

ANALIZA NOŚNOŚCI PALI FDP NA PODSTAWIE WYNIKÓW PRÓBNYCH OBCIĄŻEŃ STATYCZNYCH

Jerzy SEKOWSKI, Łukasz JANOSZ
Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice, Polska

Słowa kluczowe: *pale FDP, próbne obciążenie statyczne, nośność pali.*

1. Wstęp

Zasadniczymi przyczynami wyboru posadowienia na palach są warunki gruntowo-wodne oraz obciążenia przekazywane z obiektu na podłoże. Współczesne możliwości techniczne firm wykonawczych oraz szeroki zakres proponowanych pali sprzyjają wyborowi takiego rozwiązania. O poprawności przyjętego rozwiązania według normy [8] decydują wyniki próbnego obciążenia, przeprowadzonego zgodnie z określonymi zasadami. Norma EN [9] zaleca je jako jedną z metod projektowania pali. Aktualnie, w krajowej praktyce inżynierskiej próbne obciążenia statyczne (rzadziej dynamiczne [6]) wykorzystywane są przede wszystkim jako badania odbiorcze zaprojektowanych pali – także tych, których nie uwzględniła norma [8] (tj. typów pali, których wówczas nie stosowano). Stąd też każde takie badanie jest interesującym doświadczeniem nie tylko dla projektanta.

W prezentowanym artykule przedstawione zostaną wyniki próbnych obciążeń statycznych pali FDP, zgodnie z [8], wykonanych pod obiekt kubaturowy na terenie Gliwic. Autorzy współuczestniczyli w przeprowadzeniu próbnych obciążeń, natomiast opracowanie wyników i analiza są ich udziałem i sporządzone zostały na potrzeby niniejszego artykułu.

2. Nośność pali na podstawie badań statycznych

Zaprojektowanie i przeprowadzenie próbnego obciążenia statycznego pala, celem uzyskania krzywej obciążenie-osiadanie, a w następstwie określenie nośności pala, wymaga [4]:

- zaprojektowania i wykonania konstrukcji oporowej lub balastowej,
- przyjęcia właściwego systemu obciążającego i odpowiedniego systemu pomiarowego wartości obciążeń,
- przygotowania układu pomiarowego przemieszczeń głowicy pala w czasie,
- wybrania metody przeprowadzenia próbnego obciążenia statycznego pala,
- interpretacji wyników uwzględniającej metodę przeprowadzonego badania.

Zależność obciążenie-osiadanie ($Q-s$) z próbnego obciążenia statycznego jest uznawana za bardzo wiarygodną charakterystykę pracy pala w podłożu. Zależna jest

ona w dużym stopniu od metody realizacji badania. Stąd też bezpośrednie porównanie wyników badań przeprowadzanych różnymi metodami może być niejednoznaczne.

Do najczęściej wymienionych w literaturze oraz stosowanych w różnych krajach metod badań statycznych pali należą:

- metoda wolnych stałych stopni obciążenia (Slow ML Test) [5,10],
- metoda szybkich stałych stopni obciążenia (Quick ML Test) [5,10],
- metoda stałej prędkości przemieszczenia (CRP Test) [5,10],
- metoda równowagi (IE Test) [5,7],
- metoda francuska LCPC [2,11],
- zalecenia niemieckie z roku 1993[5],
- szwedzki test cykliczny [7],
- metoda proponowana przez ISSMFE, 1985r. [5,7,9],
- metoda normowa PN-83/B-02482, 1983r. [8].

Podstawowa różnica przedstawionych powyżej metod sprowadza się do procedury prowadzenia badań, w tym realizacji obciążenia. Autorzy w swoich badaniach wykorzystali metodę przedstawioną w normie [8]. Według zaleceń tejże normy pal jest obciążany w $n \geq 10$ równych przyrostach obciążenia do obciążenia granicznego lub minimum $1,5 \cdot N_t$, gdzie N_t jest nośnością obliczoną według procedury tej normy. W praktyce często obciążenie przypadające na pal jest znacznie mniejsze od nośności i badanie przeprowadza się do obciążenia maksymalnego równego $1,5 \cdot Q_r$, gdzie Q_r jest obciążeniem obliczeniowym pala.

