

Jarosław Rybak*, Marek Wyjadłowski**

DOŚWIADCZALNA WERYFIKACJA OBLICZEŃ NOŚNOŚCI BOCZNEJ PALI***

1. Wprowadzenie

Obliczenia nośności bocznej pali i ich przemieszczeń poziomych są skomplikowane i zależne od przyjmowanych założeń. Projektowanie pali obciążonych siłami bocznymi jest zatem obarczone ryzykiem błędów – niezależnie od stopnia zaawansowania metody obliczeniowej. Sposobem na uzyskanie korelacji między prowadzonymi obliczeniami a pracą pala w konstrukcji jest wykonanie próbnych obciążeń bocznych. Badania takie pozwalają na oszacowanie przemieszczeń a zarazem na wyznaczenie (w zależności od przyjmowanego kryterium) maksymalnej siły obciążającej pal.

Nośność pali na obciążenia poziome określa się ze względu na stany graniczne nośności i stany graniczne użyteczności. W przypadku stanu granicznego nośności decydujący jest warunek nośności gruntu na docisk boczny pala. W stanie granicznym użyteczności, najistotniejszy jest warunek ograniczenia przemieszczeń poziomych pala. Istotne jest również sprawdzenie wartości ekstremalnych momentów zginających pal. Zasadniczą trudność w budowie modelu obliczeniowego pala obciążonego siłą poziomą stanowi określenie odkształcalności współdziałającego gruntu. Stosowane w praktyce metody obliczeniowe oceny nośności pali obciążonych siłami poziomymi pochodzą z lat 60 i 70 ubiegłego wieku [6, 11].

Metody te bazują na rozwiązaniu pala jako belki na podłożu sprężystym [7], które zmodyfikował Terzaghi [13]. Zasadniczy problem w zastosowaniu tego modelu obliczeniowego stanowiło przyjęcie sztywności gruntu wokół pala. Autorzy prac [4, 5, 8] przedstawili zasady wyznaczania sztywności gruntu dla pali obciążonych siłami poziomymi.

* Zakład Budownictwa Wodnego i Geodezji, Instytut Geotechniki i Hydrotechniki, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, Wrocław

** Zakład Fundamentowania, Instytut Geotechniki i Hydrotechniki, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, Wrocław

*** Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2008–2010 jako projekt badawczy

Należy podkreślić, że Eurokod 7 [2] traktuje wykonywanie próbnych obciążeń jako równoprawną metodę projektowania pali. Takie „aktywne projektowanie” pozwala na najwłaściwszy dobór pali ze względu na obciążenia, jest jednak trudne do zaakceptowania przez inwestorów. Badania pali obciążonych siłami poziomymi są obecnie nadal prowadzone przez wielu autorów [9, 10].

Typowe konstrukcje stosowane do wywierania obciążenia bocznego na pal działają na zasadzie „rozpierania” lub „ściągnięcia” sąsiednich pali siłownikiem hydraulicznym. Przykładowe rozwiązanie przedstawiono na rysunku 1. Technika taka ma zasadnicze wady polegające na nieadekwatności sposobu obciążenia sąsiednich pali w stosunku do ich pracy pod konstrukcją (gdzie ich obciążenie boczne ma jednakowy zwrot). Pewnym problemem jest również swobodna głowica pala obciążanego (rys. 1), która w rzeczywistej pracy pala jest utwierdzona w konstrukcji oczepu. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki obliczeń statycznych i ich weryfikację doświadczalną w odniesieniu do pala o małej średnicy (mikropala iniekcyjnego). Obliczenia przemieszczeń wykonano metodą normową wg [1] z uwzględnieniem rzeczywistej sztywności mikropala i przy założeniu, że głowica jest neutwierdzona.



Rys. 1. Przykładowe stanowisko do badań nośności bocznej

2. Obliczenia statyczne metodą normową

Metoda normowa [1] umożliwia obliczanie pojedynczych pali zginanych w warunkach gruntów nośnych: niespoistych o $I_D > 0,20$ oraz spoistych o $I_L < 0,75$ jednorodnych lub uwarstwionych, jeżeli można je sprowadzić do gruntów jednorodnych. Metodą normową nie można obliczać zginania pali osadzonych w gruntach przewarstwionych gruntami nienośnymi. Założenia obliczeniowe metody normowej opierają się na hipotezach pala sztywnego i wiotkiego. Sztywność pala jest określana stosunkiem zagłębienia pala w gruncie h : i jego długości „sprężystej” h_s .

