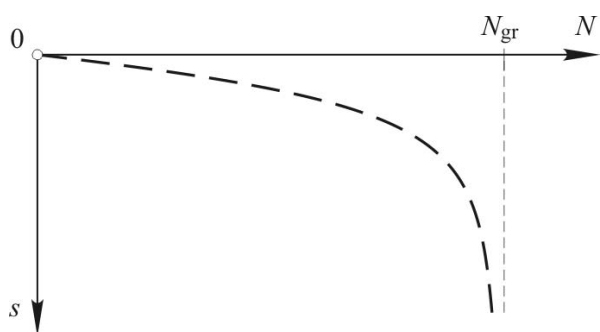


Przybliżony sposób interpretacji wyników badań statycznych pali

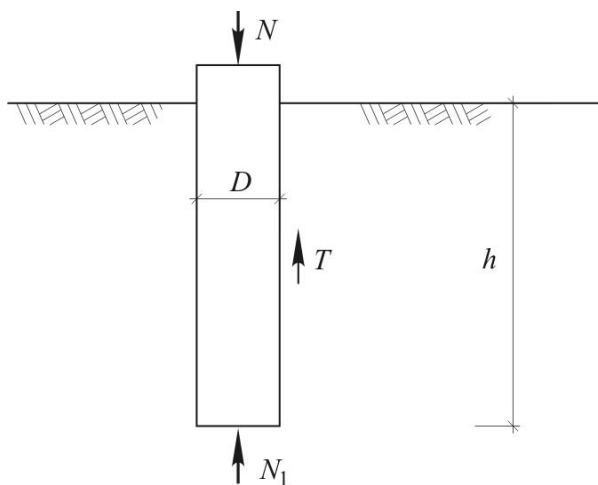
Prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer

Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury

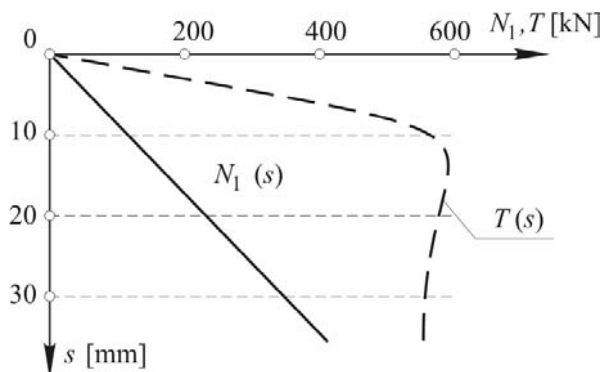
Interpretacja wyników badań statycznych pola jest ciągle przedmiotem badań [3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13]. Podstawowe wydaje się pytanie, czy interpretacja taka poprzez ekstrapolację znajduje uzasadnienie w opisie pracy pala? Czy na podstawie ograniczonych obciążeń, np. w zakresie $0,4 N_{gr}$, można wnioskować o granicznej nośności pala? Czy informacje zawarte w pierwszej fazie obciążania są wystarczające do ustalenia nośności granicznej? Za nośność graniczną N_{gr} przyjęto w pracy pionową asymptotę, do której dąży krzywa obciążenie – osiadanie (rys. 1).



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie krzywej Q-s



Rys. 2. Schemat obciążenia pala w gruncie



Rys. 3. Mobilizacja oporu na pobocznicy pala oraz w podstawie

Aktualnie przyłożona w głowicy pala siła N jest równoważona przez odpór podstawy N_1 oraz opór pobocznicy T . Schematycznie siły te przedstawiono na rys. 2.

Wraz z osiadaniem wymuszonym przez obciążenie w głowicy rośnie odpór podstawy pala oraz opór na pobocznicy. Mobilizacja składowych naprężeń na pobocznicy pala następuje szybciej niż mobilizacja naprężeń pod podstawą pala. Na rys. 3 pokazano jak w praktycznych przypadkach badań statycznych kształtują się odpór w podstawie i opór pobocznicy.

Z rys. 3 wynika, że bardzo często w badaniach statycznych osiągamy maksimum reakcji pobocznicy pala. Opór ten po przekroczeniu punktu ekstremalnego nieznacznie maleje i pozostaje stały. Są zatem powody, aby twierdzić, że jeden z elementów – maksymalny opór pobocznicy może być określony w badaniach statycznych. Drugi z elementów, to maksymalny odpór podstawy pala. Wielu autorów podziela pogląd, że za N_{lmax} możemy przyjąć iloczyn powierzchni podstawy oraz naprężenia q_c z sondowania statycznego [6]. Biorąc ten fakt za podstawę, Autor przyjął do opisu tego zjawiska krzywą proponowaną przez Meyera-Kowalowa [7].

