

Prof. dr hab.inż. Zygmunt MEYER  
Politechnika Szczecińska, Katedra Geotechniki  
Dr inż. Mariusz KOWALÓW, *adres e-mail* [m.kowalow@gco-consult.com](mailto:m.kowalow@gco-consult.com)  
Geotechnical Consulting Office Szczecin

## WYKORZYSTANIE TESTU OSTERBERGA DO STATYCZNYCH OBCIĄŻEŃ PRÓBNYCH PALI

### OSTERBERG LOAD METHOD USED FOR STATIC TEST PILE

**Streszczenie** W pracy przedstawiono statyczne próbne obciążenia pali o dużym udźwigu (rzędu kilku do kilkunastu tysięcy ton). Test Osterberga pozwala na dokładne określenie nośności poboczniczy pala, podstawy pala oraz sporządzenie wykresu obciążenie w głowicy-osiadanie. Z badań Osterberga wynika, że dla danego pala poddawanego testom w gruncie stosunek udźwigu poboczniczy i podstawy jest stały. Metoda pozwala na projektowanie pali o właściwej do potrzebego udźwigu długości i średnicy.

**Abstract** The paper present statistic test load for piles using Osterberg method. The method allows to estimate skin resistance, toe resistance and the top load – settlement curve. Based upon tests it is possible to design piles a different length by comparison to that one applied for tests.

### 1. Wstęp

Posadowienie na palach obiektów inżynierskich jest szeroko stosowane w praktyce. W ostatnich latach posadowienie na palach jest również wykorzystywane przy posadowieniu obiektów wysokich. Przykładem tego może być wysoki obiekt wznoszony w Sofii „Europe Tower”. Wieża ta ma mieć wysokość ok. 180 m, a posadowienie przewidziano na płycie żelbetowej, która spoczywa na palach o dużej nośności. Precyzyjne określenie udźwigu pali o dużej nośności, w szczególności określenie zależności obciążenie w głowicy - osiadanie pala w tak odpowiedzialnych konstrukcjach jest problemem. Szczególnie wtedy, kiedy 80÷90% nośności pala wynika z tarcia o pobocznicę. Obliczeniowa nośność pali to 2500 ton (25MN).

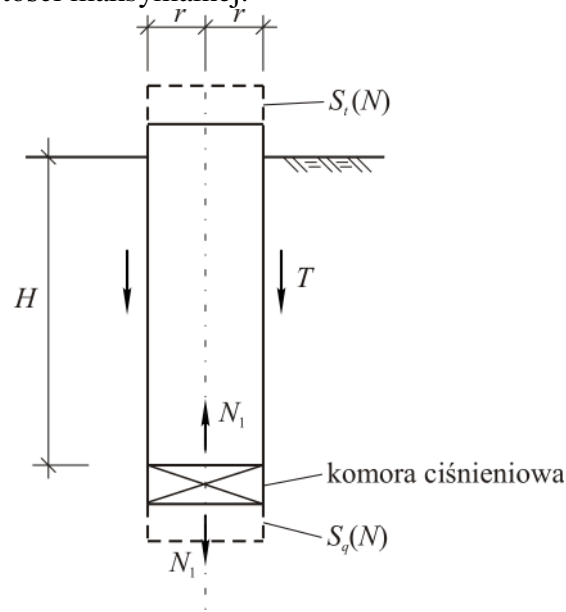
Projekt przewiduje wykonanie pali o średnicy ok.135 cm i długości ok. 50 m, tak aby pale spoczywały w warstwie nośnej na długości od 36÷40m. Warstwę nośną stanowią ility mioceńskie bardzo zwarte o następujących parametrach: kat tarcia wewnętrznego  $\phi=30^\circ$ , kohezja  $c=55 \text{ kPa}$  oraz moduł ścisłości  $E=80 \text{ MPa}$ .

Z uwagi na charakter konstrukcji, wrażliwość na nierównomierne osiadanie postanowiono przeprowadzić próbne statyczne obciążenia pala przy wykorzystaniu testu Osterberga [2].

