

## FUNDAMENTY PALOWE, OBLICZENIA Z ZASTOSOWANIEM ZASAD EUROKODU 7 I DOŚWIADCZEŃ KRAJOWYCH

Kazimierz Gwizdała, Adam Krasieński

Politechnika Gdańska, Gdańsk

**Streszczenie.** Zagadnienie obliczania fundamentów palowych jest w Eurokodzie 7 przedstawione w sposób ogólny. Określono jedynie główne zasady wykonywania obliczeń oraz podano wymagania, jak im powinny odpowiadać. Założenie takie jest uzasadnione, ale stanowi utrudnienie w praktycznym zastosowaniu inżynierskim. Projektanci są obligowani do samodzielnego poszukiwania odpowiednich i wiarygodnych metod obliczeniowych, które są rozproszone w licznych opracowaniach. Dotyczy to zarówno metod obliczania statycznego fundamentów palowych, określania nośności pali, jak i prognozowania osiadań pali pojedynczych oraz w grupie. W artykule omówiono powyższe zagadnienia oraz przedstawiono kilka propozycji metod i podejść obliczeniowych z wykorzystaniem aktualnych wyników badań oraz wieloletnich doświadczeń krajowych.

**Słowa kluczowe:** pale fundamentowe, projektowanie pali, nośność pali, osiadania fundamentów palowych

### WSTĘP

W Polsce od kilku lat stosowane są zasady projektowania geotechnicznego zgodnie z Eurokodem 7. W załączniku krajowym do powyższej normy nie ma dodatkowych zaleceń dotyczących obliczania i projektowania fundamentów palowych, w związku z czym obowiązują zalecenia zawarte w wersji oryginalnej (ogólnoeuropejskiej) normy. Dotyczą one między innymi klasyfikacji metod obliczeniowych, wartości współczynników częściowych oddziaływań  $\gamma_G$  i  $\gamma_Q$ , współczynników korelacyjnych od  $\zeta_1$  do  $\zeta_6$  oraz współczynników nośności  $\gamma_b$ ,  $\gamma_s$ ,  $\gamma_t$  i  $\gamma_{s,t}$ .

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Kazimierz Gwizdała, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, e-mail: kgwiz@pg.gda.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2016

Według załącznika krajowego, sprawdzanie nośności fundamentów, również palowych, zaleca się przeprowadzać, stosując podejście obliczeniowe 2 (DA2 lub DA2\*), z kombinacją współczynników:  $A1$  „+”  $M1$  „+”  $R2$ ”.

Przy opracowywaniu EC7 przyjęto, że w normie znajdują się jedynie zasady i wymagania, jakim powinny odpowiadać różnego rodzaju obliczenia statyczne fundamentów i konstrukcji geotechnicznych, bez narzucania konkretnych metod i szczegółowych wzorów obliczeniowych. Przedstawiono jedynie pewne propozycje obliczeń. Idea ta znacząco odróżnia Eurokody od dawnych norm polskich, w których zawarte wzory obliczeniowe traktowano jako obowiązkowe. Z jednej strony taka istotna zmiana jest korzystna z tego względu, że daje projektantom dużą swobodę w doborze metod obliczeniowych i nie krępuje rozwoju tych metod. Jednocześnie odpowiedzialność za projekt i wyniki obliczeń skupiana jest tylko na osobie projektanta. Z drugiej strony swoboda doboru metod obliczeniowych może być dla wielu projektantów kłopotliwa i niewygodna. Wymusza na nich ciągły rozwój i uaktualnianie swojej wiedzy przez studiowanie bieżącej literatury fachowej i najnowszych opracowań. Zalecane jest też duże doświadczenie praktyczne i dobra znajomość zagadnienia. Zgodnie z wymaganiami EC7, stosowane przez projektantów metody obliczeniowe powinny mieć solidne podstawy merytoryczne – pochodzić z uznanych źródeł bądź mieć oparcie w wynikach badań eksperymentalnych. Biorąc pod uwagę dużą liczbę dostępnych źródeł literatury, należy stwierdzić, że zadania, przed jakimi stoją projektanci, mogą nie być łatwe.

Wychodząc naprzeciw zapotrzebowaniu i chcąc częściowo ułatwić pracę projektantom, w niniejszym artykule zawarto kilka wskazówek i porad dotyczących stosowania niektórych metod obliczania statycznego i projektowania fundamentów palowych z zachowaniem zasad i wymogów EC7. Przytoczone metody należy jednak nadal traktować jako przykładowe lub sugerowane, ale dające w miarę wysoki poziom wiarygodności i bezpieczeństwa.

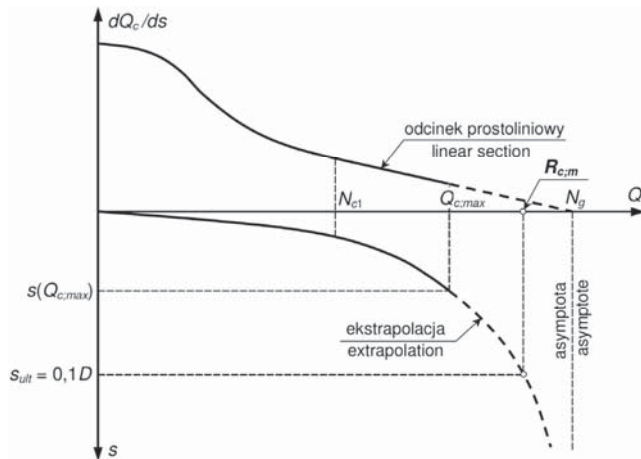
## METODY OKREŚLANIA NOŚNOŚCI PALI ZGODNIE Z ZASADAMI EC7

### Wiadomości wstępne

W EC7, pkt 7.4.1, wyróżniono cztery rodzaje metod określania nośności pali. We wszystkich nośność graniczną pala definiuje się umownie jako siłę, przy której przemieszczenie jego głowicy osiąga wartość równą 10% średnicy trzonu  $D$ . Wartość nośności charakterystycznej pala oblicza się, dzieląc nośność graniczną przez współczynniki korelacyjne od  $\xi_1$  do  $\xi_6$ , a nośność projektową (obliczeniową) określa się przez podzielenie wartości charakterystycznej przez współczynniki nośności  $\gamma_b$ ,  $\gamma_s$ ,  $\gamma_t$  lub  $\gamma_{s,t}$ .

W przypadku określania nośności pali na podstawie próbnych obciążeń statycznych (SPLT) występuje taka niedogodność, że rzadko podczas badania dochodzi się do wartości siły powodującej przemieszczenie równe 10% średnicy pala. W przypadku badania pali tzw. produkcyjnych nie jest to czasami wskazane ze względów konstrukcyjnych. W powyższej sytuacji proponuje się ekstrapolację wykresu  $Q$ - $s$  z próbnego obciążenia do

wartości siły granicznej  $N_g$ . Według zaleceń polskiej normy PN-83/B-02482, konstruuje się wykres pomocniczy  $dQ_c/ds$  i poszukuje na nim odcinka prostoliniowego (rys. 1). Ekstrapolację krzywej osiadania (linia przerywana) można przeprowadzić, wykorzystując metodę funkcji hiperbolicznej Gwizdały [2013] lub metodą graficzną.



Rys. 1. Określanie nośności pala ( $R_{c,m}$ ) z wykresu próbnego obciążenia

Fig. 1. Determination of pile bearing capacity ( $R_{c,m}$ ) from static load test chart

W przypadku braku możliwości wydzielenia odcinka prostoliniowego na wykresie  $dQ/ds$  nośność  $R_{c,m}$  pala proponuje się przyjąć równą sile  $Q_{c,max}$ . Ze względu na możliwość wystąpienia takiej sytuacji, w celu uniknięcia problemów ze spełnieniem warunku nośności, wartość maksymalnej siły, do której należy doprowadzić próbne obciążenie, powinna być określona z warunku:

$$Q_{c,max} > F_d \cdot \xi_1 \cdot \gamma_t \quad (1)$$

gdzie:  $F_d$  – wartość projektowa (obliczeniowa) obciążenia przekazywanego na pala.

