted bases [8, 9]. Widening of a pile base using the jet grouting technology consists in formation of a cement-soil column through mixing in-situ soil with a jet of cement grout. The diameter of the obtained cement-soil column is greater than the diameter of the concrete pile. Such a structure is constructed in two stages. The shaft of the reinforced concrete CFA pile is constructed first. Before the freshly pumped concrete sets, a sealed injection pipe is inserted into the mix, reaching to the bottom of the pile. The diameter of the injection pipe is greater than the diameter of the jet grouting stem and monitor that will be used later. After several days, once the concrete of the pile has reached sufficient strength, the stem with jet grouting monitor is introduced into the hollow pipe and the jet grouting procedure

mieszalnik zawieszony iniekccyjnej oraz pompa wysokociśnieniowa. Parametry iniekcji dobierane są odpowiednio do rodzaju i stanu gruntu oraz wymaganej średnicy poszerzenia. W wyniku opisanego powyżej rozwiązania uzyskuje się pal CFA z poszerzoną podstawą, którego schemat ilustruje Rys. 1.

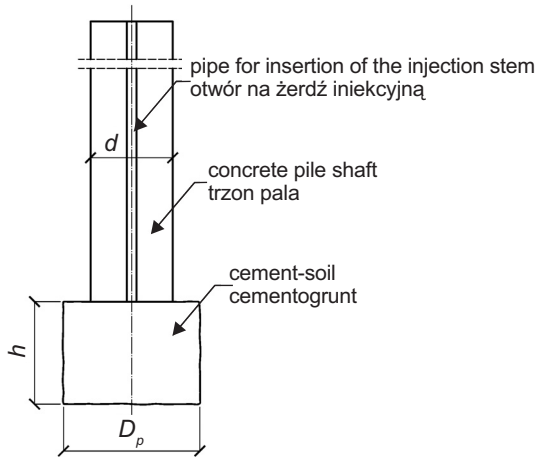


Fig. 1. A schematic view of a CFA pile with widened jet grouted base

Rys. 1. Schemat pala CFA z podstawą poszerzoną iniekcją strumieniową

Po ustabilizowaniu się mieszanki zawieszony cementowej i gruntu pod poszerzoną podstawą pala wykonywana jest dodatkowo iniekcja doprężająca podłoże według rozwiązania opisanego w [10], która ma na celu polepszenie współpracy tej podstawy z gruntem.

W związku z koniecznością uzyskania odpowiedniej wytrzymałości kolumny cementogruntu stosuje się najczęściej iniekcję pojedynczą zaczynem cementowym. Taki sposób wykonania iniekcji ogranicza jednak średnicę kolumny. Z wyżej wymienionego powodu w przypadku trzonów pali o średnicach większych niż 1000 mm lub poszerzenia podstaw baret można stosować dwie, trzy lub więcej rurek iniekcyjnych.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wyników badań pali CFA z podstawą poszerzoną metodą iniekcji strumieniowej. Badania te umożliwiły analizę zachowania pali pod obciążeniem, ocenę wpływu poszerzenia na nośność oraz opracowanie zasad obliczania ich nośności.

2. PROGRAM BADAŃ

W ramach budowy obiektów mostowych wzdłuż drogi S8 na węźle Salomea w Warszawie wykonano doświadczalny pal wiercony średnicy 1000 mm i długości 16 m z podstawą poszerzoną metodą iniekcji strumieniowej i uformowaną pod podstawą pala kolumną cementogruntu o projektowanej

is performed in the soil underneath the concrete pile. The procedure is conducted using jet grouting equipment, which includes drilling rig capable of reaching depths below the bottom of the concrete pile, injection grout mixer and a high-pressure pump. The injection parameters are selected adequately to the type and state of the soil and to the required diameter of the widening. As a result of the described procedure, a CFA pile with widened base is obtained, whose schematic view is shown in Fig. 1.

Once the mixture of cement grout and soil under the widened base has stabilized, an additional foundation-stressing injection is performed according to the solution described in [10] in order to improve the combined performance of the base and the underlying soil.

Due to the need to provide sufficient strength of the cement-soil column, single jet injection with cement grout is typically used. However, such a method of grouting limits the diameter of the obtained column. Therefore, in the case of pile shaft diameters greater than 1000 mm or barrette piles, construction of base widening may involve use of two or three injection pipes.

The aim of this article is to present the results of load tests performed on CFA piles with widened jet grouted bases. The described tests enabled analysis of performance of the piles under load, evaluation of the impact of widening on their bearing capacity and formulation of principles for calculation of their bearing capacity.

2. TEST PROGRAM

During construction of bridge structures of the S8 expressway at the Salomea interchange in Warsaw, an experimental CFA pile with a widened jet grouted base was constructed. The concrete shaft of the CFA pile had a diameter of 1000 mm and length of 16 m, and the cement-soil column formed by jet grouting had a designed diameter of 1500 mm and length of 2 m. A reference CFA pile of the same diameter and length was constructed as well. The base of the reference pile was not widened by means of jet grouting, but the technology of additional foundation-stressing injection was used in the soil under the end of the pile. In order to identify the effect of jet grouted base widening on the bearing capacity of the pile, load tests of both piles were conducted. The displacements of the pile shaft at various depths were registered during the tests using extensometers. Based on the measurements, the bearing capacity of the piles was assessed and the distribution of forces along the shaft and under the base of the widened pile was analyzed.

średnicy 1500 mm i długości 2 m. Wykonano również pal o tej samej średnicy i długości z iniekcją naprzężającą podstawę, bez kolumny z cementogruntu. W celu ustalenia wpływu poszerzenia podstawy pala metodą iniekcji strumieniowej na jego nośność wykonano próbne obciążenia obu pali. Podczas obciążenia próbnego rejestrowano odkształcenia trzonu pala na różnych głębokościach za pomocą ekstensometrów. Na tej podstawie oceniono nośność pali oraz przeanalizowano rozkład sił wzdłuż pobocznic i pod podstawą pala z poszerzoną podstawą.