MATEMATYCZNE PODSTAWY INTERPRETACJI

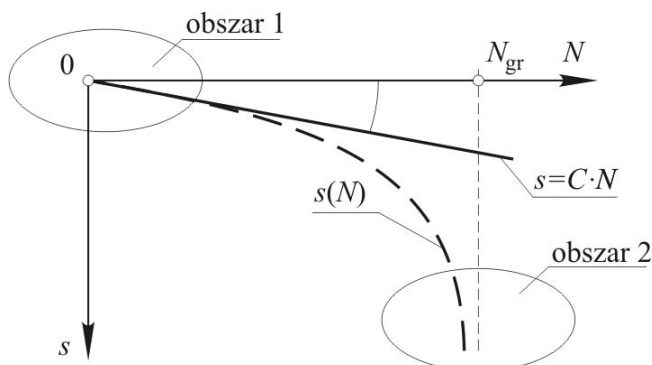
Za podstawę opisu Autor przyjął krzywą Meyera-Kowalowa [7], nazywając ją w skrócie krzywą MK, która przyjmuje postać:

$$s = C \cdot N_{gr} \cdot \frac{\left(1 - \frac{N}{N_{gr}}\right)^{-\kappa} - 1}{\kappa} \quad (1)$$

Zakładamy, że na podstawie badania statycznego uzyskujemy zbiór $\{s_i, N_i\}$. Formalnie krzywa ma trzy parametry: C , κ oraz N_{gr} . Schematycznie krzywą pokazano na rys. 4.

Obliczenie stałej C można przeprowadzić w odniesieniu do punktów dla małych obciążeń. Stąd:

$$\lim_{N \rightarrow 0} s(N) = C \cdot N \quad (2)$$



Rys. 4. Wykres krzywej $s = s(N)$

i jest to równanie prostej, z której metodą najmniejszych odchyłek otrzymamy C , wykorzystując pierwsze punkty krzywej. Można też posłużyć się równaniem kwadratowym:

$$s = C \cdot N + C_1 \cdot N^2 \quad (3)$$

lub krzywą wykładniczą:

$$s = C \cdot N \cdot C_1^N \quad (4)$$

Z każdej z tych aproksymacji przy wykorzystaniu metody najmniejszych kwadratów otrzymamy stałą C . Wielkości te obliczone różnymi metodami różnią się nieznacznie, dlatego można wykorzystać równanie (2). Pozostają zatem do wyznaczenia dwa pozostałe parametry κ oraz N_{gr} . Formalnie można je obliczyć również metodą najmniejszej sumy kwadratów odchyłek. Jest to zadanie pracochłonne i chociaż jest to metoda podstawowa, Autor podjął próbę, aby parametry te opisać bezpośrednimi wzorami analitycznymi. W poprzednim opracowaniu [9] Autor zaproponował, aby cały zbiór danych z badania statycznego $\{s_i; N_i\}$ podzielić na dwa obszary. Obszar 1 dla małych obciążeń wykorzystać do obliczenia stałej C (rys. 4), natomiast dane z obszaru 2 wykorzystać do określenia N_{gr} . W opracowaniu tym Autor zaproponował, by w praktycznych obliczeniach inżynierskich krzywą (1) zastąpić poniższą formułą:

$$\ln B = C_1(\kappa) + C_2(\kappa) \cdot \ln \left(\frac{N}{N_{gr}} \right) \quad (5)$$

gdzie:

$$B = \frac{s}{C \cdot N} \quad (6)$$

Koncepcja zastąpienia krzywej w równaniu (1) równaniem (5) opiera się na fakcie, że można ją przedstawić jako:

$$s = C \cdot N \cdot e^{C_1} \cdot \left(\frac{N}{N_{gr}} \right)^{C_2} \quad (7)$$

natomiast na podstawie zbioru wartości $\{s_i; N_i\}$ w obszarze 2 (rys. 4) można poprzez aproksymację, wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów, otrzymać krzywą rodzaju:

$$s = D_0 \cdot N^{D_1} \quad (8)$$

Po porównaniu stałych krzywych (7) i (8) otrzymuje się:

$$C_2 + 1 = D_1 \quad (9)$$

oraz równanie:

$$N_{gr} = k \cdot \left(\frac{C}{D_0} \right)^{\frac{1}{D_1-1}} \quad (10)$$

gdzie

$$k = A_2(\kappa) + 3,615 \cdot \left(\frac{N_{gr}}{1000} \right) \quad (11)$$

Analiza równań (7) i (8) wskazuje również na inny istotny związek:

$$D_1 - 1 = A_0(\kappa) \cdot \left(\frac{N_{gr}}{1000} \right)^{-A_1(\kappa)} \quad (12)$$