W podobny sposób należy postępować w przypadku określania nośności pali na podstawie badań dynamicznych. Badania powinny umożliwić określenie wartości siły granicznej ( $Q_{ult}$ ) i skonstruowanie wykresu  $Q$ - $s$ . W przypadku braku takiej możliwości nośność  $R_{c,m}$  pala należy przyjąć równą sile  $Q_{c,max}$ , rozumianej jako ekwiwalent statyczny maksymalnej siły otrzymanej z interpretacji próbnego obciążenia dynamicznego pala.

W obliczeniach wstępnych do projektu najczęściej wykorzystywane są metody analityczne obliczania nośności pali na podstawie parametrów z badań podłoża gruntowego. Należy zaznaczyć, że w EC7 wymaga się, aby metody te były zweryfikowane wynikami próbnych obciążeń statycznych pali. Nośności pali w metodach analitycznych wyznacza się z ogólnych wzorów statycznych:

– w przypadku pala wciskanego

$$R_{c,cal} = R_{b,cal} + R_{s,cal} = A_b \cdot q_b + \sum A_{s,i} \cdot q_{s,i} \quad (2)$$

– w przypadku pala wyciąganego

$$R_{st,cal} = \sum A_{s,i} \cdot q_{st,i} \quad (3)$$

Oznaczenia wielkości zawarte w powyższych wzorach są zgodne z EC7.

W grupie rozpatrywanych metod nadal najchętniej stosowana jest w Polsce metoda obliczeniowa według polskiej normy PN-83/B-02482. Została ona zweryfikowana setkami próbnymi obciążen statycznych pali, które w wystarczającym stopniu potwierdziły jej wiarygodność i bezpieczeństwo. W celu dostosowania do założeń EC7 metoda wymagała jednak nieznacznej modyfikacji, którą zaproponował między innymi Sobala [2012, 2014].

Za najbardziej miarodajne i nowoczesne uważa się jednak metody obliczeń opierające się na bezpośrednich wynikach badań *in situ* (najczęściej sondowań CPTU). W literaturze polskiej istnieje kilka propozycji takich metod, np. metoda Gwizdały i Stęczyńskiego [2006, 2007] w odniesieniu do pali Vibro i pali wielkośrednicowych, metoda Krasieńskiego [2013a, b] – do pali przemieszczeniowych wkręcanych (SDP). Prowadzone są również badania naukowe nad opracowaniem takiej metody do określania nośności pali CFA. Najbardziej rozpowszechnione w świecie z grupy metod bezpośrednich są propozycje francuskie [Bustamante i Gianesselli 1983] i belgijskie [Van Impe 1991].

#### Obliczanie nośności pali według PN-83/B-02482 z dostosowaniem do zasad EC7

Po dostosowaniu polskiej metody normowej do wymogów EC7 nośności graniczne pala wciskanego i wyciąganego oblicza się według wzorów:

$$R_{c,cal} = R_{b,cal} + R_{s,cal} = S_b \cdot A_b \cdot q_b + \sum S_{s,i} \cdot A_{s,i} \cdot q_{s,i} \quad (4)$$

$$R_{st,cal} = \sum S_{st,i} \cdot A_{s,i} \cdot q_{s,i} \quad (5)$$

w których współczynniki technologiczne  $S_b$ ,  $S_{s,i}$  i  $S_{st,i}$  należy przyjmować według tabeli 4, PN.

W tablicy tej nie ujęto niektórych pali nowych technologii, między innymi pali CFA i przemieszczeniowych wkręcanych. W stosunku do pali CFA proponuje się przyjmować współczynniki technologiczne jak do pali wierconych głowicą pokrętną. W stosunku do pali przemieszczeniowych wkręcanych proponuje się przyjmować współczynniki technologiczne dla oporu podstawy jak do pali wierconych głowicą pokrętną, a dla oporów poboczniczy – jak do pali Vibro.

Wartości jednostkowe oporów gruntu  $q_b$  i  $q_s$  podane są w normie w zależności od rodzaju i stanu gruntu. Odpowiadają one osiadaniam pali na poziomie 3–5% średnicy ich trzonów. W celu dostosowania tych wielkości do założeń europejskich, aby odpowiadały osiadaniam pali równym 10% średnicy, zwiększono je o około 25% (według propozycji Sobali [2012]). Propozycję wartości zmodyfikowanych zestawiono w tabelach 1 i 2.

Tabela 1. Wartości oporów granicznych gruntu pod podstawą pala  $q_b$  [kPa]Table 1. Ultimate unit base resistance  $q_b$  [kPa]

| Rodzaj gruntu<br>Soil type | $I_D = 1,00$     | $I_D = 0,67$       | $I_D = 0,33$ | $I_D = 0,20$ |
|----------------------------|------------------|--------------------|--------------|--------------|
| Gr, saGr                   | 9700             | 6400               | 3750         | 2450         |
| CSa, MSa                   | 7300             | 4500               | 2700         | 1800         |
| FSa                        | 5150             | 3400               | 2050         | 1300         |
| siSa                       | 4200             | 2650               | 1450         | 850          |
| Rodzaj gruntu<br>Soil type | $I_L < 0, w = 0$ | $I_L = 0, w = w_p$ | $I_L = 0,50$ | $I_L = 0,75$ |
| clsiGr, clsisaGr, clGr     | 5200             | 3450               | 2050         | 1050         |
| clsiSa, saclSi, clSi       | 3450             | 2450               | 1050         | 550          |
| sasiCl, siCl, saCl, Cl     | 3500             | 2450               | 1000         | 500          |
| saSi, Si                   | 2300             | 1550               | 650          | 300          |

Tabela 2. Wartości oporów granicznych gruntu wzdłuż pobocznicy pala  $q_s$  [kPa]Table 2. Ultimate unit shaft resistance  $q_s$  [kPa]

| Rodzaj gruntu<br>Soil type | $I_D = 1,00$     | $I_D = 0,67$       | $I_D = 0,33$ | $I_D = 0,20$ |
|----------------------------|------------------|--------------------|--------------|--------------|
| Gr, saGr                   | 205              | 135                | 95           | 74           |
| CSa, MSa                   | 165              | 95                 | 60           | 43           |
| FSa                        | 125              | 78                 | 39           | 28           |
| siSa                       | 94               | 56                 | 31           | 20           |
| Rodzaj gruntu<br>Soil type | $I_L < 0, w = 0$ | $I_L = 0, w = w_p$ | $I_L = 0,50$ | $I_L = 0,75$ |
| clsiGr, clsisaGr, clGr     | 165              | 120                | 84           | 55           |
| clsiSa, saclSi, clSi       | 120              | 63                 | 39           | 18           |
| sasiCl, siCl, saCl, Cl     | 120              | 63                 | 31           | 14           |
| saSi, Si                   | 81               | 38                 | 20           | 9            |
| Mud                        | 60               | 22                 | 0            | 0            |

Wartości  $q_b$  i  $q_s$  przyjmowane do wzorów (6) i (7) należy dodatkowo zinterpolować z głębokością, zgodnie z wytycznymi PN i komentarzem do normy [Kosecki 1988].

Wartości charakterystyczne nośności pali  $R_{c;k}$  i  $R_{st;k}$  wyznacza się według formuł zawartych w EC7, wykorzystujących współczynniki korelacyjne  $\xi_3$  i  $\xi_4$  oraz współczynnik modelu  $\gamma_{Rd}$ , który przyjmuje się o wartościach:  $\gamma_{Rd} = 1,25$  do fundamentu na pojedynczym palu,  $\gamma_{Rd} = 1,12$  do fundamentu na dwóch palach i  $\gamma_{Rd} = 1,00$  do fundamentu na co najmniej trzech palach.

Zgodnie z podejściem obliczeniowym DA2 (DA2\*), nośność projektową pala określa się, stosując współczynniki  $\gamma_t = 1,1$  i  $\gamma_{s,t} = 1,15$ .

### Propozycja obliczania nośności pali Vibro i pali wielkośrednicowych na podstawie sondowań CPT(U)

Propozycję dla pali wciskanych przedstawili Gwizdała i Stęczniewski [2006, 2007]. Nośność graniczną pala oblicza się z wzoru (2), w którym wartości oporów jednostkowych  $q_b$  i  $q_{s,i}$  określa się z wyrażień:

$$q_b = \psi_1 \cdot \bar{q}_c \quad q_{s,i} = \frac{\bar{q}_{cs,i}}{\psi_{2,i}} \quad (6, 7)$$

gdzie:  $\bar{q}_c$ ,  $\bar{q}_{cs,i}$  – reprezentatywne wartości oporów stożka sondy CPT odpowiadające podstawie i poboczniczy pala w warstwie  $i$ ,  
 $\psi_1$ ,  $\psi_{2,i}$  – współczynniki nośności odpowiednio dla podstawy i poboczniczy pala w warstwie „ $i$ ” (tab. 3 i 4).

