

Ocena nośności podłoża gruntowego pod fundamentem bezpośrednim w nawiązaniu do norm europejskich

Krzysztof Nepelski¹

¹ Katedra Geotechniki, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: k.nepelski@pollub.pl

Streszczenie: W artykule opisano metodę wyznaczania nośności podłoża gruntowego zgodnie z wytycznymi norm europejskich. Przedstawiono analizę nośności podłoża uzależnioną od parametrów wytrzymałościowych gruntu. Wyniki pokazano w formie graficznej za pomocą wykresów. Rezultaty obliczeń omówiono w odniesieniu do Polskiej Normy PN-81/B-03020 [2]. Dla każdej z nośności oszacowano niezbędne wymiary fundamentu, dla obliczeniowych oddziaływań wyznaczonych zgodnie z wytycznymi Eurokodu [1] i Polskiej Normy [2].

Słowa kluczowe: projektowanie fundamentów, nośność podłoża, Eurokod, porównanie norm

1. Wprowadzenie

Standaryzacja norm europejskich wprowadziła wiele zmian w stosunku do obowiązujących krajowych postanowień normowych. W wielu przypadkach procedury obliczeniowe zmieniły się lub uległy modyfikacji. Również szacowanie nośności podłoża gruntowego według Eurokodu 7 [1] uległo zmianie w stosunku do dotychczas stosowanej Polskiej Normy [2]. W artykule przedstawiono metodę szacowania nośności podłoża, zgodnie z wytycznymi norm europejskich. Opisano sposób obliczeń oraz przedstawiono analizę nośności podłoża dla różnych gruntów, porównując wartości oszacowane według nowej normy z wartościami otrzymanymi z obliczeń według starej normy. Dodatkowo, ze względu na zmiany w wyznaczaniu wartości obliczeniowych oddziaływań oszacowano minimalne wymiary fundamentów dla przeciętych obciążeń przekazywanych przez konstrukcję.

2. Obliczanie nośności według Eurokodu 7

W standardowych warunkach pracy konstrukcji, przy stopniowym wzroście naprężenia w gruncie spowodowanym zwiększaniem obciążenia fundamentów, nie następuje istotny wzrost ciśnienia wody w porach. W takich przypadkach stosować można obliczenia nośności podłoża przedstawione w europejskiej normie jako w warunkach "z odpływem".

Nośność podłoża w warunkach „z odpływem” wyznacza się ze wzoru (1):

$$\frac{R}{A'} = c'N_c b_c s_c i_c + q'N_q b_q s_q i_q + 0,5\gamma' B' N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma \quad (1)$$

w którym:

N_c, N_q, N_γ – współczynniki nośności,

b_c, b_q, b_γ – współczynniki wpływu nachylenia podstawy,

s_c, s_q, s_γ – współczynniki wpływu kształtu podstawy,

i_c, i_q, i_γ – współczynniki wpływu nachylenia wypadkowej obciążenia,

c', γ' – parametry gruntu poniżej poziomu posadowienia,

q' – efektywne naprężenie w poziomie posadowienia.

Teoria obliczeniowa zastosowana w Eurokodzie [1] odpowiada tej stosowanej w polskiej normie [2]. Zakłada ona ścięcie gruntu wzdłuż określonej powierzchni, w wyniku którego może dojść do wyparcia gruntu spod fundamentu.

Nośność podłoża gruntowego warunkowana niedopuszczeniem do wypierania gruntu spod fundamentu w normie [2] określana była wzorem (2):

$$Q_{fNB} = B' L' \left(1 + 0,3 \frac{B'}{L'} \right) N_c c_u i_D + \left(1 + 1,5 \frac{B'}{L'} \right) N_D \rho_D g D_{min} i_D + \left(1 - 0,25 \frac{B'}{L'} \right) N_B \rho_B g B' i_B \quad (2)$$

w którym:

N_C, N_D, N_B – współczynniki nośności,

i_C, i_D, i_B – współczynniki wpływu nachylenia wypadkowej obciążenia,

c_u, ρ_D, ρ_B – parametry gruntu,

D_{min} – minimalna odległość od poziomu posadowienia do poziomu terenu

Wzór podany w Eurokodzie jest analogiczny do stosowanego w polskiej normie. Współczynniki nośności N_C, N_D, N_B odpowiadają N_C, N_D, N_B . Współczynniki N_C i N_B różnią się wartością. Współczynniki wpływu nachylenia wypadkowej i_C, i_D, i_B odpowiadają i_C, i_D, i_B jednak sposób ich wyznaczenia jest różny. Współczynniki kształtu podstawy s_c, s_q, s_γ odpowiadają wartościom w nawiasach, jednak różnią się co do wartości. Dodatkowo w Eurokodzie wprowadzone zostały współczynniki nachylenia podstawy b_c, b_q, b_γ . Analogiczne współczynniki można było znaleźć w innej polskiej normie – PN-83/B-03010 [3] odnoszącej się do projektowania ścian oporowych.

3. Analiza nośności podłoża

3.1. Założenia do obliczeń

W celu porównania nośności szacowanych wg Eurokodu [1] i Polskiej Normy [2] wykonano obliczenia nośności podłoża oraz niezbędnej wielkości fundamentu.

Obliczenia przeprowadzono z założeniami:

- dwóch rodzajów podłoża – niespoistego (kąąt tarcia w przedziale 25°-40°) oraz spoistego (spójność w przedziale 0-65kPa, przy kątach tarcia 5°, 10°, 15°, 20°, 25°)
- fundamentów prostokątnych o proporcjach boków podstawy $L/B=1$ oraz $L/B=10$ odpowiadających pracy stóp i ław fundamentowych
- wymiary fundamentów do wyznaczenia nośności podłoża - $B=1m$
- głębokości posadowienia fundamentu 60cm od poziomu terenu
- ciężar objętościowy gruntu: niespoistego - $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, spoistego - $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$

Oszacowanie nośności podłoża przeprowadzono zgodnie z wytycznymi starej i nowej normy. Dla obliczeń wg [2] przyjęto współczynnik bezpieczeństwa dla parametrów gruntu $\gamma_m=0,9$, oraz współczynnik do nośności obliczeniowej $m=0,9 \cdot 0,9=0,81$. Dla obliczeń wg [1] przyjęto zgodnie z obowiązującym w Polsce podejściem DA2 wartości charakterystyczne parametrów gruntu oraz częściowy współczynnik do nośności podłoża $\gamma_R=1,4$.

3.2. Wyniki analizy

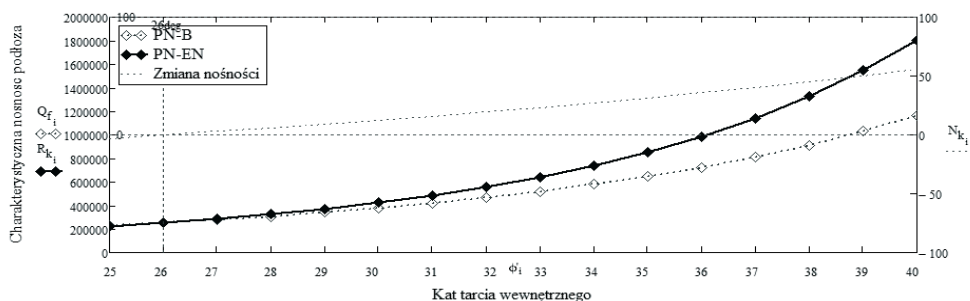
W wyniku przeprowadzonych analiz otrzymano łącznie ponad 700 wartości nośności podłoża dla gruntów o różnych parametrach wytrzymałościowych. Wyniki pogrupowano i przedstawiono w formie wykresów prezentujących zależność „nośność (charakterystyczna lub obliczeniowa) – parametr wytrzymałościowy (kąąt tarcia lub spójność)”. Dodatkowo na każdym z wykresów dodano linię prezentującą procentowy wzrost lub spadek nośności wyznaczonej wg Eurokodu [1] w odniesieniu do Polskiej Normy [2].

