

Wyznaczanie nośności geotechnicznej pali wciskanych

według EC7 i metody opisanej w PN-83/B-02482

W Eurokodzie 7 (PN-EN 1997-1, 2008) jako jedną z metod liczbowego określania nośności geotechnicznej pali wciskanych wymieniono projektowanie na podstawie obliczeń z wykorzystaniem metod empirycznych lub analitycznych, których wiarygodność została potwierdzona wynikami próbnych obciążeń statycznych w podobnych sytuacjach. Do takich metod z pewnością można zaliczyć polską metodę projektowania pali wg PN-83/B-02482.

Zasady określania nośności geotechnicznej pali wciskanych wg PN-EN 1997-1

Projektowanie geotechniczne pali w stanie granicznym nośności sprowadza się do takiego doboru rodzaju, długości i przekroju pała w rozpatrywanych warunkach gruntowych, aby spełniony był warunek:

$$F_{c,d} \leq R_{c,d} \quad [1]$$

gdzie: $F_{c,d}$ to obliczeniowy efekt oddziaływań na projektowany pał (uwzględnia także ewentualne tarcie negatywne), a $R_{c,d}$ jest nośnością obliczeniową pała w gruncie. Nośność obliczeniową pała $R_{c,d}$ wyznaczana jest przez podzielenie nośności charakterystycznej $R_{c,k}$ przez współczynnik bezpieczeństwa γ_t , który dla pali wciskanych i drugiego podejścia obliczeniowego wg PN-EN 1997-1 przyjmuje wartość $\gamma_t = 1,1$

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t} \quad [2]$$

Wyznaczanie nośności charakterystycznej $R_{c,k}$ na podstawie wyników badań podłoża (obliczeń) podlega ścisłym zasadom i regułom podanym w PN-EN 1997-1. $R_{c,k}$ wyznacza się na podstawie nośności granicznych obliczonych $R_{c,calc}$, wprowadzając ewentualną korektę ze względu na niepewność modelu obliczeniowego. W normie PN-EN 1997-1 nie podano sposobów określania $R_{c,calc}$, pozostawiając dobór konkretnej metody jej wyznaczania do decyzji projektanta podejmowanej w ramach konkretnego projektu. Jednak każda wykorzystywana metoda szczegółowa powinna umożliwiać określenie zbioru nośności granicznych $R_{c,calc}$ dla dostępnych profili geotechnicznych, a na ich podstawie określenie nośności charakterystycznej $R_{c,k}$, tj. wartości nośności granicznej zapewnionej z prawdopodobieństwem $p = 0,95$. W praktyce rzadko dysponujemy wystarczającą liczbą wyznaczonych nośności granicznych umożliwiającą przeprowadzenie pełnej analizy statystycznej. Dlatego w praktyce wykorzystywane są podane w normie PN-EN 1997-1 współczynniki korelacyjne ξ , które pośrednio opisują rozkłady prawdopodobieństwa uznane za właściwe dla podanych w normie ogólnych metod określania nośności pali. Nośność charakterystyczna $R_{c,k}$ wyliczana jest z ogólnej zależności:

$$R_{c,k} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot \min \left\{ \frac{(R_{c,calc})_{mean}}{\xi_{mean}}; \frac{(R_{c,calc})_{min}}{\xi_{min}} \right\} \quad [3]$$

gdzie: $(R_{c,calc})_{mean}$ i $(R_{c,calc})_{min}$ są odpowiednio średnią i minimalną wartością nośności granicznych $R_{c,calc}$, a ξ_{mean} i ξ_{min} są współczynnikami korelacyjnymi, odpowiednio dla wartości średniej i minimalnej nośności granicznej. Współczynnik γ_{Rd} opisuje niepewność związaną z przyjętym modelem obliczeniowym.