Reprezentatywną wartość  $\bar{q}_c$  przyjmuje się jako średnią ważoną z przedziału głębokości ( $l_1 + l_2$ ), gdzie  $l_1$  jest odcinkiem mierzonym od poziomu podstawy pala w górę, a  $l_2$  odcinkiem mierzonym od poziomu podstawy pala w dół. Długości odcinków  $l_1$  i  $l_2$  przyjmuje się z przedziału od  $1D_b$  do  $4D_b$  ( $D_b$  – średnica podstawy pala) w zależności od uwarstwienia podłoża gruntowego w rejonie podstawy pala (szczegóły opisano w wymienionych pracach Gwizdały i Stęczniewskiego).

Reprezentatywną wartość  $\bar{q}_{cs,i}$  przyjmuje się jako średnią ważoną z warstwy  $i$  gruntu o wysokości  $h_i$ .

Tabela 3. Współczynniki  $\psi_1$  i  $\psi_2$  w odniesieniu do pali Vibro  
 Table 3. Bearing capacity coefficients  $\psi_1$  and  $\psi_2$  for Vibro piles

| Rodzaj gruntu<br>Soil type | Współczynnik $\psi_1$<br>Coefficient $\psi_1$ |  | Rodzaj gruntu<br>Soil type  | Współczynnik $\psi_2$<br>Coefficient $\psi_2$ |   |
|----------------------------|---|--|-----------------------------|---|---|
|                            | $\bar{q}_c$                                   | Wzór<br>Formula  |                             | $\bar{q}_{cs}$                                | Wzór<br>Formula   |
| Wszystkie<br>All soils     | $\leq 4$ MPa                                  | $\psi_1 = 1,0$   | clSi,<br>sacIiSi,<br>clsiSa | 0,5 ÷ 12<br>MPa                               | $\psi_2 = 18,0 \cdot \frac{\bar{q}_{cs}}{p_{ref}} + 9,4$  |
| Wszystkie<br>All soils     | 4 ÷ 40<br>MPa                                 | $\psi_1 = 1,9 \cdot \left( \frac{\bar{q}_c}{p_{ref}} \right)^{-0,455}$ | siSa                        | 4 ÷ 40 MPa                                    | $\psi_2 = 10,3 \cdot \frac{\bar{q}_{cs}}{p_{ref}} + 82,6$ |
|                            |   |  | FSa                         | 4 ÷ 40 MPa                                    | $\psi_2 = 7,0 \cdot \frac{\bar{q}_{cs}}{p_{ref}} + 86,3$  |
|                            |   |  | MSa i CSa                   | 4 ÷ 40 MPa                                    | $\psi_2 = 5,9 \cdot \frac{\bar{q}_{cs}}{p_{ref}} + 58,6$  |

$p_{ref} = 1,0$  MPa



Tabela 4. Współczynniki  $\psi_1$  i  $\psi_2$  w odniesieniu do pali wierconych wielkośrednicowych  
 Table 4. Bearing capacity coefficients  $\psi_1$  and  $\psi_2$  for large diameter bored piles

| Współczynnik $\psi_1$<br>Coefficient $\psi_1$ |                | Współczynnik $\psi_2$<br>Coefficient $\psi_2$            |                            |   |  |
|---|----------------|--|----------------------------|---|--|
| Rodzaj gruntu<br>Soil type                    | $\bar{q}_c$    | Wzór<br>Formula  | Rodzaj gruntu<br>Soil type | $\bar{q}_{cs}$ oraz $D$<br>$\bar{q}_{cs}$ and $D$ | Wzór<br>Formula  |
| Wszystkie<br>All soils                        | 10 ÷ 40<br>MPa | $\psi_1 = 0,177 - 0,001 \cdot \frac{\bar{q}_c}{p_{ref}}$ | siSa                       | 4 ÷ 40 MPa  | $\psi_2 = 12,4 \cdot \frac{\bar{q}_{cs}}{p_{ref}} + 110$ |
|   |                |  | FSa                        | 4 ÷ 40 MPa  | $\psi_2 = 9,4 \cdot \frac{\bar{q}_{cs}}{p_{ref}} + 88$   |
|   |                |  | MSa i<br>CSa               | 4 ÷ 40 MPa<br>$D < 1,5$ m                         | $\psi_2 = 6,3 \cdot \frac{\bar{q}_{cs}}{p_{ref}} + 69$   |
|   |                |  | MSa i<br>CSa               | 4 ÷ 40 MPa<br>$D \geq 1,5$ m                      | $\psi_2 = 10,3 \cdot \frac{\bar{q}_{cs}}{p_{ref}} + 126$ |

$p_{ref} = 1,0$  MPa,  $D$  – średnica pala – pile diameter

W przypadku pali wierconych wielkośrednicowych wartości współczynników  $\psi_1$  i  $\psi_2$  odnoszą się w zasadzie tylko do gruntów niespoistych. Nie jest zatem wskazane wykorzystywanie proponowanej metody do obliczania nośności tego rodzaju pali w gruntach spoistych. W odniesieniu z kolei do pali Vibro metoda może zawyżać nośność podstawy ( $R_b$ ), a zaniżać nośność pobocznic ( $R_s$ ). Z tego względu zaleca się ostrożność w stosowaniu jej do pali o małym zagłębieniu w warstwie nośnej (poniżej  $5D$ ).

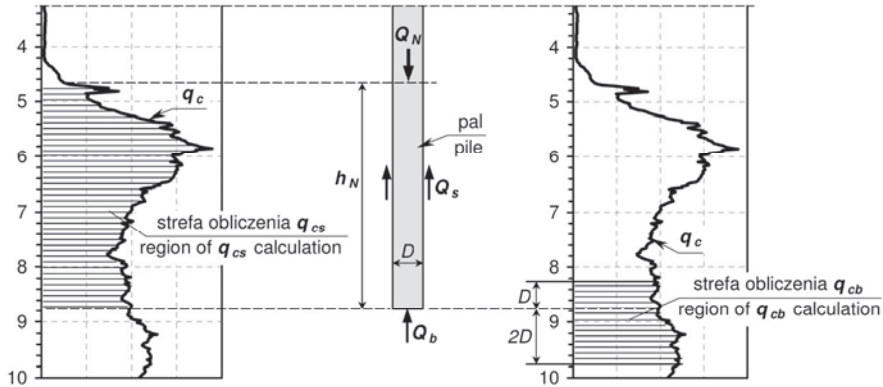
### Propozycja obliczania nośności pali przemieszczeniowych wkręcanych w gruntach niespoistych na podstawie sondowań CPT(U)

Propozycję przedstawił Krasiński [2013a, b]. Metodę obliczeniową opracował na podstawie ponad 20 badań nośności pali, oprzyrządowanych w aparaturę umożliwiającą pomiar oporów pobocznic i podstawy pala. Badania były powiązane z badaniami CPT podłoża gruntowego, wykonywanymi dokładnie w miejscach lokalizacji pali. Badania zrealizowano na terenach deltowych północnej Polski i dlatego stosowanie metody powinno być ograniczone do pali wciskanych zagłębionych w gruntach nośnych z nawodnionych piasków drobnych, średnich i pospółek pochodzenia wodno-łodowcowego.

Podobnie jak w opisanych wyżej metodach, nośność graniczną pala wciskanego oblicza się z ogólnego wzoru (2), w którym wartości oporów jednostkowych  $q_b$  i  $q_{s,i}$  określa się z:

$$q_{b,gr} = 2475 \cdot \left( \frac{q_{cb}}{p_{ref}} \right)^{0,16} \quad [\text{kPa}]; \quad q_{s,i} = 65 \cdot \left( \frac{q_{cs,i}}{p_{ref}} \right)^{0,23} \quad [\text{kPa}] \quad (8, 9)$$

gdzie:  $q_{cb}$ ,  $q_{cs}$  – ekwiwalentne wartości oporu stożka sondy CPT określane z wykresu sondowania według schematu na rysunku 2 (przy wyznaczaniu  $q_{cs}$  grunt nośny zaleca się podzielić na podwarstwy), MPa.  
 $p_{ref}$  – naprężenie referencyjne o wartości 1,0 MPa.