Pale są obliczane jako sztywne gdy $h < 1,5 h_s$ oraz jako wiotkie gdy $h > 3,0 h_s$. Długość sprężystą (zagłębienie sprężyste pala) określa wtedy wzór (1) wg [1]:

$$h_x = \sqrt[\bar{n}+4]{\frac{4EJ}{k_x D}} h^{\bar{n}} \quad (1)$$

gdzie:

- $\bar{n} = 1,0$ — jak dla gruntów niespoistych lub spoistych normalnie skonsolidowanych,
 k_x — współczynnik podatności gruntu obliczone według wzorów (40), (41) normy,
 dla gruntów niespoistych: $k_x = S_n (750I_D^2 + 225 I_D + 150) \gamma^{(n)}/D$,
 dla gruntów spoistych: $k_x = S_n 9600 (1 - I_L)/D$,
 EJ — sztywność pala,
 D — średnica pala.

Przemieszczenie pala wiotkiego y_o w poziomie terenu wyznacza się według wzoru:

$$y_o = \frac{H_n h^{\bar{n}} N_2}{k_x D h_s^{\bar{n}+1}} \quad (2)$$

gdzie:

- N_2 — współczynnik z wykresu 26 normy [1],
 H_n — siła pozioma obciążająca pal.

3. Obliczenia nośności bocznej mikropala iniekcyjnego

Próbnym obciążeniami siłą poziomą poddano mikropal iniekcyjny zaprojektowany w celu wzmocnienia posadowienia budynku mieszkalnego. Długość mikropali (zarówno badanego jak i drugiego, o który rozpierano siłownik) wynosiła $l = 6,5$ m, a ich obliczeniowa średnica wynosiła $D = 0,18$ m. Mikropale wykonano z C20/25 oraz były zbrojone rurą stalową bez szwu ciągnioną i walcowaną na zimno ogólnego zastosowania wg PN-84/H-74220 o wymiarach $\emptyset 76,1/3,65$ ze stali 18 G2A. Obliczono moment bezwładności dla przekroju zastępczego pala, w którym przekrój rury stalowej został zamieniony na ekwiwalentny przekrój betonowy o większym promieniu wewnętrznym i zewnętrznym.

- moment bezwładności rury: $J = 5,471 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$
- zastępczy moment bezwładności dla rury: $J = 4,673 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$
- moment bezwładności przekroju zastępczego pala: $J = 0,000057 \text{ m}^4$
- sztywność mikropala EJ : $EJ = 27000000 \cdot 0,000057 = 1505 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$

Współczynnik podatności bocznej gruntu k_x warstw podłożu wyznaczono według wzorów: dla gruntów niespoistych:

$$k_x = \frac{S_n (750I_D^2 + 255I_D + 150) \gamma^{(n)}}{D} \quad (3)$$

dla gruntów spoistych:

$$k_x = \frac{S_n 9600 (1 - I_L)}{D} \quad (4)$$

Dla mikropali iniekcyjnych wciskanych pojawia się problem doboru współczynnika technologicznego S_n . Wstępnie przyjęto wartość $S_n = 1,1$ jak dla pali wbijanych i wvibro-wywanych. Grunty występujące w podłożu uzasadniają zastosowanie metody normowej. W tabeli 1 zestawiono warunki geotechniczne w podłożu oraz obliczone współczynniki podatności bocznej k_x .

