

Model krzywej aproksymującej wyniki testów statycznych pali

prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Geotechniki

dr inż. Mariusz Kowalów

Geotechnical Consulting Office, Sp. z o.o. Szczecin

WSTĘP

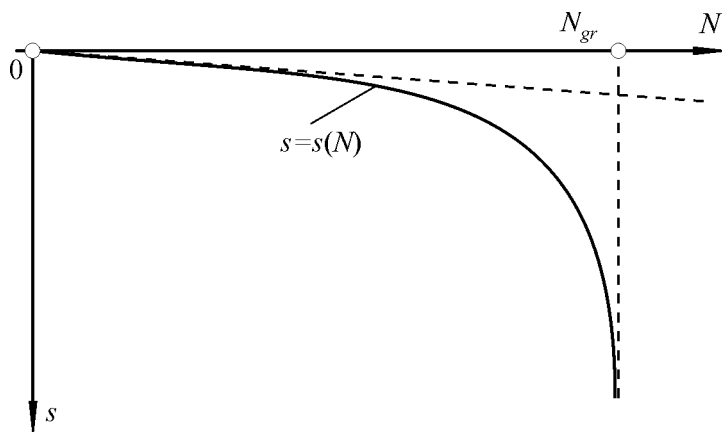
Gwałtowny rozwój budownictwa powoduje coraz szersze wykorzystanie posadowienia na palach. Jest to spowodowane faktem, że pod budownictwo wykorzystuje się coraz częściej grunty słabe oraz drugim powodem jest wznoszenie coraz wyższych obiektów. Praktyka inżynierska wskazuje, że najbardziej wiarygodną ocenę nośności pali dają próbne obciążenia [1,2,3,6,7,8,11,12,13,14]. Obowiązek próbnych obciążeń wynika również z Normy [15]. Zwykle podczas próbnych obciążeń pali staramy się tak obciążyć pal, aby określić jego nośność. Często jednak jesteśmy zainteresowani obciążeniem granicznym pala bowiem ono wyznacza margines bezpieczeństwa [4,5,6,7,9,10,11,12,13,14].

Podczas próbnych obciążeń często nie osiągamy stanu granicznego. Wynika to z niezbędnych obciążeń jakie należałoby przyłożyć w głowicy pala (rzędu kilkunastu lub nawet kilkudziesięciu MN). Przykładem może być budowa Europa Tower w Sofii. Wieża o wysokości prawie 200 m posadowiona jest na palach o długości ponad 60 m.

Jedną z metod oszacowanie obciążeń granicznych na podstawie próbnych obciążeń jest aproksymacja uzyskanych wyników do wybranej krzywej i statystyczne określenie parametrów tej krzywej. W literaturze [4, 5] zwykle przybliżenie to nazywane jest aproksymacją hiperboliczną. Wybór krzywej często wynika z analizy przebiegu zjawiska próbne obciążenie-osiadanie pala. Niezależnie od wyboru krzywej, aproksymacja statystyczna jej parametrów oznacza, że wynikają one ze zbioru danych nie zaś z oceny fizycznych cech ośrodka. Oznacza to dalej, że uzyskane obciążenie graniczne spełnia równanie przyjętej krzywej oraz zasadę minimum sumy kwadratów i odchyłek. Jakkolwiek pewna interpretacja fizyczna otrzymanych wyników jest również możliwa.

ANALIZA ZJAWISKA

W wyniku próbnych obciążeń pala (test statyczny) uzyskujemy zbiór wartości: osiadanie-obciążenie $\{S_i, N_i\}$. Schematycznie wykres taki pokazano na rys. 1.



Rys. 1 Schemat krzywej osiadania dla próbnych obciążeń

Poszukiwana krzywa zgodnie z rys. 1 powinna posiadać dwie główne cechy

- dla $N \rightarrow 0$ krzywa $S(N)$ dąży do linii prostej (stycznej)

$$S = \text{const} \cdot N \quad \text{oraz} \quad (1)$$
- dla $N \rightarrow N_{gr}$ osiadanie S powinno dążyć do nieskończoności.