Wartości współczynników korelacyjnych zostały tabelaryzowane w załączniku normatywnym A do PN-EN 1997-1, w zależności od liczby i metody wyznaczania nośności granicznych R_c . W odniesieniu do metody opartej na obliczeniach stosuje się współczynniki ξ_3 i ξ_4 podane w tablicy A.10 załącznika. Na rys. 1 przedstawiono ich wartości (dla zwiększenia czytelności prezentowane w postaci ciągłych linii) bez uwzględnienia wpływu sztywności zwieńczenia.

Wpływ zwieńczenia o dużej sztywności, umożliwiającej redystrybucję obciążeń z pali słabszych na mocniejsze, uwzględnia się wg p. 7.6.2.3 (7) (PN-EN 1997-1, 2008) przez podzielenie wartości współczynników korelacyjnych ξ_3 i ξ_4 przez 1,1. Po odpowiednich przekształceniach współczynnik ten można uwzględnić jako $\gamma_{Rd} = 0,909$ we wzorze [3].

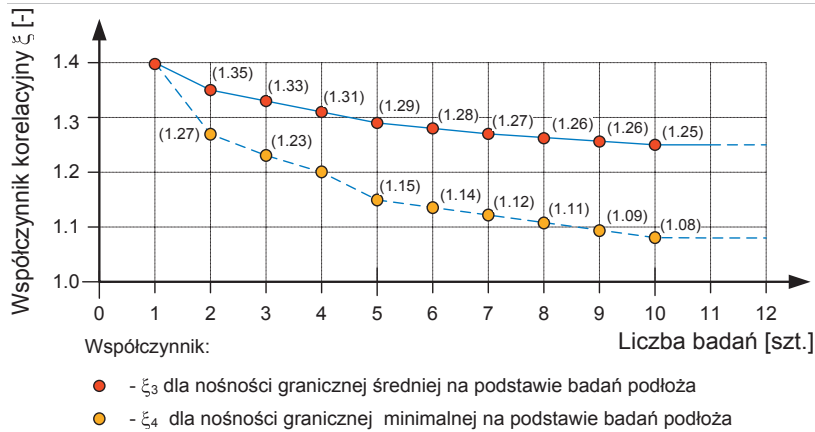
Określanie nośności granicznej pali wg PN-83/B-02482

Projektowanie oparte na wynikach badań gruntu umożliwia wykorzystanie wszelkich wiarygodnych metod analitycznego lub empirycznego określania nośności granicznej pali, m.in. szeroko dotychczas wykorzystywanej w Polsce metody empirycznej opisanej w PN-83/B-02482. Metoda ta, dla pełnej zgodności z zasadami i regułami Eurokodu 7, wymaga aktualizacji opisu i oznaczeń oraz uzgodnienia poziomu niezawodności, tj. zastosowania odpowiednich współczynników bezpieczeństwa lub modelu. W systemie Eurokodów do decyzji krajowych komitetów normalizacyjnych pozostawiono ustalenie wartości współczynników bezpieczeństwa, co umożliwia takie ich skalibrowanie, aby zachować dotychczasowy, akceptowany w danym kraju, poziom niezawodności. W odniesieniu nośności geotechnicznej pali sprowadza się to do przyjęcia założenia, że obciążenia $F_{c,d}$ i nośności pali wyznaczone zgodnie z Eurokodem 7 (PN-EN 1997-1, 2008) i normą PN-83/B-02482 powinny być jednakowe lub bardzo zbliżone. Wartość współczynników bezpieczeństwa dla obciążeń $F_{c,d}$ określana jest w załączniku krajowym do normy PN-EN 1990, natomiast współczynniki bezpieczeństwa dla nośności geotechnicznej $R_{c,d}$ zostały ustalone w załączniku krajowym do PN-EN 1997-1 przez przyjęcie drugiego podejścia obliczeniowego. Zatem kalibracja metody wyznaczania nośności geotechnicznej może odbywać się wyłącznie przez wykorzystanie współczynników modelu.

dr inż. Dariusz Sobala

Zakład Dróg i Mostów
Politechniki Rzeszowskiej,
Pracownia Projektowa Aarsleff Sp. z o.o.