### 2. Test Osterberga

Statyczne próbne obciążenia pali w postaci testu Osterberga polegają na zamontowaniu w palu komory ciśnieniowej. Komora ta sprawia, że siła w komorze powoduje przesunięcie górnej części pala w górę, zaś dolnej części pala w dół. Podstawowy przypadek to

zamontowanie komory w podstawie pała (rys.1). Siła wywołana w komorze ciśnieniowej zmienia się od zera do wartości maksymalnej.



Rys. 1. Schemat obciążenia pała komorą ciśnieniową w podstawie

Formalnie związki pomiędzy siłą w komorze  $N$ , a przemieszczeniem w górę i w dół wywołanym tymi siłami można otrzymać obliczając przemieszczenia dolnej krawędzi podstawy pała wykorzystując znane w literaturze Wiłun[1] wzory Bousinesqa. Mamy

$$S_q = \alpha_q \cdot \frac{N_1}{\pi r E} \quad (1)$$

$$S_t = \alpha_t \cdot 7,5 \cdot \frac{T}{\pi H E} \quad (2)$$

Parametry  $\alpha_q$  oraz  $\alpha_t$  są stałymi dla danego rodzaju gruntu oraz rodzaju powierzchni zewnętrznej pała. Można je ustalić w trakcie testu Osterberga [2]. Podczas testu Osterberga zarówno siły  $N_1$ , jak również  $T$  są równe sile generowanej w komorze ciśnieniowej  $N$ . Można zatem napisać, że stosunek osiadań jest równy:

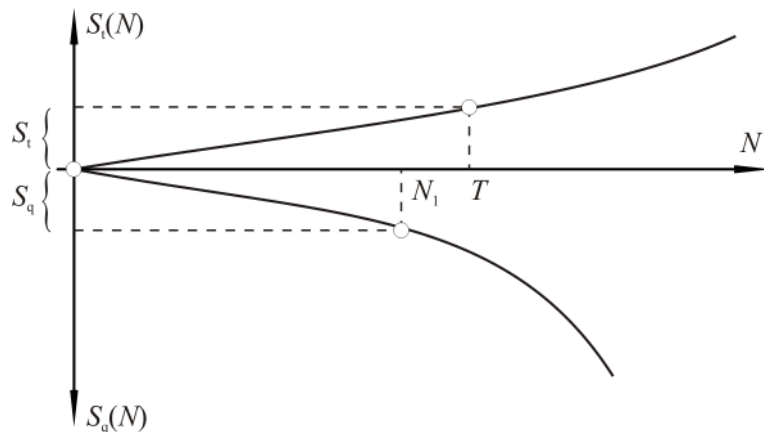
$$\frac{S_q}{S_t} = \frac{\alpha_q}{\alpha_t} \cdot \frac{H}{7,5r} \quad (3)$$

W klasycznym teście Osterberga rezultatem badań są związki  $S_t = f(N)$  oraz  $S_q = f(N)$ . Dla obszaru, gdzie ma zastosowanie liniowa teoria obciążenie-osiadanie otrzymujemy w tym teście zależności:

$$S_t = B_t \cdot N \quad \text{oraz} \quad (4)$$

$$S_q = B_q \cdot N \quad (5)$$

Przykładowo wykresy  $S_t(N)$  oraz  $S_q(N)$  pokazano na rys. 2



Rys. 2. Wykresy obciążenie- przemieszczenia pala podczas testu

Zwykle w praktyce analizę pracy pala ograniczamy do części, gdzie związki osiadanie-obciążenie są liniowe. Jakkolwiek istnieją możliwości ekstrapolacji hiperbolicznej w celu ustalenia granicznych wielkości  $N$  dla  $S_t$  oraz  $S_q$ . Łącznie nośność pala obciążonego w głowicy oblicza się porównując osiadanie Osterberg [2]. Mamy:

$$S_t = S_q \quad \text{oraz zakładając udźwig pala} \quad U = N_1 + T \quad (6)$$

wówczas otrzymamy poniższe związki

$$N_1 = U \frac{1}{1 + \frac{B_q}{B_t}}, \quad T = U \frac{\frac{B_q}{B_t}}{1 + \frac{B_q}{B_t}} \quad (7)$$

ponadto można otrzymać stosowną krzywą osiadanie-obciążenie, która wynika ze wzoru (6) rys. 2. Na podstawie zależności (3) oraz (7) możemy otrzymać związek, który ma znaczenie przy zmianie długości pala podczas projektowania posadowienia na podstawie opisywanego testu:

$$\frac{B_q}{B_t} = \frac{H}{7,5r} \cdot \frac{\alpha_q}{\alpha_t} \quad \text{oraz} \quad \frac{\alpha_q}{\alpha_t} = \frac{7,5r}{H} \cdot \frac{B_q}{B_t} = const \quad (8)$$

