

Przemysław Kościk¹
Kazimierz Gwizdała²

BADANIA NOŚNOŚCI PALI FORMOWANYCH TECHNIKĄ INIEKCJI STRUMIENIOWEJ

STRESZCZENIE: Referat prezentuje autorski projekt doświadczalny, przeprowadzony w pełnej skali technicznej, obejmujący terenowe badania nośności pali formowanych technologią iniekcji strumieniowej. Badania przeprowadzono na specjalnie przygotowanym do tego celu poletku doświadczalnym. Celem doświadczenia była ocena jednostkowych oporów gruntu na poboczniczy badanych pali.

1. Wstęp

Metoda iniekcji strumieniowej stosowana od wielu lat w różnych dziedzinach budownictwa oraz ochronie środowiska [4,5], oprócz typowych zastosowań związanych ze wzmacnianiem i uszczelnianiem gruntów, wykorzystywana jest również do wykonywania pali fundamentowych nowo wznoszonych obiektów [1,6]. Praktyka zastępowania „klasycznych” pali fundamentowych palami typu *jet grouting* (w dalszej części referatu pale te będą nazywane palami iniekcyjnymi) wskazuje na potrzebę opisu współpracy tych pali z podłożem gruntowym ze szczególnym uwzględnieniem oceny ich nośności oraz osiadań.

Nawet, jeśli udział pali iniekcyjnych w realizacjach nowych konstrukcji budowlanych może wydawać się mało znaczący na tle innych technologii palowych, o tyle, bez wątplenia są to pale doskonale sprawdzające się przy wzmacnianiu posadowień obiektów istniejących [3]. W każdym przypadku

¹ dr inż., TS Franki Sp. z o. o. Poznań

² dr hab. inż. prof. PG, Politechnika Gdańska

należy określić miarodajną zależność obciążenie – osiadanie oraz ocenić wpływ wykonanego wzmocnienia na konstrukcję.

Zawansowane badania terenowe, które umożliwiły ocenę oporów gruntu na poboczniczy i pod podstawą pali iniekcyjnych wykonywano między innymi we Francji [2]. W Polsce również od przeszło dziesięciu lat prowadzi się badania nośności pali iniekcyjnych. Ze względu jednak na brak odpowiedniego oprzyrządowania wyniki tych doświadczeń nie pozwalały na ocenę oporu gruntu mobilizowanego na poboczniczy badanych pali. W celu uzyskania wiarygodnych danych zaprojektowano specjalny program badań nośności pali iniekcyjnych, który przewidywał:

- a) ustalenie in situ miarodajnych warunków gruntowych w miejscu wykonywania pali iniekcyjnych przy użyciu sondy statycznej CPT,
- b) wykonanie pali iniekcyjnych o założonych długościach i średnicach wraz z oprzyrządowaniem umożliwiającym pomiar odkształcenia trzonu pala wzdłuż jego poboczniczy,
- c) przeprowadzenie badań nośności z pomiarem odkształceń trzonu pala,
- d) pobranie próbek tworzywa grunto-cementu dla określenia parametrów wytrzymałościowych oraz odkształceniowych (modułów sprężystości) materiału badanych pali.

W wyniku przeprowadzonych badań określono rozkładu sił wzdłuż trzonów pali i mobilizację oporów gruntu w funkcji obciążenia głowicy.

Badania zrealizowano na poletku doświadczalnym „Zakopianka” w Krakowie.

