

Halina Konderla*

OCENA NOŚNOŚCI PALI NA PODSTAWIE BADAŃ SONDĄ STATYCZNĄ CPT

1. Wstęp

Projektowanie fundamentów palowych powinno być poprzedzone rozpoznaniem podłoża gruntowego na znaczne głębokości. Obecnie coraz częściej poza wierceniami stosuje się sondowanie statyczne CPT.

Istnieją dwie możliwości określania nośności pali przy wykorzystaniu parametrów mierzonych w czasie testu sondowania:

- pośrednia; na podstawie pomierzonego oporu pod stożkiem q_c określa się wskaźniki testowe stopień zagęszczenia I_D lub stopień plastyczności I_L , a następnie pośrednie korelacje pozwalają na ocenę oporów pod podstawą i na poboczniczy pała według normy PN-83/B-02482 [6],
- bezpośrednia; za pomocą metod wykorzystujących bezpośrednią korelację oporu pod podstawą i na poboczniczy pała z parametrami mierzonymi podczas sondowania.

Oba sposoby wyznaczania nośności pali zastosowano w przykładzie liczbowym. W obliczeniach wykorzystano wyniki sondowań CPT wykonanych w bezpośrednim sąsiedztwie projektowanego fundamentu palowego.

2. Metody projektowania nośności pali

2.1. Metoda normowa

Norma PN-83/B-02482 do oceny nośności pali wykorzystuje wzór statyczny, w którym nośność pała jest sumą oporu pod postawą N_p i oporu poboczniczy N_s . Nośność obliczeniową pała wciskanego oblicza się na podstawie wzoru:

* Zakład Geomechaniki i Budownictwa Podziemnego, Instytut Geotechniki i Hydrotechniki, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, Wrocław

$$N_T = N_p + N_s = S_p q^{(r)} A_p + m_1 \sum_{i=1}^n S_{si} t_i^{(r)} A_{si} \quad (1)$$

gdzie:

- $q^{(r)}$ — obliczeniowy opór gruntu pod podstawą pała,
- $t_i^{(r)}$ — obliczeniowy opór gruntu wzdłuż pobocznic pała w obrębie rozpatrywanej warstwy i -tej,
- S_p, S_{si} — współczynniki technologiczne zależne od rodzaju pała, rodzaju i stanu gruntu,
- A_p — pole przekroju poprzecznego podstawy pała, zależy od technologii wykonania pała i rodzaju gruntu,
- A_{si} — pole pobocznic w i -tej warstwie gruntu,
- m_1 — współczynnik redukcyjny uwzględniający pracę pali w grupie.

Wartości $q^{(r)}$ i $t_i^{(r)}$ wyznacza się ze wzorów:

$$\begin{aligned} q^{(r)} &= \gamma_m q \\ t_i^{(r)} &= \gamma_m t_i \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

- γ_m — współczynnik materiałowy, $\gamma_m \leq 0,9$,
- q — opór gruntu pod podstawą pała,
- t — opór gruntu wzdłuż pobocznic pała.

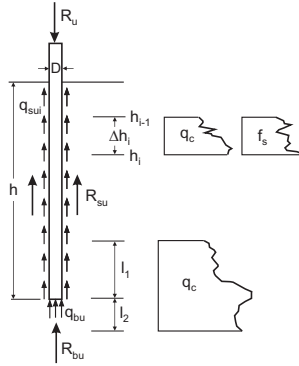
2.2. Ocena nośności pali na podstawie testu statycznego sondowania

Wśród badań *in situ* sondowanie CPT charakteryzuje się największą liczbą metod określania nośności pojedynczego pała. Wynika to z faktu, że sondę CPT można traktować jako model pała obciążonego w sposób ciągły. Sonda statyczna pozwala na bezpośredni pomiar oporu pod stożkiem q_c oraz tarcia na pobocznicy tulei czarnej f_s . Parametry sondowania są używane do obliczania nośności pała (rys. 1):

$$R_u = R_{bu} + R_{su} = A_b q_{bu} + \sum_i A_{si} q_{sui} \quad (3)$$

gdzie:

- R_u — obciążenie graniczne w głowicy pała,
- R_{bu}, R_{su} — graniczne opory gruntu odpowiednio pod podstawą i na pobocznicy pała,
- q_{bu}, q_{sui} — jednostkowe, graniczne opory gruntu odpowiednio pod podstawą i na pobocznicy pała w obrębie i -tej warstwy obliczeniowej,
- A_b — powierzchnia podstawy pała,
- A_{si} — pole powierzchni bocznej pała w obrębie i -tej warstwy obliczeniowej.



