

## **Określenie oporów poboczniczy pala na podstawie próbnych statycznych obciążeń pala**

**Prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer, dr inż. Grzegorz Szmeczel**

**Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury**

Próbne statyczne obciążenie pala jest zalecanym przez Eurokod 7 sposobem na sprawdzenie nośności pala [1, 2]. Coraz częściej określa się obciążenie dopuszczalne pala w głowicy od dopuszczalnego osiadania pala pod obciążeniem statycznym. Wymaga to często wyjścia poza obszar próbnych obciążeń i prognozowania na podstawie osiadania, których nie osiągnięto. W literaturze podaje się próby określone związkiem obciążenie w głowicy – osiadanie pala w całym zakresie [1, 2, 3]. Ostatnie prace w tym zakresie to prace Meyera [4, 5, 6, 7] oraz Szmeczela [11]. Meyer podał propozycję związku obciążenie – osiadanie pala w pełnym zakresie: krzywą tę określa się w pracy jako krzywą Meyera-Kowalowa (MK). W poprzednich opracowaniach [4, 5, 6, 11] podano sposoby, które umożliwiają oblicze-

nie parametrów tej krzywej na podstawie metod statystycznych. Znajomość tych parametrów pozwala na ekstrapolację krzywej obciążenie – osiadanie poza obszar obciążeń statycznych. Nie można jednak wydzielić w reakcji pala oporu poboczniczy i podstawy. W niniejszej pracy przedstawiono propozycję analitycznego określenia mobilizacji oporu poboczniczy wraz z wzrostem osiadania.

### **MATEMATYCZNY OPIS ZJAWISKA**

Związek obciążenie-osiadanie pala w głowicy ma wcześniej przedstawioną postać [4]

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

gdzie:

$C$  – stała podatności podłoża w stosunku do pała uwzględniającym opór podstawy i poboczniczy,

$N$  – siła przyłożona w głowicy pała,

$N_{gr}$  – siła przyłożona w głowicy pała, przy której pał osiada w sposób niekontrolowany,

$s$  – osiadanie pała,

$\kappa$  – bezwymiarowy współczynnik.

Schematycznie wykres krzywej (1) Meyera-Kowalowa przedstawiono na rys. 1.

Krzywa ta posiada duże asymptoty:

– ukośną

$$s = C \cdot N \quad [\text{mm}] \quad (2)$$

– pionową

$$N = N_{gr} \quad [\text{kN}] \quad (3)$$

gdzie:

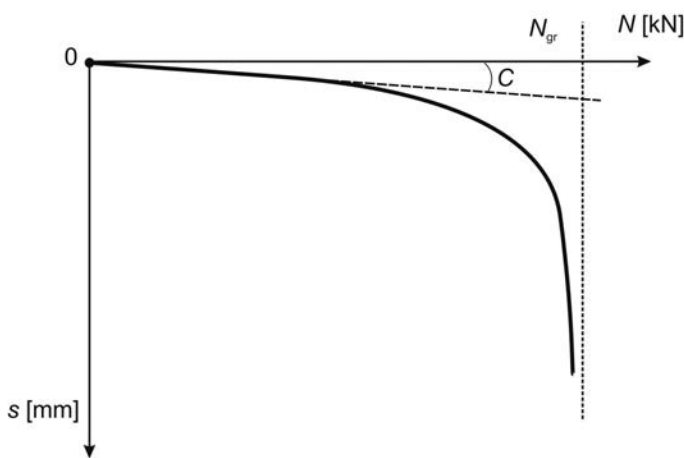
$$C = \lim_{N \rightarrow 0} \frac{ds}{dN} \quad [\text{mm/kN}] \quad (4)$$

Założono, że analizie będą poddane dwa stany pracy pała:

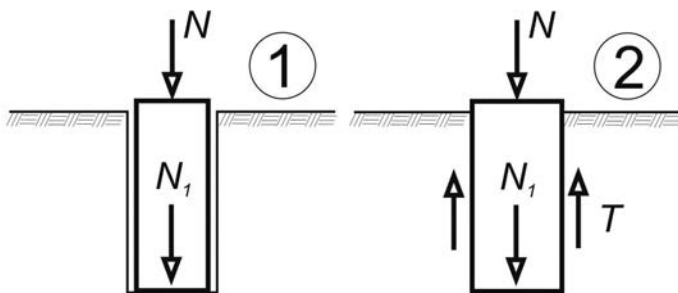
– pał, którego reakcja pochodzi jedynie od oporu podstawy, stan 1,

– pał, którego reakcja pochodzi od oporu podstawy i oporu poboczniczy, stan 2.