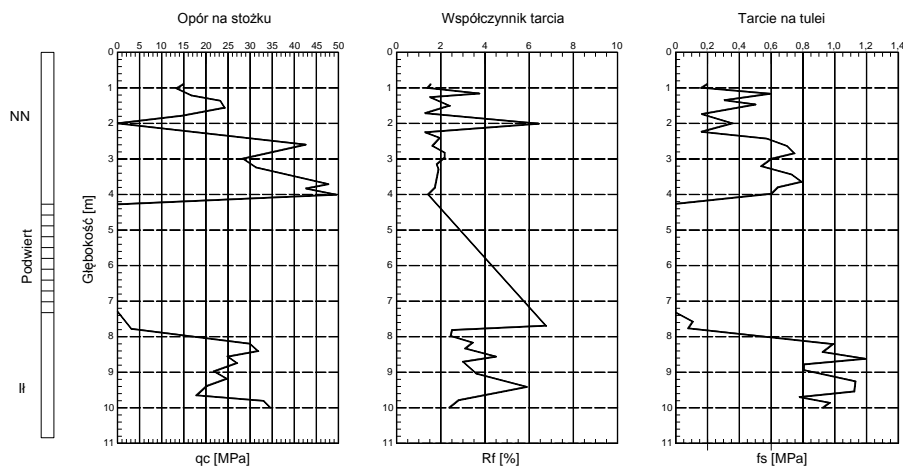
2. Przebieg badań

Centrum Handlowo-Usługowe „Zakopianka” w Krakowie zostało wybudowane w roku 1997 w miejscu starych, wyburzonych zakładów przemysłowych. Posadowienie nowego obiektu poprzedzone zostało konsolidacją dynamiczną gruntu nasypowego o zmiennej miąższości. Na przygotowanym w ten sposób podłożu posadowiono fundamenty oraz wykonano nasyp budowlany pod płytę posadzki.

Na początku 2001 roku w rejonie jednego z budynków zaobserwowano nagłe i znaczne osiadania słupów stalowej konstrukcji hali oraz spękania posadzki. Od tego czasu w rejonie tym prowadzono ciągłe obserwacje oraz przeprowadzono zabiegi techniczne mające na celu doraźne wzmocnienie gruntu pod istniejącymi fundamentami. W celu kompleksowego

poprawienia warunków posadowienia konstrukcji obiektu oraz posadzki zaprojektowano i wykonano wzmocnienie gruntu w postaci układu niezbrojonych pali iniekcyjnych o średnicy 600 mm i łącznej długości około 1700 m.

Przed rozpoczęciem robót przeprowadzono dodatkowe, szczegółowe badania geotechniczne przy użyciu sondy statycznej, oraz wyznaczono rejon poletka doświadczalnego gdzie wykonano sondowanie oznaczone jako CPT-2 (rys. 1). Poletko doświadczalne zlokalizowano w rejonie prowadzonych robót palowych, pomiędzy wykonanymi palami konstrukcyjnymi, które docelowo posłużyły do zakotwienia stanowiska badawczego.



Rys.1. Wyniki sondowań – sonda CPT-2

W oparciu o istniejącą dokumentację geotechniczną oraz sondowania statyczne stwierdzono, że strop gruntów nośnych w postaci półzwartych, trzeciorzędowych ilów mioceńskich znajduje się na głębokości od – 6,5 m do – 7,50 m poniżej poziomu posadzki. Występujące powyżej stropu ilów grunty stanowią niejednorodny konglomerat nasypów gruzowo-betonowych (z licznymi pustkami) przemieszany z gruntami rodzimymi o bardzo zróżnicowanych cechach geotechnicznych. Profile geotechniczne w miejscu wykonania przeznaczonych do badań pali iniekcyjnych oraz ich charakterystykę zamieszczono w tabeli 1 i 2.

2.1. Stanowiska do badań i wykonanie pali badawczych

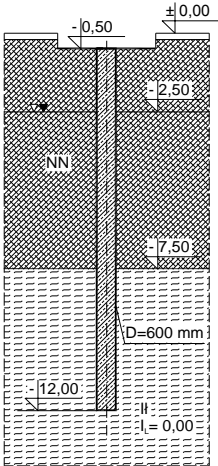
Do badań wykonano dwa niezbrojone pale iniekcyjne ϕ 600 mm o długościach 9,5 m (pal A1) i 11,5 m (pal B1). Pale zaprojektowano w taki sposób, aby umożliwić pomiar odkształceń trzonu pali na różnych głębokościach. Do tego celu, przed montażem stanowiska badawczego, przystąpiono do oprzyrządowania pali. Po wykonaniu pala, w niezwiązane jeszcze tworzywo gruntowo-cementowe wprowadzono zaślepione z jednej strony, stalowe rury osłonowe o średnicy 50 mm. W każdym palu badawczym planowano obsadzić po cztery rury o różnych długościach, z których najdłuższa miała sięgać podstawy pala. Bezpośredni pomiar odkształceń trzonu pala miał zostać przeprowadzony poprzez stalowe pręty pomiarowe ϕ 20 mm wprowadzone do rur osłonowych. Pręty zakończone zostały stalowymi płytkami, o które opierały się czujniki zegarowe o dokładności pomiaru 0,01 mm.