Przyrosty obciążenia na kolejnych stopniach są równe od 1/8 do 1/12 nośności obliczeniowej N_t . Każdy ze stopni jest utrzymywany do momentu stabilizacji pala, którą przyjmuje się jako prędkość osiadań nie przekraczającą $0,05 \text{ [mm]} / 10 \text{ [min.]}$. Każdy ze stopni obciążenia powinien być utrzymywany przez minimum 20 [min.]. Całość obciążenia może być realizowana w jednym bądź dwóch cyklach. W przypadku odciążania pośredniego, pierwszy cykl obciążenia przeprowadza się do obciążenia na poziomie nośności obliczeniowej (lub obciążenia obliczeniowego) pala.

Istnieje szereg metod interpretacji rezultatów próbnego obciążenia pali. Niektóre z nich (np. LCPC), są ściśle powiązane z metodą badania. Zazwyczaj jednak można stosować do jednej krzywej zależności obciążenie-osiadanie kilka różnych metod interpretacji otrzymanych wyników. Do najpopularniejszych należą:

- metoda zaproponowana przez Davissona w 1972r. i Pecka wraz ze współautorami w 1974 r. [5],
- metoda LCPC [2],
- metoda zaproponowana przez China w 1970r. [5],
- metoda zaproponowana przez Fullera i Hoga [5],
- metoda ISSMFE: [5,7,9],
- metoda normowa PN-83/B-02482 [8].

Interpretacja rezultatów badania następuje na podstawie krzywej pomocniczej, wykreślonej w odniesieniu do otrzymanego z badań wykresu Q-s. Metoda umożliwia ocenę postępującego uplastycznienia gruntu i obciążenia granicznego.

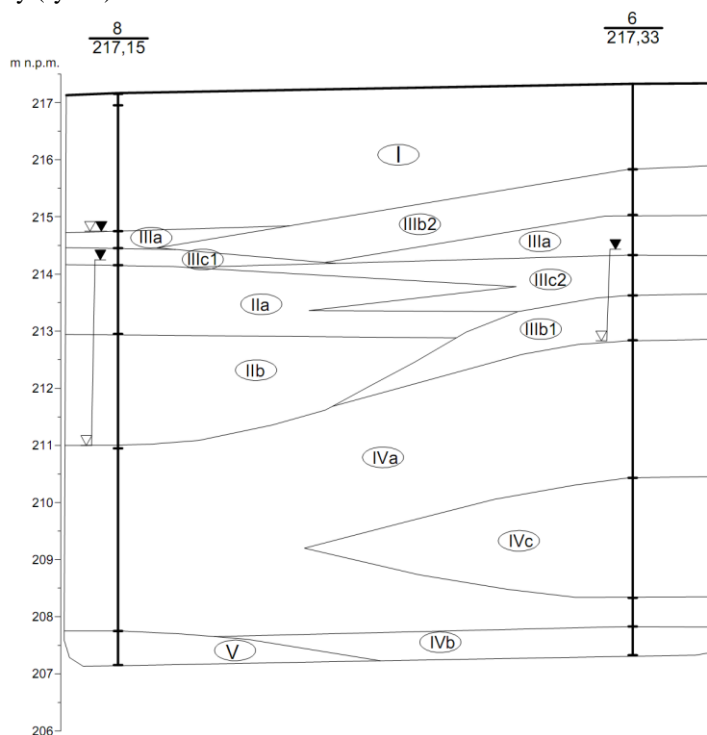
3. Opis przedmiotu badań

3.1. Charakterystyka warunków geologicznych

W podłożu projektowanej zabudowy wyróżniono [3]:

- I – grunty antropogeniczne,
- II – holocenijskie grunty organiczne,
- III – holocenijskie grunty rzeczne i zastoiskowe,
- IV – plejstocenijskie grunty wodnolodowcowe-piaszczyste,
- V – plejstocenijskie grunty ilaste.