TABELA 1
Dane geotechniczne do obliczeń

Przełot warstwowy [m]	Warstwa	Grunt	I_D/I_L	γ [kN/m ³]	Φ [°]	c [2-a]	k_x [kN/m ³]
0,0÷-1,00	C1	G _{πz}	0,05	2,15	17,2	24,4	55733
1,00÷-2,70	II	P _r	0,30	1,65	31,7	—	28738
-2,70÷-3,50	C2	Nm _g	0,70	13,0	6,9	5,6	17600
-3,50÷-4,00	II	P _r	0,35	1,70	32	—	33309
-4,00÷-6,50	I	P _o	0,40	2,05	37,7	—	45100

W celu obliczenia wartości średniej podatności bocznej k_x , obliczono wstępne zagłębienie sprężyste pala h_s dla k_x najmniejszego, czyli obliczonego dla warstwy najstabszej.

$$h_s = \sqrt[5]{\frac{4EJ}{k_x D} h^n} = \sqrt[5]{\frac{4 \cdot 1505}{17600 \cdot 0,18}} 6,5 = 1,65 \text{ [m]} \quad (5)$$

Ponieważ $h_1/h_s = 1,0 / 1,65 = 0,47$, to obliczono średnią ważoną wartość współczynnika k_x :

$$k_x = \frac{1,0 \cdot 55733 + 0,65 \cdot 28738}{1,65} = 45066 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right] \quad (6)$$

Zagłębienie sprężyste pala dla uśrednionej wartości k_x wynosi:

$$h_s = \sqrt[5]{\frac{4EJ}{k_x D} h^n} = \sqrt[5]{\frac{4 \cdot 1505}{45066 \cdot 0,18}} 6,5 = 1,35 \text{ [m]} \quad (7)$$

Przy założeniu wartości współczynnika technologicznego $S_n = 1,0$, jak dla pali niewymienionych w tabeli 11 [1], otrzymano: $k_x = 40689 \text{ kN/m}^3$, $h_s = 1,40 \text{ m}$. Mikropal iniekcyjny można traktować jak pal wiotki ponieważ spełniony jest warunek: $h > 3h$.

Przemieszczenie pala wiotkiego y_o w poziomie terenu wyznaczono według wzoru (2). Współczynnik N_2 z wykresu 26 normy [1] przyjęto jako $N_2 = 1,70$. Obliczone przemieszczenia y_o pala dla współczynnika $S_n = 1,1$ oraz $S_n = 1,0$ zestawiono w tabeli dla sił jakimi obciążano mikropal w pierwszym cyklu obciążenia.

TABELA 2

Wyniki obliczeń przemieszczenia poziomego

Siła H_n [kN]	Przemieszczenie $y_o (S_n = 1,1)$ [m]	Przemieszczenie $y_o (S_n = 1,0)$ [m]
0,00	0,0000	0,0000
1,48	0,0011	0,0011
2,80	0,0021	0,0022
4,13	0,0031	0,0032
5,45	0,0041	0,0042
6,25	0,0047	0,0048
7,04	0,0053	0,0054
7,84	0,0059	0,0060
9,69	0,0072	0,0075
10,49	0,0078	0,0081
11,28	0,0084	0,0087
11,81	0,0088	0,0091
12,34	0,0092	0,0095

4. Polowe badania nośności bocznej mikropala iniekcyjnego

Próbnym obciążeniami siłą poziomą poddano mikropal iniekcyjny, zaprojektowany na obciążenia pionowe, dla wzmocnienia posadowienia konstrukcji budynku mieszkalnego, który uległ uszkodzeniom na skutek nierównomiernych osiadań.

Stanowisko badawcze przedstawiono na rysunku 2. Siła pozioma (reakcja) przenoszona była na drugi mikropal, którego głowica była trwale utwierdzona w betonowej posadzce pomieszczenia.



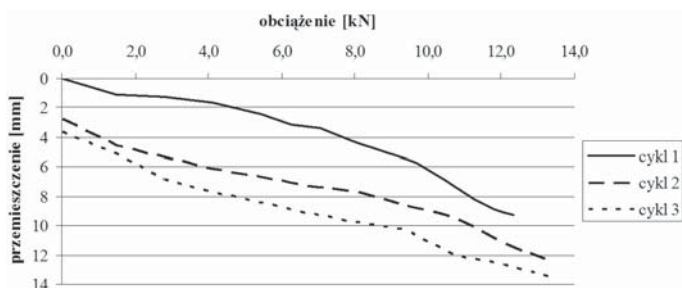
Rys. 2. Układ obciążający i układ pomiarowy

Obciążenie zrealizowano za pomocą siłownika hydraulicznego o charakterystyce $Q = 2,65 \cdot p - 2,5$ gdzie p [bar], zachowując zalecenia normy [1] odnośnie do stabilizacji osiadań w kolejnych krokach obciążenia. Pomiar ciśnienia w układzie hydraulicznym realizowano przy pomocy manometru elektronicznego. Pomiar przemieszczenia bocznego, ze względu na ograniczony dostęp do głowicy pała próbnie obciążanego bocznie wykonano za pomocą pojedynczego zegarowego czujnika przemieszczeń o dokładności 0,01 mm (rys. 2).