Pale CFA z podstawą poszerzoną metodą iniekcji strumieniowej zastosowano podczas budowy obiektów mostowych drogi S8 na odcinku obwodnicy Marek zamiast pierwotnie zaprojektowanych innych pali (prefabrykowanych lub wierconych). W podłożu tego odcinka występowały głównie piaski drobne, pylaste i średnie, średniozagęszczone, a głębiej zagęszczone. Zaprojektowano pale CFA średnicy 600 mm i 800 mm o długości $L = 9,0 \div 14,0$ m, które miały podstawy zagłębione w piaskach, z poszerzeniem w postaci kolumny cementogruntu o projektowanej średnicy 1100 mm pod podstawą pala betonowego. Łącznie wykonano w ten sposób 392 pale, spośród których 17 poddano próbnym obciążeniom statycznym wg [11], co pozwoliło na określenie ich nośności.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na Rys. 2 przedstawiono wykres próbnego obciążenia pala porównawczego o średnicy 1000 mm z iniekcją naprzężającą podłoże, lecz bez podstawy poszerzonej iniekcją strumieniową. Na podstawie tego wykresu stwierdzono, że:

- nośność obliczeniowa pala wynosi 3000 kN,
- nośność graniczna pala wynosi 4900 kN.

Na Rys. 3 pokazano wykres próbnego obciążenia wykonane na tej samej budowie pala o średnicy 1000 mm z podstawą poszerzoną iniekcją strumieniową. Na podstawie tego wykresu stwierdzono, że:

- nośność obliczeniowa pala wynosi 6600 kN,
- nośność graniczna pala wynosi około 10000 kN.

Na podstawie Rys. 2 i 3 można także zauważyć, że przy obciążeniu 4900 kN osiadanie pala bez podstawy poszerzonej wyniosło 89,0 mm, zaś pala z podstawą poszerzoną zaledwie 13,5 mm.

CFA piles with widened jet grouted bases were used during construction of bridge structures of the S8 expressway on the bypass of Marki instead of the originally designed types of piles (prefabricated or drilled). The subgrade of the section consisted mostly of fine, silty and medium sands in a natural state of compression ranging from intermediate to compressed (at greater depths). The designed CFA piles had the diameters of 600 mm and 800 mm, with lengths within the range from 9.0 m to 14.0 m. Their bases, which were surrounded by sands, were widened using cement-soil columns of the designed diameter of 1100 mm. The columns were located under the ends of the concrete shafts. In total, 392 piles were constructed in this manner, out of which 17 were subjected to static loading tests according to [11], which enabled determination of their bearing capacity.

3. TEST RESULTS AND THEIR ANALYSIS

Fig. 2 presents the chart from the load test of the reference pile of the diameter of 1000 mm (with initial foundation-stressing injection, but without the widened jet grouted base). Based on the chart it may be observed that:

- the design value of the bearing capacity of the pile equals 3000 kN,
- the ultimate bearing capacity of the pile equals 4900 kN.

Fig. 3 shows the chart from the load test of the experimental pile of the diameter of 1000 mm and with the widened jet grouted base. Based on the chart it may be observed that:

- the design value of the bearing capacity of the pile equals 6600 kN,
- the ultimate bearing capacity of the pile equals approx. 10000 kN.

Based on Figs 2 and 3 it may be noted that at the load of 4900 kN the settlement of the pile without widened base equaled 89.0 mm, while the settlement of the pile with widened base was as low as 13.5 mm.

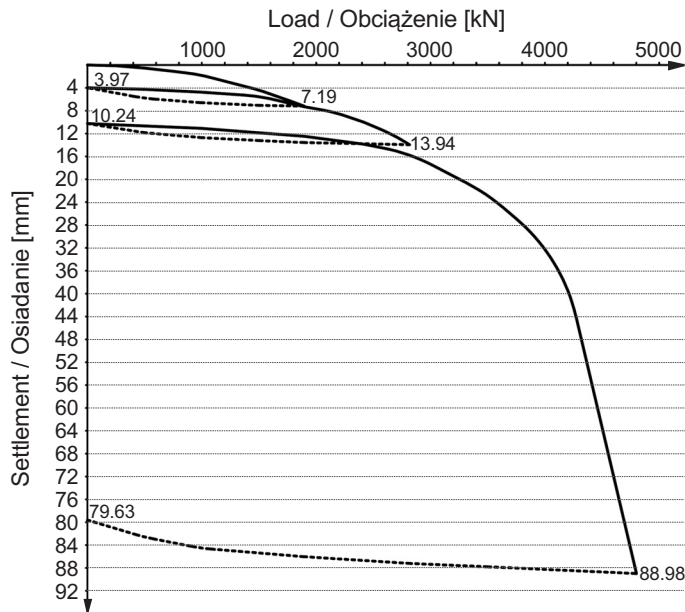


Fig. 2. Static load test chart for the reference pile of 1000 mm diameter without the widened jet grouted base (S8 expressway at the Salomea interchange in Warsaw)

Rys. 2. Wykres próbnego obciążenia pała o średnicy 1000 mm bez podstawy poszerzonej iniekcją strumieniową, wykonanego na budowie drogi S8 na węźle Salomea w Warszawie

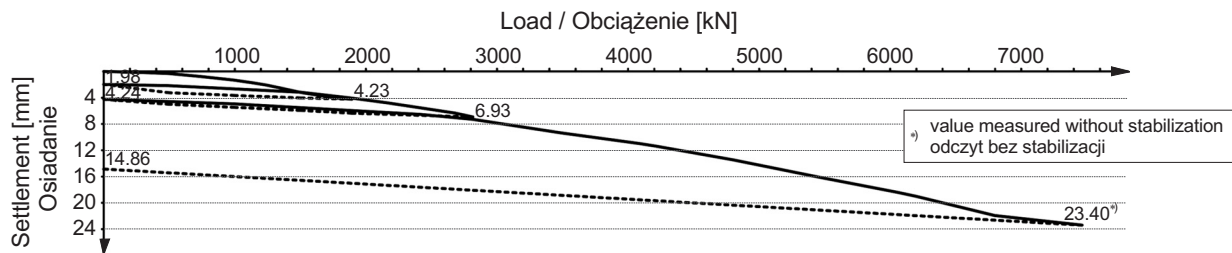


Fig. 3. Static load test chart for the experimental pile of 1000 mm diameter with the widened jet grouted base (S8 expressway at the Salomea interchange in Warsaw)

Rys. 3. Wykres próbnego obciążenia pała o średnicy 1000 mm z podstawą poszerzoną iniekcją strumieniową, wykonanego na budowie drogi S8 na węźle Salomea w Warszawie

Z przeprowadzonych próbnych obciążeń wynika, że nośność graniczna pała z podstawą poszerzoną iniekcją strumieniową była 1,5 raza wyższa od nośności pała bez poszerzonej podstawy, zaś nośność obliczeniowa tego pała była 1,65 wyższa od nośności obliczeniowej pała bez poszerzonej podstawy. Oznacza to, że w wyniku poszerzenia podstawy iniekcją strumieniową uzyskano istotne zwiększenie nośności pała.