3.2.1. Nośność podłoża - Grunty niespoiste

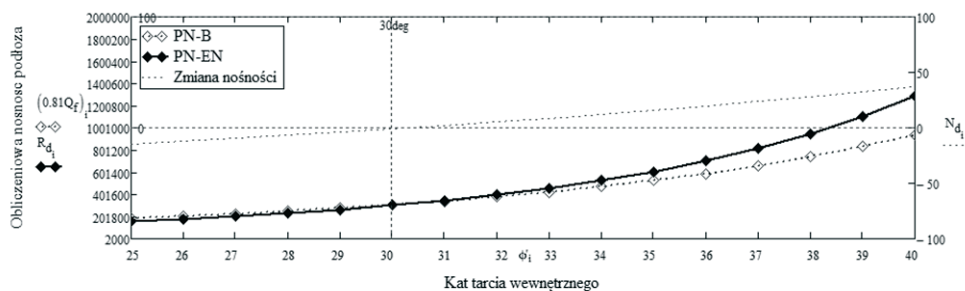
Na podstawie wykresów na rysunkach 1 i 2 można stwierdzić, że nośność podłoża pod stopą wyznaczona wg Eurokodu [1] jest większa niż wg Polskiej Normy [2] dla gruntów z kątem tarcia większym niż 30 stopni. Poniżej tej granicy nośności są porównywalne, natomiast powyżej granicy 30 stopni następuje znaczna poprawa zwiększająca się wraz ze wzrostem kąta tarcia wewnętrznego. Zauważyć również można, że dla wartości

charakterystycznych lepsze rezultaty uzyskuje się w prawie całym przedziale rozważanych parametrów podłoża.

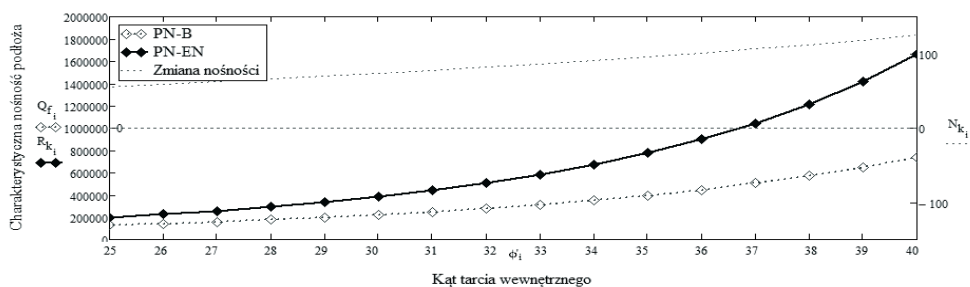
W przypadku ław mamy do czynienia ze wzrostem nośności podłoża w całym zakresie badanych gruntów (rysunek 3 i 4). Wzrost ten wynosi od 50% do nawet 100% dla najmocniejszych gruntów w stosunku do nośności szacowanej wg Polskiej Normy [2]. Fakt ten zauważono również w [4], gdzie zwrócono uwagę na niedoszacowanie nośności podłoża niespoistego. Efektem tego były obliczenia nośności podłoża pod fundamentami istniejących budynków, zgodnie z którymi były one zbyt małe do przeniesienia istniejących obciążeń.



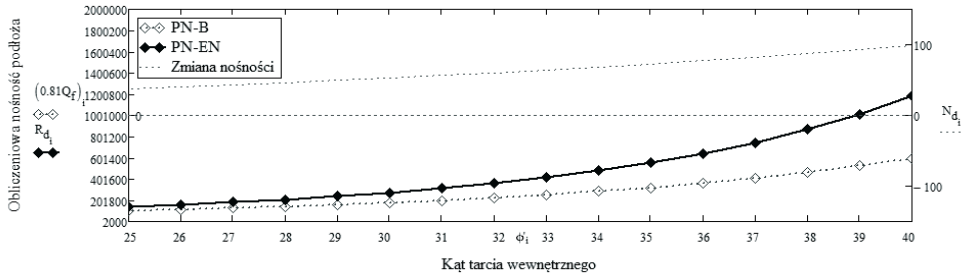
Rys. 1. Charakterystyczna nośność podłoża niespoistego pod stopa fundamentową ($L/B=1$)



Rys. 2. Obliczeniowa nośność podłoża niespoistego pod stopa fundamentową ($L/B=1$)



Rys. 3. Charakterystyczna nośność podłoża niespoistego pod ławą fundamentową ($L/B=10$)