Schematycznie sytuację pokazano na rys. 2



Rys. 1. Schemat krzywej Meyer-Kowalowa



Rys. 2. Schemat pracy pała w stanach 1 i 2

Stany te można opisać równaniami:

– stan 1

$$s = C_1 \cdot N_{gr1} \cdot \frac{\left(1 - \frac{N}{N_{gr1}}\right)^{-\kappa_1} - 1}{\kappa_1} \quad [\text{mm}] \quad (5)$$

– stan 2

$$s = C_2 \cdot N_{gr2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{N}{N_{gr2}}\right)^{-\kappa_2} - 1}{\kappa_2} \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

Określenie oporu poboczniczy na podstawie obu tych stanów przedstawiono na rys. 3

$$T(s) = N(s, 2) - N(s, 1) \quad [\text{kN}] \quad (7)$$

Zakłada się, że z próbnego statycznego obciążenia pała znane są parametry krzywej 2 obliczone metodami statycznymi  $C_2$ ,  $\kappa_2$ ,  $N_{gr2}$ . Nieznane są natomiast parametry stanu 1. Systematyczny przegląd rozwiązania równań (5), (6), (7) wskazuje, że do celów praktycznych obliczeń można przyjąć następujące uproszczenia:

$$\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa \quad [-] \quad \text{oraz} \quad N_{gr1} = N_{gr2} = N_{gr} \quad [\text{kN}] \quad (8)$$

Oznacza to, że przy bardzo dużych obciążeniach pała i osiadaniach pała, opór poboczniczy można pominąć. Przy tak przyjętych założeniach otrzymano równanie opisujące opór poboczniczy:

Oznacza to również, że szukamy jedynie nadwyżki oporu poboczniczy ponad wartość, która powstaje przy dużych osiadaniach.

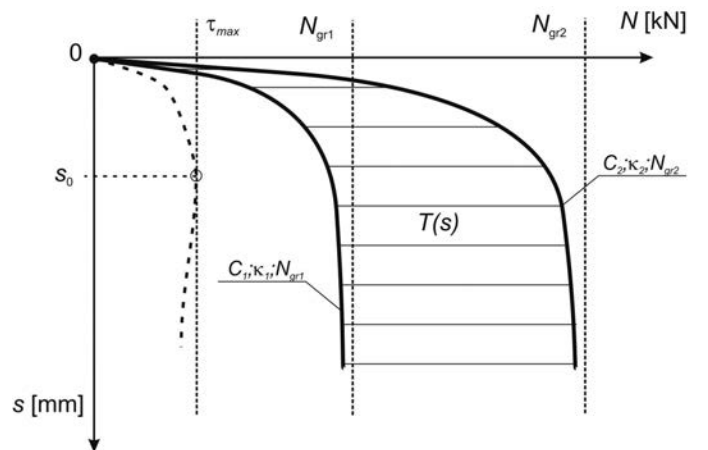
$$T(s) = N_{gr} \cdot \left[ 1 - \left( 1 + \frac{\kappa \cdot s}{C_2 \cdot N_{gr}} \right)^{-\frac{1}{\kappa}} \right] - N_{gr} \cdot \left[ 1 - \left( 1 + \frac{\kappa \cdot s}{C_1 \cdot N_{gr}} \right)^{-\frac{1}{\kappa}} \right] \quad [\text{kN}] \quad (9)$$

Z równania tego uzyskano zależności:

$$\frac{T(s)}{N_{gr}} = \left( 1 + \frac{\kappa \cdot s}{C_1 \cdot N_{gr}} \right)^{\frac{1}{\kappa}} - \left( 1 + \frac{\kappa \cdot s}{C_2 \cdot N_{gr}} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad [-] \quad (10)$$

W celu uproszczenia obliczeń wykonano następujące podstawienie:

$$Y = \frac{T(s)}{N_{gr}}; \quad X = \frac{\kappa \cdot s}{C_2 \cdot N_{gr}}; \quad \alpha = \frac{C_2}{C_1} \quad [-] \quad (11)$$



Rys. 3. Schemat obliczenia oporu poboczniczy pała

Podstawiając (11) do równania (10) otrzymano:

$$Y = -(1+X)^{-\frac{1}{\kappa}} + (1+\alpha X)^{-\frac{1}{\kappa}} \quad [-] \quad (12)$$

Następnie wyznaczono ekstremum funkcji  $Y(X)$ :  $\frac{dY}{dX} = 0$  gdy  $X=X_0$  oraz  $X_0$  spełnia równanie:

$$X_0 = \frac{1 - \alpha^{\frac{\kappa}{\kappa+1}}}{\alpha^{\frac{\kappa}{\kappa+1}} - \alpha} \quad [-] \quad (13)$$