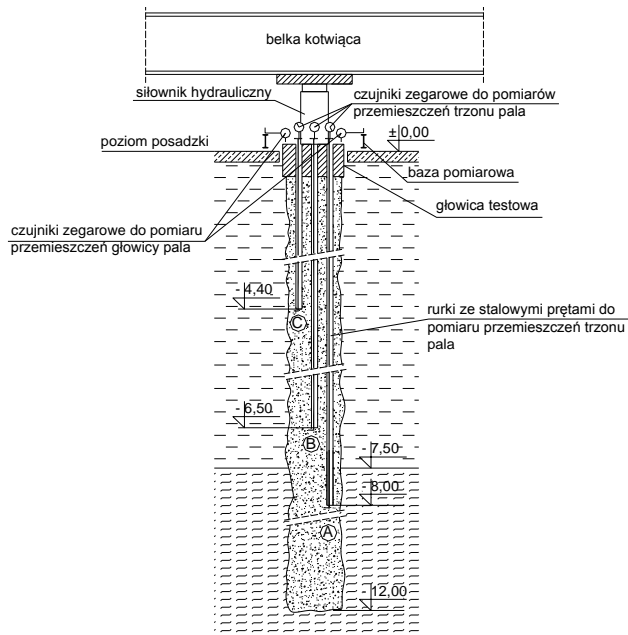
W trakcie robót okazało się, że ze względu na liczne przeszkody występujące w gruncie nasypowym udało się oprzyrządownić tylko pal B1. Rury osłonowe oznaczone symbolami A, B, i C wprowadzono na głębokość -8,00 m, -6,50 m oraz -4,40 m (rys. 2). Najdłuższej rury, która miała sięgać podstawy pala ostatecznie nie udało się obsadzić.

Tabela 1. Profil geotechniczny wraz z charakterystyką pala A1

Pal A1 – profil geotechniczny	Charakterystyka badanego pala
	<ul style="list-style-type: none"> - pal iniekcyjny ϕ 600 mm; - długość $L = 9,5$ m; - bez zbrojenia; <p><u>Parametry procesu iniekcji:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - system iniekcji: jednomediowy; - ciśnienie iniekcji, 40-45 MPa; - zaczyn z cementu hutniczego CEM III/B 32,5 przy $c/w = 2/1$; - prędkość obrotowa żerdzi iniekcyjnej 20 obr./min.; - prędkość posuwu żerdzi iniekcyjnej 4 cm/10 sek.

Tabela 2. Profil geotechniczny wraz z charakterystyką pala B1

Pal B1 – profil geotechniczny	Charakterystyka badanego pala
	<ul style="list-style-type: none"> – pal iniekcyjny ϕ 600 mm; – długość $L = 11,5$ m; – bez zbrojenia; <u>Parametry procesu iniekcji:</u> – system iniekcji: jednomiedowy; – ciśnienie iniekcji, 40-45 MPa; – zaczyn z cementu hutniczego CEM III/B 32,5 przy $c/w = 2/1$; – prędkość obrotowa żerdzi iniekcyjnej 20 obr./min.; – prędkość posuwu żerdzi iniekcyjnej 4 cm/10 sek.