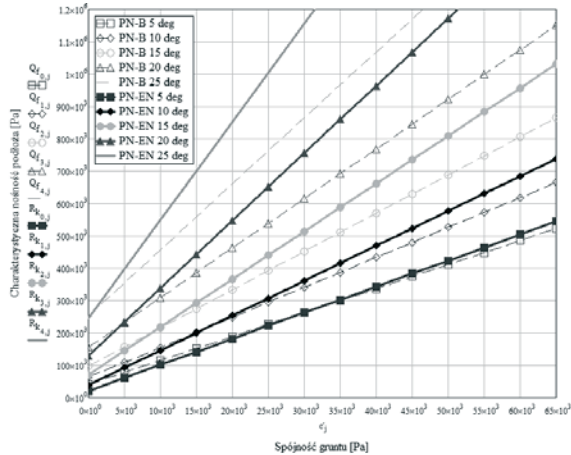


Rys. 4. Obliczeniowa nośność podłoża niespoistego pod ławą fundamentową ($L/B=10$)

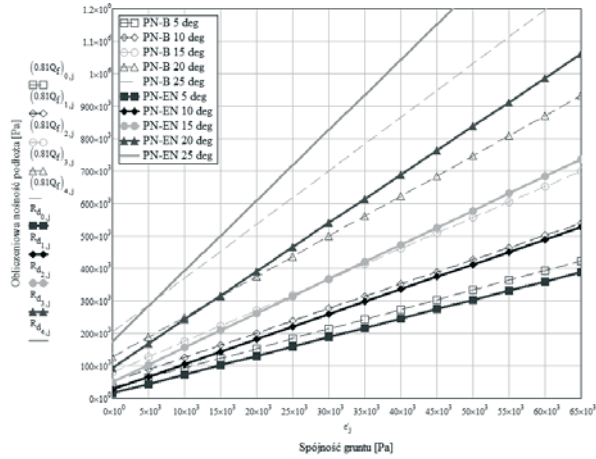
3.2.2. Nośność podłoża - Grunty spoiste

Zgodnie z wykresami na rysunkach 6 i 8 stwierdzić można że nośności obliczeniowe gruntów spoistych wyznaczone według obydwu norm są porównywalne dla gruntów o kącie tarcia do 15° zarówno dla stóp jak i ław fundamentowych. Różnica w wyznaczonej nośności nie przekracza 10%. Powyżej granicy kąta tarcia 15° zauważa się wzrost nośności (dla najlepszych gruntów do 25%) na korzyść Eurokodu. Mniejszą nośność uzyskano jedynie dla gruntów pod stopami z kątem tarcia poniżej 10° .

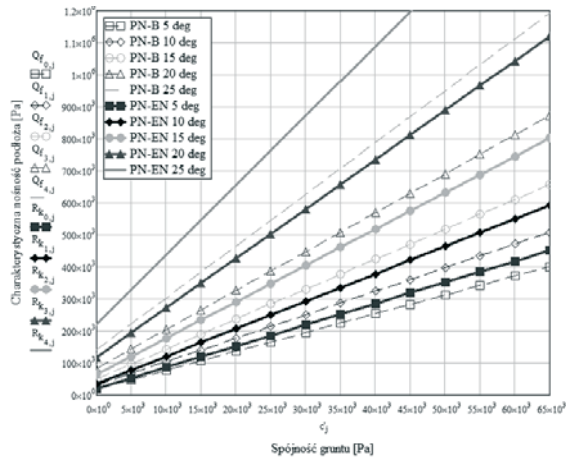
Dla wartości charakterystycznych (rysunek 5 i 7) porównywalne nośności występują jedynie dla gruntów najsłabszych, o kącie tarcia 5° . W pozostałych przypadkach, nośność wyznaczona wg Eurokodu zawsze jest większa osiągając dla mocnych gruntów wartości wyższe nawet o ponad 40%.