Niniejszy artykuł stanowi propozycję dostosowania metody projektowania pali wg PN-83/B-02482, do wymagań Eurokodu 7 (PN-EN 1997-1, 2008). Zaproponowana procedura zakłada, że wprowadzenie Eurokodów pozwoli na zachowanie dotychczasowego poziomu niezawodności wg PN po stronie oddziaływań i obciążeń.



Liczba analizowanych profili gruntowych	1	2	3	4	5	6	7	8	9	≥10
Współczynniki korelacyjne										
ξ₃	1.40	1.35	1.33	1.31	1.29	1.28	1.27	1.26	1.26	1.25
ξ₄	1.40	1.27	1.23	1.20	1.15	1.14	1.12	1.11	1.09	1.08

Rys. 1. Wartości współczynników korelacyjnych dla obliczeniowej metody wyznaczania nośności granicznej i różnej liczby badań

Praktyczne wykorzystanie konkretnej metody obliczeniowego wyznaczania nośności granicznej pala $R_{c,calc}$ jest limitowane dostępem do niezbędnych parametrów geotechnicznych podłoża. Metoda wg PN-83/B-02482 umożliwia projektowanie pali w oparciu o dane zawarte w większości typowych dokumentacji geotechnicznych opracowywanych w Polsce. Umożliwia ona również wyznaczenie nośności dla wielu różnych rodzajów pali, a uzupełnienie jej o pojawiające się nowe technologie nie powinno stanowić problemu. Jest to również metoda otwarta na uaktualnienia, co niestety nie było do tej pory wykorzystywane w wystarczającym zakresie. Należy pamiętać, że obliczone nośności pali każdą tego typu metodą są co najwyżej tak dokładne, jak parametry gruntów wykorzystane do ich wyznaczenia, a te pozostawiają zwykle wiele do życzenia.

W celu dostosowania metody obliczeniowego wyznaczania nośności pali wg PN-83/B-02482 do wymagań Eurokodu 7 należy przede wszystkim uaktualnić stosowany dotychczas opis metody, który w obecnym stanie nie pozwala na jednoznaczne określenie nośności charakterystycznej oraz granicznej pali i umożliwia w praktyce określenie jedynie nośności obliczeniowej. Jednym z celów wprowadzenia Eurokodu 7 jest ujednoczenie i sformalizowanie stosowanego opisu w skali europejskiej. Tak więc wykorzystanie dowolnej metody szczegółowej obliczania nośności powinno polegać na wyznaczeniu na podstawie dostępnych profili gruntowych zbioru nośności granicznych pali $R_{c,calc}$ a następnie wykorzystaniu przedstawionej wyżej procedury określenia nośności charakterystycznej i obliczeniowej wg PN-EN 1997-1.

Zgodnie z dotychczas stosowanym opisem w PN-83/B-02482 warunek stanu granicznego nośności pali wciskanych był zapisany w następujący sposób:

$$Q_r \leq m \cdot N_t \quad [4]$$

gdzie m jest współczynnikiem niepewności modelu uwzględniającym liczbę pali w fundamencie (0,9 dla fundamentu opartego na min. trzech palach, 0,8 na dwóch palach i 0,7 na jednym palu), a N_t jest nośnością obliczeniową pala wciskanego. Rozwijając zapis [4], otrzymujemy:

$$N_t = N_p + N_s = q^{(r)} A_p S_p + \sum_i t_i^{(r)} A_{si} S_{si} = \gamma_m q A_p S_p + \sum_i \gamma_{mi} t_i A_{si} S_{si} \quad [5]$$