Rys. 2. Schemat oprzyrządowania pala iniecyjnego B1

Z pala badawczego B1 (po zakończeniu próbnego obciążenia) pobrano rdzenie tworzywa gruntowo-cementowego w celu określenia jego właściwości wytrzymałościowych oraz odkształceniowych (tabela 3).

Tabela 3. Wyniki badań tworzywa pala B1.

Głębokość zalegania	Nr próbki	Średnia gęstość objętościowa ρ	Wytrzymałość na ściskanie R_c	Moduł sprężystości E_c
[m]		[kg/dm ³]	[MPa]	[GPa]
-	1	1,905	6,3	-
-	2		8,3	-
-	3		5,6	6,6
-	4		6,2	-
-	5		5,8	-
-3,00	6		-	5,7
-5,50	7		-	8,4
-7,00	8		-	6,9
-8,50	9		-	8,5

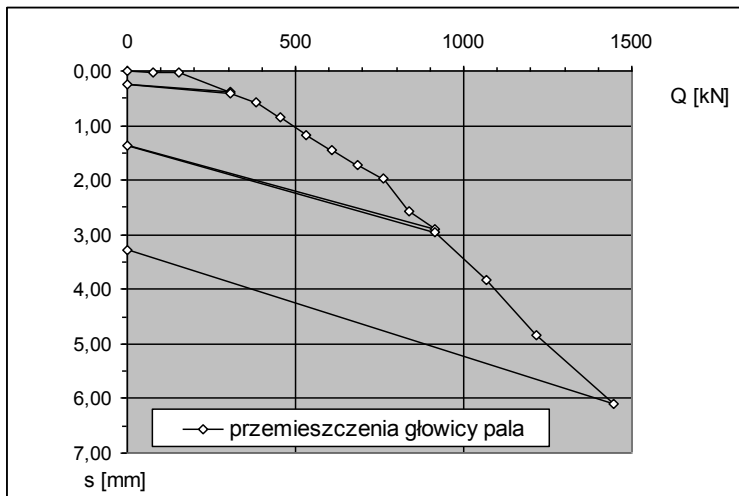
2.2. Przebieg próbnego obciążenia

Statyczne badania nośności przeprowadzono na obydwu palach. Pal A1 obciążono maksymalną siłą $Q_i = 1447$ kN, rejestrując przy tym osiadania rzędu 6,0 mm (rys. 3). Przy obciążeniu obliczeniowym równym 251 kN zanotowano osiadania o wartości zaledwie 0,3 mm. Projektowaną nośność pala określono na poziomie 637 kN. Warto zwrócić uwagę na wielkość osiadań sprężystych, które kształtują się w granicach 50 % całkowitego osiadania badanego pala, patrz rys. 3 – dla trzech różnych pomiarów obciążenia.

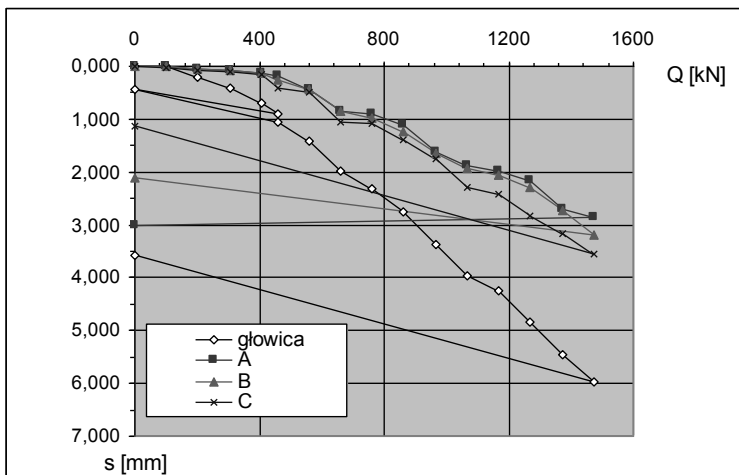
W przypadku pala B1 podczas badania osiągnięto wartość obciążenia $Q_i = 1472$ kN co oznaczało trzykrotne przeciążenie pala w stosunku do obciążenia projektowego $Q_r = 465,0$ kN. Projektowaną nośność pala określono na poziomie 794 kN.