Rys. 1. Założenia do obliczeń nośności pala

$$q_{bu} = \psi_1 \bar{q}_c \quad (4)$$

gdzie:

ψ_1 — współczynnik nośności podstawy,

\bar{q}_c — uśredniony, jednostkowy opór gruntu pod stożkiem sondy w strefie przy podstawie pala.

$$q_{sui} = \frac{\bar{q}_{csi}}{\psi_{2i}} \quad \text{lub} \quad q_{sui} = \frac{\bar{f}_{si}}{\psi_{3i}} \quad (5)$$

gdzie:

\bar{q}_{csi} — uśredniony, jednostkowy opór gruntu pod stożkiem sondy w obrębie i -tej warstwy obliczeniowej,

\bar{f}_{si} — uśredniony, jednostkowy opór gruntu na pobocznicę tulei sondy w obrębie i -tej warstwy obliczeniowej,

ψ_{2i} — współczynnik nośności poboczniczy w obrębie i -tej warstwy obliczeniowej (przy uwzględnianiu oporu q_c),

ψ_{3i} — współczynnik nośności poboczniczy w obrębie i -tej warstwy obliczeniowej (przy uwzględnianiu oporu f_s),

Δh_i — miąższość i -tej warstwy obliczeniowej,

h — zagłębienie pala w gruncie.

Warstwa obliczeniowa obejmuje grunt jednego rodzaju o zbliżonych wartościach oporów sondy q_c lub f_s .

W większości metod obliczania nośności pali na podstawie sondowania CPT przyjmuje się empiryczne korelacje pomiędzy q_{bu} i \bar{q}_c dla podstawy oraz pomiędzy q_{sui} i \bar{q}_{csi} lub \bar{f}_{si} dla poboczniczy pala. Zależności te są najczęściej potwierdzone wynikami próbnych obciążeń pali w skali naturalnej.

Metody określania nośności pali różnią się zakresem ich stosowania (w zależności od metody wykonania pali), wartościami współczynników ψ_1 , ψ_{2i} i ψ_{3i} , sposobem uśredniania

wartości \bar{q}_c , \bar{q}_{csi} i \bar{f}_s oraz przyjmowaniem zasięgu stref podłoża uwzględnianych w obliczaniu oporu podstawy.

W metodach najstarszych, obecnie praktycznie nie wykorzystywanych, np. Huizinga [3], wartość q_{bu} wyznaczana jest na podstawie oporu pod stożkiem sondy w poziomie podstawy pala ale wartość q_{su} nie jest określana.

Do metod pozwalających na określenie jednostkowego, granicznego oporu gruntu na poboczniczy pala należy między innymi metoda Philipponnat [5]. Występujące w tej metodzie współczynniki korelacyjne uwzględniają ograniczenia wartości q_{sui} w zależności od rodzaju i stanu gruntu.

Metody obliczeń modyfikowane są w zależności od lokalnych wyników badań. W Polsce do obliczania nośności pali Franki najczęściej wykorzystywane są następujące metody: Energopolu [4], Philipponnat [5] i Wiłuna [11].

Ważną rolę w obliczeniach odgrywa metoda uśredniania wartości q_c w rejonie postawy oraz q_c i f_s w wydzielonych przedziałach obliczeniowych Δh_i .

Ogólne wzory na wartości uśrednione są następujące:

$$\begin{aligned}\bar{q}_c &= \frac{1}{l_1 + l_2} \int_{h-l_1}^{h+l_2} q_c(h) dh \\ \bar{q}_{csi} &= \frac{1}{\Delta h_i} \int_{h_{i-1}}^{h_i} q_c(h) dh \\ \bar{f}_c &= \frac{1}{\Delta h_i} \int_{h_{i-1}}^{h_i} f_s(h) dh\end{aligned}\tag{6}$$

gdzie:

l_1 i l_2 — grubości warstwy gruntu powyżej i poniżej poziomu podstawy pala przyjęte do analizy.