Parametry równań (10,11,12) po aproksymacji metodą najmniejszych kwadratów odchyłek przyjmują postać:

$$A_0(\kappa) = 1,1406 + 0,539 \cdot \kappa + 0,514 \cdot \kappa^2 \quad (13)$$

$$A_1(\kappa) = 1,5 + 0,178 \cdot \kappa \quad (14)$$

$$A_2(\kappa) = 1,4279 + 0,303 \cdot \kappa - 0,01685 \cdot \kappa^2 \quad (15)$$

Można teraz rozwiązanie zadania, to jest znalezienie κ oraz N_{gr} , przedstawić w postaci dwóch równań. Z równania (10) i (11) widać, że:

$$N_{gr} = \frac{A_2(\kappa)}{0,003615 - \left(\frac{D_0}{C} \right)^{\frac{1}{D_1-1}}} \quad (16)$$

a z równania (12):

$$N_{gr} = 1000 \cdot \left[\frac{D_1 - 1}{A_0(\kappa)} \right]^{\frac{-1}{A_1(\kappa)}} \quad (17)$$

Równanie (16) wygodnie jest przekształcić, wprowadzając parametr:

$$D_* = C \cdot 0,003615^{(D_1-1)} \quad (18)$$

wtedy otrzymuje się zależność:

$$N_{gr} = \frac{1000 \cdot A_2(\kappa) \cdot (D_1 - 1)}{3,615 \cdot \left(1 - \frac{D_0}{D_*} \right)} \quad (19)$$

Technika rozwiązania układu równań (16) i (19) wymaga przedstawienia ich w postaci logarytmicznej:

$$\ln \left[\frac{A_0(\kappa)^{A_1(\kappa)}}{A_2(\kappa)} \right] + A_1(\kappa) \cdot \ln \left[\frac{D_1 - 1}{3,615 \cdot \left(1 - \frac{D_0}{D_*} \right)} \right] + \ln(D_1 - 1) = 0 \quad (20)$$

Do dalszych obliczeń wygodnie jest przyjąć:

$$E_1 = \ln(D_1 - 1) \quad (21)$$

$$E_2 = \ln \left[\frac{D_1 - 1}{3,615 \cdot \left(1 - \frac{D_0}{D_*} \right)} \right] \quad (22)$$

Należy wykazać, że w celach praktycznych obliczeń inżynierskich można przyjąć:

$$\ln \left[\frac{A_0(\kappa)^{A_1(\kappa)}}{A_2(\kappa)} \right] = F(\kappa) \quad (23)$$

gdzie:

$$F(\kappa) = 0,054972 \cdot \kappa^2 - 0,48656 \cdot \kappa + 0,54235 \quad (24)$$

Ostatecznie rozwiązanie uzyskujemy z poniższego równania kwadratowego:

$$0,054972 \cdot \kappa^2 + \kappa [0,178 \cdot E_2 - 0,48656] + [0,54235 + E_1 + 1,5 \cdot E_2] = 0 \quad (25)$$

Przykład obliczeniowy

Sprawdzamy dokładność przybliżenia zadania krzywą s wzorem (5). Z wzoru (1) obliczamy s , dla N z badania statycznego, a następnie D_0 oraz D_1 przy założeniu, że $N_{gr} = 2500$ kN, $C = 0,001$ mm/kN oraz $\kappa = 2,0$. W wyniku obliczeń otrzymuje się $D_0 = 1,367 \cdot 10^{-5}$, $D_1 = 1,7341$. Obliczamy parametry rozwiązania: D_* z wzoru (18), E_1 z wzoru (21) oraz E_2 z wzoru (22).

Otrzymujemy: $D_* = 1,1612 \cdot 10^{-5}$, $E_1 = -0,30911$ oraz $E_2 = 0,28925$. Dla wartości tych z równania kwadratowego (25) otrzymuje się $\kappa = 2,08$. Następnie obliczamy N_{gr} z wzorów (17) i (19). Z wzoru (17) otrzymujemy $N_{gr} = 2651$ kN, natomiast z wzoru (19) otrzymuje się $N_{gr} = 2632$ kN. Z założenia powinno być $N_{gr} = 2500$ kN, co wskazuje na odchyłkę 6%.

Odchyłka ta wynika z aproksymacji przyjętych dla: $A_0(\kappa)$, $A_1(\kappa)$, $A_2(\kappa)$ oraz $F(\kappa)$. Uzyskanie większej dokładności wymagałoby założenia do aproksymacji tych funkcji w postaci wielomianów wyższego stopnia niż dwa, ale wówczas rozwiązania układów równań nastroczają duże kłopoty formalne.