Jest to asymptota pionowa

$$\lim_{N \rightarrow N_{gr}} S(N) = \infty \quad (2)$$

Formalnie krzywa o tych cechach nie jest hiperbolą ponieważ posiada jedną asymptotę $N \rightarrow N_{gr}$. Druga linia jest styczną do krzywej w punkcie $N = 0$. Niezależnie od tego określenie aproksymacja hiperboliczna funkcjonuje w literaturze.

W niniejszej pracy proponuje się, aby funkcja aproksymująca taki przebieg osiadania miała postać:

$$S = A \cdot \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{N}{N_{gr}}\right)^\kappa} - 1 \right] \quad (3)$$

Można sprawdzić, że gdy $N < N_{gr}$ oraz gdy $N \rightarrow N_{gr}$ otrzymujemy asymptotę pionową $N = N_{gr}$. Funkcja (3) spełnia również warunek (1). Dla małych wartości N mamy:

$$S = A \frac{\kappa}{N_{gr}} \cdot N \quad (4)$$

stała występująca we wzorze (1) jest równa

$$\text{const} = A \cdot \frac{\kappa}{N_{gr}} \quad (5)$$

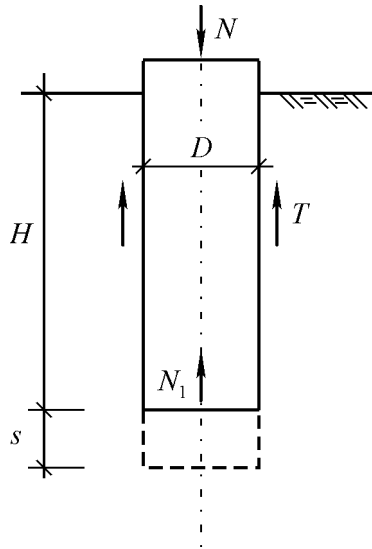
Analizę krzywej: obciążenie – osiadanie, uzyskiwaną w testach statycznych można również przeprowadzić wykorzystując relacje jakie wynikają z przyjęcia liniowej teorii sprężystości dla ośrodka gruntowego [10]. Otrzymamy:

$$S_i = \alpha_i \cdot \frac{\tau}{E} \cdot 2 \cdot (1 + \nu) \cdot 3D \quad (6)$$

$$S_q = \alpha_q \cdot \frac{N_1}{\pi ED} \quad \text{gdzie} \quad (7)$$

$$\alpha_i \cong 0,8 \div 1,2 \quad ; \quad \alpha_q = 0,5 \div 1,0$$

Parametry te określa się na drodze badań eksperymentalnych i reprezentują one sposób współpracy pała z gruntem oraz lokalne własności ośrodka.



Rys. 2 Schemat obciążenia pala

Jeżeli założymy, że na pobocznicy nie występuje poślizg $\tau < \tau_{max}$ to otrzymamy:

$$S_t = S_q = S \quad (8)$$

Ponadto równaniem zamykającym jest równanie równowagi sił

$$N = N_1 + T \quad (9)$$

Na podstawie równań(6,7,8,9) otrzymamy:

$$S = \frac{N}{\pi ED \cdot \left[\frac{1}{\alpha_q} + \frac{1}{\alpha_t} \cdot \frac{H}{6 \cdot D(1+\nu)} \right]} \quad (10)$$

oraz następnie

$$N_1 = \frac{1}{\alpha_q} \cdot \pi ED \cdot S \quad (11)$$

$$T = \frac{1}{\alpha_t} \cdot \pi ED \cdot S \cdot \frac{H}{6 \cdot D(1+\nu)} \quad (12)$$

Z zależności (10) widać, że w zakresie liniowej teorii sprężystości związek $S = S(N)$ jest związkiem liniowym. Związek ten określa styczną do krzywej osiadania na rys. 1, w punkcie $N = 0$.