Rys. 2. Schemat obliczania ekwiwalentnych wartości oporów stożka  $q_{cs}$  i  $q_{cb}$ .  
 Fig. 2. Calculation scheme of the equivalent cone resistances  $q_{cs}$  and  $q_{cb}$

We wzorach (8) i (9) wartości  $q_{cb}$  i  $q_{cs,i}$  należy podawać w MPa i powinny one spełniać warunki:

$$q_{cs} \in (5 \div 25) \text{ [MPa]} \quad \text{i} \quad q_{cb} \in (10 \div 30) \text{ [MPa]} \quad (10)$$

Przy zagłębieniu pala w gruncie nośnym ( $h_N$ ) mniejszym niż  $5D$  należy zastosować redukcję jego nośności za pomocą współczynnika  $\eta_{hN}$ :

$$R_{t;cal} = \eta_{hN} \cdot (R_{b;cal} + R_{s;cal}), \quad \text{gdzie} \quad \eta_{hN} = 0,4 + 0,6 \cdot \frac{h_N}{5D_p} \leq 1,0 \quad (11, 12)$$

Współczynniki korelacyjne do pali przemieszczeniowych wkręcanych proponuje się nieznacznie obniżyć w stosunku do propozycji zawartej w EC7 ze względu na bardziej wyrównaną charakterystykę pracy tego rodzaju pali w gruncie w porównaniu z palami innych technologii oraz przy kontroli warunków gruntowych podczas wykonania pali (rejestracja oporów wkręcania). Proponowane wartości współczynników  $\xi_3$  i  $\xi_4$  podano w tabeli 5.

Tabela 5. Wartości współczynników korelacyjnych  $\xi_3$  i  $\xi_4$  ( $n$  – liczba zbadanych profili CPT)  
 Table 5. Correlation coefficients  $\xi_3$  and  $\xi_4$  values ( $n$  – number of CPT profiles)

| $\xi$ dla $n$<br>$\xi$ for $n$ | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 7    | 10   |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\xi_3$                        | 1,3  | 1,25 | 1,21 | 1,19 | 1,17 | 1,15 | 1,13 |
| $\xi_4$                        | 1,25 | 1,15 | 1,12 | 1,09 | 1,05 | 1,0  | 1,0  |



### Propozycja obliczania nośności pali na podstawie sondowań CPT według PN-EN 1997-2:2007

W rozpatrywanej normie zawarto dwie propozycje szacowania oporów gruntu wokół pali na podstawie wyników sondowań CPT podłoża gruntowego.

W pierwszej propozycji, opisanej w pkt D.6 normy, podaje się bardzo proste korelacje pomiędzy oporami gruntu niespoistego wzdłuż pobocznic i pod podstawą pala ( $q_s$  i  $q_b$ ) a oporami ( $q_c$ ) stożka sondy wciskanej z końcówką elektryczną. Korelacje te zestawiono w tabelach 6 i 7.

Tabela 6. Wartości oporów gruntów niespoistych pod podstawą pala ( $q_b$ )  
Table 6. Unit base resistance ( $q_b$ ) for non-cohesive soils

| Znormalizowane osiadanie pala<br>Normalized pile settlement | Opór gruntu pod podstawą pala $q_b$ [MPa] w zależności od średniego oporu stożka sondy $q_c$ [MPa]<br>Base soil resistance $q_b$ [MPa] in relation to average cone resistance $q_c$ [MPa] |            |            |            |
|---|---|------------|------------|------------|
|   | $q_c = 10$  | $q_c = 15$ | $q_c = 20$ | $q_c = 25$ |
| $s/D_b$   |   |            |            |            |
| 0,02  | 0,70  | 1,05       | 1,40       | 1,75       |
| 0,03  | 0,90  | 1,35       | 1,80       | 2,25       |
| 0,10  | 2,00  | 3,00       | 3,50       | 4,00       |

Wartości pośrednie można interpolować liniowo – Intermediate values can be interpolated linearly.  
W przypadku pali z powiększoną podstawą, podane wartości  $q_b$  należy przemnożyć przez 0,75.  
In the case of piles with enlarged basis the given  $q_b$  values should be multiplied by 0.75.

Tabela 7. Wartości oporów gruntów niespoistych na pobocznicę pala ( $q_s$ )  
Table 7. Unit shaft resistance ( $q_s$ ) for non-cohesive soils

| Średni opór stożka sondy $q_c$ [MPa]<br>Average cone resistance $q_c$ [MPa] | Wartość oporu gruntu na pobocznicę pala $q_s$ [MPa]<br>Value of soil shaft resistance $q_s$ [MPa] |
|---|---|
| 0   | 0   |
| 5   | 0,040   |
| 10  | 0,080   |
| $\geq 15$   | 0,120   |

Wartości pośrednie można interpolować liniowo – Intermediate values can be interpolated linearly.

Propozycję zapożyczono z normy niemieckiej DIN 1054 (2003-1), w której podano informację, że metoda odnosi się do pali wierconych wielkośrednicowych. Informacji takiej nie zamieszczono niestety w normie PN-EN 1997-2:2007. Między innymi z tego powodu autorzy nie rekomendują powyższej propozycji, jak również dlatego, że jest zbyt uproszczona, zaniża wartość oporu gruntu pod podstawą pala oraz nie podaje procedury wyznaczania średniej wartości  $q_c$  w rejonie podstawy pala.

Druga propozycja, opisana w pkt D.7 normy, jest bardziej złożona niż pierwsza i częściowo uwzględnia technologię pali. Poniżej scharakteryzowano ją skrótowo.

Opór graniczny gruntu pod podstawą pala ( $q_b$ ) określa się z:

$$q_b = 0,5 \cdot \alpha_p \cdot \beta \cdot s \cdot \left( \frac{q_{c,I;\text{mean}} + q_{c,II;\text{mean}}}{2} + q_{c,III;\text{mean}} \right) \leq 15 \text{ MPa} \quad (13)$$

gdzie:  $\alpha_p$  – współczynnik klasy pala, według tabeli 8,  
 $\beta$  – współczynnik kształtu podstawy pala; w przypadku pali o przekroju kołowym lub kwadratowym i bez powiększenia podstawy  $\beta = 1,0$ ,  
 $s$  – dodatkowy współczynnik uwzględniający kształt podstawy pala; w przypadku pali o przekroju kołowym lub kwadratowym  $s = 1,0$ ,  
 $q_{c,I;\text{mean}}$ ,  $q_{c,II;\text{mean}}$  i  $q_{c,III;\text{mean}}$  – średnie wartości oporu stożka sondy z odpowiednich przedziałów głębokości w rejonie podstawy pala (szczegóły opisane w normie).

Opór graniczny gruntu wzdłuż poboczniczy pala ( $q_s$ ) określa się z:

$$q_s = \alpha_s \cdot q_{c;z;a} \quad (14)$$

gdzie:  $\alpha_s$  – współczynnik według tabel 8 i 9,  
 $q_{c;z;a}$  – wartość odciętej  $q_c$  na głębokości  $z$ ; według normy  $q_{c;z;a} \leq 12 \text{ MPa}$  lub  $15 \text{ MPa}$ .