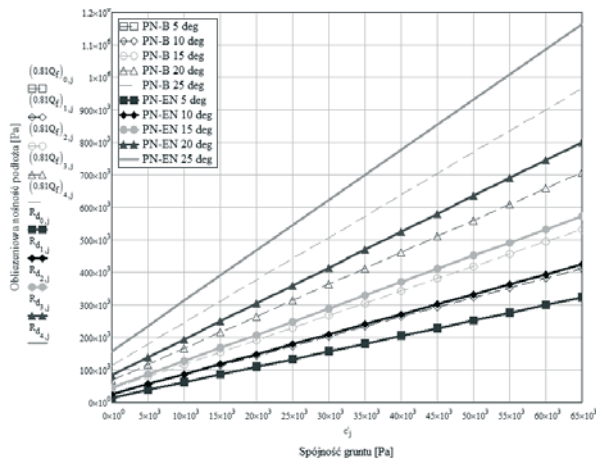
Rys. 5. Charakterystyczna nośność podłoża spoistego pod stopą fundamentową ($L/B=1$)



Rys. 6. Obliczeniowa nośność podłoża spoiestego pod stopą fundamentową ($L/B=1$)



Rys. 7. Charakterystyczna nośność podłoża spoiestego pod ławą fundamentową ($L/B=10$)



Rys. 8. Obliczeniowa nośność podłoża spoiestego pod ławą fundamentową ($L/B=10$)

3.2.3. Dobór wymiarów fundamentu

Nowe normy europejskie zmieniły również współczynniki częściowe do wyznaczania wartości obliczeniowych. Uwzględniając je przeprowadzono analizę doboru wielkości podstawy fundamentu ze względu na nośność podłoża. Do obliczeń przyjęto, że na fundament przekazywane są z konstrukcji charakterystyczne siły o wartości:

- stopa fundamentowa: stałe – 600 kN, zmienne – 400 kN,
- ława fundamentowa: stałe – 240 kN/mb, zmienne – 200kN/mb,

Przyjęto współczynniki bezpieczeństwa dla obciążeń stałych 1,15 [2] i 1,35 [1] oraz dla obciążeń zmiennych 1,30 [2] i 1,50 [1].

Rezultatem obliczeń są minimalne pola powierzchni stopy oraz minimalne szerokości ławy określone dla wyznaczonych wcześniej nośności podłoża i przyjętych obciążeń.

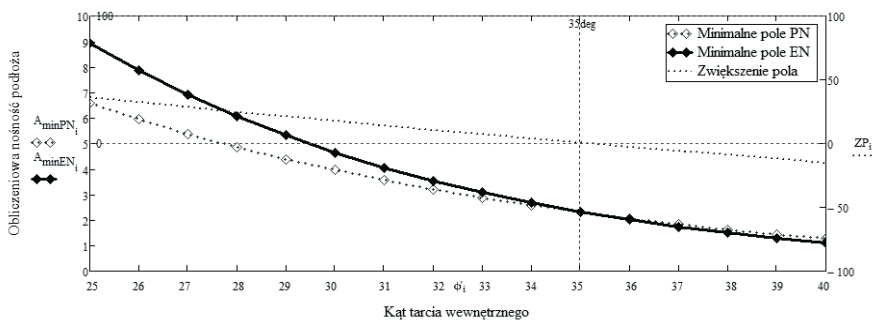
Z analiz podłoża niespoistego (Rys. 9.) wynika, że dla stóp fundamentowych posadowionych na gruntach o kącie tarcia poniżej 35° wymagane jest większe pole podstawy. Różnica w wymaganym polu wzrasta wraz ze zmniejszaniem się wartości kąta tarcia wewnętrznego i dla 25° osiąga 35%. Dla gruntów mocniejszych wymagane pole jest porównywalne, lecz można zauważyć zmniejszanie się pola, dla kąta 40° nawet o 15%.

W przypadku ław fundamentowych (Rys. 10.), jednoznacznie można stwierdzić, że projektowanie zgodnie z Eurokodem jest ekonomiczniejsze. Zmniejszenie wymaganej szerokości osiąga wartości od 15% do nawet 40% w najmocniejszych gruntach.