Powyższe równania pozwalają na przeanalizowanie dwóch przypadków:

- na pobocznicy po osiągnięciu naprężeń $\tau = \tau_{max}$ następuje poślizg oraz drugi przypadek gdy,
- w podstawie po przekroczeniu $\sigma = \sigma_{max}$ następuje przemieszczenie bez zwiększania obciążenia.

W przypadku pierwszym zakładamy, że $N = N_{max}$ jest znane i wówczas osiadanie S , które ten stan wywołuje wyniesie

$$S(\tau_{max}) = \alpha_t \cdot \frac{\tau_{max}}{E} \cdot 2(1+\nu) \cdot 3D \quad (13)$$

Stan taki odpowiada sile przyłożonej w głowicy N_{max}

$$N_{max} = f(\tau_{max}) = S(\tau_{max}) \cdot \pi ED \cdot \left[\frac{1}{\alpha_q} + \frac{1}{\alpha_t} \cdot \frac{H}{6 \cdot D(1+\nu)} \right] \quad (14)$$

Dla $N > N_{max}$ równanie równowagi sił (9) będzie miało postać:

$$N = N_1 + \pi DH \cdot \tau_{max} \quad (15)$$

Po podstawieniu stosownych wielkości z równania (11) otrzymamy

$$S = \alpha_q \cdot \frac{N - \pi DH \cdot \tau_{max}}{\pi ED} \quad (16)$$

Stan taki może trwać aż do przekroczenia stanu granicznego w podstawie pała, gdy naprężenia osiągną $\sigma = \sigma_{max}$. Wystąpi to w momencie gdy

$$N_1 = \frac{1}{4} \pi D^2 \cdot \sigma_{max} \quad (17)$$

a stąd

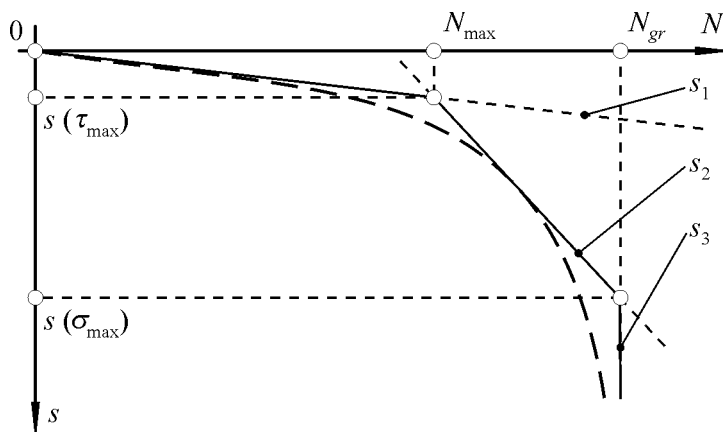
$$S(\sigma_{max}) = \frac{\alpha_q}{4} \cdot \frac{\sigma_{max}}{E} \cdot D \quad (18)$$

Ponadto ze wzoru (15) otrzymamy

$$N(\sigma_{max}) = \frac{1}{4} \pi D^2 \cdot \sigma_{max} + \pi DH \cdot \tau_{max} \quad (19)$$

Nacisk w głowicy pała przedstawiony wzorem (19) możemy uważać za maksymalną siłę przy której grunt się przeciwstawia osiadaniu czyli N_{gr} .