Rozkład oporów na pobocznicy i podstawie omawianego pała z poszerzoną podstawą przedstawiono na Rys. 4. Zielonym kolorem pokazano krzywą osiadania pała. Kolorem niebieskim przedstawiono opór pobocznicy, a czerwonym – opór podstawy pała. Stwierdzono, że pod wpływem obciążenia opór na pobocznicy dochodzi do pewnej granicznej wartości i praktycznie się nie zmienia z dalszym wzrostem obciążenia oraz towarzyszącym mu wzrostem osiadania pała. Natomiast przyrosty oporu podstawy są w przybliżeniu proporcjonalne do obciążenia, co oznacza, że nie nastąpiło wyczerpanie

The conducted load tests indicate that the ultimate bearing capacity of the pile with widened jet grouted base was 1.5 times greater than the ultimate bearing capacity of the reference pile, and the design value of the bearing capacity of the widened pile was 1.65 times greater than the design value of the bearing capacity of the reference pile. Therefore, widening of the base by means of jet grouting has increased the bearing capacity of the pile significantly.

Distribution of resistance between the shaft and the base of the discussed pile with widened base is shown in Fig. 4. The pile settlement is plotted in green. The shaft resistance is shown in blue and base resistance – in red. It may be observed that as the load increases, shaft resistance increases to a certain limit value and practically does not change with further increase in load and the accompanying settlement. The base resistance, however, is approximately proportional to the growing load, which means that the full

możliwości przyrostu oporów podstawy. Wynika z tego, że opory pobocznic wzbudzone są znacznie szybciej niż opory podstawy pała, co potwierdza znaną tezę, że mobilizacja maksymalnych oporów pobocznic następuje przy przemieszczeniach odpowiadających w przybliżeniu 0,01 średnicy trzonu pała, zaś maksymalne opory podstawy pała zostają zmobilizowane przy przemieszczeniach odpowiadających w przybliżeniu 0,1 średnicy podstawy pała.

Z przeprowadzonych badań wynika również, że uzyskano bezpośredni styk pomiędzy trzonem pała betonowego a kolumną z cementogruntu. Potwierdzeniem tego jest przebieg krzywej osiadania pała, pokazujący, że przyrosty osiadania są od początku niewielkie, takie jak w przypadku tradycyjnych pali z iniekcją podstawy.

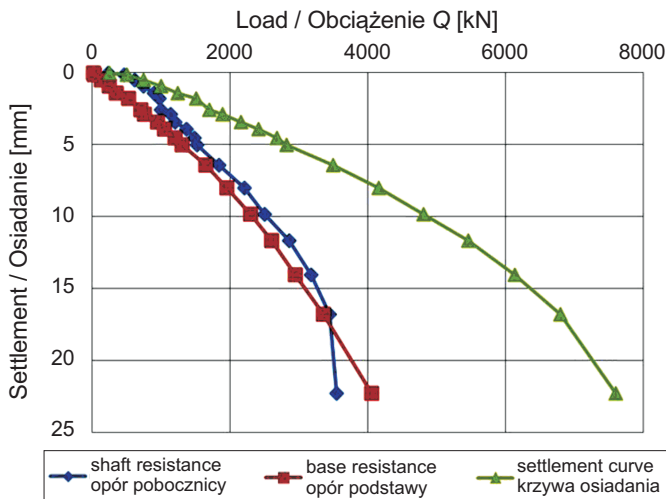


Fig. 4. Base resistance and shaft resistance of the CFA pile of 1000 mm diameter and a widened jet grouted base of 1500 mm diameter
Rys. 4. Opór podstawy i opór pobocznic pała CFA o średnicy 1000 mm z podstawą poszerzoną iniekcją strumieniową o średnicy 1500 mm

Podczas budowy obiektów mostowych wzdłuż drogi S8 na odcinku obwodnicy Marek wykonano 392 pale CFA o średnicach 600 mm i 800 mm z podstawą poszerzoną iniekcją strumieniową do średnicy 1100 mm. Typowy wykres obciążenia pała CFA z podstawą poszerzoną iniekcją strumieniową wykonanego na tej budowie przedstawiono na Rys. 5. Wyniki próbnych obciążeń 17 pali zestawiono w Tabl. 1, a charakterystykę statystyczną tych wyników podano w Tabl. 2. Obciążenie obliczeniowe tych pali zaprojektowano według zasad podanych w rozdziale 5.

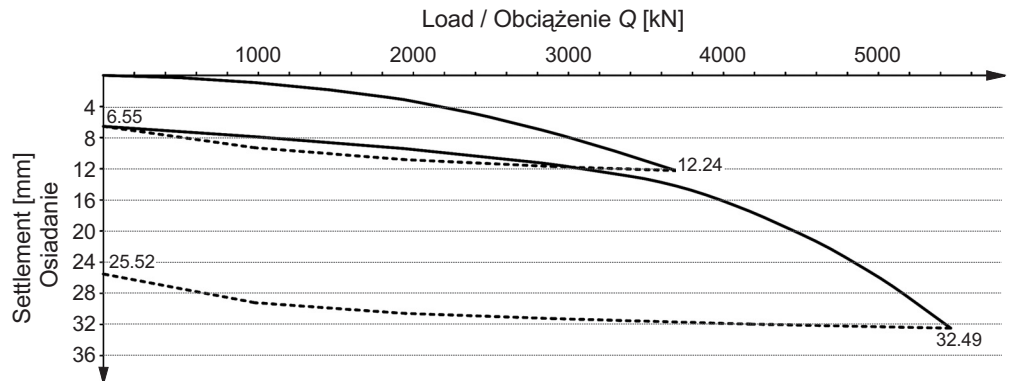


Fig. 5. A typical load test chart of a 600 mm CFA pile with jet grouted base widened to 1100 mm (S8 expressway on the bypass of Marek)
Rys. 5. Typowy wykres próbnego obciążenia pała CFA 600 mm z podstawą poszerzoną iniekcją strumieniową do średnicy 1100 mm, na budowie drogi S8 na odcinku obwodnicy Marek

