

NOŚNOŚĆ PODŁOŻA GRUNTOWEGO POD ŁAWĄ FUNDAMENTOWĄ WEDŁUG EUROKODU 7 ORAZ PN-81/B-03020

Wojciech GOSK*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki obliczeń nośności podłoża gruntowego pod ławą fundamentową uzyskane na podstawie Eurokodu 7 i normy PN-81/B-03020 Posadowienie bezpośrednie budowli. Wykazano, że obliczone według obydwu norm nośności podłoża dla poszczególnych rodzajów gruntów dają porównywalne wyniki, gdy przyjmujemy charakterystyczne wartości parametrów geotechnicznych. Wyniki uzyskane na bazie parametrów i obciążeń obliczeniowych prowadzą natomiast do zróżnicowanych ocen nośności podłoża, co uzależnione jest od zastosowanego podejścia obliczeniowego według Eurokodu 7.

Słowa kluczowe: ława fundamentowa, Eurokod 7, nośność podłoża.

1. Wstęp

Wprowadzenie Eurokodu 7 „Projektowanie geotechniczne” wzbudza w środowisku projektantów, zwłaszcza z obszaru geotechniki, wiele dyskusji i pytań. Naturalnym jest doszukiwanie się podobieństw i różnic w algorytmach projektowania w stosunku do dotychczasowej normy PN-81/B-03020 *Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie*, na przykład prace Pieczyraka (2006, 2009) oraz Galasa i Kiziewiczza (2009). Obydwie normy opierają się co prawda na metodzie stanów granicznych, jednakże zastosowanie zróżnicowanego podejścia w kwestii współczynników częściowych powoduje uzyskiwanie zróżnicowanych ocen nośności podłoża. Praca niniejsza jest próbą odpowiedzi na pytanie na ile istotne są te różnice w przypadku obliczeń według obydwu norm dla podstawowego zagadnienia inżynierii geotechnicznej, jakim jest nośność podłoża pod ławą fundamentową.

Norma Eurokod 7 wprowadza w projektowaniu geotechnicznym 5 rodzajów pierwszego stanu granicznego:

EQU – utrata równowagi konstrukcji lub podłoża, rozpatrywanych jako ciało sztywne, gdy wytrzymałość materiałów konstrukcyjnych i gruntu ma znaczenie nieistotne dla zapewnienia nośności;

STR – wewnętrzne zniszczenie albo nadmierne odkształcenie konstrukcji lub jej elementów, w tym na przykład fundamentów bezpośrednich, pali lub ścian nadziemnych, gdy wytrzymałość materiałów konstrukcyjnych jest decydująca w zapewnieniu nośności;

GEO – zniszczenie albo nadmierne odkształcenie podłoża, gdy wytrzymałość gruntu lub skały jest decydująca dla zapewnienia nośności;

UPL – utrata stateczności konstrukcji albo podłoża (utrata równowagi pionowej) spowodowana ciśnieniem wody (wyporem) lub innym oddziaływaniem pionowym (stan graniczny wyparcia);

HYD – hydrauliczne unoszenie cząstek gruntu, erozja wewnętrzna lub przebiecie hydrauliczne w podłożu spowodowane spadkiem hydraulicznym (ciśnieniem spływowym).

Obliczenia wykonane w ramach niniejszej pracy dotyczyć będą stanu oznaczonego jako GEO. Zagadnienie nośności podłoża pod fundamentem bezpośrednim jest podstawowym problemem w obszarze tego stanu.

2. Stan graniczny nośności podłoża gruntowego według Eurokodu 7

Sprawdzenie pierwszego stanu granicznego według Eurokodu 7 sprowadza się do wykazania, że:

$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

gdzie E_d jest to wartość obliczeniowa efektu oddziaływań, natomiast R_d jest to wartością obliczeniową oporu przeciw oddziaływaniu.

Wartość obliczeniową oddziaływania F_d wyznacza się z zależności:

$$F_d = \gamma_F \cdot F_{rep} \quad (2)$$

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: w.gosk@pb.edu.pl

gdzie F_{rep} jest to wartość reprezentatywna oddziaływania, γ_F jest to współczynnik częściowy do oddziaływania według załącznika A normy Eurokod 7 (por. Tab. 1).

Wartość obliczeniową parametru geotechnicznego X_d należy wyznaczyć jako

$$X_d = X_k / \gamma_M \quad (3)$$

gdzie X_k jest to wartość charakterystyczna parametru geotechnicznego, γ_M jest to współczynnik częściowy do parametru geotechnicznego według załącznika A normy Eurokod 7 (por. Tab. 2).

Współczynniki częściowe do oddziaływań można stosować albo do samych oddziaływań (F_{rep}), albo do ich efektów (E):

$$E_d = E \{ \gamma_F F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d \} \quad (4a)$$

lub

$$E_d = \gamma_E E \{ F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d \} \quad (4b)$$

W przypadku oporów obliczeniowych współczynniki częściowe można stosować do parametrów gruntu (X), albo do oporów (nośności) (R), jak również do obydwóch tych wielkości (γ_R jest to współczynnik częściowy do oporu lub nośności):

$$R_d = R \{ \gamma_F F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d \} \quad (5a)$$

lub

$$R_d = R \{ \gamma_F F_{rep}; X_k; a_d \} / \gamma_R \quad (5b)$$

lub

$$R_d = R \{ \gamma_F F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d \} / \gamma_R \quad (5c)$$

W powyższych wzorach $a_d = a_{nom} \pm \Delta a$ jest wartością obliczeniową danej geometrycznej. Norma Eurokod 7 stwierdza, że zasadniczo współczynniki częściowe oddziaływań i współczynniki materiałowe (γ_F i γ_M) uwzględniają niewielkie odchyłki danych geometrycznych. W takich przypadkach nie zaleca się wymagania dodatkowego zapasu bezpieczeństwa, więc $a_d = a_{nom}$ (a_{nom} jest to wartość nominalna danej geometrycznej).