gdzie N_p jest nośnością podstawy pala, N_s jest nośnością pobocznic, γ_m jest współczynnikiem materiałowym dla gruntu przyjmowanym wg PN-81/B-03020, zwykle o wartości 0,9, q jest stabilizowanym oporem granicznym pod podstawą pala, zależnym od rodzaju i stanu gruntu, A_p powierzchnią podstawy pala, S_p jest stabelaryzowanym dla różnego rodzaju pali i gruntu współczynnikiem technologicznym modyfikującym podstawową wartość q , q jest stabelaryzowanym oporem granicznym na pobocznicę pala zależnym od rodzaju i stanu gruntu, A_s jest powierzchnią pobocznicę pala, a S_s jest stabelaryzowanym

współczynnikiem technologicznym modyfikującym podstawową wartość t w zależności od rodzaju pala i gruntu. W ramach wykorzystywanej metody należy ponadto uwzględnić redukcję wartości oporów pod podstawą pala i wzdłuż jego pobocznic w zależności od głębokości i średnicy pala, przyjmując prawidłowo poziom odniesienia prowadzonych obliczeń w postaci odpowiednio skorygowanego poziomu terenu.

Przyjmując zasadę równoważności niezawodności uzyskiwanej dla nośności pali przed wprowadzeniem i po wprowadzeniu Eurokodu 7 (PN-EN 1997-1, 2008), możemy zapisać:

$$R_{c,d} = m \cdot N_t = m \cdot \left(\gamma_m q A_p S_p + \sum_i \gamma_{mi} t_i A_{si} S_{si} \right) \quad [6]$$

Z wcześniejszych rozważań wiemy, że:

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t} = \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot \gamma_t} \cdot \min \left\{ \frac{(R_{c,calc})_{mean}}{\xi_3}, \frac{(R_{c,calc})_{min}}{\xi_4} \right\} \quad [7]$$

W przypadku metody opisanej w PN-81/B-03020 za typową można uznać sytuację, w której dla pojedynczego fundamentu obliczenia oparte są na jednym profilu gruntowym. Zatem $(R_{c,calc})_{mean} = (R_{c,calc})_{min}$, $\xi = \xi_3 = \xi_4 = 1,4$, a równanie [7] przyjmuje postać:

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t} = \frac{R_{c,calc}}{\gamma_{Rd} \cdot \gamma_t \cdot \xi} \quad [8]$$

Porównując odpowiednie strony równań [6] i [8], otrzymujemy:

$$\frac{R_{c,k}}{\gamma_t} = \frac{R_{c,calc}}{\gamma_{Rd} \cdot \gamma_t \cdot \xi} = m \cdot \left(\gamma_m q A_p S_p + \sum_i \gamma_{mi} t_i A_{si} S_{si} \right) \quad [9]$$

lub

$$R_{c,calc} = \gamma_t \cdot \gamma_{Rd} \cdot m \cdot \xi \cdot \left(\gamma_m q A_p S_p + \sum_i \gamma_{mi} t_i A_{si} S_{si} \right) \quad [10]$$

Współczynnik m zależny od liczby pali w fundamencie palowym jest klasycznym współczynnikiem modelu i powinien być uwzględniany na etapie określania nośności charakterystycznej. Podstawowa wartość tego współczynnika $m = 0,9$ dla fundamentów opartych na więcej niż dwóch palach ma swój odpowiednik w PN-EN 1997-1 w korekcie $\gamma_{Rd} = 0,909$ wartości współczynników korelacyjnych ξ , gdy występują warunki do redystrybucji obciążeń z pali słabszych na pale mocniejsze. Dlatego w dalszych rozważaniach te dwie wartości przyjęto jako bazowe, a zmianę wartości m uwzględniono przez wprowadzenie dodatkowego współczynnika modelu $\gamma_{Rd1} = 1,0$ dla fundamentów na min. 3 palach, $\gamma_{Rd2} = 1,125$ dla fundamentów na dwóch palach lub $\gamma_{Rd1} = 1,286$ dla fundamentów na jednym palu do równania:

$$R_{c,k} = \frac{R_{c,calc}}{\gamma_{Rd1,2lub3}} \quad [11]$$

Przyjmując we wzorze [10] $\gamma_m = 0,9$ oraz $\gamma_{Rd} = 0,909$, otrzymujemy wartość $\gamma_{Rd} \cdot \gamma_t \cdot \xi \cdot \gamma_m = 1,26$ lub $\gamma_{Rd1} \cdot \gamma_t \cdot \xi = 1,4$. ▶