Schematycznie analizę tę przedstawiono na rys. 3



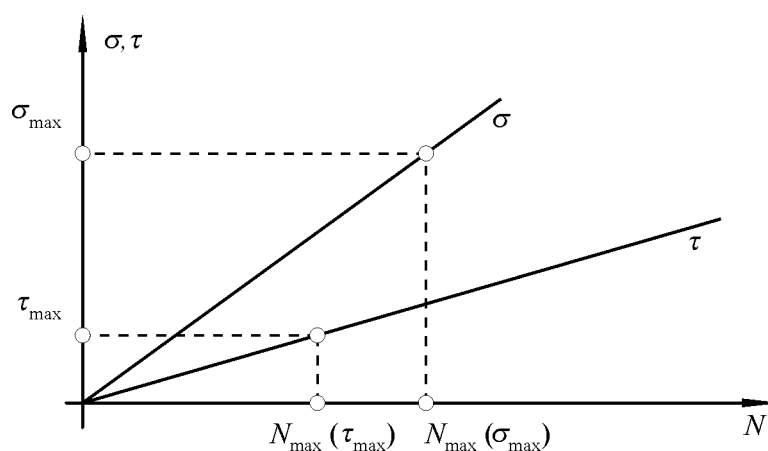
Rys. 3 Schemat zmian osiadania $S(N)$ po przekroczeniu naprężeń maksymalnych

Na rys. 3 pokazano dwie krzywe osiadania S_1 , kiedy osiadanie odbywa się zgodnie ze wzorem (10) oraz krzywą S_2 , kiedy osiadanie odbywa się zgodnie ze wzorem (16). Pomierzoną w trakcie próbnych obciążeń pała krzywą, narysowano linią przerywaną natomiast asymptotę pionową zaznaczono symbolem S_3 .

Krzywa pomierzona zatem jest styczna w punkcie $N=0$ do prostej S oraz do asymptoty $N = N_{gr}$. Proponowana w opracowaniu krzywa aproksymująca (3) wypełnia pokazany na rys. 3 przebieg.

Jeżeli przyjąć, że utrata nośności pała w pierwszej kolejności następuje w wyniku przekroczenia naprężeń w podstawie wówczas wykres pokazany na rys. 3 nie zmienia się, a jedynie zamieniają się miejscami osiadania zaznaczone na osi rzędnych $S(\tau_{max})$ oraz $S(\sigma_{max})$.

Dla przypadku tego można również otrzymać stosowne zależności korzystając ze wzorów (9, 10, 11, 12). Elementy składające się na utratę nośności pała pokazano schematycznie na rys. 4.



Rys. 4 Schemat zmiany naprężeń na pobocznicy i w podstawie podczas obciążania pała

Na rys. 4 pokazano, że w miarę wzrostu obciążenia pała w głowicy, najpierw naprężenia na pobocznicy osiągają τ_{max} , a następnie w podstawie pała osiąga σ_{max} . Możliwy jest też przypadek odwrotny, kiedy przekroczenie naprężeń najpierw nastąpi w podstawie pała, a następnie na pobocznicy. Zależy to od właściwości gruntu oraz wymiarów pała.

ESTYMACJA PARAMETRÓW KRZYWEJ APROKSYMUJĄCEJ

Obliczenie parametrów krzywej przybliżającej wyniki próbnych obciążeń pała przeprowadzono metodą najmniejszej sumy kwadratów odchyłek. Celem obliczeń jest głównie uzyskanie najbardziej prawdopodobnej wartości N_{gr} . Zakładamy, że z pomiarów mamy zbiór wartości $\{S_i; N_i\}$ osiadanie-obciążenie. Zgodnie z zależnością (3) równanie warunkowe ma postać

$$S(N_i) = A \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{N_i}{N_{gr}}\right)^k} - 1 \right] \quad (20)$$

Warunek minimum sumy kwadratów wyraża zależność

$$\sum [S_i - S(N_i)]^2 = \delta^2 = \min \quad (21)$$

Z równania (21) należy obliczyć trzy parametry: A, N_{gr} oraz κ . Ilość parametrów można zmniejszyć, gdy podstawimy