Tabela 8. Maksymalne wartości współczynników  $\alpha_p$  i  $\alpha_s$  dla pali w piaskach i pospółkach  
 Table 8. Maximum values of  $\alpha_p$  and  $\alpha_s$  coefficients for piles in sand and sandy gravel

| Rodzaj pala (średnica > 150 mm)<br>Type of pile (diameter > 150 mm)         | $\alpha_p$ | $\alpha_s$ |
|---|------------|------------|
| Pale żelbetowe prefabrykowane wbijane<br>Precast concrete driven piles      | 1,0        | 0,010      |
| Pale wbijane Vibro i Franki<br>Driven Vibro and Franki piles                | 1,0        | 0,012      |
| Pale formowane świdrem ciągłym (CFA)<br>Continuous Flight Auger piles (CFA) | 0,8        | 0,006      |
| Pale wiercone w rurach osłonowych<br>Bored piles in casings                 | 0,6        | 0,005      |

Tabela 9. Maksymalne wartości współczynnika  $\alpha_s$  dla pali w ilach i pyłach  
 Table 9. Maximum values of  $\alpha_p$  and  $\alpha_s$  coefficients for piles in clay and silt

| Rodzaj gruntu (Soil type) | $q_c$ [MPa] | $\alpha_s$ |
|---------------------------|-------------|------------|
| II – Clay                 | > 3,0       | 0,030      |
| II – Clay                 | ≤ 3,0       | 0,020      |
| Pył – Silt                |             | 0,025      |

Podobnie jak wyżej, autorzy nie rekomendują opisanej propozycji. Wartość 0,5 we wzorze (13) jest w pewnym sensie współczynnikiem skali pomiędzy oporami  $q_b$  i  $q_c$  ( $\alpha_p$  należy traktować jako współczynnik technologiczny). Przyjęcie stałej wartości współczynnika skali jest błędne. Ogólnie wiadomo, że zmniejsza się ona nieliniowo wraz ze

wzrostem oporu  $q_c$ . Zatem wzór (13) znacznie zawyża wartość oporu  $q_b$  w gruntach zagęszczonych i bardzo zagęszczonych. Ograniczenie do 15 MPa nie rozwiązuje problemu, gdyż jest zbyt duże. Zdaniem autorów, nie powinno przekraczać wartości 8–10 MPa. Z kolei wartości współczynnika  $\alpha_s$  w tabeli 8 wydają się być zaniżone. Ponadto sposoby wyznaczania wartości  $q_{c:I,mean}$ ,  $q_{c:II,mean}$ ,  $q_{c:III,mean}$  oraz  $q_{c:za}$  są niejasno opisane w normie i mogą sprawiać trudności we właściwej interpretacji. Podane uwagi wymieniono jako najważniejsze.

Istnieją również propozycje prognozowania pełnej krzywej osiadania pali  $Q-s$  na podstawie wyników sondowań CPT. W odniesieniu do pali Vibro metodą taką przedstawiono w pracach Gwizdały i Więclawskiego [2015] oraz Więclawskiego [2015a, b], a w odniesieniu do pali SDP – w pracach Krasieńskiego [2013a, b].

### Tarcie negatywne

Tarcie negatywne proponuje się obliczać zgodnie z zasadami normy PN-83/B-02482. W gruntach słabonośnych (organiczne i luźne nasypy) można przyjmować wartości  $f_{sn} = 5 \div 10$  kPa, niezależnie od głębokości. W gruntach mineralnych wytrzymałych, tarcie negatywne można obliczać według takich samych zasad jak tarcie pozytywne, ale ze współczynnikiem technologicznym jak dla pali wyciąganych –  $S_{st} = 0,6 \div 0,8$ . Tarcie negatywne powinno się przyjmować tylko w sytuacjach, w których zachodzą okoliczności jego wystąpienia. Zwraca się również uwagę, że według EC7 tarcie negatywne należy przyjmować po stronie oddziaływań, ze współczynnikiem  $\gamma_G$ .

### Nośność pali w grupie

W EC7 zagadnienie nośności pali w grupie jest tylko wzmiankowane i to bardzo ogólnie. Dlatego proponuje się w tym względzie stosować zasady według PN-83/B-02482 oraz zalecenia zawarte w pracy Gwizdały [2011]. W zależności od technologii pali, warunków gruntowych i rozstawu pali nośność grupy pali może być większa, równa lub mniejsza od sumy nośności pali pojedynczych [Tejchman i in. 2001]. W przypadkach, w których nośność grupy pali jest mniejsza od sumy nośności pali pojedynczych, wyznacza się współczynnik  $m_1$ , którym redukuje się nośność poboczniczy pala:

$$R_{rg;cal} = R_{b;cal} + m_1 \cdot R_{s;cal}; \quad R_{stg;cal} = m_1 \cdot R_{st;cal} \quad (15, 16)$$

Analizy teoretyczne i badania modelowe wykazują, że nakładanie się na siebie stref oddziaływania sąsiednich pali powoduje faktycznie redukcję oporu poboczniczy pali wciśkanych, ale jednocześnie wpływa na wzrost oporów podstawy. Ten drugi efekt jest jednak pomijany w obliczeniach ze względów bezpieczeństwa.

W odniesieniu do pali skrajnych w grupie autorzy proponują korektę współczynnika  $m_1$  według formuł:

$$- \text{dla pali krawędziowych: } m_{1k} = 0,75 \cdot m_1 + 0,25 \quad (17)$$

$$- \text{dla pali narożnych: } m_{1n} = 0,5 \cdot m_1 + 0,5 \quad (18)$$

Należy pamiętać, że nośność całej grupy pali nie może przekroczyć nośności zastępczego fundamentu blokowego wyznaczonego zewnętrznym obrysem pali i głębokością ich podstaw [Gwizdała 2011]. Analiza nośności takiego fundamentu zastępczego pozwala



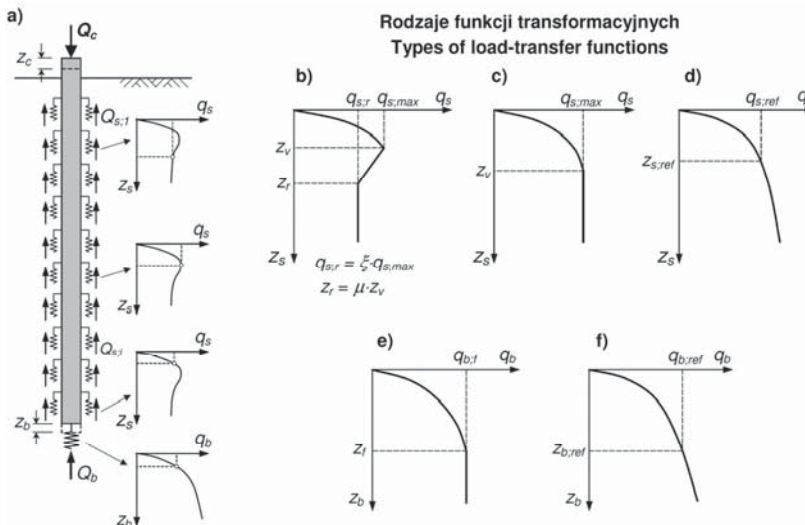
stwierdzić, czy zwiększanie liczby pali w istniejącym obrysie fundamentu jest zabiegiem efektywnym, czy nie. Analizę taką należy jednak przeprowadzać z rozważą, szczególnie w odniesieniu do składnika nośności zależnego od współczynnika  $N_{\gamma}$  i szerokości fundamentu ( $B_g$ ).

## PROPOZYCJE DOTYCZĄCE OBLICZANIA OSIADANIA PALI I FUNDAMENTÓW PALOWYCH

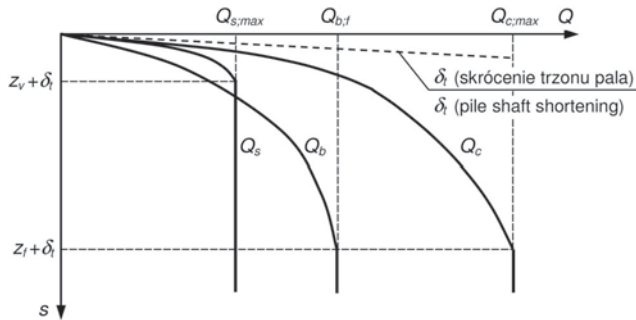
Zagadnienie osiadania fundamentów palowych jest często traktowane drugorzędnie w projektowaniu obiektów budowlanych. Wynika to z faktu i założenia, że fundamenty palowe ulegają małym osiadaniami. Również w EC7 zagadnienie osiadania pali jest potraktowane bardzo ogólnie. W ostatnim czasie dostrzega się jednak wagę obliczania i prognozowania osiadań pali i grup palowych, głównie w kontekście poprawności obliczeń statycznych konstrukcji posadawianej na palach. Podatność pali oraz sztywność oczepu wieńczącego w dużym stopniu decydują o rozkładzie i wartościach sił w palach, sił przekrojowych w fundamencie oraz wytyżeń elementów konstrukcyjnych nadbudowy. W modelowaniu schematów fundamentów palowych bardzo przydatna jest znajomość charakterystyk obciążenie-osiadanie pali.