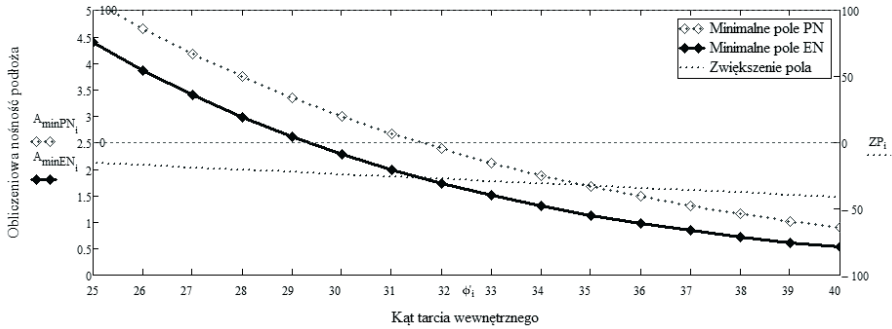
W gruntach spoiстых zauważono zwiększone zapotrzebowanie na powierzchnię stóp fundamentowych (Rys. 11.), od kilku do ponad 50%. Największy wzrost zapotrzebowania w stosunku do starej normy zaobserwowano dla gruntów najsłabszych, o niewielkim kącie tarcia i bardzo małej spójności. Zmniejszenie pola wystąpiło jedynie dla gruntu o kącie tarcia 25° i spójności powyżej 30 kPa.

Szerokość ław fundamentowych posadowionych na gruntach spoiстых (Rys. 12.), jest zbliżona dla obliczeń według obydwu norm. Występujące różnice w większości przypadków dochodzą maksymalnie do 12%. Jedynie w przypadku bardzo słabego podłoża dochodzi do zwiększenia szerokości o 25%, a w przypadku bardzo mocnego podłoża zmniejszenia pola o 25%.

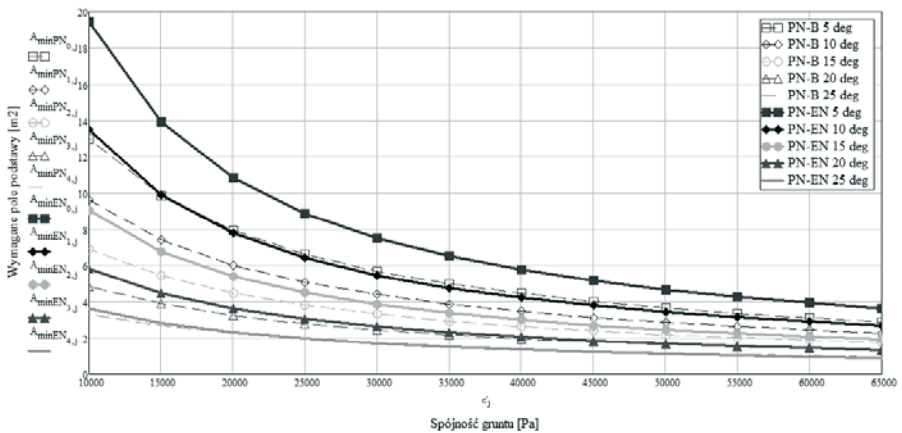
Porównując obliczenia według Eurokodu do starej normy, zaobserwowano ogólny trend zmniejszania wymiarów fundamentów w gruntach bardzo mocnych, oraz zwiększania wymiarów w gruntach bardzo słabych. W przypadku warunków przeciętnych fundamenty zaprojektowane według obydwu norm nie powinny znacząco się różnić. Nie dotyczy to ław fundamentowych posadowionych na gruntach niespoistych, dla których obliczenia wykonane zgodnie z nową normą dają znacznie ekonomiczniejsze rezultaty.



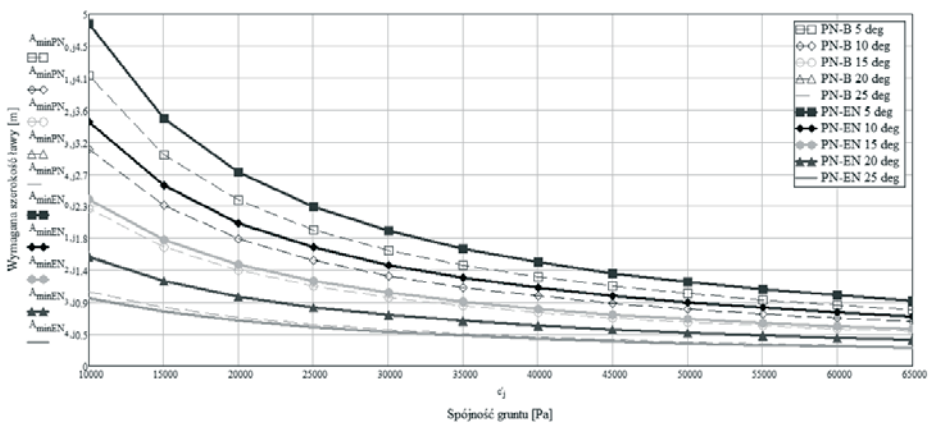
Rys. 9. Wymagane pole powierzchni stopy fundamentowej ($L/B=1$) dla założonych obciążeń na podłożu niespoistym