Po podstawieniu do równania (12):

$$Y = \left( \alpha^{\frac{\kappa}{\kappa+1}} - 1 \right) \cdot \left[ \frac{\alpha^{-1} - 1}{\alpha^{\frac{\kappa}{\kappa+1}} - 1} \right]^{\frac{1}{\kappa}} \quad [-] \quad (14)$$

Do celów praktycznych obliczeń inżynierskich zależność tę można przedstawić w postaci przybliżonej dla:

$$0,5 < \kappa < 4,5 \quad \text{oraz} \quad 5 < \frac{C_1}{C_2} < 10 \quad [-] \quad (15)$$

$$Y = \frac{1}{0,8 + \kappa} \cdot \frac{\ln \left[ \frac{\alpha}{0,4^{1+0,165}} \right]}{\ln 0,782} \quad [-] \quad (16)$$

W tabl. 1 przedstawiono funkcję  $Y = Y(\kappa; \alpha)$

Tabl. 1. Wartości funkcji  $Y = Y(\kappa; \alpha)$  przy różnych wartościach  $\kappa$  i  $\alpha$

$\alpha^{-1} \backslash \kappa$	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5
5	1,9	0,82	0,40	0,15	0,01
6	2,5	1,14	0,61	0,33	0,15
7	2,9	1,40	0,80	0,47	0,26
8	3,4	1,65	1,00	0,60	0,37
9	3,8	1,86	1,14	0,71	0,46
10	4,1	2,0	1,24	0,80	0,54

Praktyczne wykorzystanie zależności (16) wymaga znajomości stałych  $C_1$  i  $C_2$ . Do celów inżynierskich stałe te można obliczyć analitycznie na podstawie analizy współpracy pała z gruntem [4, 10]. Otrzymuje się zatem:

$$C_1 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{E_q D_1} \quad [-] \quad (17)$$

$$C_2 = \frac{7,5}{\pi} \cdot \frac{1}{E_t h} \quad [-] \quad (18)$$

gdzie:

$D$  – średnica obszaru gruntu w podstawie pała, który współpracuje z pałem i przemieszcza się,

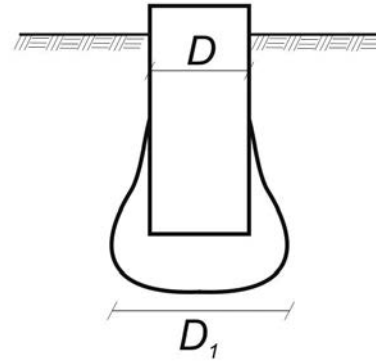
$E_q$  – moduł ściśliwości gruntu w podstawie,

$E_t$  – moduł ściśliwości gruntu współpracującego z poboczną pała,

$q_c$  – opór wciskania stożka sondy statycznej.

Na rys. 4 pokazano schematycznie współpracę podstawy pała z gruntem w przypadku gruntów niespoistych.

Parametr  $C_2$  można obliczyć również z krzywej obciążenia statycznego metodami statystycznymi [8].



Rys. 4. Schemat współpracy podstawy pała z gruntem niespoistym

Do celów obliczeń praktycznych można przyjąć:

$$E_q \cdot D_1 = 2(2q_c)^{7/6} \cdot D \quad [\text{kN/mm}] \quad (19)$$

we wzorze tym  $q_c$  [MPa];  $D$  [m]

$$E_t = (2q_c)^{7/6} \quad [\text{MPa}] \quad (20)$$

we wzorze tym  $q_c$  [MPa];  $E_t$  [MPa] przy podłożu uwarstwowionym  $E_t$  należy uśrednić względem głębokości położenia warstwy i miąższości.

## PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Jako przykład wykorzystania opisanej metody wykorzystano wyniki badania statycznego pała wykonanego na budowie budynku biurowego z częścią usługową w Szczecinie. Średnica pała  $D = 0,4$  m. Pał wiercony długości  $h = 9,0$  m. Zagłębiony podstawą w piaskach drobnych akumulacji rzecznej o  $q_c$  pod podstawą 8,2 MPa.

Do obliczeń przyjęto następujące dane:

$$q_c = 8,2 \text{ MPa}; \quad D = 0,4 \text{ m}; \quad h = 14,5 \text{ m}$$

$$E \cdot D_1 = 20,9 \text{ MPa}$$

$$C_1 = 0,0645 \text{ mm/kN}$$

$$C_2 = 0,0066 \text{ mm/kN}$$

$$\text{Parametr } \alpha \text{ wynosi: } \alpha = \frac{0,0066}{0,0645} = 0,103 \text{ lub } \alpha^{-1} = 9,67.$$

Zestawienie wyników obliczeń  $Y = \frac{T_{(\max)}}{N_{gr}}$  przedstawiono w tabl. 2.