value of base resistance has not been mobilized yet. The results show that shaft resistance is mobilized considerably earlier than base resistance, which confirms the well-known thesis that the maximum shaft resistance is mobilized at displacements corresponding to approx. 0.01 of the diameter of the pile shaft, while the maximum base resistance is mobilized at displacements corresponding to approx. 0.1 of the diameter of the base of the pile.

The conducted tests also show that a direct contact at the interface between the concrete CFA pile and the cement-soil column has been obtained. This fact is confirmed by the shape of the plotted settlement curve, which shows relatively small settlements from the onset of loading, similarly as for typical piles with injected bases.

During construction of bridge structures of the S8 expressway on the bypass of Marek, 392 piles with diameters of 600 mm and 800 mm were constructed. Their bases were widened to the diameter of 1100 mm using jet grouting. A typical load test chart for a CFA pile with widened jet grouted base constructed at this site is shown in Fig. 5. The results of load tests for the 17 tested piles are presented in Table 1, and the statistical characteristics of the results are given in Table 2. The design values of loading for the piles were determined according to the principles presented in section 5.

Table 1. Bearing capacity test results of CFA piles with widened jet grouted bases formed during construction of the bridge structures of the S8 expressway on the bypass of Marki

Tablica 1. Wyniki badań nośności pali CFA z podstawą poszerzoną iniekcją strumieniową wykonanych na budowie obiektów mostowych drogi S8 na odcinku obwodnicy Marek

Pile no. Nr pala	Pile characteristics Charakterystyka pala	Design value of load according to the design Obciążenie obliczeniowe według projektu [kN]	Design value of bearing capacity based on the test Nośność obliczeniowa na podstawie badania [kN]	Ultimate bearing capacity based on the test Nośność graniczna na podstawie badania [kN]
P2 10	ϕ 800/1100, $L = 11.5$ m ^{*)}	2216	2424	3650
P1 4	ϕ 800/1100, $L = 11.0$ m	2071	3539	5000
3P 17	ϕ 600/1100, $L = 10.5$ m	2458	2742	4800
3L 16	ϕ 600/1100, $L = 11.0$ m	2561	3039	– ^{**)}
2L 11	ϕ 800/1000, $L = 13.0$ m	3616	3863	–
1L 17	ϕ 600/1100, $L = 11.0$ m	2630	2901	5000
1P 14	ϕ 600/1100, $L = 9.5$ m	2360	2583	4500
1L 5	ϕ 600/1100, $L = 11.0$ m	2630	2822	5000
3L 10	ϕ 600/1100, $L = 13.0$ m	3281	3868	6100
6L 5	ϕ 600/1100, $L = 9.0$ m	2635	3060	4800
5L 10	ϕ 600/1100, $L = 12.0$ m	3060	3853	5200
1P 13	ϕ 600/1100, $L = 11.0$ m	3135	4248	5900
2P 11	ϕ 600/1100, $L = 14.0$ m	3608	4919	–
3P 10	ϕ 600/1100, $L = 13.0$ m	3297	4550	–
6P 8	ϕ 600/1100, $L = 9.0$ m	2622	3377	4800
5P 10	ϕ 600/1100, $L = 12.0$ m	2989	3752	–
4P 10	ϕ 600/1100, $L = 11.0$ m	3224	4090	6000

^{*)} ϕ 800/1100 or / lub ϕ 600/1100 – the designed diameter of the concrete pile and of the widened cement-soil column in [mm] / projektowana średnica pala betonowego i poszerzonej podstawy pala w [mm], L – the designed length of the pile / projektowana długość pala.

^{**)} value could not be determined from the load-settlement chart due to high stiffness of the pile at maximum test load / nie można wyznaczyć na podstawie wykresu obciążenie-osiadanie ze względu na dużą sztywność pala przy maksymalnym obciążeniu badawczym.

Table 2. Statistical characteristics of the test results obtained for CFA piles with widened jet grouted bases formed during construction of the bridge structures of the S8 expressway on the bypass of Marki

Tablica 2. Charakterystyka statystyczna wyników badań pali CFA z podstawą poszerzoną iniekcją strumieniową wykonanych na budowie obiektów mostowych drogi S8 na odcinku obwodnicy Marek

Parameter Parametr		Number of measurements Liczba pomiarów	Minimum value Wartość minimalna	Maximum value Wartość maksymalna	Average value Wartość średnia	Standard deviation Odchylenie standardowe
Design value of load according to the design Obciążenie obliczeniowe według projektu	[kN]	17	2071	3616	2847	468
Design value of bearing capacity based on the test Nośność obliczeniowa na podstawie badania	[kN]	17	2424	4914	3507	720
Ultimate bearing capacity based on the test Nośność graniczna na podstawie badania	[kN]	12	3650	6100	5062	688

Stwierdzono, że średnia wartość nośności obliczeniowej pali wyznaczona na podstawie przeprowadzonych badań była 1,23 razy wyższa od średniego obciążenia obliczeniowego według projektu. Natomiast średnia nośność graniczna określona na podstawie badań była 1,78 razy wyższa od średniej wartości obciążenia obliczeniowego według projektu.

It was observed that the average design value of bearing capacity of the piles obtained in the conducted tests was 1.23 greater than the average design value of loading specified in the design. The average ultimate bearing capacity based on the test was 1.78 higher than the average design value of load according to the design.