Poniżej przedstawiono szerzej dwie metody, które następnie wykorzystano w przykładzie liczbowym.

Metoda Energopolu [4]

Jednostkowy, graniczny opór gruntu pod podstawą pala wyznacza się ze wzoru (4), w którym dla pali o średnicy $D < 0,6$ m:

$$\psi_1 = k \cdot \beta\tag{7}$$

gdzie k współczynnik niejednorodności gruntu w strefach l_1 i l_2 zależny od q_c

$$k = \frac{q_{c,\min}}{\bar{q}_c}\tag{8}$$

$q_{c,\min}$ — minimalna wartość jednostkowego oporu stożka sondy w strefach l_1 i l_2 ,

$$\bar{q}_c = \frac{1}{l_1 + l_2} \int_{h-h}^{h+l_2} q_c(h) dh \quad \text{przy czym } l_1 = D, l_2 = 4D \quad (9)$$

β — współczynnik zmniejszający $\beta = \beta(\bar{q}_c) \in \langle 0,25; 1,00 \rangle$ [4].

Jednostkowy, graniczny opór gruntu na poboczniczy pała oblicza się ze wzoru (5₂), w którym:

$$\bar{f}_c = \frac{1}{\Delta h_i} \int_{h_{i-1}}^{h_i} f_s(h) dh \quad (10)$$

Współczynnik ψ_{3i} odczytuje się z nomogramu zamieszczonego w [4]

$$\frac{1}{\psi_{3i}} = \frac{1}{\psi_{3i}(z, \bar{f}_{si}, h)} \in \langle 0, 1; 0, 5 \rangle, \text{ gdzie } z \text{ jest zagłębieniem sondy CPT.}$$

Metoda Philipponnat [5]

Uśredniony, jednostkowy opór gruntu pod stożkiem sondy

$$\begin{aligned} \bar{q}_c &= \frac{\bar{q}_{cd} + \bar{q}_{cg}}{2} \\ \bar{q}_{cd} &= \frac{1}{3D} \int_h^{h+3D} q_c(h) dh \\ \bar{q}_{cg} &= \frac{1}{3D} \int_{h-3D}^h q_c(h) dh \end{aligned} \quad (11)$$

Jeżeli $\bar{q}_{cg} > \bar{q}_{cd}$ to należy przyjmować $\bar{q}_{cg} = \bar{q}_{cd}$

Współczynnik ψ_1 zależy od rodzaju gruntu i wynosi: 0,35 dla żwiru, 0,40 dla piasku, 0,45 dla glin i 0,50 dla iłów i kredy.

Jednostkowy, graniczny opór gruntu na poboczniczy pała q_{su} , wyznaczony z wzoru (51), dla danego rodzaju pała nie może przekraczać wartości maksymalnej podanej w pracy [5]. Dla pali Franki wynosi ona 120 kPa.

Uśredniony, jednostkowy opór gruntu pod stożkiem sondy

$$\bar{q}_{csi} = \frac{1}{\Delta h_i} \int_{h_{i-1}}^{h_i} q_c(h) dh \quad (12)$$

Współczynnik $\psi_{2i} = \frac{\alpha_{si}}{\alpha_{fi}}$. Dla pali Franki $\alpha_{fi} = 1,25$, natomiast współczynnik α_{si} zależy od rodzaju gruntu i wynosi 50 dla iłów, 60 dla pyłów i glin, 100 dla piasków luźnych, 150 dla piasków średnio zagęszczonych oraz 200 dla piasków zagęszczonych i żwirów.