Grunty nasypowe przykrywają cały teren inwestycji warstwą o miąższości 1,3-2,8 m. Holocenijskie grunty organiczne (warstwy IIa-IIb) reprezentowane są przez namuły o $I_L=0,22-0,42$ i torfyo zawartości części organicznych odpowiednio: 5,3-8,8%, i 47%. Holocenijskie osady rzeczne i zastoiskowe (warstwy IIIa-IIIc2) związane są z działalnością pobliskiej rzeki. Grunty te zawierają domieszki części organicznych (do 3,8%) i są zróżnicowane pod względem litologii oraz stanu fizycznego ($I_D=0,2$, $I_L=0,15-0,35$). Z gruntami pakietu II wspólnie zalegają pod nasypami I, do głębokości 3,6-6,4 m. Pakiet IV - (warstwy IVa-IVc) występuje poniżej głębokości 3,6-6,4 m. Są to zasadniczo zagęszczone piaski ($I_D=0,71$). Pakiet V to plejstocenijskie grunty ilaste w stanie twar doplastycznym ($I_L=0,15$). Woda o charakterze naporowym nawiercona została na głębokości 3,8-6,2 m ppt. Warunki gruntowo-wodne ilustruje wybrany przekrój geotechniczny (rys. 1).



Rys.1. Wybrany przekrój geotechniczny [3].
Fig. 1. A selected geotechnical cross-section [3].

3.2. Opis obiektu

Projektowany budynek pełnić będzie funkcję Centrum Informatycznego Politechniki Śląskiej i Przychodni Zdrowia. Bryła budynku stanowi połączenie części niskiej (Przychodnia Zdrowia) „otoczonej” pasem ażurowej osłony elewacyjnej wysokiej (blok Centrum Informatycznego).

Budynek jest częściowo parterowy, a częściowo 4 kondygnacyjny, o wymiarach w planie 43,25 mx 31,10 m i powierzchni całkowitej 2041,50 m². Po szczegółowej analizie warunków gruntowo-wodnych, konstrukcji i przeznaczenia obiektu oraz jego otoczenia zdecydowano się na posadowienie pośrednie. Projektant [1] zaproponował pale przemieszczeniowe FDP o średnicy Ø420 mm i długościach od 7 do 13 m. Rozmieszczono je pod ławami i stopami fundamentowymi, będącymi jednocześnie ich oczepami.

4. Próbné obciążenie pali

Ze względu na przyjęty przez projektanta układ pali i możliwość wykorzystania pali sąsiednich do zakotwienia w próbných obciążeniach wykorzystano kotwione stanowisko badawcze. Do kotwienia wykorzystano 4 pale konstrukcyjne. Stanowisko do próbných obciążeń przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Stanowisko do próbných obciążeń pala (fot. Ł. Janosz).

Fig. 2. A stand for load tests of the pile (photo by Ł. Janosz).

W realizowanym obiekcie przewidziano wykonanie próbných obciążeń statycznych dla trzech pali o długościach 9, 10 i 13 m oznaczonych odpowiednio: K-202, P-201, P-200,

rozmieszczonych w różnych fragmentach obiektu. Określone przez projektanta nośności pali wynosiły odpowiednio: $N_{t,1}=477\text{kN}$, $N_{t,2}=792\text{ kN}$ i $N_{t,3}=703\text{ kN}$:

Do przeprowadzenia próbnego obciążenia przyjęto następujące wartości obciążenia:

Pal K-202, L=9,0 [m]:	$Q_{\max,1}=1,5 \times N_{t,1}=1,5 \times 477=716\text{ [kN]}$,
Pal P-201, L=10,0 [m]:	$Q_{\max,2}=1,5 \times N_{t,2}=1,5 \times 792=1188\text{ [kN]}$,
Pal P-200, L=13,0 [m]:	$Q_{\max,3}=1,5 \times N_{t,3}=1,5 \times 703=1055\text{ [kN]}$.