Wyniki przedstawione w Tabl. 2 pokazują charakterystyki statystyczne obciążenia obliczeniowego według projektu oraz nośności obliczeniowej i nośności granicznej na podstawie badania. W dalszej części pracy obliczono i przeanalizowano wskaźniki wyrażające nośność obliczeniową na podstawie badania i nośność graniczną na podstawie badania poszczególnych pali. Wskaźnik nośności obliczeniowej na podstawie badania określono jako iloraz tej nośności do obciążenia obliczeniowego według projektu. Analogicznie wskaźnik nośności granicznej na podstawie badania określono jako iloraz tej nośności do obciążenia obliczeniowego według projektu. Wyniki obliczeń zestawiono w Tabl. 3, a charakterystykę statystyczną otrzymanych wskaźników podano w Tabl. 4.

The contents of Table 2 present the statistical characteristics of the design value of loading specified in the design along with the design value and the ultimate value of bearing capacity based on the tests. The following part of the article presents calculations and analyses of ratios that reflect the design value of bearing capacity and the ultimate value of bearing capacity obtained in the tests for individual piles. The design bearing capacity ratio based on the test was defined as the proportion of the design value of this capacity to the design value of load specified in the design for the given pile. Analogously, the ultimate bearing capacity ratio based on the test was defined as the proportion of the ultimate capacity to the design value of load specified in the design for the given pile. The results of calculations are presented in Table 3, and the statistical characteristics of the results are given in Table 4.

Table 3. Ratios reflecting the proportion of the design value and ultimate value of bearing capacity obtained in the test to the design value of load specified in the design for the tested CFA piles with widened bases formed during construction of the bridge structures of the S8 expressway on the bypass of Marki

Tablica 3. Wskaźniki wyrażające stosunek nośności obliczeniowej na podstawie badania oraz nośności granicznej na podstawie badania do obciążenia obliczeniowego według projektu pali CFA z poszerzoną podstawą wykonanych na budowie obiektów mostowych drogi S8 na odcinku obwodnicy Marek

Pile no. Nr pala	Pile characteristics Charakterystyka pala	Design bearing capacity ratio based on the test Wskaźnik nośności obliczeniowej na podstawie badania	Ultimate bearing capacity ratio based on the test Wskaźnik nośności granicznej na podstawie badania
P2 10	$\phi 800/1100, L = 11.5^{*)}$	1.09	1.65
P1 4	$\phi 800/1100, L = 11.0$ m	1.71	2.41
3P 17	$\phi 600/1100, L = 10.5$ m	1.12	1.95
3L 16	$\phi 600/1100, L = 11.0$ m	1.19	– **)
2L 11	$\phi 800/1000, L = 13.0$ m	1.07	–
1L 17	$\phi 600/1100, L = 11.0$ m	1.10	1.90
1P 14	$\phi 600/1100, L = 9.5$ m	1.09	1.91
1L 5	$\phi 600/1100, L = 11.0$ m	1.07	1.90
3L 10	$\phi 600/1100, L = 13.0$ m	1.18	1.86
6L 5	$\phi 600/1100, L = 9.0$ m	1.16	1.82
5L 10	$\phi 600/1100, L = 12.0$ m	1.26	1.70
1P 13	$\phi 600/1100, L = 11.0$ m	1.35	1.88
2P 11	$\phi 600/1100, L = 14.0$ m	1.36	–
3P 10	$\phi 600/1100, L = 13.0$ m	1.38	–
6P 8	$\phi 600/1100, L = 9.0$ m	1.29	1.83
5P 10	$\phi 600/1100, L = 12.0$ m	1.25	–
4P 10	$\phi 600/1100, L = 11.0$ m	1.27	1.86

*) $\phi 800/1100$ or / lub $\phi 600/1100$ – the designed diameter of the concrete pile and of the widened cement-soil column in [mm] / projektowana średnica pala betonowego i poszerzonej podstawy pala w [mm], L – the designed length of the pile in / projektowana długość pala.

**) value could not be determined from the load-settlement chart due to high stiffness of the pile at maximum test load / nie można wyznaczyć na podstawie wykresu obciążenie-osiadanie ze względu na dużą sztywność pala przy maksymalnym obciążeniu badawczym.

Table 4. Statistical characteristics of the test results obtained for CFA piles with widened jet grouted bases formed during construction of the bridge structures of the S8 expressway on the bypass of Marki
 Tablica 4. Charakterystyka statystyczna wskaźników nośności pali CFA z podstawą poszerzoną iniekcją strumieniową wykonanych na budowie obiektów mostowych drogi S8 na odcinku obwodnicy Marek

Parameter Parametr	Number of measurements Liczba oznaczeń	Minimum value Wartość minimalna	Maximum value Wartość maksymalna	Average value Wartość średnia	Standard deviation Odchylenie standardowe
Design bearing capacity ratio based on the test Wskaźnik nośności obliczeniowej na podstawie badania	17	1.07	1.71	1.23	0.16
Ultimate bearing capacity ratio based on the test / Wskaźnik nośności granicznej na podstawie badania	12	1.65	2.41	1.89	0.18

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że średni wskaźnik nośności obliczeniowej na podstawie badania wynosi 1,23 i jest taki sam jak stosunek średniej wartości nośności obliczeniowej pali do średniego obciążenia obliczeniowego według projektu. Natomiast średni wskaźnik nośności granicznej na podstawie badania wynosi 1,89 i jest nieco większy od stosunku średniej nośności granicznej określonej na podstawie badań do średniego obciążenia obliczeniowego według projektu (1,78).

Badania pali na obwodnicy Marek potwierdziły skuteczność zastosowania iniekcji strumieniowej do poszerzenia podstaw pali CFA.

5. ZASADY OBLICZANIA NOŚNOŚCI PALI CFA Z PODSTAWĄ POSZERZONĄ INIEKCJĄ STRUMIENIOWĄ

Na pal poddany osiowemu obciążeniu pionowemu oddziałują siły oporu ośrodka gruntowego na poboczniczy i w podstawie pała (Rys. 6).