Piśmiennictwo

1. Gwizdała K.: *Fundamenty palowe. Technologie i obliczenia*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
2. PN-81/B-03020 (1981) *Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie*. Warszawa: PKN.
3. PN-83/B-02482 (1983) *Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych*. Warszawa: PKN.
4. PN-EN 1990 (2004) *Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji*. Warszawa: PKN.
5. PN-EN 1997-1 (2008) *Projektowanie geotechniczne. Część 1. Zasady ogólne*. Warszawa: PKN.

- Zatem ostatecznie nośność graniczna pala wciskanego wyznaczona metodą wg PN-83/B-02482 jest równa:

$$R_{c,calc} = 1 \cdot 26 \cdot (qA_p S_p + \sum_i t_i A_{si} S_{si}) = 1 \cdot 4 \cdot N_t \quad [12]$$

Bardziej eleganckie jest uwzględnienie wartości współczynnika skalującego 1,26 w stabelaryzowanych wartościach q i t lub/i S_p i S_{si} , co czyni metodę bardziej jednoznaczną i czytelną. Jednak ze względów praktycznych na obecnym etapie wdrażania Eurokodu 7 w Polsce wygodniej posługiwać się wartością nośności N_t , którą można w łatwy sposób wyznaczyć przy użyciu dostępnego oprogramowania i stosowanych dotychczas arkuszy obliczeniowych.

Nie zmienia to faktu, że podane w PN-83/B-02482 wartości oporów granicznych dla pala wzorcowego oraz współczynników technologicznych S_p i S_{si} należy koniecznie poddać przeglądowi, uaktualnieniu i uzupełnieniu o stosowane współcześnie rodzaje pali na bazie doświadczeń zdobytych w ciągu blisko 30-letniego okresu wykorzystania metody.

Procedura określania nośności obliczeniowej pali wciskanych

Prezentowana poniżej praktyczna procedura jest oparta na zaleceniach Eurokodu 7 i metodzie wyznaczania nośności pali wciskanych wg PN-83/B-02482.

Krok 1. Na podstawie n profili gruntowych wyznaczyć $i = 1..n$ nośności graniczne pala: $R_{c,calc_i} = 1,4 \cdot N_t$ przyjmując N_t wg PN-83/B-02482.

Krok 2. Wyznaczyć wartość średnią $(R_{c,calc})_{mean}$ oraz minimalną $(R_{c,calc})_{min}$ ze zbioru obliczonych $R_{c,calc_i}$ nośności granicznych.

Krok 3. Odczytać współczynniki korelacyjne ξ_3 i ξ_4 z tablicy A.10 załącznika normatywnego A do normy PN-EN 1997-1 dla n nośności granicznych $R_{c,calc_i}$ obliczonych na podstawie analogicznej liczby badań podłoża.

Krok 4. Wprowadzić ewentualną poprawkę wg p. 7.6.2.3 (7) PN-EN 1997-1 do wartości współczynników korelacyjnych ξ_3 i ξ_4 przyjętych w kroku 3 przez podzielenie ich przez współczynnik $\gamma_{rd} = 1,1$, gdy zwieńczenie jest sztywne i zapewnia redystrybucję obciążeń z pali słabszych na mocniejsze – poprawkę należy przyjmować pod warunkiem $\xi_3 > 1,0$.

Krok 5. Określić wartość współczynnika modelu w zależności od liczby pali w fundamencie $\gamma_{rd3} = 1,0$ dla więcej niż 3 pali, $\gamma_{rd2} = 1,125$ dla dwóch pali lub $\gamma_{rd1} = 1,286$ dla jednego pala.