Obciążenia pala wykonywano zgodnie z postanowieniami normy PN-83/B-02482 [8]. Do próbnego obciążenia został użyty zestaw siłowników o nośności całkowitej umożliwiającej zadanie projektowanego obciążenia. Siłowniki były zasilane za pomocą pompy hydraulicznej. Siłowniki ustawiono osiowo na głowicy pala próbnie obciążanego. Belka główna przed badaniem nie mogła opierać się na siłownikach. Wartość siły przekazywanej przez siłowniki na pal określana była na podstawie pomiaru ciśnienia oleju mierzonego na manometrze o klasie dokładności 1,0. Każdy stopień obciążenia utrzymywany był do osiągnięcia stabilizacji osiadań, mierzonych za pomocą czujników przemieszczeń.

Umowną stabilizację osiadań pala przyjęto wówczas, gdy w ciągu dwóch kolejnych okresach 10 minutowych przyrost osiadań nie był większy niż 0,05 mm.

Po osiągnięciu siły zbliżonej do obciążenia projektowego (lub nośności obliczeniowej) dokonano całkowitego odciążenia pala i pomierzono jego trwałe osiadanie. Następnie przywrócona została wartość siły sprzed odciążenia i kontynuowano obciążanie pala stopniowo do siły Q_{\max} z pomiarem osiadań. Po końcowym odciążeniu pomierzono trwałe osiadanie końcowe pala. Pomiar osiadań dokonywany był za pomocą 4 czujników zegarowych o dokładności odczytu 0,01 mm. Czujniki te opierały się na niezależnej bazie pomiarowej.

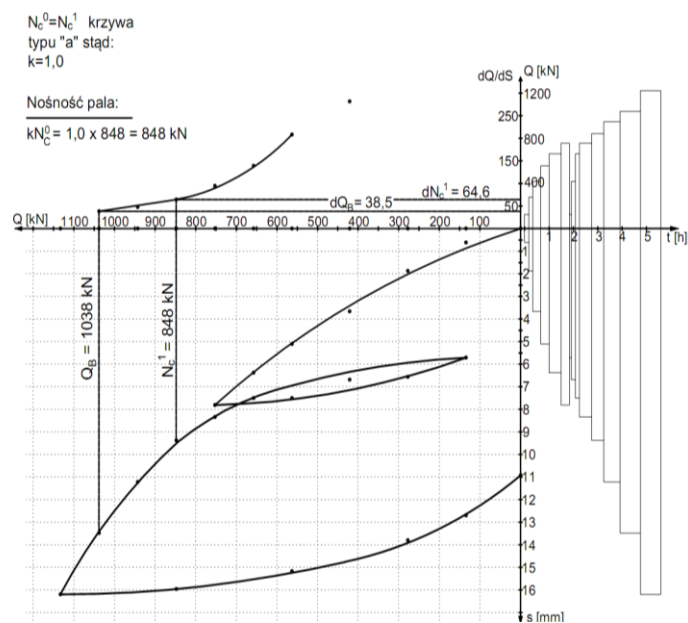
W trakcie próbnego obciążenia kontrolowano metodą geodezyjną wyciąganie pali kotwiących znajdujących się najbliżej pala próbnie obciążanego. Maksymalne trwałe wyciągnięcie pala kotwiącego nie mogło być większe od 5 mm.

5. Rezultaty próbnego obciążenia i ich analiza

W dniach 03.03.2015 do 04.03.2015 przeprowadzono trzy próbne obciążenie statyczne pali przemieszczeniowych FDP o średnicach $\varnothing 420\text{ mm}$ i długościach: L=13,0 m, L=10,0 m i L=9,0 m.