METODY PRZYBLIŻONE

Do celów wstępnych obliczeń polegających na interpretacji wyników badań statycznych można przyjąć dalsze uproszczenie metody przedstawionej wcześniej. Równanie (10) można przedstawić w postaci przybliżonej:

$$N_{gr} = KN_{gr} \cdot \left(\frac{C}{D_0} \right)^{\frac{1}{D_1-1}} \quad (26)$$

wtedy z mniejszą dokładnością około 10 ÷ 15% można uzyskać aproksymację:

$$K(N_{gr}) = 2,268 \cdot \left(\frac{N_{gr}}{1000} \right)^{1,2422} \quad (27)$$

Pozwala to na uzyskanie równania opisującego N_{gr} jako:

$$N_{gr} = \left[2350 \cdot \left(\frac{D_0}{C} \right)^{\frac{1}{D_1-1}} \right]^{4,1288} \quad (28)$$

Można też K aproksymować funkcją liniową, wtedy otrzymuje się:

$$K = 3,545 \cdot \left(\frac{N_{gr}}{1000} \right) - 1,579 \quad (29)$$

i stąd

$$N_{gr} = \frac{1579}{3,545 - 1000 \cdot \left(\frac{D_0}{C} \right)^{\frac{1}{D_1-1}}} \quad (30)$$

W przypadku rozpatrywanego przykładu obliczeniowego otrzymuje się z wzoru (28) $N_{gr} = 2713$ kN, natomiast z wzoru (30) $N_{gr} = 2401$ kN.

W praktycznych obliczeniach inżynierskich problemem pozostaje dokładność pierwszej aproksymacji, która polega na obliczeniu wartości $\{s_i; N_i\}$ z obszaru (2) (rys. 3) parametrów podstawowych D_0 oraz D_1 . Są one obarczone błędem pomiarów, głównie osiadania. Sprawdzenie uzyskanych wyników podsta-

wowych D_0 oraz D_1 można oszacować następująco. Z wzoru (18) otrzymuje się:

$$D_0 < C \cdot 0,003615^{(D_1-1)} \quad (31)$$

ponadto zachodzi dalsza przybliżona zależność:

$$\left(\frac{D_0}{C} \right)^{\frac{1}{D_1-1}} \approx \frac{296,4}{\kappa^{0,0972}} \cdot \left[\ln \left(\frac{C}{D_0} \right) \right]^{1/6} \quad (32)$$

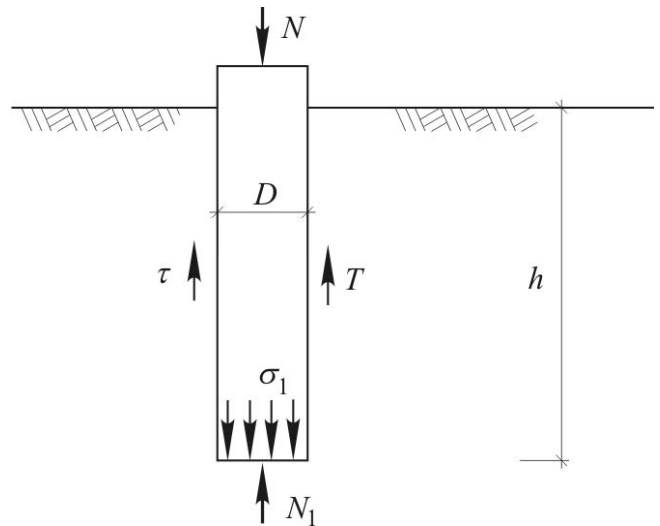
OKREŚLENIE OPORU POBOCZNICZY PALA

Opór poboczniczy pala określono z wykorzystaniem uproszczonego modelu krzywej $Q-s$ (5), przy założeniu, że pod podstawą pala zależność przemieszczenie-osiadanie, opór podstawy pala N_1 opisana jest liniowo. Schematycznie usytuowanie pala oraz siły i naprężenia pokazano na rys. 5.