### Metoda funkcji transformacyjnych

Do prognozowania krzywej osiadania pala pojedynczego proponuje się metodę funkcji transformacyjnych [Gwizdała 1996], która została szczegółowo opisana także w wielu innych publikacjach. Schemat obliczeniowy pala do metody przedstawiono na rysunku 3, a wynik obliczeń w postaci wykresów obciążenie-osiadanie pokazano na rysunku 4.



Rys. 3. Schemat współpracy pala/kolumny z gruntem w metodzie funkcji transformacyjnych  
Fig. 3. Soil-pile interaction scheme in the load-transfer functions method



Rys. 4. Krzywe obciążenie-osiadanie wyznaczone metodą funkcji transformacyjnych  
Fig. 4. Load-settlement curves obtained from transfer functions method

Funkcje transformacyjne najczęściej przyjmuje się o postaciach c) i e) pokazanych na rysunku 3 i wyraża zależnościami potęgowymi:

$$q_b = q_{b:f} \left( \frac{s_b}{z_f} \right)^\beta \quad \text{dla } q_b \leq q_{b:f} \quad \text{oraz} \quad q_s = q_{s:\max} \left( \frac{s_s}{z_v} \right)^\alpha \quad \text{dla } q_s \leq q_{s:\max} \quad (19, 20)$$

gdzie:  $\alpha$  – wykładnik funkcji  $q_s$ - $z$ , który przyjmuje się z przedziału 0,3 do 0,5,  
 $z_v$  – przemieszczenie poboczniczy pala, przy którym mobilizuje się maksymalny opór tarcia gruntu  $q_{s:\max}$ ;  $z_v$  przyjmowane jest najczęściej o wartości 5 mm lub  $0,01D$ ,  
 $\beta$  – wykładnik funkcji  $q_b$ - $z$ , którego wartość przyjmuje się najczęściej z przedziału od 0,25 do 0,6,  
 $z_f$  – przemieszczenie podstawy pala, przy którym mobilizuje się graniczny opór gruntu ( $q_{b:f}$ ) pod podstawą;  $z_f$  przyjmowane jest najczęściej o wartości od  $0,05D$  do  $0,1D$ .

Wartości oporów maksymalnych i granicznych  $q_{s:\max}$  i  $q_{b:f}$  można określać opisanymi wcześniej metodami obliczania nośności pali.

Parametry funkcji transformacyjnych dla wybranych rodzajów pali zaproponowano w tabeli 10.

Tabela 10. Proponowane parametry funkcji transformacyjnych  
Table 10. Proposed transfer function parameters

| Rodzaj pali – Piles type   | $z_v$   | $\alpha$ | $z_f$   | $\beta$ |
|--|---------|----------|---------|---------|
| Pale żelbetowe prefabrykowane wbijane<br>Precast concrete driven piles | $0,01D$ | 0,50     | $0,05D$ | 0,25    |
| Pale wiercone i CFA – Bored and CFA piles                              |         |          |         |         |
| – grunty niespoiste – non-cohesive soils                               | $0,01D$ | 0,50     | $0,05D$ | 0,50    |
| – grunty spoiste – cohesive soils                                      | $0,01D$ | 0,25     | $0,05D$ | 0,50    |
| Pale Vibro – Vibro piles   | $0,01D$ | 0,25     | $0,05D$ | 0,20    |
| Pale wkręcane – Screw displacement piles<br>SDP, SDC, CMC              | 10 mm   | 0,38     | $0,1D$  | 0,38    |

Niekiedy można w obliczeniach pominąć odkształcalność trzonu pala, dzięki czemu nie wymagają one iteracji i można je wykonać na oporach całkowitych pobocznicy i podstawy pala:

$$(Q_b-s)_{\text{cal}} = R_{b;\text{cal}} \left( \frac{s}{z_f} \right)^\beta \leq R_{b;\text{cal}}; \quad (Q_s-s)_{\text{cal}} = R_{s;\text{cal}} \left( \frac{s}{z_v} \right)^\alpha \leq R_{s;\text{cal}} \quad (21, 22)$$

$$(Q-s)_{\text{cal}} = (Q_b-s)_{\text{cal}} + (Q_s-s)_{\text{cal}} \quad (23)$$

### Charakterystyki $Q-s$ pali w grupie

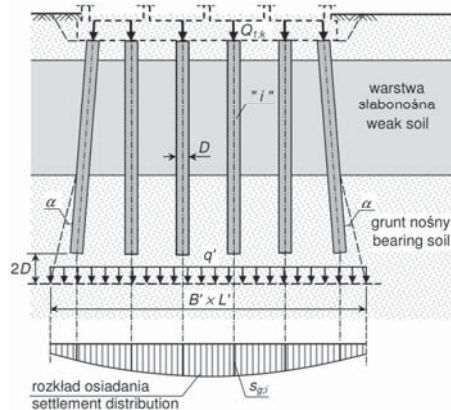
Wyznaczanie charakterystyk pracy pali w grupie jest zagadnieniem złożonym. Do obliczeń projektowych można przyjąć założenie, że charakterystyka pala „i” pracującego w grupie wynika z sumy jego osiadania jako pala pojedynczego ( $s_{1;i}$ ) i osiadania gruntu zalegającego pod podstawami pali ( $s_{g;i}$ ). Wartości osiadań  $s_{1;i}$  i  $s_{g;i}$  wyznacza się przy orientacyjnej (np. średniej) wartości obciążenia charakterystycznego przypadającego na pojedynczy pal ( $Q_{1;k}$ ).

Wartość  $s_{1;i}$  odpowiadającą sile  $Q_{1;k}$  odczytuje się z krzywej osiadania pala pojedynczego  $(Q-s)_{1;k}$  (rys. 6), zmodyfikowanej przez uwzględnienie oddziaływania pali sąsiednich za pomocą formuły:

$$(Q-s)_{1;k} = (Q_b-s)_k + m_1 \cdot (Q_s-s)_k \quad (24)$$

gdzie współczynnik  $m_1$  jest współczynnikiem redukcyjnym omówionym wcześniej, z dodatkowym uwzględnieniem pali skrajnych – krawędziowych ( $m_{1k}$ ) i narożnych ( $m_{1n}$ ) – wzory (17) i (18).

Wartość osiadania ( $s_{g;i}$ ) można wyznaczyć np. metodą fundamentu zastępczego według schematu przedstawionego na rysunku 5 lub według innych schematów proponowanych w literaturze.



Rys. 5. Schemat do obliczania osiadań gruntu zalegającego pod podstawami pali  
Fig. 5. Scheme for the estimation of soil settlement underneath the pile bases

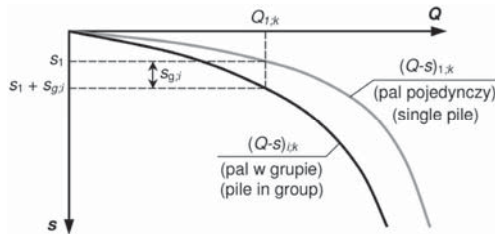
Obliczenia osiadania ( $s_g$ ) można przeprowadzić dowolną metodą, np. odkształceń jednoosiowych pod obszarem prostokątnym  $B' \times L'$ . W celu urealnienia wyników obliczeń warto uwzględnić wzrost modułu ścisłości ( $M_0$ ) gruntu z naprężeniem, włączając w to również naprężenie dodatkowe od nacisków ( $q'$ ), np. według formuły zaproponowanej w PN-EN 1997-2:2007:

$$M_0(z) = M_{0,\text{ref}} \cdot \left[ \frac{\sigma'_{v0}(z) + 0,5 \cdot \Delta\sigma'_v(z)}{p_{\text{ref}}} \right]^{w_2} \quad (25)$$

gdzie:  $M_{0,\text{ref}}$  – wartość referencyjna modułu ścisłości, odpowiadająca naprężeniu  $p_{\text{ref}} = 100 \text{ kPa}$ ,  
 $\sigma'_{v0}(z)$  – składowa pionowa naprężenia efektywnego pierwotnego na głębokości  $z$ ,  
 $\Delta\sigma'_v(z)$  – składowa pionowa naprężenia efektywnego od obciążenia budowlą na głębokości  $z$ ,  
 $w_2$  – wykładnik, który można przyjmować o wartości 0,5 do gruntów niespoistych i 0,6 do gruntów spoistych.

Rozkład osiadań można opisać funkcją  $s_g(x, y)$ , umożliwiającą dalej wyznaczenie wartości osiadania ( $s_{g,i}$ ) pod dowolnym palem „ $i$ ”.