Uzyskane w trakcie próbnego obciążenia przemieszczenia głowicy oraz trzonu (rys. 4) posłużyły do wyznaczenia krzywych rozkładu obciążeń wzdłuż badanego pala B1. Uzyskano również informacje na temat odkształceń własnych trzonu pala. Odkształcenia na odcinku 8,0 m (od głowicy pala do punktu pomiarowego A) osiągnęły wartość 0,9 mm przy obciążeniu 465,0 kN oraz 3,1 mm pod obciążeniem maksymalnym.

Porównując to z przemieszczeniami pomierzonymi w głowicy (odpowiednio 1,1 mm i 6,0 mm) okazuje się, że w zakresie obciążeń, którym poddany zostanie pal w trakcie eksploatacji odkształcenia własne trzonu osiągają wartość aż 80 % osiadań całkowitych.



Rys. 3. Próbné obciążenie pala A1



Rys. 4. Próbné obciążenie pala B1

Krzywe rozkładu obciążeń wzdłuż badanego pala (rys. 5) wyznaczono w oparciu o wzór:

$$Q_i = (2A_{pi}E_{ci}\Delta_i)/l_i - Q \quad (1)$$

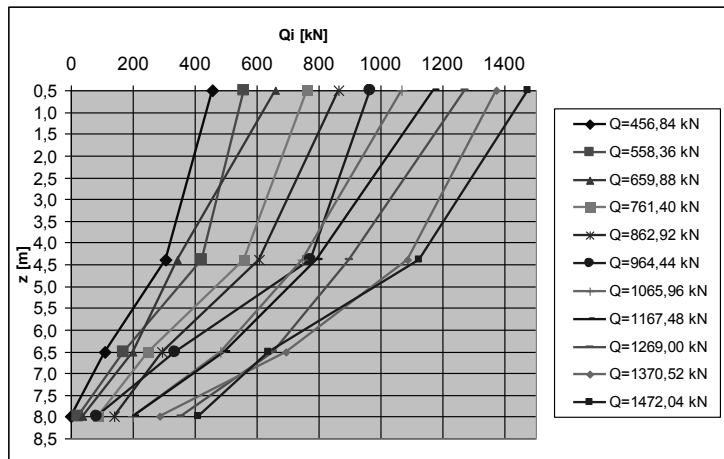
gdzie:

A_{pi} – pole przekroju poprzecznego pala;

E_{ci} – moduł sprężystości materiału pala na odcinku l_i ;

Δ_i – skrócenie sprężyste odcinka l_i pala;

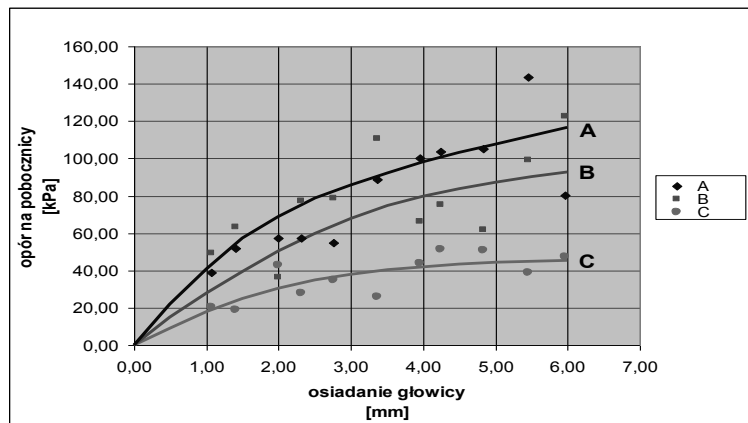
l_i – odcinek pomiędzy głowicą a poziomem, w którym wyznaczamy siłę Q_i .