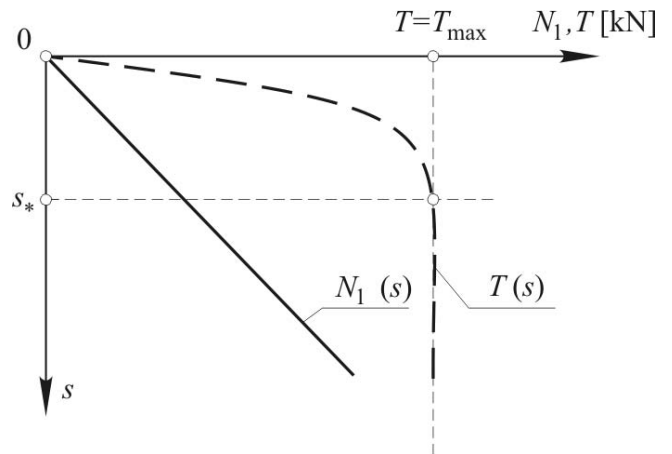
Równanie równowagi sił pionowych działających na pał ma postać:

$$N(s) = N_1(s) + T(s) \quad (33)$$

Na rys. 6 pokazano zmianę sił N oraz T wraz ze zmianą osiadania:



Rys. 5. Schemat obciążeń działających na pał



Rys. 6. Rozkład sił działających na pał

Na podstawie rys. 6 można napisać, że gdy $s = s_*$ wtedy:

$$\left. \frac{dN}{ds} \right|_{s \rightarrow s_*} = \left. \frac{dN_1}{ds} \right|_{s \rightarrow s_*} + \left. \frac{dT}{ds} \right|_{s \rightarrow s_*} \quad (34)$$

gdzie:

$$\left. \frac{dT}{ds} \right|_{s=s_*} = 0 \quad (35)$$

Z założenia o liniowych zmianach N_1 wraz z osiadaniami można napisać:

$$N_1 = \frac{\pi}{4} \cdot E_p \cdot D \cdot s \quad (36)$$

stąd:

$$\frac{dN_1}{ds} = \frac{\pi}{4} \cdot E_p \cdot D \quad (37)$$

oraz

$$N_1(s_*) = \frac{\pi}{4} \cdot E_p \cdot D \cdot s_* \quad (38)$$

Pochodną $\frac{dN}{ds}$ obliczymy dla uproszczonego modelu krzywej $Q - s$, z równania (5). Wtedy:

$$N = N_{gr} \cdot \left(\frac{s}{CN_{gr}} \right)^{\frac{1}{C_2+1}} \cdot e^{\frac{-C_1}{C_2+1}} \quad (39)$$

Po różniczkowaniu równania (39) mamy:

$$\frac{dN}{ds} = \frac{1}{C} \cdot e^{\frac{-C_1}{C_2+1}} \cdot \left(\frac{s}{CN_{gr}} \right)^{\frac{-C_2}{C_2+1}} \quad (40)$$

Po podstawieniu zależności (37) oraz (40) do równania (34), otrzymuje się:

$$\left(\frac{s_*}{CN_{gr}} \right)^{\frac{1}{C_2+1}} = \left[(C_2 + 1) \cdot e^{\frac{C_1}{C_2+1}} \cdot X \right]^{\frac{-1}{C_2}} \quad (41)$$

gdzie:

$$X = \frac{\pi}{4} \cdot E_p \cdot D \quad (42)$$

We wcześniejszej części pracy otrzymano:

$$C_2 = D_1 - 1 \quad (43)$$

Pozostaje zatem do określenia stała C_1 . Z równania (7) otrzymuje się:

$$C_1 = \ln \left[\frac{D_0 \cdot N_{gr}^{D_1-1}}{C} \right] \quad (44)$$

Można teraz obliczyć osiadanie s_* , przy którym $T(s)$ osiąga T_{max} . Stąd:

$$s_* = C \cdot N_{gr} \left[(C_2 + 1) \cdot e^{\frac{C_1}{C_2+1}} \cdot X \right]^{\frac{C_2+1}{C_2}} \quad (45)$$

Można również obliczyć T_{max} , bowiem:

$$T_{max} = N(s_*) - N_1(s_*) \quad (46)$$

Po podstawieniu otrzymuje się:

$$T_{max} = N_{gr} \cdot \left[(C_2 + 1) \cdot e^{\frac{C_1}{C_2+1}} \cdot X \right]^{\frac{1}{2}} \cdot e^{\frac{-C_1}{C_2+1}} - \frac{\pi}{4} \cdot E_p \cdot D \cdot C \cdot N_{gr} \cdot \left[(C_2 + 1) \cdot e^{\frac{C_1}{C_2+1}} \cdot X \right]^{\frac{C_2+1}{C_2}} \quad (47)$$

Po uporządkowaniu otrzymuje się:

$$\frac{T_{max}}{N_{gr}} = \frac{C_2}{C_2 + 1} \left[(C_2 + 1) \cdot e^{\frac{C_1}{C_2+1}} \cdot X \right]^{\frac{1}{C_2}} \quad (48)$$