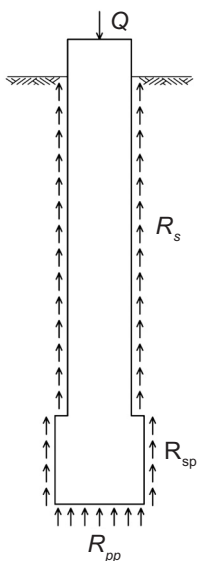


Fig. 6. Distribution of forces acting on a CFA pile with widened jet grouted base
 Rys. 6. Rozkład sił działających na pal CFA z podstawą poszerzoną iniekcją strumieniową

Based on the conducted tests, the average ratio of design bearing capacity determined from the load test equaled 1.23 and was the same as the proportion of the average design value of bearing capacity to the average design value of load specified in the design. The average ratio of the ultimate bearing capacity equaled 1.89 and was slightly greater than the proportion of the average ultimate bearing capacity determined from the load test to the average design value of load specified in the design (1.78).

Pile load tests performed on the bypass of Marki have confirmed the effectiveness of jet grouting in CFA base widening applications.

5. PRINCIPLES FOR CALCULATION OF BEARING CAPACITY OF CFA PILES WITH WIDENED JET GROUTED BASES

When a pile is subjected to vertical axial load, resistance forces are mobilized along the shaft and under the base of the pile (Fig. 6).

The pile remains in equilibrium due to the fact that the vertical load Q is balanced by the sum of the shaft resistance of the concrete pile R_s , the shaft resistance of the cement-soil column R_{sp} and the base resistance R_{pp} according to the equation:

$$Q = R_s + R_{sp} + R_{pp} \quad (1)$$

Fig. 7 presents a schematic diagram of the load transferred from the concrete pile of cross-section A resulting from diameter d and the unit load q on to the cement-soil column (jet grouted widening). The force is distributed into shaft resistance of the column and base resistance of the column, as the load transferred from the concrete pile is balanced by the sum of the two resistances:

$$q \cdot A = R_{sp} + R_{pp} \quad (2)$$

where:

Pał utrzymywany jest w równowadze dzięki temu, że obciążenie pionowe Q jest równoważone przez sumę sił oporów na pobocznicę pała żelbetowego R_s , pobocznicę wykonanej iniekcyjnie kolumny cementogruntovej R_{sp} oraz w podstawie R_{pp} zgodnie ze wzorem:

$$Q = R_s + R_{sp} + R_{pp} \quad (1)$$

Na Rys. 7 przedstawiono schematycznie obciążenie przekazywane przez pał betonowy o przekroju A wynikające ze średnicy d i obciążenia jednostkowego q na kolumnę (poszerzenie iniekcją strumieniową) z cementogruntu oraz rozkład tej siły na pobocznicę oraz podstawę kolumny z cementogruntu. Wynika to stąd, że obciążenie przekazywane przez pał betonowy na kolumnę cementogruntu jest równoważone przez sumę oporów powstałych na pobocznicę i w podstawie tej kolumny:

$$q \cdot A = R_{sp} + R_{pp}, \quad (2)$$

gdzie:

R_{sp} – opór pobocznicę kolumny cementogruntu,

R_{pp} – opór podstawy kolumny cementogruntu.

Nośność pionową na wciskanie pała CFA z poszerzoną podstawą z cementogruntu można wyznaczyć przyjmując wcześniej przedstawiony układ sił. Nośność takiego pała jest sumą oporów na pobocznicę żelbetowego trzonu, oporu podstawy kolumny z cementogruntu i oporu na pobocznicę kolumny z uwzględnieniem współczynników technologicznych. Może być ona obliczana z następującego wzoru wynikającego z zapisów normowych [11, 12]:

$$N_t = N_s + N_{pp} + N_{sp} = \sum S_{si} \cdot t_i^{(r)} \cdot A_s + S_{pp} \cdot q_p^{(r)} \cdot A_p + S_{sp} \cdot t_p^{(r)} \cdot A_{sp} \quad (3)$$

w którym:

N_t – obliczeniowa nośność pała wciskanego [kN],

N_{pp} – opór podstawy kolumny z cementogruntu [kN],

N_s – opór pobocznicę pała [kN],

N_{sp} – opór pobocznicę kolumny z cementogruntu [kN],

A_p – pole przekroju poprzecznego kolumny z cementogruntu [m²],

A_s – pole pobocznicę pała (trzonu żelbetowego) [m²],

A_{sp} – pole pobocznicę kolumny z cementogruntu [m²],

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

$t_i^{(r)}$ – jednostkowy opór gruntu wzdłuż pobocznicę pała w warstwie i [kPa],

R_{sp} – opór pobocznicę kolumny cementogruntu,

R_{pp} – opór podstawy kolumny cementogruntu.

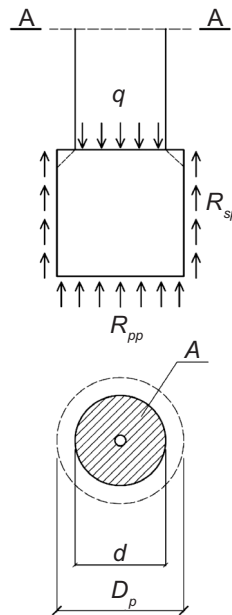


Fig. 7. A schematic view of the distribution of forces in the cement-soil column
Rys. 7. Schemat układu sił w kolumnie z cementogruntu

The vertical compression bearing capacity of a CFA pile with widened cement-soil base may be calculated based on the aforementioned system of forces. Bearing capacity of the pile equals the sum of the shaft resistance of the concrete pile, the shaft resistance of the cement-soil column and the base resistance, taking into account adequate technological coefficients. It may be calculated from the following equation, resulting from the provisions of the standards [11, 12]:

$$N_t = N_s + N_{pp} + N_{sp} = \sum S_{si} \cdot t_i^{(r)} \cdot A_s + S_{pp} \cdot q_p^{(r)} \cdot A_p + S_{sp} \cdot t_p^{(r)} \cdot A_{sp} \quad (3)$$

where:

N_t – design value of the compression bearing capacity of the pile [kN],

N_{pp} – base resistance of the cement-soil column [kN],

N_s – shaft resistance of the concrete pile [kN],

N_{sp} – shaft resistance of the cement-soil column [kN],

A_p – area of the cross-section of the cement-soil column [m²],

A_s – side area of the concrete pile shaft [m²],

A_{sp} – side area of the cement-soil column [m²],

$q_p^{(r)}$ – unit soil resistance under the base of the cement-soil column [kPa],

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

S_{pp}, S_{sp}, S_s – współczynniki technologiczne.