$$X_i = \frac{1}{\left(1 - \frac{N_i}{N_{gr}}\right)^\kappa} - 1 \quad (22)$$

wtedy otrzymamy

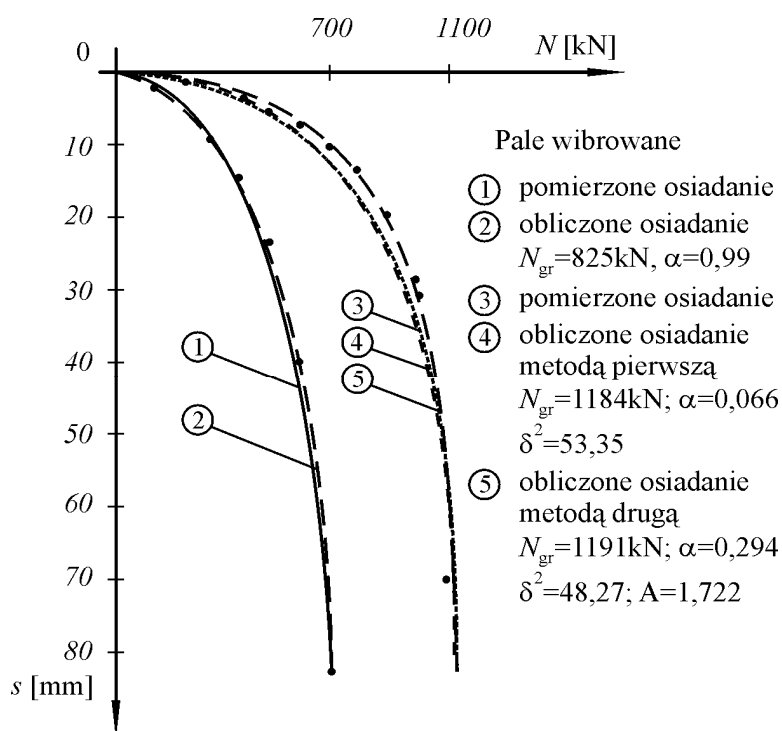
$$A = \frac{\sum (S_i \cdot X_i)}{\sum (X_i^2)} \quad (23)$$

oraz równanie (21) w postaci

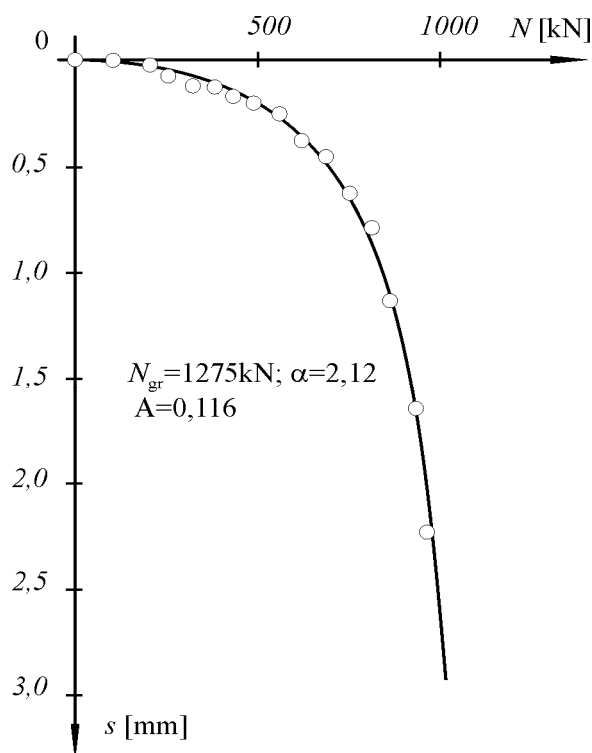
$$\sum \left[S_i - X_i \cdot \frac{\sum (S_i \cdot X_i)}{\sum (X_i^2)} \right]^2 = \delta^2 = \min \quad (24)$$

W równaniu (24) występują jedynie dwa parametry poszukiwane: N_{gr} oraz κ . Zadanie to można rozwiązać również metodami standardowymi [16]. W celu zilustrowania proponowanej metody aproksymującej wyniki pomiarów próbnego obciążania pali przedstawiono wyniki estymacji parametrów krzywej dla dwóch zbiorów:

- przypadek przedstawiony w literaturze [6] oraz wyniki próbnych obciążeń,
- dla przypadku wieży wznoszonej w Sofii (dane Autorów)



Rys. 5 Aproksymacja krzywej osiadania dla zbioru wartości podanych w literaturze [6]



Rys. 6 Aproxymacja krzywej osiadania podczas próbnych obciążeń wg danych Autorów [10]

WNIOSKI

1. Najbardziej wiarygodną metodą określania nośności pali są próbne obciążenia. Na podstawie próbnych obciążeń pala staramy się określić graniczne obciążenia pala. Jest to spowodowane potrzebą określenia obszaru bezpieczeństwa pracy pala. Jedną z metod określenia nośności granicznej jest tzw. „ekstrapolacja hiperboliczna”.
2. W opracowaniu przedstawiono krzywą przybliżającą wyniki pomiarów, która umożliwi obliczenie obciążeń granicznych pala metodami statystycznymi. Proponowana krzywa nie jest formalnie hiperbolą, ale spełnia warunki rozwiązania pacy pala.
3. W pracy przedstawiono również analizę elementów, które wpływają na nośność pala a które prowadzą do określenia obszaru przebiegu krzywej estymującej.

LITERATURA

1. Cichy L., Rybak J., Tkaczyński G.(2009): Badanie nośności pali prefabrykowanych. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, str. 30-32.
2. Cruz N., Pinto P., Viana de Fonseca A., Andrae R.(2008): Pile bearing capacity of the new bridge over Zambezi River (Mozambique). Predictions and performance of static load best results. 11th Baltic Sea Geotechnical Conference, Geotechnics in Maritime Engineering, Gdańsk, pp. 35-41.

3. Dundulis K., Žaržojus G.(2008): Ewaluation of the pile foundation bearing capacity. 11th Baltic Sea Geotechnical Conference, Geotechnics in Martime Engineering, Gdańsk, pp. 55-60.
4. England M.: (1992), Pile settlement behavior: an accurate model. Application of stress wave theory to piles. pp. 91-96, Rotterdam-Balkena.
5. Fleming W.G.K. (1992): A new method for single pile settlement prediction and analysis. Geotechnique 42, No.3, pp. 411-425.
6. Gwizdała K., Kowalski J.R.: (2005): Prefabrykowane pale wbijane, Wyd. Politechniki Gdańskiej.
7. Gwizdała K., Tejchman A., Blockus M.: (2005): Kontrolne badania dynamiczne pali prefabrykowanych w czasie ich wykonawstwa. XXII Konferencja Naukowo-Techniczne Awarie Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje.
8. Gwizdała K., Sętczniewski M., Dyka I.(2009): Wykorzystanie sondowań statycznych do obliczania nośności i osiadań pali. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, str. 62-68.
9. Krasieński A., Cudny M. (2008): The improvement of axial bearing capacity of open end pipe piles. 11th Baltic Sea Geotechnical Conference, Geotechnics in Martime Engineering, Gdańsk, pp. 511-518.
10. Meyer Z., Kowalów M. (2009) : Wykorzystanie testu Osterberga do statycznych obciążeń próbnych pali . XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje.
11. Pieczyrak J., Bzówka J. (2009): Próbne obciążenie pali badanych w dużym zakresie obciążenia. Konferencja „Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoży ekspansywnych”, Bydgoszcz.
12. Rogowski R., Franczak P.(2009): Zastosowanie pali FDP w budownictwie mostowym. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, str. 54-57.
13. Rychlewski P. (2009): Badanie pali testowych. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, str. 72-74.
14. Tumosa K., Stragys V. (2008): Test results of bored piles. 11th Baltic Sea Geotechnical Conference, Geotechnics in Martime Engineering, Gdańsk, pp. 99-105.
15. Norma Palowa PN-B-02482/1983
16. Statystyka [pakiet programowy]