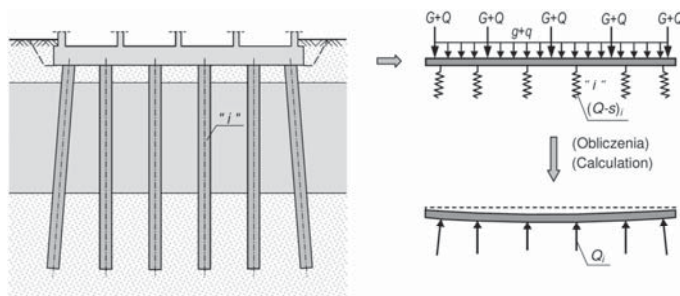
Charakterystykę ( $Q-s$ ) <sub>$i,k$</sub>  dostosowaną do warunków pracy w grupie wyznacza się według schematu na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat ideowy wyznaczania charakterystyki  $Q-s$  pala „ $i$ ” w grupie

Fig. 6. Scheme of  $Q-s$  characteristic determination for an individual pile in a group of piles

W następnym etapie obliczeń statycznych przygotowuje się schemat obliczeniowy fundamentu palowego, w którym każdy pal wyrażony jest podporą sprężystą o indywidualnej, nieliniowej charakterystyce ( $Q-s$ ) <sub>$i$</sub>  (rys. 7).



Rys. 7. Schemat obliczeniowy fundamentu palowego

Fig. 7. Calculation scheme for pile foundation



Po rozwiązaniu układu statycznego w wynikach obliczeń otrzymuje się zarówno rozkład sił w palach, osiadania fundamentu z uwzględnieniem sztywności oczepu fundamentowego, jak i deformację i siły wewnętrzne w konstrukcji oczepowej.

Obliczenia fundamentów palowych z uwzględnieniem współpracy oczepu fundamentowego z nierównomiernie osiadającą grupą pali można realizować również metodą hybrydową proponowaną i opisywaną między w pracach: Dyki [2001], Gwizdały i Dyki [2002] oraz Gwizdały [2011].

### **Metoda elementów skończonych (MES)**

Obliczanie statyczne fundamentów palowych, a głównie określanie ich osiadań i przemieszczeń, coraz częściej realizowane jest metodą numeryczną przy użyciu zorientowanych geotechnicznie programów komputerowych do analizy MES. Wciąż istotnym i trudnym problemem jest odwzorowanie numeryczne niektórych technologii wykonywania pali, głównie pali przemieszczeniowych. W celu uzyskania miarodajnych wyników obliczeń niezbędne jest zatem skalibrowanie modelu numerycznego pala z wynikami badań pali w terenie (próbnych obciążeń statycznych).

W odniesieniu do fundamentów palowych najbardziej miarodajne wyniki obliczeń uzyskuje się w analizie 3D. Niektóre schematy palowe można analizować w układzie płaskim 2D (PSO), przy czym należy wówczas stosować odpowiednie przeliczniki i elementy zastępcze, dostosowujące układ płaski do rzeczywistego układu przestrzennego.

Analizy MES fundamentów palowych w polskiej praktyce projektowej są jak dotąd wykorzystywane rzadko, zazwyczaj w dużych i złożonych projektach, i przy współpracy z ośrodkami naukowymi. Przykładowe analizy numeryczne osiadania pali w grupie przedstawiono między innymi w pracach Gwizdały i Kęsika [2015a, b].

## **OBLICZANIE FUNDAMENTÓW PALOWYCH OBCIĄŻONYCH SIŁAMI POZIOMYMI**

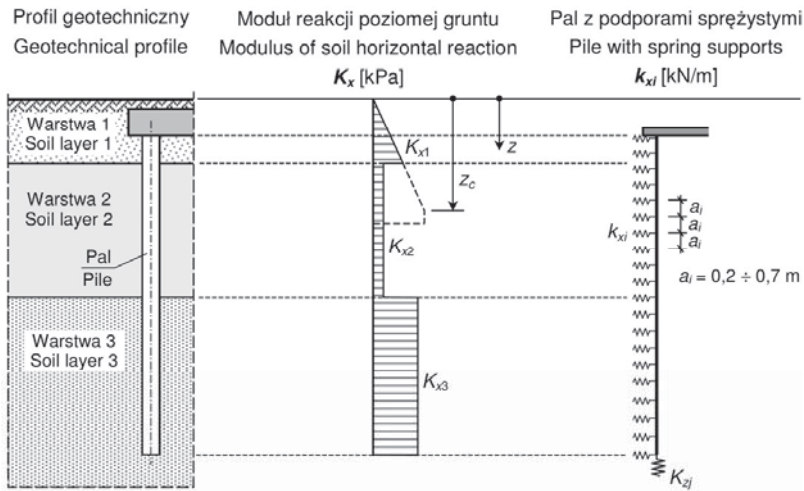
Fundamenty palowe obciążone w sposób złożony z dużym udziałem sił poziomych są w Polsce obliczane najczęściej metodą uogólnioną [Kosecki 2006]. W metodzie tej pale modeluje się w postaci prętów współpracujących z szeregiem podpór sprężysto-plastycznych, odwzorowujących podłoże gruntowe (rys. 8).

Parametry podpór sprężystych wyznacza się metodami opisanymi pracy Koseckiego [2006].

Po rozwiązaniu schematu statycznego układu palowego zwykle nie sprawdza się nośności pali na obciążenia poziome, natomiast analizuje się siły osiowe i momenty zginające w palach oraz przemieszczenia układu, które stanowią główne kryterium weryfikacji rozwiązania projektowego.

Stosuje się również obliczenia z wykorzystaniem równania różniczkowego ugięcia odkształconego pręta i krzywych typu  $p$ - $y$  [Gwizdała 2013].



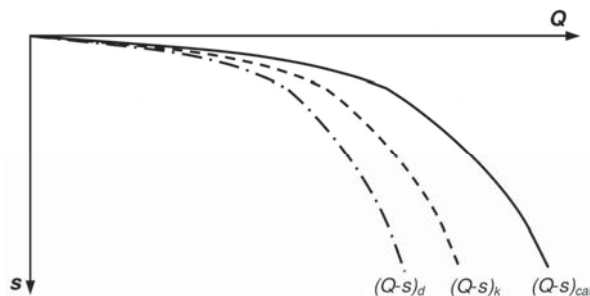


Rys. 8. Schemat pala w metodzie uogólnionej  
Fig. 8. Pile modeled in the "generalized method"

## KONCEPCJA PODEJŚCIA DO PROJEKTOWANIA FUNDAMENTÓW PALOWYCH

Obecnie coraz częściej wykorzystywana jest koncepcja podejścia do projektowania fundamentów palowych, której ideą jest rezygnacja z klasycznego pojęcia nośności pala wyrażonej w postaci siły o określonej wartości liczbowej. Nośność tę zastępuje się funkcją (charakterystyką) obciążenie-osiadanie ( $Q-s$ ) pala. Koncepcję dokładniej opisano w pracy Krawczyńskiego [2015].

Po wyznaczeniu krzywej ( $Q-s$ )<sub>cal</sub>, np. metodą funkcji transformacyjnych [Gwizdała 1996, 2011], wyznacza się krzywą charakterystyczną ( $Q-s$ )<sub>k</sub> oraz krzywą obliczeniową pala ( $Q-s$ )<sub>d</sub> (rys. 9).