Jednostkowy opór obliczeniowy gruntu pod podstawą można wyznaczyć ze wzoru:

$$q_p^{(r)} = \gamma_m \cdot q, \quad (5)$$

w którym:

$q = \bar{q}_c \cdot \psi_1$, przy czym \bar{q}_c wyznacza się jako średnią z wyrównanych wartości oporu stożka sondy CPT q_c zawartych w strefach $(h - 1,5D_p)$ i $(h + 1,5D_p)$ zgodnie z [12] (h, D_p według Rys. 1.), a wartości współczynnika nośności podstawy pała ψ_1 , który odnosi się także do podstawy kolumny uzyskanej metodą iniekcji strumieniowej [13], można określić na podstawie [1].

Opór obliczeniowy gruntu na pobocznic $t^{(r)}$, zgodnie z [11], można wyznaczyć ze wzoru:

$$t^{(r)} = \gamma_m \cdot t, \quad (6)$$

w którym opór na pobocznic pała może być obliczany na podstawie sondowań CPT z poniższego wzoru według [1]:

$$t = \frac{\bar{q}_c}{\psi_2}, \quad (7)$$

przy czym wartość współczynnika nośności pobocznic ψ_2 można określić na podstawie [1].

Z przeprowadzonych dotychczas obliczeń wynika, że opór na pobocznic kolumny z cementogruntu w przypadku jej małej wysokości można pominąć w obliczeniach nośności pała.

Pale CFA z podstawą poszerzoną metodą iniekcji strumieniowej należy projektować tak, aby kolumna cementogruntu znajdowała się w jednej warstwie gruntu. Ułatwia to dobór warunków technologicznych iniekcji strumieniowej. W świetle przedstawionych wyników próbnych obciążeń przyjęte wstępnie współczynniki technologiczne do obliczenia nośności pali CFA z poszerzoną podstawą zostały dobrane prawidłowo. Istnieją pewne zapasy bezpieczeństwa, które należy uznać za uzasadnione, ponieważ technologia poszerzenia za pomocą iniekcji strumieniowej nie jest całkowicie kontrolowana w różnych warunkach gruntowych. Dlatego dalsze badania pali CFA z podstawą poszerzoną metodą iniekcji strumieniowej mogą wskazać na potrzebę korekty współczynników technologicznych.

6. WNIOSKI

Na budowie obiektów mostowych drogi S8 na węźle Salomea w Warszawie wykonano doświadczalny pał wiercony z podstawą poszerzoną metodą iniekcji strumieniowej i porównano

$t_i^{(r)}$ – unit soil friction along the side of the shaft of the pile in the i^{th} soil layer,

$t_p^{(r)}$ – unit soil friction along the side of the cement-soil column [kPa],

S_{pp}, S_{sp}, S_s – technological coefficients.

Unit soil resistance under the base may be calculated from:

$$q_p^{(r)} = \gamma_m \cdot q, \quad (5)$$

where:

$q = \bar{q}_c \cdot \psi_1$, while \bar{q}_c is determined as average CPT cone penetration resistance q_c over the depth zone of $(h - 1.5D_p)$ to $(h + 1.5D_p)$ as per [12] (h, D_p according to Fig. 1), and the values of foundation bearing coefficient under the pile base ψ_1 , which are applicable to the base of the jet grouted cement-soil column as well [13], may be determined based on [1].

The design value of unit soil friction along the side of the shaft $t^{(r)}$, according to [11], may be calculated from the equation:

$$t^{(r)} = \gamma_m \cdot t, \quad (6)$$

whereas the unit friction resistance along the shaft may be determined based on CPT tests from the following equation [1]:

$$t = \frac{\bar{q}_c}{\psi_2}, \quad (7)$$

in which the values of shaft bearing coefficient ψ_2 may be determined from [1].

Calculations that were performed thus far suggest that if the length of the cement-soil column is relatively small, the value of its shaft resistance is negligible and may be omitted in calculations of the bearing capacity of the pile.

CFA piles with widened jet grouted bases should be designed in such a manner that the entire cement-soil column is situated within a single layer of soil, as it facilitates the choice of technological parameters of the jet grouting procedure. In the light of the presented test results, the adopted values of technological coefficients for calculation of bearing capacity of CFA piles with widened bases were assumed correctly. The obtained safety margins should be considered appropriate, since the technology of base widening by means of jet grouting is not fully controlled under various ground conditions. It is therefore possible that further research devoted to CFA piles with jet grouted bases may imply a need for correction of the technological coefficients.

jego nośność z nośnością pała referencyjnego bez poszerzonej podstawy. Z przeprowadzonych próbnych obciążeń wynikało, że nośność graniczna pała z podstawą poszerzoną iniekcją strumieniową była 1,5 raza wyższa od nośności pała bez poszerzonej podstawy, a obciążenie dopuszczalne tego pała było 1,65 razy wyższe od obciążenia dopuszczalnego pała bez poszerzonej podstawy.

Stwierdzono, że pod wpływem obciążenia opór na pobocznicy osiąga pewną graniczną wartość i z dalszym wzrostem obciążenia oraz towarzyszącym mu wzrostem osiadania pała praktycznie się nie zmienia. Przyrosty oporu podstawy były w przybliżeniu proporcjonalne do wzrostu obciążenia, co oznaczało, że nie nastąpiło wyczerpanie możliwości przyrostu oporów podstawy. Potwierdza to znaną tezę, że opory pobocznicy wzbudzone są znacznie szybciej niż opory podstawy pała, a mobilizacja maksymalnych oporów pobocznicy następuje przy przemieszczeniach odpowiadających w przybliżeniu 0,01 średnicy trzonu pała, podczas gdy całkowite opory podstawy pała zostają zmobilizowane przy przemieszczeniach odpowiadających w przybliżeniu 0,1 średnicy pała. Ponadto zauważono, że uzyskano bezpośredni styk pomiędzy trzonem pała betonowego a kolumną z cementogruntem. Potwierdzeniem jest przebieg krzywej osiadania pała, z której wynika, że przyrosty osiadania są od początku niewielkie, takie jak w przypadku pali z iniekcją podstawy.