W obu opisanych powyżej metodach wykorzystuje się pojęcie nośności dopuszczalnej z zastosowaniem koncepcji współczynników bezpieczeństwa, oddzielnie dla poboczniczy i podstawy pała:

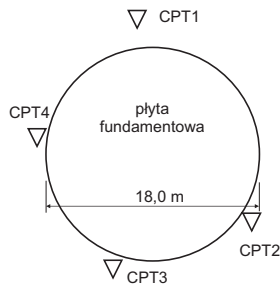
$$N = \frac{R_{bu}}{F_b} + \frac{m_1 R_{su}}{F_s} = N_b + N_s \quad (13)$$

gdzie:

N, N_b, N_s — nośności dopuszczalne odpowiednio całkowita, podstawy i poboczniczy pała,
 F_b i F_s — współczynniki bezpieczeństwa odpowiednio dla podstawy i poboczniczy pała [2] — dla obu metod współczynniki te są równe $F_b = F_s = 2$.

3. Wyniki badania sondą CPT

Dla projektowanego fundamentu palowego w ramach prac terenowych wykonano 4 sondowania statyczne CPT [7] oraz 4 otwory badawcze położone w ich sąsiedztwie. Te ostatnie zgodnie z normą [9] mają służyć weryfikacji przeprowadzonego rozpoznania *in situ*. Lokalizację miejsc wykonanych badań pokazano na rysunku 2. Na podstawie wierceń określono profile geologiczne do głębokości 18 m. Wiercenia przeprowadzono świdrem spiralnym o średnicy 102 mm do głębokości 18 m.



Rys. 2. Rozmieszczenie otworów badawczych

Sondowanie wykonano samojezdną sondą statyczną włoskiej firmy PAGANITG 73–200 wyposażoną w zestaw hydrauliczny GOUDA o maksymalnej sile nacisku 200 kN i stożek mechaniczny typu Begemanna [10]. Profil gruntowy został wyinterpretowany na podstawie sondowań oraz w oparciu o wyniki wierceń wykonanych na analizowanym terenie.

Uzyskane z badań parametry sondowania użyto do określenia:

— stopnia plastyczności — dla gruntów spoistych (wartość wyprowadzona)

$$I_L = A - 0,5 \log(q_c - \sigma'_{vo}) \quad (14)$$

A — współczynnik zależny od rodzaju gruntu, uwzględniający jego regionalność,

$$A = 0,15 \div 0,35,$$

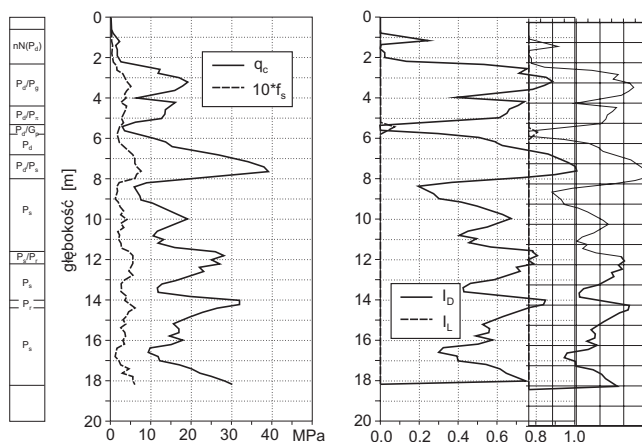
σ'_{vo} — pionowe efektywne naprężenie geostaticzne,

— stopnia zagęszczenia (formuła Baldi [1]) — dla gruntów niespoistych (wartość wyprowadzona)

$$I_L = 0,42 - \ln\left(\frac{q_c}{(248\sigma'_{vo})^{0,55}}\right) \quad (15)$$

— nośności pali metodami bezpośrednimi.

Przykładowe wyniki sondowania CPT wraz z interpretacją przedstawiono na rysunku 3. Wyniki badań polowych wskazują na duże zróżnicowanie budowy geologicznej w obrębie fundamentu, występowanie nośnej warstwy piasków odpowiedniej do posadowienia pali oraz brak gruntów nienośnych.