Rys. 9. Charakterystyki  $Q-s$  pala: obliczona, charakterystyczna i projektowa  
Fig. 9. Load-settlement curves of pile: calculated, characteristic and design

Krzywą charakterystyczną wyznacza się zgodnie z EC7 z wyrażenia:

$$(Q-s)_k = \min \left\{ \frac{(Q-s)_{\text{cal};\text{min}}}{\xi_3}, \frac{(Q-s)_{\text{cal};\text{min}}}{\xi_4} \right\} \quad (26)$$

a krzywą projektową z wyrażenia

$$(Q-s)_d = \frac{(Q-s)_k}{\gamma_t} \quad (27)$$

Propozycje wyznaczania krzywej  $Q-s$  charakterystycznej i projektowej przedstawiono również w pracach Więclawskiego [2015a, b] oraz Gwizdały i Więclawskiego [2015]. Krzywą charakterystyczną  $(Q-s)_k$  wykorzystuje się w obliczeniach statycznych fundamentu palowego (np. w schemacie według rys. 7) w celu sprawdzenia warunków SLS, a krzywą projektową  $(Q-s)_d$  – w obliczeniach w celu sprawdzenia warunków ULS. W analizie wyników obliczeń poprawność posadowienia na palach ocenia się na podstawie przemieszczeń i deformacji oczepu fundamentowego oraz stopnia wyężenia jego konstrukcji (czasami również elementów nadbudowy). W założeniach koncepcji nie ma potrzeby sprawdzania warunku nośności pali (ULS GEO), natomiast siły i ewentualne momenty zginające w palach są potrzebne do sprawdzenia warunku ULS STR w odniesieniu do ich trzonów. Zdaniem autorów, proponowana koncepcja projektowa jest bardziej racjonalna i wygodniejsza w stosowaniu od podejścia klasycznego i wskazane jest, aby rozpowszechniła się w polskiej praktyce projektowej.

## PODSUMOWANIE

Pomimo obowiązywania EC7 w Polsce obliczenia fundamentów palowych nadal opierają się głównie na zasadach i metodach zawartych w polskiej normie PN-83/B-02482. Norma ta została opracowana na podstawie wieloletnich doświadczeń krajowych i dobrze sprawdza się w warunkach geotechnicznych Polski. W obliczeniach nośności pali stosuje się podstawowy wzór statyczny, ale wyniki weryfikuje się próbnymi obciążeniami statycznymi (SPLT) i/lub badaniami dynamicznymi (PDA, DLT) na palach wykonywanych w miejscu budowy.

Osiadania i charakterystyki obciążenie-osiadanie pali określa się na podstawie badań terenowych (SPLT, PDA), natomiast analityczne prognozowanie krzywej obciążenie-osiadanie pala może być realizowane metodą funkcji transformacyjnych.

W ostatnich latach wprowadza się i rozpowszechnia w Polsce metody obliczania nośności i prognozowania charakterystyk  $Q-s$  pali, opierające się na bezpośrednich wynikach badań *in situ* podłoża gruntowego: CPT(U), DMT i PMT. Metody te opracowano na podstawie wyprowadzonych metodami statystycznymi empirycznych zależności i korelacji między wynikami badań podłoża gruntowego i wynikami próbnymi obciążeń statycznych pali. Jak dotąd krajowe metody tego rodzaju odnoszą się do pali niektórych technologii i zagłębionych głównie w podłożu z gruntów niespoistych. Brakuje dobrej metody tego rodzaju dla pali innych technologii i zagłębionych w gruntach spoistych.

W przypadku ważnych i odpowiedzialnych obiektów zaleca się stosowanie obliczeń numerycznych MES z wykorzystaniem zaawansowanych modeli ośrodka gruntowego. Wskazane jest również stosowanie metod obserwacyjnych projektowania posadowień na palach.

## PIŚMIENNICTWO

- Bustamante, M., Gianceselli, L. (1983). Określenie nośności pala pojedynczego na podstawie badań in situ. *Archiwum Hydrotechniki*, XXX, 1, 89–112.
- DIN 1054:2003. Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. (Subsoil – verification of the safety of earthworks and foundation).
- Dyka, I. (2001). Analiza i metoda obliczeń osiadania grupy pali. Praca doktorska. Politechnika Gdańska, Gdańsk.
- Gwizdała, K. (1996). Analiza osiadań pali przy wykorzystaniu funkcji transformacyjnych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej* 532, Budownictwo Wodne XLI, Gdańsk.
- Gwizdała, K. (2011). Fundamenty palowe. Tom 1. Technologie i obliczenia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Gwizdała, K. (2013). Fundamenty palowe. Tom 2. Badania i zastosowania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Gwizdała, K., Dyka, I. (2002). Estimation of settlements of piles in group. *Proceedings of the 9<sup>th</sup> Conference on Piling and Deep Foundations*, Nice, 3/4/5 June 2002, 257–262.
- Gwizdała, K., Kęsik, P. (2015a). Pile group settlement, methods, examples of calculations referred to measurement results carried out in field tests. *Proceedings of XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Edinburgh, 3, 1091–1096.
- Gwizdała, K., Kęsik, P. (2015b). Osiadanie grupy pali w odniesieniu do współczesnych metod obliczeniowych. *Konferencja Naukowa KILiW PAN i PZITB*, Krynica, 227–234.
- Gwizdała, K., Stępcznowski, M. (2004). Obliczanie nośności i osiadań pali Vibro na podstawie sondowania sondą statyczną. *Inżynieria i Budownictwo*, 6.
- Gwizdała, K., Stępcznowski, M. (2006). Obliczanie nośności i osiadań pali wierconych wielkośrednicowych na podstawie sondowania sondą statyczną. *Inżynieria i Budownictwo*, 6, 331–333.
- Gwizdała, K., Stępcznowski, M. (2007). Determination of the bearing capacity of pile foundations based on CPT test results. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 29 (1–2), 55–67.
- Gwizdała, K., Więclawski, P. (2015). Nośność graniczna oraz interpretacje metod bezpośrednich dla pali przemieszczeniowych. *Konferencja Naukowa KILiW PAN i PZITB*, Krynica, 237–244.
- Kosecki, M. (1988). Komentarz do normy PN-83/B-02482. Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych. Szczecin 1985.
- Kosecki, M. (2006). Statyka ustrojów palowych. Zasady obliczania metodą uogólnioną i fundamentów płytowo-palowych metodą podłoża dwuparametrowego. PZITB Oddział Szczecin.
- Kraśniński, A. (2013a). Pale przemieszczeniowe wkręcane. Współpraca z niespoistym podłożem gruntowym. *Monografie* 134, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
- Kraśniński, A. (2013b). Zasady projektowania pali przemieszczeniowych wkręcanych w gruntach niespoistych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 4, 278–286.
- Kraśniński, A. (2015). Propozycja alternatywnego podejścia do obliczania i projektowania fundamentów palowych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 5, 703–709.
- PN-83/B-02482. Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.
- PN-EN 1997-2:2007. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Cz. 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.

- PN-EN 1997-1:2008. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Cz. 1: Zasady ogólne.
- Sobala, D. (2012). Projektowanie pali według Eurokodu 7 – metody i przykłady praktycznego wykorzystania. Materiały Seminarium „Podłoże i fundamenty budowli drogowych”, Autostrada Polska, Kielce, 81–92.
- Sobala, D. (2014). Sposoby określania nośności geotechnicznej pali wciskanych – procedury i przykłady obliczeniowe według Eurokodu 7. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, XXXI, 61 (1/14), 287–310.
- Tejchman, A., Gwizdała, K., Świniański, J., Krasieński, A., Dyka, I. (2001). Nośność i osiadanie fundamentów palowych. Monografia. Politechnika Gdańska, Gdańsk.
- Van Impe, W.F. (1991). Developments in pile design. Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Piling and Deep Foundations, Stresa, Italy, 727–758.
- Więclawski, P. (2015a). Prognozowanie pracy pali Vibro obciążonych osiowo z wykorzystaniem wyników sondowania CPT. Praca doktorska. Politechnika Gdańska, Gdańsk.
- Więclawski, P. (2015b). Ocena współpracy pali Vibro z podłożem gruntowym na podstawie badań in-situ. Konferencja Naukowa KILiW PAN i PZITB, Krynica, 341–348.

## PILE FOUNDATIONS, CALCULATIONS ACCORDING TO EUROCODE 7 RULES AND LOCAL EXPERIENCES

**Abstract.** Eurocode 7 presents the problem of pile foundation design in a very general way. Only the main principles and requirements are specified. Such a concept is justified, however it is an impediment to practical engineering applications. Designers are obliged to independently search for suitable and reliable calculation methods, which are often scattered in numerous literature sources. This concerns to static calculation methods, piles bearing capacity determination and the settlement prediction for a single pile or a group of piles. The paper discusses these issues and presents some suggestions of methods and computational approaches using the current results of studies and long-term national experiences.

**Key words:** foundation piles, pile design, load-bearing capacity of piles, pile foundation settlement

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 12.06.2016

Cytowanie: Gwizdała, K., Krasieński, A. (2016). Fundamenty palowe, obliczenia z zastosowaniem zasad Eurokodu 7 i doświadczeń krajowych. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (2), 3–22.