Z wzoru (44) otrzymuje się, a ponadto:

$$e^{C_1} = \frac{D_0 \cdot N_{gr}^{D_1-1}}{C} \quad (49)$$

Po podstawieniu do zależności (48) :

$$\frac{T_{max}}{N_{gr}} = \frac{D_1 - 1}{D_1} \left[\frac{C}{D_1 \cdot D_0 \cdot N_{gr}^{D_1-1}} \right]^{\frac{1}{D_1-1}} \quad (50)$$

Wzór ten pozwala na obliczenie T_{max} , jeżeli znamy parametr X . Parametr ten jest określany wzorem (42). Podstawową trudność stanowi odpowiednie przyjęcie modułu ścisłości gruntu pod podstawą pała. Grunt w tym miejscu ulega ścisaniu podczas osiadania pała. Obliczenia praktyczne wskazują, że moduł E_p jest znacznie wyższy niż moduł edometryczny tego gruntu otrzymywany dla małych obciążeń. Zasadne byłoby określenie tego modułu na podstawie naprężenia q_c uzyskiwanego na tej głębokości sondą statyczną. Zależność taką można uzyskać, gdy:

$$T_{max} = N_{gr} - \frac{\pi D^2}{4} \cdot q_c \quad (51)$$

wtedy równanie (50) przekształci się w równanie z jedną niewiadomą X , co pozwala na obliczenie E_p .

Przykład obliczeniowy

Obliczamy s_* – osiadanie, przy którym T osiąga T_{max} , wówczas wykorzystujemy równanie:

$$\frac{s_*}{CN_{gr}} = \left[D_1 \cdot \left(\frac{D_0 \cdot N_{gr}^{D_1-1}}{C} \right)^{\frac{1}{D_1}} \cdot X \right]^{\frac{1}{D_1-1}} \quad (52)$$

Założmy że $X=0,1$ pozostałe dane przyjmijmy jak w poprzednim przykładzie. Po podstawieniu otrzymuje się $s_* = 21,4$ mm. Jest to wielkość praktycznie obserwowana w obciążeniach statycznych pali. W podobny sposób obliczymy $\frac{T_{max}}{N_{gr}}$ z wzoru (50):

$$\frac{T_{max}}{N_{gr}} = \frac{0,7341}{1,7341} \left[\frac{0,001}{0,00001367 \cdot 2500^{0,7341} \cdot 1,73 \cdot 0,1} \right]^{1,36} = 0,63$$

Jest to wartość oczekiwana, bowiem następnie możemy obliczyć składową naprężenia na pobocznicę pała. W tym celu musimy założyć długość pała i jego średnicę. Zakładamy że, $D = 0,4$ m; $h = 15$ m – po podstawieniu otrzymamy:

$$\tau = \frac{0,63 \cdot 2500}{\pi \cdot 0,4 \cdot 15} = 83 \text{ kPa}$$

Jest to również wielkość oczekiwana. Można jeszcze obliczyć moduł ścisłości w momencie osiągnięcia osiadania s_* pod podstawą pała oraz q_c pod podstawą pała jako opór graniczny i wtedy:

$$X = \frac{\pi}{4} \cdot E_p \cdot D = 0,1$$

stąd

$$E_p = 318 \text{ MPa}$$

a następnie pod podstawą pała q_c , które wynoszą odpowiednio:

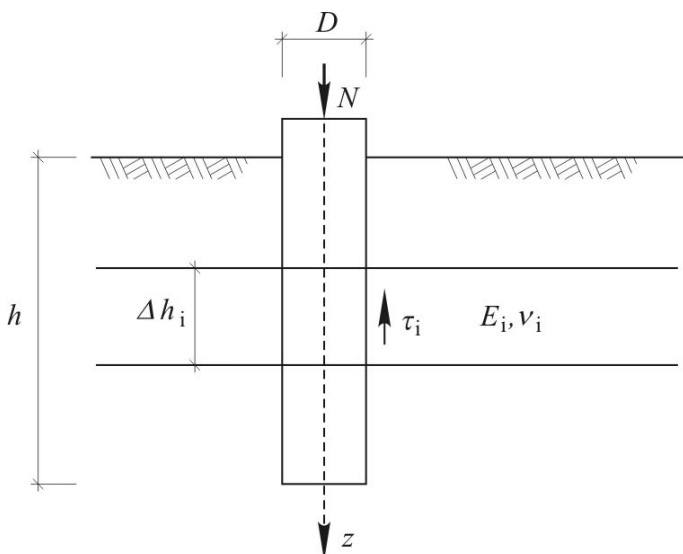
$$q_c = \frac{(1-0,63) \cdot 2500}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} = 7,36 \text{ MPa}$$

Przy takim q_c zwykle moduł edometryczny nie przekracza 40 MPa, natomiast wcześniej otrzymaliśmy $E_p = 318 \text{ MPa}$.