Podczas budowy obiektów mostowych drogi S8 na odcinku obwodnicy Marek wykonano 392 pale CFA z podstawą poszerzoną metodą iniekcji strumieniowej oraz przeprowadzono próbne obciążenia 17 pali. Stwierdzono, że średnia wartość nośności obliczeniowej pali wyznaczona na podstawie przeprowadzonych badań była 1,23 razy wyższa od średniego obciążenia obliczeniowego według projektu, zaś średnia nośność graniczna była 1,78 razy wyższa od średniego obciążenia obliczeniowego według projektu. Średni wskaźnik nośności obliczeniowej określonej na podstawie badania wynosił 1,23 i był taki sam jak stosunek średniej wartości nośności obliczeniowej pali do średniego obciążenia obliczeniowego według projektu. Natomiast średni wskaźnik nośności granicznej wynosił 1,89 i był nieco większy od stosunku średniej nośności granicznej oznaczonej na podstawie badania do średniego obciążenia obliczeniowego według projektu.

Badania pali na budowie obiektów mostowych na węźle Salomea oraz na obwodnicy Marek potwierdziły skuteczność zastosowania iniekcji strumieniowej do poszerzenia podstawy pali CFA. Nośność pali CFA z podstawą poszerzoną metodą iniekcji strumieniowej może być obliczana według zasad podanych w rozdziale 5 niniejszego artykułu.

6. CONCLUSIONS

During construction of bridge structures of the S8 expressway at the Salomea interchange in Warsaw, an experimental CFA pile with a widened jet grouted base was constructed. Its bearing capacity was compared with bearing capacity of a reference pile without widened base. The conducted load tests indicated that the ultimate bearing capacity of the pile with widened jet grouted base was 1.5 times greater than the bearing capacity of the reference pile, and its allowable load was 1.65 times greater than the allowable load of the reference pile.

It was noted that as the load increased, shaft resistance increased to a certain limit value and practically did not change with further increase in load and the accompanying settlement. The base resistance was approximately proportional to the growing load, which meant that the full potential value of base resistance was not reached. The results confirm the well-known thesis that shaft resistance is mobilized considerably earlier than base resistance: the maximum shaft resistance is mobilized at displacements corresponding to approx. 0.01 of the diameter of the pile shaft, while the maximum base resistance is mobilized at displacements corresponding to approx. 0.1 of the diameter of the pile. It was also observed that direct contact at the interface between the concrete CFA pile and the cement-soil column was obtained. This fact was confirmed by the shape of the settlement curve, which showed relatively small settlements from the onset of loading, similarly as for typical piles with injected bases.

During construction of bridge structures of the S8 expressway on the bypass of Marki, 392 CFA piles with widened jet grouted bases were constructed and load tests were performed on 17 piles. It was observed that the average design value of bearing capacity of the piles was 1.23 greater than the average design value of load specified in the design. The average ultimate bearing capacity was 1.78 greater than the average design load. The average ratio of design bearing capacity determined from the load test equaled 1.23 and was the same as the proportion of the average design value of bearing capacity to the average design value of load specified in the design. The average ratio of the ultimate bearing capacity equaled 1.89 and was slightly greater than the proportion of the average ultimate bearing capacity determined from the load test to the average design value of load specified in the design.

Pile load tests performed during construction of bridge structures at the Salomea interchange and on the bypass of Marki have confirmed the effectiveness of jet grouting in

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Gwizdała K.*: Fundamenty palowe. Technologie i obliczenia. Tom 1. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2010
- [2] *Gwizdała K.*: Współczesne technologie pali. Seminarium - Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych, Gdańsk, 2004
- [3] *Kłosiński B., Szymankiewicz Cz.*: Wpływ iniekcyjnego naprężania podstaw pali na ich nośność. Inżynieria i Budownictwo, **57**, 12, 2001, 702-706
- [4] Patent PL 202253: Sposób zwiększania nośności fundamentów głębokich. Uprawniony – Instytut Badawczy Dróg i Mostów, rok uzyskania prawa 2008
- [5] *Fontanella E., Callisto L., Desideri A.*: An interpretation of jet grouting effects on the retaining structures of a deep excavation and on adjacent buildings. Proceedings of Conference “Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground”, Roma, May 2011, Taylor and Francis Group, London, 2012, 941-948, DOI: 10.1201/b12748-124
- [6] *Shen S.L., Wang Z.F., Hopribulsuk S., Kim Y.H.*: Jet grouting with a newly developed technology: The Twin-Jet method. Engineering Geology, **152**, 1, 2013, 87-95, DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.10.018
- [7] *Njock P.G. A., Chen J., Modoni G.*: A review of jet grouting practice and development. Arabian Journal of Geosciences, **11**, 16, 2018, article no. 459, DOI: 10.1007/s12517-018-3809-7
- CFA base widening applications. Bearing capacity of CFA piles with widened jet grouted bases may be calculated according to the principles presented in section 5 of this paper.
- [8] *Szymankiewicz Cz.*: Poszerzanie podstaw pali metodą iniekcji strumieniowej. Inżynieria i Budownictwo, **69**, 3, 2013, 115-120
- [9] *Słowikowski D., Bartoszek Z., Szymankiewicz Cz.*: Pale z iniekcyjnie poszerzoną podstawą (pale IS). Geoinżynieria: drogi, mosty, tunele, **59**, 2, 2017, 50-52
- [10] Patent PL 226652: Sposób zwiększania nośności fundamentów głębokich oraz urządzenie do zwiększania nośności fundamentów głębokich. Uprawnieni – Instytut Badawczy Dróg i Mostów oraz Polbud-Pomorze Sp. z o.o., rok uzyskania prawa 2017
- [11] PN-83/B-02482:1983 Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych
- [12] PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne
- [13] *Bzówka J.*: Współpraca kolumn wykonywanych techniką iniekcji strumieniowej z podłożem gruntowym. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2009