Ponadto mamy:

$$\frac{T}{N_1} = \frac{B_q}{B_t} \quad (9)$$

oraz pala w postaci

$$S = U \cdot \frac{B_q}{1 + \frac{B_q}{B_t}} \quad (10)$$

Wzór (8) pozwala obliczyć nową wartość  $B_t^{(1)}$  dla pała o długości  $H_1$  innej niż pała testowego ( $H \neq H_1$ ). Przy skróceniu pała w stosunku do długości testowej parametr  $B_q$  nie zmienia się.

### 3. Przykład obliczeniowy

Dla warunków posadowienia Europe Tower w Sofii, w trakcie testów utworzono zależności siła  $N$  w komorze oraz przemieszczenie, które dla części liniowych związków mają przykładowo postać:  $B_q = 1^{mm} / MN$  oraz  $B_t = 0,2^{mm} / MN$  i wtedy  $\frac{B_q}{B_t} = 5$  i następnie

$$S = \frac{U}{6} \left[ \frac{mm}{MN} \right] \quad \text{oraz} \quad \frac{T}{U} = \frac{5}{6}; \quad \frac{N_1}{U} = \frac{1}{6}.$$

Dla projektowanego obciążenia np.  $U = 25MN$  otrzymamy  $S = 4,1mm$ . Dla przyjętych pali widać, że osiadanie jest bardzo małe i układ może być zbyt sztywny. Dlatego można skrócić pale z pierwotnej długości np.  $H = 36m$  w warstwie nośnej do np.  $H_1 = 20m$  nie zmieniając średnicy. Zależności stosunku  $B_q^{(1)}$  do  $B_t^{(1)}$  otrzymamy ze wzoru (8):

$$\frac{B_q^{(1)}}{B_t^{(1)}} = \frac{B_q}{B_t} \cdot \frac{H_1}{H} \quad (11)$$

i wtedy

$$N_1^{(1)} = U^{(1)} \frac{1}{1 + \frac{B_q^{(1)}}{B_t^{(1)}}}; \quad T^{(1)} = U^{(1)} \cdot \frac{\frac{B_q^{(1)}}{B_t^{(1)}}}{1 + \frac{B_q^{(1)}}{B_t^{(1)}}} \quad (12)$$

W rozpatrywanym przykładzie obliczeniowym po podstawieniu otrzymamy:  $B_q^{(1)} / B_t^{(1)} = 2,78$  oraz  $N_1 = 0,26 \cdot U^{(1)}$  a następnie  $T^{(1)} = 0,74 \cdot U^{(1)}$ . Oznacza to, że zmniejszyła się nośność poboczniczy z 83% do 74%. Wiąże się to ze wzrostem osiadania pała. Można wykazać, ze wzoru (1), że osiadanie to wyniesie:

$$S^{(1)} = S \cdot \frac{N_1^{(1)}}{N_1} = B_q \cdot N_1^{(1)} \quad (13)$$

Jak już napisano wcześniej przy zmianie długości pała w stosunku do pała testowego parametr  $B_q$  nie zmienia się. Dlatego po podstawieniu otrzymamy:

$$S_1 = N_1^{(1)} \cdot 10 \frac{mm}{MN} = 0,26 \cdot U^{(1)} \left[ \frac{mm}{MN} \right] \quad (14)$$

Przyjmując tak jak poprzednio  $U^{(1)} = 25MN$  otrzymamy w tym przypadku osiadanie pojedynczego pała  $S^{(1)} = 7,0mm$ .