Tabl. 2. Wartości funkcji  $Y = \frac{T_{(s)}}{N_{gr}}$  przy różnych wartościach  $\kappa$

$\kappa$	4,5	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2
Y	0,59	0,48	0,45	0,41	0,38	0,35	0,32	0,30

Ze względu na to, że wartość  $N_{gr}$  pochodzi z aproksymacji badania statycznego, podobnie jak  $\kappa$ , dlatego jest możliwe obliczenie  $T_{\max}$ . Jeżeli z optymalizacji otrzymano  $\kappa = 4,5$ , natomiast  $N_{gr} = 2500$  kN, to wówczas:

$$T_{(\max)} = 2500 \cdot 0,59 = 1475 \text{ kN}$$

A następnie:

$$N_1(\max) = N_{gr} - T_{\max} = 2500 - 1475 = 1025 \text{ kN}$$

Wartość ta odpowiada w przybliżeniu:

$$N_1(\max) = \frac{\pi D^2}{4} q_c = 1030 \text{ kN}$$

Uzyskuje się także możliwość obliczenia składowej stycznej naprężenia  $\tau_{\max}$  na poboczniczy pala:

$$\tau_{\max} = \frac{1475}{\pi \cdot 0,4 \cdot 16} = 73,36 \text{ kPa}$$

## WNIOSKI

W pracy przedstawiono metodę analitycznego obliczenia oporu poboczniczy pala na podstawie próbnych obciążeń statycznych pala.

Do matematycznego opisu zjawiska wykorzystuje się przedstawioną w literaturze krzywą obciążenie – osiadanie ( $Q-S$ ) Meyera-Kowalowa.

Rozwiązanie uzyskano przy założeniu, że opór poboczniczy można uzyskać, odejmując od siebie funkcję obciążenie-osiadanie pala w dwóch różnych stanach pracy pala: bez udziału poboczniczy oraz przy jej udziale w przenoszeniu obciążeń.

Wyniki obliczeń wskazują, że do celów obliczeń inżynierskich metoda ta daje wyniki obserwowane w przypadkach praktycznych.

Program dalszych badań przewiduje weryfikację wyników teoretycznych przy zastosowaniu proponowanej metody z tymi, jakie uzyskuje się w warunkach naturalnych. Wtedy tarcie o pobocznice uzyskuje się na podstawie pomiaru skrócenia trzonu pala.

1. Gwizdała K.: Fundamenty Palowe. Tom 1: Technologie i obliczenia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
2. Gwizdała K.: Fundamenty Palowe. Tom 2: Badania i zastosowania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
3. Krasieński A.: Pale przemieszczeniowe wkręcane. Współpraca z niespoistym podłożem gruntowym. Wydawnictwo PG, Gdańsk 2013.
4. Meyer Z.: Analiza naprężeń na poboczniczy oraz pod podstawą pojedynczego pala w oparciu o liniową teorię Boussinesqa. XVIII Seminarium Naukowe z cyklu Regionalne problemy inżynierii środowiska. Szczecin, czerwiec 2010.
5. Meyer Z., Kowalów M.: Wykorzystanie testu Osterberga do statycznych próbnych obciążeń pali. XXIV Konferencja Naukowo techniczna Awarie Budowlane, Szczecin– Międzyzdroje, 2009.
6. Meyer Z., Kowalów M.: Model krzywej aproksymującej wyniki próbnych obciążeń pali. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2010.
7. Meyer Z., Szmeczel G.: Analiza możliwości analitycznej aproksymacji krzywej obciążenie – osiadanie dla próbnych obciążeń pali żelbetowych w gruntach sypkich. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 4/2010.
8. Meyer Z., Szmeczel G.: Metoda interpretacji próbnych obciążeń pali prefabrykowanych. Materiały na 58 KN Krynica 2012 Zeszyty Politechniki Rzeszowskiej.
9. Meyer Z., Szmeczel G.: Wybór funkcji aproksymującej parametry modelu krzywej obciążenie-osiadanie dla pali prefabrykowanych na podstawie próbnych obciążeń pali. Materiały na 59 KN Krynica 2013 Zeszyty Politechniki Lubelskiej.
10. Meyer Z., Żarkiewicz K.: Wykorzystanie wzoru na osiadanie płyty statycznej do określenia naprężenia pod podstawą kolumny betonowej. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 01/2014, 30-35.
11. Szmeczel G.: Określenie nośności granicznej pali na podstawie próbnych obciążeń statycznych w ograniczonym zakresie. Praca doktorska. Wydział Budownictwa i Architektury ZUT w Szczecinie, 2014.