Przyjęto, że obciążenie w pierwszym cyklu będzie prowadzone do osiągnięcia przemieszczenia granicznego $y_0 = 10$ mm, które często przyjmowane jest jako dopuszczalne [12].

W pierwszym cyklu obciążenia, dla siły wynoszącej $Q = 12,34$ kN zaobserwowano, że przemieszczenie boczne pała osiągnęło niemal 10 mm (wynosiło 9,29 mm). Mikropal odciążono i po stabilizacji przemieszczeń poziomych zarejestrowano jego trwałe przemieszczenie.

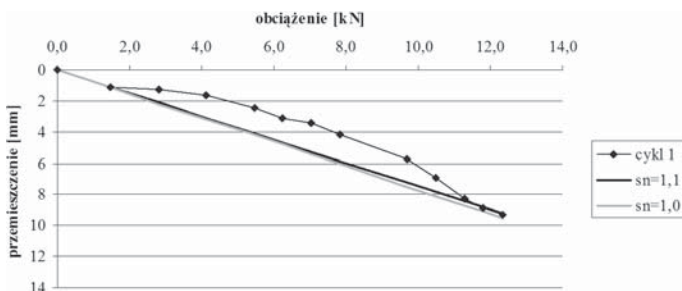
Mikropal był następnie obciążany w dwóch kolejnych cyklach obciążenia do $Q_{\max} = 13,40$ kN, co pozwoliło na pewne obserwacje odnośnie jego zachowania pod wielokrotnym obciążeniem. Zarejestrowany przebieg badania pała oraz przemieszczenia ustabilizowane w kolejnych krokach obciążenia przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Wykres przemieszczeń w kolejnych cyklach obciążenia

5. Porównanie wyników

Do porównania przyjęto wartości obliczonych oraz pomierzonych przemieszczeń w pierwszym cyklu próbnego obciążenia.



Rys. 4. Zestawienie wielkości przemieszczeń pomierzonych w cyklu 1 i obliczonych

Rozpatrywany mikropala o małej średnicy $D = 0,18$ m stanowi przypadek graniczny w wykorzystaniu metody normowej, gdyż jej stosowanie jest ograniczone do pali o średnicy $D > 0,20$ m, wykonanych w gruntach nośnych. Występująca w podłożu warstwa namułu o miąższości $h = 0,80$ m i stopniu plastyczności $I_L = 0,70$ jest bardzo zbliżona właściwościami do gruntów definiowanych jako nienośne. Warstwa ta występowała jednak poniżej obliczonego zagłębienia sprężystego mikropala $h_s = 1,40$ m, co zmniejsza jej wpływ na przemieszczenia głowicy pala.

Obliczone wartości końcowego przemieszczenia mikropala w pierwszym cyklu obciążenia dla siły $F = 12,34$ kN wykazują zaskakującą zgodność z przemieszczeniem obliczeniowym. Należy jednak pamiętać, że przemieszczenie obliczane ma charakter liniowy w zależności od przyłożonej siły. W przypadku wyników pomiarów, są one liniowe (sprężyste) jedynie w pierwszej fazie obciążenia. Przyrosty osiadań przy dużych obciążeniach mają już charakter deformacji plastycznej i występują przemieszczenia trwałe po odciążeniu). Charakter przebiegu przemieszczenia obserwowanego i obliczeniowego wskazuje, że po osiągnięciu obciążenia, gdzie występuje ich równość (dla przemieszczenia przekraczającego 10 mm), przemieszczenie pomierzone przyrastało szybciej od obliczeniowego. Różnice pomiędzy pomierzonym a obliczeniowym przemieszczeniem wystąpiły również dla wartości obciążenia mniejszych od $F = 12,34$ kN, gdzie wartości obliczeniowe okazały się większe od obserwowanych.