PRAKTYCZNE SPOSOBY OBLICZANIA STAŁEJ C A PODSTAWIE PARAMETRÓW GRUNTOWYCH

Parametr C jest jedną ze stałych, które występują w modelu krzywej $Q - s$ według Meyera-Kowalowa. Stałą tą można określić na podstawie wyników badania statycznego dla obszaru 1 (rys. 3). Stała ta wyraża zagregowany współczynnik podatności podłoża, a jej odwrotność może być porównywana do stałej Winklera. Stałą tę można również określić na podstawie znajomości parametrów gruntowych: ϕ , E oraz ν , gdzie: ϕ jest kątem tarcia wewnętrznego gruntu w danej warstwie, E jest modułem ścisłości gruntu w danej warstwie, a ν jest współczynnikiem Poissona gruntu w danej warstwie.

Dla małych obciążeń głowicy pała można przyjąć, że cała reakcja podłoża wynika z tarcia na poboczniczy pała. Schematycznie ten stan pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Schemat pracy pała w podłożu uwarstwowym przy małych obciążeniach głowicy

Stan ten określa równanie:

$$N = T \quad (53)$$

Z wcześniejszych badań [11] wynika, że podstawowa zależność osiadanie pała – naprężenia mają postać:

$$s = \frac{\tau_i}{G_i} \cdot l_i$$

gdzie:

$$l_i = \alpha_i \cdot D$$

oraz

$$G_i = \frac{E_i}{2 \cdot (1 + \nu_i)} \quad (54)$$

Założmy ponadto, że przemieszczenie pała w każdej warstwie jest takie samo oraz, że odbywa się bez poślizgu. Otrzymuje się wtedy zależność na opór poboczniczy:

$$T_i = \pi \cdot D \cdot \tau_i \quad (55)$$

i następnie:

$$T = \sum T_i \quad (56)$$

a po podstawieniu zależności (54) otrzymamy:

$$T = \frac{1}{2} \pi \cdot s \cdot \sum \left[\frac{E_i \cdot h_i}{\alpha_i \cdot (1 + \nu_i)} \right] \quad (57)$$

Korzystając z zależności (53), otrzymamy:

$$N = \frac{1}{2} \pi \cdot s \cdot \sum \left[\frac{E_i \cdot h_i}{\alpha_i \cdot (1 + \nu_i)} \right] \quad (58)$$

stąd:

$$C = \frac{2}{\pi \cdot \sum \left[\frac{E_i \cdot h_i}{\alpha_i \cdot (1 + \nu_i)} \right]} \quad (59)$$

Oznacza to, że znając parametry gruntowe każdej warstwy, można obliczyć stałą C . Z analizy statystycznej związków parametrów gruntowych oraz stałych w równaniu (59) możemy otrzymać:

$$\alpha_i = \frac{7}{4} \cdot (\text{tg} \cdot \phi_i)^{-3/2} \quad (60)$$

oraz

$$\nu_i = \frac{8}{45} \cdot (\text{tg} \cdot \phi_i)^{-5/8} \quad (61)$$

We wzorze (59) na stałą C wygodnie jest wstawić:

$$\lambda_i = \frac{1}{\alpha_i \cdot (1 + \nu_i)} \quad (62)$$

wtedy wzór na stałą C przyjmie postać:

$$C = \frac{2}{\pi \cdot \sum [\lambda_i \cdot E_i \cdot h_i]} \quad (63)$$

Do celów praktycznych obliczeń inżynierskich można posłużyć się wzorem przybliżonym:

$$\lambda_i = \frac{3}{2} \cdot (\text{tg} \cdot \phi_i)^{5/3} \quad (64)$$

Znając stałą C wyrażoną wzorem (63), parametr X opisany wzorem (42) można wyrazić teraz jako:

$$X = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_p \cdot D}{\sum [\lambda_i \cdot E_i \cdot h_i]} \quad (65)$$

Dla ośrodka jednorodnego otrzymamy wtedy:

$$X = \frac{1}{2} \cdot \frac{D}{H} \cdot \frac{E_p}{E} \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (66)$$

gdzie:

E – moduł edometryczny gruntu na długości pala,

E_p – moduł edometryczny gruntu w podstawie pala.

Przykład obliczeniowy

Do praktycznych obliczeń przyjęto podłoże składające się z trzech warstw o parametrach podanych w tabl. 1.