Krok 6. Wyznaczyć wartość nośności charakterystycznej pala na wciskanie

$$R_{c,k} = \frac{1}{\gamma_{rd1,2 \text{ lub } 3}} \cdot \min \left\{ \frac{(R_{c,calc})_{mean}}{\xi_3}, \frac{(R_{c,calc})_{min}}{\xi_4} \right\}$$

Krok 7. Odczytać wartości $\gamma_t = 1,1$ współczynnika częściowego bezpieczeństwa zgodnie z zestawem R2 tablicy A.6 załącznika normatywnego A do normy PN-EN 1997-1.

Krok 8. Wyznaczyć nośność obliczeniową pali w fundamencie

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t}$$

Próbne obciążenia dla wyznaczonych w ten sposób nośności pali należy projektować na maksymalne obciążenie odpowiadające $(1 \div 1,2) R_{c,calc}$ wyznaczonej w danym rejonie. Pierwsze próbne obciążenie należy zlokalizować w miejscu odpowiadającym najniższej wyznaczonej nośności granicznej, a kolejne w obszarach uznanych za reprezentatywne dla całego fundamentu.

Podsumowanie

Przedstawiona w artykule procedura pozwala na określenie wartości geotechnicznej nośności obliczeniowej pali wciskanych $R_{c,d}$ na podstawie wyników obliczeń (badań podłoża) zgodnie z zasadami i regułami podanymi w Eurokodzie 7 (PN-EN 1997-1, 2008) z wykorzystaniem metody znanej z PN-83/B-02482. Zaproponowana procedura zakłada, że wdrożenie Eurokodów (określenie krajowych wartości współczynników obciążenia) pozwoli na zachowanie dotychczasowego poziomu niezawodności wg PN po stronie oddziaływań i obciążeń. Z doświadczeń autora wynika, że spełnienie tego warunku jest dużo łatwiejsze w budownictwie mostowym niż kubaturowym. Warto podkreślić, że wartość nośności obliczeniowej uzyskiwana wg przedstawionej wyżej procedury jest tożsama z wartością uzyskaną wg PN-83/B-02482 jedynie w przypadku wykorzystania do obliczeń pojedynczego profilu gruntowego. Generalnie wartości nośności charakterystycznej i obliczeniowej nie są stałe i zależą w znacznym stopniu od liczby wykonanych badań podłoża pod fundamentem. W tym zakresie procedura zaproponowana w PN-EN 1997-1 i niniejszym artykule pozwala, przy zwiększonej liczbie wykonanych badań podłoża, na bardziej ekonomiczne projektowanie pali niż wg PN-83/B-02482. Należy pamiętać, że wykorzystanie omawianej metody obliczeniowej obwarowane jest koniecznością spełnienia licznych dodatkowych warunków (np. dotyczących wymaganego minimalnego zagłębienia stopy pala w warstwie nośnej, zachowania odpowiedniej odległości stopy pala od stropu warstwy słabej itp.) opisanych szczegółowo w PN-83/B-02482. W artykule przedstawiono jedynie ogólną koncepcję wykorzystania metody zgodnie z wymaganiami PN-EN 1997-1, nie podając, znanego większości inżynierów w Polsce, pełnego jej opisu. Proces projektowania pali wciskanych wymaga ponadto analizy stanów granicznych nośności w odniesieniu do trzonu pala oraz stanów granicznych użyteczności w odniesieniu do trzonu pala i przemieszczeń (osiadań) pala w gruncie (Gwizdała, 2010). Ogólne podejście przedstawione w artykule na przykładzie pali wciskanych może zostać w łatwy sposób adaptowane do projektowania pali wyciąganych. Uzasadnione wydaje się wykorzystanie okresu wdrażania Eurokodu 7 (PN-EN 1997-1, 2008) do przeglądu, uaktualnienia i uzupełnienia podstawowych parametrów omawianej metody na bazie doświadczeń zdobytych w ciągu blisko 30-letniego okresu jej wykorzystania. □