6. Wnioski

Projektowanie pali według metody normowej jest bezpieczne w zakresie obciążenia, powyżej którego pojawiają się deformacje plastyczne. Wartość tego granicznego obciążenia może być wyznaczona jedynie w trakcie próbnych obciążeń.

Wartości przyjętych współczynników technologicznych S_n nie mają istotnego wpływu na obliczone przemieszczenia. Przyjęcie współczynnika $S_n = 1,0$, jak dla technologii nie wymienionych w tabeli 11 normy [1], prowadzi do stosunkowo niewielkiego zwiększenia obliczonych przemieszczeń.

Na podstawie przeprowadzonego doświadczenia można wnioskować, że metodę normową można stosować dla oszacowania przemieszczeń w pierwszym cyklu obciążenia. Zgodność wyników pomiarów i obliczeń w przedstawionym przykładzie może być jednak pozorna, gdyż prawdopodobnie podłoże gruntowe było wzmocnione w otoczeniu głowicy pala przez ucieczkę zaczynu cementowego w procesie jego iniekcji. Sztywność pierwszej warstwy ma bardzo istotny wpływ na przemieszczenia pali spowodowane siłami poziomymi [6].

Próbne obciążenia siłami poziomymi przeprowadzone przez innych autorów [9, 10] wskazują na istotny wzrost przemieszczeń w kolejnych cyklach obciążeń. W przedstawionym przykładzie (rys. 3) zaobserwowano wzrost przemieszczenia o niemal 40%. W projektowaniu konstrukcji na palach poddanych obciążeniom poziomym wielokrotnie zmiennym metoda normowa nie może być zatem stosowana.

Próbné obciążenia dla wielu cykli obciążenia, aż do osiągnięcia zbieżności przemieszczeń, są wówczas najdokładniejszą metodą sprawdzenia warunków stanu granicznego użytkowalności.

LITERATURA

- [1] PN-83/B-02482 Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych
- [2] PN-EN 1997-1: 2008 Eurokod 7 Projektowanie geotechniczne. Część 1. Zasady ogólne
- [3] *Ashour M., Pilling P., Norris G.*: Lateral Behavior of Pile Groups in Layered Soils. *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.* Volume 130, Issue 6, June 2004, pp. 580–592
- [4] *Broms B.B.*: Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils. *Journ. of Soil Mech. and Foundation Eng. Division, ASCE*, vol. 90, SM2, 1964, pp. 27–63
- [5] *Broms B.B.*: Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils. *Journ. of Soil Mech. and Foundation Eng. Division, ASCE*, vol. 90, SM3, 1964, pp. 123–156
- [6] *Fan Chia-Cheng, Long J.H.*: Assessment of Existing Methods for Predicting Soil Response of Laterally Loaded Piles in Sand. *Computers and Geotechnics*, 32, 2005, pp. 274–289
- [7] *Hetenyi M.*: *Beams on Elastic Foundations*. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1946
- [8] *Jamiołkowski M., Garassino A.*: Soil Modulus for Laterally Loaded Piles. *Proceedings of the 9th international conference soil mechanics and foundation engineering. Speciality session 10*, Tokyo, 1977
- [9] *Jianye Ching, Jie-Ru Chen*: Predicting Displacement of Augered Cast-in-place Piles Based on Load Test Database. *Structural Safety* 32, 2010, pp. 372–383
- [10] *Jong-Sub Lee, Yung-Ho Park*: Equivalent Pile Load-head Settlement Curve Using a Bi-directional Pile Load Test. *Computers and Geotechnics* 35, 2008, pp. 124–133
- [11] *Reese L.C., Van Impe W.F.*: *Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading*. A.A. Balkema Rotterdam Brookfield, 2001
- [12] *Rybak J.*: *Badania pali. Prefabrykacja w mostownictwie*. Seminarium Wrocławskie Dni Mostowe, 23–24 listopada 2010. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2010, s. 213–220
- [13] *Terzaghi K.*: Evaluation of Coefficients of Subgrade Modulus. *Geotechnique*, V, 1955, pp. 297–326