Na podstawie wyników pomiarów terenowych przemieszczenia głowicy pala w zależności od przyłożonego obciążenia Q sporządzono diagramy zależności obciążenie-osiadanie Q(s) dla wszystkich badanych pali oraz dokonano ich interpretacji zgodnie z PN-83/B-02482 [8]. W tabelicy 1 przedstawiono zestawione wyniki badań dla wszystkich pali, natomiast na rys. 3 przykładowy wykres zależności Q-s dla jednego z nich, a mianowicie pala o długości 13 m. Wynika z niego, że kolejno zadawanym stopniom obciążenia odpowiadają równomierne przyrosty osiadań, co świadczy o dobrej współpracy pala z ośrodkiem gruntowym. Wspomnianą krzywą można, zgodnie z normą PN-83/B-02482 [8], określić jako „typ a”. Jak wynika z tabeli 1, nośności obliczeniowe badanych pali przy interpretacji otrzymanych wyników według [8] wynoszą:

Pal P-200:	$k \cdot N_c^0=848\text{ [kN]}$,
Pal P-201:	$k \cdot N_c^0=1063\text{ [kN]}$,
Pal K-202:	$k \cdot N_c^0=906\text{ [kN]}$.



Rys. 3. Badanie statyczne nośności pala na wciskanie. Pal P-200, FDP, Ø420mm, L=13 m.
 Fig. 3. Static investigation of press-in load capacity of pile. Pile P-200, FDP, Ø420mm,
 L=13 m.

Tabela 1. Wyniki próbnego obciążenia pali.

Numer pala	Dane	Rodzaj obciążenia	Siła [kN]	Osiadanie [mm]	
				Całkowite	Trwale
P-200	FDP Ø420mm L=13,0 [m]	$Q_{pośr}$	753	7,81	-
		Q_{max}	1133	16,20	10,93
		$k \cdot N_c^0$ – nośność pala	848	9,38	-
P-201	FDP Ø420mm L=10,0 [m]	$Q_{pośr}$	848	5,39	-
		Q_{max}	1181	8,61	6,45
		$k \cdot N_c^0$ – nośność pala	1063	~7,12	-
K-202	FDP Ø420mm L=9,0 [m]	$Q_{pośr}$	563	1,99	-
		Q_{max}	1276	12,37	8,53
		$k \cdot N_c^0$ – nośność pala	906	~5,01	-

Nośność powyższa mobilizuje się przy osiadaniu pala pojedynczego na poziomie $s \approx 5,01-9,38 \text{ mm}$.

Porównując przedstawione powyżej wyniki z wartościami obliczeniowymi należy stwierdzić, że w przypadku wszystkich pali ich nośności uzyskane w trakcie badania są większe od określonych obliczeniowo, zatem spełniony jest warunek nośności:

$$\begin{aligned} \text{Pal P-200:} & N_{t,P-200}=703 \text{ [kN]} < k \cdot N_c^0=848 \text{ [kN]}, \\ \text{Pal P-201:} & N_{t,P-201}=792 \text{ [kN]} < k \cdot N_c^0=1063 \text{ [kN]}, \\ \text{Pal K-202:} & N_{t,K-202}=477 \text{ [kN]} < k \cdot N_c^0=906 \text{ [kN]}. \end{aligned}$$

Przyczyn rozbieżności pomiędzy wartościami nośności pali uzyskanych z badań i obliczeń można upatrywać w nadmiernej ostrożności w przyjmowaniu współczynników technologicznych (S_{si} , S_p) dla pali FDP lub w nieprecyzyjnym oszacowaniu parametrów geotechnicznych podłoża.

6. Podsumowanie

Posadowienie na palach stosuje się wówczas, gdy zachodzi potrzeba przeniesienia dużych skupionych obciążeń, a także gdy górne warstwy podłoża są słabonośne.