Tabl. 1. Parametry warstw podłoża przyjęte do obliczeń

h_i [m]	E_i [MPa]	ϕ_i [°]	λ_i [m]
1,6	12	16	0,187
4,0	20	20	0,278
3,4	40	27	0,487

Po podstawieniu do wzoru (63) otrzymamy

$$\sum (\lambda_i \cdot E_i \cdot h_i) = 92 \text{ MN/m}$$

i wtedy:

$$C = \frac{2}{\pi \cdot 92 \text{ MN/m}} = 0,00707 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Można teraz, tak jak w poprzednim przykładzie, obliczyć stałą X z wzoru (42) i wówczas $X = 0,706$. Wtedy $\frac{T_{\max}}{N_{gr}}$ wyniesie podobnie jak poprzednio 0,63. Wynika to z faktu, że we wzorze (50) występuje wyrażenie:

$$\frac{C}{X} = \frac{C}{\frac{\pi}{4} \cdot E_p \cdot D \cdot C} = \frac{4}{\frac{\pi}{4} \cdot E_p \cdot D} \quad (67)$$

co oznacza, że stosunek $\frac{T_{\max}}{N_{gr}}$ wyrażony przez D_0 oraz D_1 nie zależy bezpośrednio od C .

PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono uproszczoną metodę określania parametrów do krzywej Meyera-Kowalowa. Krzywa ta wyraża wyniki badania statycznego pala w postaci siła-osiadanie. Przedstawiona metoda zakłada, że do praktycznych obliczeń inżynierskich oryginalną krzywą (1) można zastąpić uproszczoną formułą (5). Przy tym założeniu opracowano metodę, która z dostateczną do celów praktycznych dokładnością pozwala na obliczenie parametrów krzywej, w tym nośności granicznej. Nośność graniczna przyjęta w pracy oznacza obciążenie w głowicy pala, która powoduje niekontrolowane osiadanie. Przedstawiona

metoda ma znaczenie praktyczne, ponieważ można w projektowaniu posadowienia na palach odwrócić sposób przyjmowania obciążeń dopuszczalnych na pal. Obciążenia dopuszczalne na pal można określić na podstawie przyjętego dopuszczalnego osiadania według wzoru:

$$s_{dop} = C \cdot N_{gr} \cdot \frac{\left(1 - \frac{N_{dop}}{N_{gr}}\right)^{-\kappa} - 1}{\kappa} \quad (68)$$

wtedy współczynnik bezpieczeństwa będzie wyrażony wzorem:

$$SF = \frac{N_{gr}}{N_{dop}} \quad (69)$$

Do celów następnych obliczeń N_{gr} można wykorzystać zależność (20), przyjmując, że:

$$K = \left[\frac{1}{480} \cdot \left(\frac{C}{D_0} \right)^{\frac{1}{D_1-1}} \right]^{-6} \quad (70)$$

LITERATURA

1. Cernica J.: Geotechnical Engineering-Foundation Design. J. Wiley & Sons. 1995.
2. Cichy L., Rybak J.: Badanie nośności pali prefabrykowanych. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, 2009.
3. Gwizdała K.: Fundamenty palowe. PWN, Warszawa 2010.
4. Gwizdała K.: Kontrola nośności pali i jakości robót palowych. Geoinżynieria i Tunelowanie, nr 4/2004.
5. Kłosiński B.: Współczesne pale wiercone. Inżynier Budownictwa, 2010.
6. Jamiolkowski M.: Nośność pali wierconych w piaskach i żwirach. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 6/2001.
7. Meyer Z., Kowalów M.: Model krzywej aproksymującej wyniki testów statycznych pali. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2010.
8. Meyer Z., Szmeczel G.: Metoda interpretacji testów statycznych obciążeń pali prefabrykowanych, 58 Konferencja Naukowa KILiW PAN, Krynica, 2012.
9. Meyer Z.: Static Load Tests, Short Series Interpretation. French-Polish Colloquium, Montpellier (Francja), 2013.
10. Meyer Z., Szmeczel G.: Wybór funkcji aproksymującej parametry modelu – krzywej obciążenie osiadanie dla pali prefabrykowanych na podstawie testów statycznych. 59 Konferencja Naukowa KILiW PAN, Krynica 2013.
11. Meyer Z.: Analiza naprężeń na poboczniczy pala oraz pod podstawę pojedynczego pala w oparciu o liniową teorię Boussinesqa. XVIII Seminarium Naukowe Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska, Szczecin 2010.
12. Rippel R.: Próbné obciążenia pali formowanych w gruncie. Inżynier Budownictwa, 2008.
13. Sieńko Z., Krasinski A.: Pomiar pionowego rozkładu siły w palu podczas testów statycznych. 56 Konferencja Naukowa KILiW PAN, Krynica 2010.
14. Sikora Z.: Sondowanie statyczne, metody i zastosowanie w geoinżynierii. Wydawnictwo Techniczne, Warszawa 2006.
15. Wiłun Z.: Zarys geotechniki. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2000.