Rys. 10. Wymagana szerokość ławy fundamentowej (L/B=10) dla założonych obciążeń na podłożu niespoistym



Rys. 11. Wymagane pole powierzchni stopy fundamentowej (L/B=1) dla założonych obciążeń na podłożu spoiстым



Rys. 12. Wymagana szerokość ławy fundamentowej (L/B=10) dla założonych obciążeń na podłożu spoiстым

4. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie wykonanych analiz można stwierdzić, że nośność podłoża oszacowana zgodnie z Eurokodem jest wyższa w zdecydowanej większości przypadków. Jedynie dla gruntów niespoistych w stanie luźnym oraz spoistych o niskich parametrach wytrzymałościowych obliczona nośność będzie mniejsza. Dotyczy to zarówno wartości charakterystycznych, jak i obliczeniowych. Znaczne zwiększenie wytrzymałości zaobserwowano dla gruntów niespoistych, szczególnie tych o bardzo dobrych parametrach.

Obliczeniowe zwiększenie wytrzymałości gruntu wynika głównie ze zwiększenia współczynnika N_{γ} oraz stosowania charakterystycznych parametrów gruntu w obliczeniach. Zwiększenie obliczeniowej nośności podłoża nie powoduje znacznego zmniejszenia wymiarów fundamentu. Związane jest to ze zmianą współczynników częściowych do wyznaczania wartości obliczeniowych oddziaływań. Ich zmiana powoduje znaczne zwiększenie obciążeń obliczeniowych. Rezultatem tego są zbliżone wymiary fundamentów wyznaczone na podstawie obydwu norm w przeciętnych warunkach gruntowych. W warunkach skrajnych można zauważyć różnice. Na podłożu bardzo słabym obserwujemy zwiększenie fundamentów, natomiast w bardzo dobrych warunkach gruntowych mamy do czynienia ze znacznym zmniejszaniem ich wymiarów.

Podsumowując, wymiary fundamentów projektowane w przeciętnych warunkach gruntowych według Eurokodu [1] nie powinny w znacząco odbiegać od tych wyznaczonych według starej Polskiej Normy [2]. Różnice wymiarów wystąpią w przypadku skrajnych paramentów wytrzymałościowych podłoża oraz dla ław posadowionych na gruntach niespoistych. Opisywane obliczenia przedstawione została w sposób umożliwiający analizę porównawczą. Podczas projektowania konkretnych fundamentów, nośność podłoża może się nieznacznie różnić. Wytrzymałość gruntu uwarunkowana jest przez wiele czynników i powinna być rozpatrywana indywidualnie dla każdego przypadku posadowienia.

Literatura

- 1 PN-EN 1997-1 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne
- 2 PN-81/B-03020 Grunty budowlane - Posadowienie bezpośrednie budowli - Obliczenia statyczne i projektowanie
- 3 PN-83/B-03010 Ściany oporowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- 4 Wysokiński L., Kotlicki W., Godlewski T., Projektowanie geotechniczne według Eurokodu 7, Warszawa 2011.

Estimating of bearing capacity of subsoil under shallow foundations related to European Standards

Krzysztof Nepelski¹

¹ *Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: k.nepelski@pollub.pl*

Abstract: The paper presents the calculation method of bearing capacity based on European Standards. The analysis of bearing capacity depends on the strength parameters of soil. Results were presented as a graph "bearing capacity" - "strength parameter". All of the results were compare to Polish Standards. Minimal dimensions of foundation were calculated for every bearing capacity. The design value of an action was calculated on the basis of European and Polish Standards.

Keywords: design foundation, bearing capacity of subsoil, European Standards, Eurocode, comparison of standards