Rys. 5. Krzywe rozkładu obciążeń wzdłuż pala B1

Analizując rozkład obciążeń wzdłuż długości pala można stwierdzić szybką mobilizację oporów tarcia na pobocznicę. Z rozkładu obciążeń (nachylenia krzywych) można również oszacować wartość obciążeń, jakie przejmuje podstawa pomimo, iż ostatni z punktów pomiarowych (punkt A) oddalony jest od stopy pala o 4,0 m. W zakresie obciążeń eksploatacyjnych całość obciążeń została przejęta praktycznie przez pobocznicę. Dopiero przy obciążeniach rzędu 1000 kN i więcej do współpracy zaczyna włączać się podstawa pala, która przy obciążeniu maksymalnym przejmuje jedynie około 10% całkowitego obciążenia pala.

Ostatecznym wynikiem przeprowadzonego doświadczenia, wyznaczonym w oparciu o znajomość rozkładu obciążeń, jest wartość oporów gruntu na pobocznicę badanego pala.



Rys. 6. Krzywe mobilizacji oporu gruntu na pobocznicę pala B1

Rysunek 6 przedstawia opory na pobocznicę w funkcji osiadania głowicy pala. W przypowierzchniowej części pala, pomiędzy głowicą a punktem pomiarowym C (w rejonie nasypów), gdzie wystąpiły największe przemieszczenia opory gruntu osiągają wartość graniczną na poziomie 50 kPa. Natomiast w rejonie gruntów rodzimych opory zbliżyły się do wartości 120 kPa nie osiągnąwszy wartości granicznej. Jest to z pewnością związane ze znacznym odkształceniem własnym i spowodowanym tym niewielkim przemieszczeniem trzonu pala na tej głębokości. Przemieszczenia pala na głębokości - 8,0 m nie przekraczają 3,0 mm (0,5% średnicy pala). Dla pełnej mobilizacji oporu gruntu przemieszczenia te powinny osiągnąć wartość rzędu 5,0 ÷ 6,0 mm.

4. Podsumowanie

1. Badania nośności z możliwością pomiaru odkształceń trzonu pala można przeprowadzać we względnie prosty sposób uzyskując zbiór danych w postaci krzywych rozkładu obciążeń wzdłuż długości pala.

2. W oparciu o krzywe rozkładu obciążeń można obok oporów gruntu na pobocznicę oszacować wartości oporów gruntu pod podstawą pali.
3. Należy zwrócić uwagę na znaczne odkształcenia własne trzonu pali iniekcyjnych, które wynoszą od 80 % do 50 % całkowitego osiadania pomierzonego w głowicy (w zakresie obciążeń projektowych).
4. Opory na pobocznicę pali iniekcyjnych są wysokie i znacznie przekraczają wartości normowe dla pali wierconych, osiągając poziom zbliżony do oporów obserwowanych np. w mikropalach iniekcyjnych.

5. Literatura

1. Bustamante M., Gianceselli L.: Nośność pionowa wiązki słupów formowanych w gruncie metodą iniekcji strumieniowej. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 8/1994.
2. Bustamante M, Gouvenot D.: Dimensionnement des colonnes de jet grouting comme element porteur et d'ancrage. XV Conference Intern. MSF. Istanbuł 2002, vol. 4.
3. Gwizdała K., Kościk P.: Zastosowanie iniekcji strumieniowej do wzmacniania istniejących obiektów. International Workshop. City of tomorrow and cultural heritage – Pomerania Outlook. Gdańsk 2005.
4. Lunardi P.: Ground Improvement by means of jet grouting. *Ground Improvement*, nr 1/1997.
5. Motak E.: Ekologiczna metoda wzmacniania podłoża i fundamentów budowli. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 11/1998.
6. Noga L., Kościk P.: Zastosowanie wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej do wzmacniania podłoża gruntowego i fundamentów. XVI Ogólnopolska Konferencja: Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Ustroń 2001.

AXIAL LOAD TESTS OF JET GROUTING PILES

Summary

In the paper the axial load tests of jet grouting piles are presented. The tests were conducted in a full technical scale on instrumented grout piles. The purpose of experiment was to evaluate the unit shaft friction of testing piles.