Rys. 3. Przykładowe wyniki sondowania

4. Przykład liczbowy

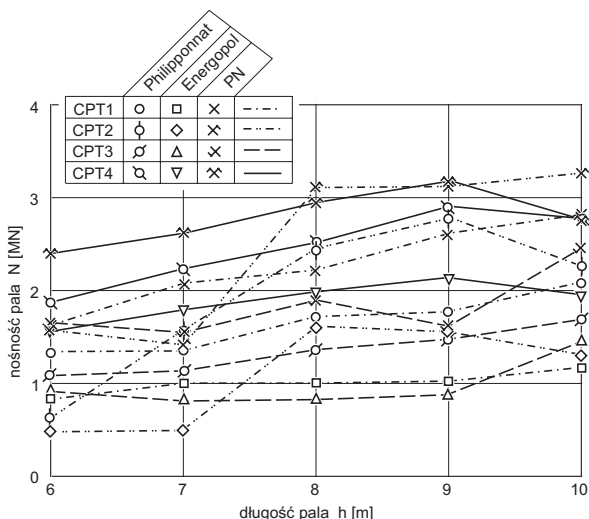
Oceny nośności pali, za pomocą omówionych powyżej metod, dokonano na przykładzie fundamentu palowego składającego się z płyty fundamentowej i pali Franki. Kołowa płyta fundamentowa o średnicy 18 m, posadowiona na głębokości 3 m p.p.t. spoczywa na palach Franki o średnicy trzonu $D = 0,52$ m i długości 6–10 m. Osiowy rozstaw pali r wynosi 1,9 m. Warunki geotechniczne panujące w rejonie projektowanego fundamentu scharakteryzowano w punkcie 3. W obliczeniach metodą normową pole podstawy pała formowanego w gruncie niespoistym zwiększano o 75%, a w gruncie spoistym o 50%.

Przeprowadzone obliczenia porównawcze wskazują na znaczne różnice w wartościach nośności pali uzyskane różnymi metodami (rys. 4). Dla analizowanych warunków geotechnicznych najwyższe nośności otrzymano metodą normową a najbezpieczniejsze metodą Energopolu.

W obliczeniach wykorzystano metodę normową [6] ponieważ jest ona podobna do jednego z podejść projektowania pali dopuszczonych w Eurokodzie 7 [8].

5. Wnioski

— Przedstawione powyżej bezpośrednie metody obliczeń nośności pali z wykorzystaniem wyników badań sondą CPT wskazują na dużą ich przydatność do bezpiecznego i ekonomicznego projektowania pali.



Rys. 4. Wpływ metody obliczeniowej na nośność pala

- Metody bezpośrednie, opracowane w Polsce uwzględniają tutejsze warunki, spełniają zatem warunek [8] o zaleceniu maksymalnego wykorzystania rozwiązań krajowych i regionalnych.
- Metody bezpośrednie są obecnie intensywnie rozwijane oraz zalecane i preferowane w praktyce inżynierskiej.
- Obliczenia porównawcze wskazują na znaczne różnice w ocenie nośności pali za pomocą dotychczas stosowanej metody normowej i metod opartych na parametrach geotechnicznych uzyskanych z badań podłoża.

LITERATURA

- [1] Baldi G.I. et al.: Interpretation of CPT'S. Fourth Inter. Geot. Seminar, Singapoe 1986, pp.143–156
- [2] Gwizdata K., Stępcziewski M.: Obliczanie nośności pali na podstawie wyników badań sondą CPT. XLIV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1998, s. 153–160.
- [3] Huizinga T.K.: Application of Results of Deep Penetration Tests to Foundation Piles, Building Research Congress. Vol. 1,1951, pp. 173–178
- [4] Instrukcja przewidywania nośności pali w oparciu o badania presjometryczne i sondowania statyczne. Centralny Ośrodek Badawczo–Rozwojowy Budownictwa Hydrotechnicznego ENERGOPOL, Warszawa, 1979
- [5] Kłos J.: Obliczanie nośności pojedynczego pala na podstawie wyników sondowań statycznych. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3, 1983, s. 303–306
- [6] PN-83/B-02482 Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych
- [7] PN-B-04452:2002 Geotechnika. Badania polowe
- [8] PN-EN 1997-1:2005 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne
- [9] PN-EN 1997-2:2007 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 2: Badania podłoża gruntowego
- [10] PN-EN ISO 22476-12:2009 Rozpoznanie i badania geotechniczne. Badania polowe. Część 12: Badanie sondą stożkową (CPTM) o końcówce mechanicznej (oryginalna wersja językowa)
- [11] Wilun Z.: Zarys geotechniki. WKiŁ, Warszawa, 1987