Według zaleceń polskiej normy palowej [8] sprawdzenie poprawności obliczeń analitycznych dokonuje się na podstawie próbnego obciążenia. W zaleceniach Eurokodu [9] jedną z metod projektowania są rezultaty próbnych obciążeń pali. W świetle powyższych zaleceń tego typu badania są potrzebne w praktyce inżynierskiej, a częstość ich wykonywania będzie wzrastać.

W realizowanym obiekcie przeprowadzono trzy próbne obciążenia pali fundamentowych typu FDP. Badania pali fundamentowych potwierdziły ich przydatność do przenoszenia, z bezpiecznym zapasem, obciążeń z obiektu na podłoże gruntowe.

W każdym z przypadków uzyskano nośności pali wyższe od wartości ustalonych obliczeniowo. Zauważalny jest jednak mniejszy przyrost nośności pala P-200, względem wartości wynikającej z obliczeń, w porównaniu do pali K-202 i P-201. Przyczyn rozbieżności można upatrywać w nadmiernej ostrożności w przyjmowaniu współczynników technologicznych pali FDP lub w nieprecyzyjnym oszacowaniu parametrów geotechnicznych podłoża. Wyjaśnienie tego problemu, podobnie jak udział rodzaju gruntu w przenoszeniu obciążeń przez pale FDP wymagałoby jednak szerszych badań i analiz.

Oznaczenia symboli

- s – osiadanie, settlement, [m],
- I_D – stopień zagęszczenia, density index, [-],
- I_L – stopień plastyczności, liquidity index, [-],
- N – nośność pala, bearing capacity of a pile, [N],
- Q – obciążenie, load, [N].

Literatura

- [1] Blejarski T.: Projekt wykonawczy posadowienia pośredniego na palach wierconych przemieszczeniowych budynku Centrum Informatycznego Politechniki Śląskiej oraz lokalu Przychodni Zdrowia, Gliwice-Kraków, 2015.
- [2] Bustamante M., Jezequel J.F.: Essai statique de pieu isolé sous charge axiale. Méthod d'essai LPC no 31, Ministère de L'équipement et du Logement Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 1989.

- [3] Dokumentacja Geologiczno - Inżynierska dla potrzeb projektowanej budowy Centrum Komputerowego Politechniki Śląskiej w Gliwicach przy ul. Łużyckiej - działka nr 267. Przedsiębiorstwo Morion Sp. z o.o., Gliwice, 2013.
- [4] Gwizdała K.: Fundamenty palowe, Tom 1, Technologie i obliczenia, Wydawnictwo Naukowe PWN, wyd. II, Warszawa, 2011.
- [5] Gwizdała K.: Fundamenty palowe, Tom 2, Badania i zastosowania. Wydawnictwo Naukowe PWN, wyd. I, Warszawa, 2013.
- [6] Gwizdała K., Brzozowski T.: Badania dynamiczne nośności pala. Górnictwo i Geoinżynieria, Rok 32, Zeszyt 2, 2008, s. 139-149.
- [7] Prakash S., Sharma D.H.: Pile foundations in engineering practice, John Wiley & Sons, New York City, 1990.
- [8] PN-B/02482:1983, Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów na palach.
- [9] PN-EN 1997-1:2008 Eurokod7, Projektowanie geotechniczne, Część 1: Zasady ogólne.
- [10] Geotechnical Control Procedure: Static Pile Load Test Manual., GCP-18 Revision #3, April 2007.
- [11] Fascicule N^o 62 –Titre V: Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil., 30 mai 2012.

ANALYSIS OF BEARING CAPACITY OF FDP PILES BASED ON STATIC LOAD TESTING

Summary

Article presents characteristics of static load pile tests, as a proof tests. Results of three such tests are presented and analysed. The tests were conducted at FDP piles designed as a foundation for a building in unfavourable soil conditions. The results of static load pile tests were positive. Capacities of piles were 20-90% larger than the design capacities.