Znając moduł ścisłości gruntu, wielkości geometryczne pała oraz siłę na poboczniczy i w podstawie można obliczyć stałe  $\alpha_q$  oraz  $\alpha_t$ . Otrzymamy ze wzoru (1)

$$\alpha_q = B_q \cdot \pi r E \quad (15)$$

a następnie ze wzoru (8)

$$\alpha_t = \alpha_q \frac{H}{7,5r} \cdot \frac{B_t}{B_q} \quad (16)$$

Po podstawieniu otrzymamy:  $\alpha_q = 0,18$  ;  $\alpha_t = 0,25$  . Są to stałe charakteryzujące współpracę pał – grunt. Podkreślić należy, że wielkości  $\alpha_q$  oraz  $\alpha_t$  pozostają takie same przy zmianie długości pała i reprezentują wzajemne oddziaływanie w rozpatrywanym przypadku gruntu i pała.

#### 4. Wnioski

1. W pracy przedstawiono podstawowe zasady prowadzenia testu Osterberga oraz opis matematyczny związków obciążenie-osiadanie, które zachodzą w tym teście.
2. Test Osterberga pozwala na bardzo dokładne ustalenie zależności obciążenie pała w głowicy oraz osiadanie.
3. Stosownie do przyłożonego w głowicy pała obciążenia otrzymujemy opór poboczniczy i opór podstawowy pała. Badania na podstawie tych testów wskazują, iż stosunek tych oporów dla zadanego pała jest stały. Opór poboczniczy i podstawy pała rośnie proporcjonalnie w miarę jak rośnie obciążenie pała w głowicy.
4. Wyniki testów pozwalają na projektowanie w oparciu o pomierzone wielkości również pałi o innych długościach (i średnicach), ale pracujących w takim samym gruncie. Dla pałi krótszych otrzymujemy wtedy większe osiadania.
5. Przedstawione tu podstawowe zasady prowadzenia testów Osterberga i ich interpretacja nie wyczerpują wszystkich możliwości tej metody. Często np. stosuje się komorę ciśnieniową umieszczoną poniżej połowy długości pała, po to aby zmniejszyć nacisk na podstawę i zbliżyć do siebie moment utraty stateczności na poboczniczy i w podstawie.
6. Praktyczne przeprowadzenie testów wymaga uwzględnienia również innych elementów osiadania pała np. przemieszczenie się poziomych ścian komory ciśnieniowej względem powierzchni terenu. Pozwala to m.in. na uwzględnienie skrócenia długości pała żelbetowego przy dużej sile osiowej. Może ono wynosić nawet 8 mm.
7. Na podkreślenie zasługuje również fakt, iż metoda ta pozwala na wyznaczenie stałych  $\alpha_t$  oraz  $\alpha_q$  , które mają odniesienie do fizycznego opisu procesu.
8. Program dalszych badań przewiduje m.in. analizę testu statycznego Osterberga dla pałi, kiedy komora ciśnieniowa umieszczona jest powyżej podstawy.

#### Oznaczenia

$B_q$  - stała opisująca przemieszczenie podstawy pała w dół,

$B_t$  - stała opisująca przemieszczenie głowicy pała w górę,

$B_q^{(1)}$  ,  $B_t^{(1)}$  - stałe dla pała o skróconej długości,

$E$  - moduł ściśliwości gruntu,

$H$  - długość pała na jakiej znajduje się on w warstwie nośnej,

$N$  - siła generowana w komorze ciśnieniowej,

$N_1$  - nacisk podstawy pala na grunt,  
 $r$  - promień pala,  
 $S_q$  - osiadanie podstawy pala,  
 $S_t$  - przemieszczenie głowicy pala,  
 $T$  - opór poboczniczy pala,  
 $U$  - obciążenie pionowe przyłożone w głowicy pala,  
 $\alpha_q, \alpha_t$  - stałe we wzorze na osiadanie

Uwaga: indeks (1) górny oznacza odpowiednie wielkości dla pala o skróconej długości

### **Literatura**

1. Wiłun Z.: Zarys geotechniki, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1976.
2. Osterberg J.O.: Recent Advances in Load Testing Driven Piles and Drilled Shafts Using Osterberg Load Cell Method, American Society of Civil Engineers, Chicago, 1994.
3. Schmertmann, John and Hayes, John: The Osterberg Cell and Bored Pile Testing – A Symbiosis, Proceedings at the Third Annual Geotechnical Engineering Conference, Cairo University, Cairo –Egypt, 1997.