3. Podejścia obliczeniowe

Norma Eurokod 7 wyróżnia trzy podejścia obliczeniowe różniące się rozkładem współczynników częściowych pomiędzy oddziaływania, efekty oddziaływań, parametry geotechniczne i inne właściwości materiałowe. Współczynniki zostały podzielone na zestawy oznaczone jako A (do oddziaływań i efektów oddziaływań), M (do parametrów geotechnicznych) i R (do oporów lub nośności).

Podejście obliczeniowe 1 (PO1) polega na analizie dwóch zestawów współczynników częściowych. Gdy pewnym jest, że jeden z tych zestawów ma decydujące

znaczenie w projekcie, sprawdzenie drugiego staje się zbędne. Generalnie w podejściu tym współczynniki stosuje się do oddziaływań lub efektów oddziaływań, ale także do parametrów geotechnicznych. Eurokod 7 wyróżnia w przypadku fundamentów bezpośrednich dwie kombinacje zestawów współczynników częściowych, kombinacja 1 (PO1/1): $A1 + M1 + R1$, kombinacja 2 (PO1/2): $A2 + M2 + R1$. Taki rodzaj zapisu należy odpowiednio interpretować, „+” oznacza: „w połączeniu z”. Kombinacja pierwsza opiera się na założeniu, że odchylenia od wielkości charakterystycznych dotyczą oddziaływań. Natomiast przyjmuje się w tej kombinacji wysoką pewność wyznaczenia wartości parametrów geotechnicznych. Kombinacja druga zakłada sytuację odwrotną, odchylenia od wielkości charakterystycznych dotyczą parametrów geotechnicznych. Natomiast wielkości oddziaływań i efektów oddziaływań przyjmują w przypadku obciążeń stałych wartości równe wielkościom charakterystycznym.

Wartości współczynników częściowych do oddziaływań (γ_F) i efektów oddziaływań (γ_E) podano w tabeli 1, natomiast współczynniki częściowe do parametrów geotechnicznych zawarto w tabeli 2, zaś do oporów – w tabeli 3.

Tab. 1. Współczynniki częściowe do oddziaływań (γ_F) i efektów oddziaływań (γ_E) według Eurokodu 7

Oddziaływanie	Symbol	Zestaw	
		A1	A2
Stałe	Niekorzystne	1,35	1,0
	Korzystne	1,0	1,0
Zmienne	Niekorzystne	1,5	1,3
	Korzystne	0	0

Tab. 2. Współczynniki częściowe do parametrów geotechnicznych (γ_M) według Eurokodu 7

Parametr gruntu	Symbol	Zestaw	
		M1	M2
Kąt tarcia wewnętrznego ^a	γ_ϕ	1,0	1,25
Spójność efektywna	γ_c	1,0	1,25
Wytrzymałość na ścinanie bez odplywu	γ_{cu}	1,0	1,4
Wytrzymałość na ścinanie jednoosiowe	γ_{qu}	1,0	1,4
Ciężar objętościowy	γ_γ	1,0	1,0

^a Współczynnik ten stosuje się do $\tan \phi'$

Tab. 3. Współczynniki częściowe do oporu/nośności (γ_R) dotyczące fundamentów bezpośrednich według Eurokodu 7

Nośność	Symbol	Zestaw		
		R1	R2	R3
Nośność podłoża	$\gamma_{R,v}$	1,0	1,4	1,0
Przesunięcie (poślizg)	$\gamma_{R,h}$	1,0	1,1	1,0

W podejściu obliczeniowym 2 (PO2) współczynniki częściowe stosuje się do oddziaływań albo efektów oddziaływań jak i do oporów (nośności). Wymagane jest jednokrotne sprawdzenie dla kombinacji $A1 + M1 + R2$. To podejście obliczeniowe nie wymaga użycia współczynników częściowych do parametrów

geotechnicznych. Takie postępowanie ma być działaniem z założenia bardziej bezpiecznym w stosunku do podejścia obliczeniowego 1.

W podejściu obliczeniowym 3 (PO3) współczynniki częściowe należy stosować do oddziaływań lub efektów oddziaływań od konstrukcji, jak również do parametrów gruntu i materiałów: (A1 lub A2) + M2 + R3. Zestaw A1 należy przyjmować do oddziaływań konstrukcji, A2 do oddziaływań geotechnicznych. To podejście obliczeniowe zakłada jednoczesne przyjęcie najwyższych z możliwych współczynników częściowych do oddziaływań i parametrów geotechnicznych.

4. Nośność graniczna podłoża gruntowego według PN-81/B-03020 i Eurokodu 7

Nośność podłoża gruntowego według PN-81/B-03020 wyraża znana zależność

$$q_f = \left(1 + 0,3 \frac{B}{L}\right) N_c c_u^{(r)} i_c + \left(1 + 1,5 \frac{B}{L}\right) N_D \rho_D^{(r)} g D_{\min} i_D + \left(1 - 0,25 \frac{B}{L}\right) N_B \rho_B^{(r)} g B i_B \quad (6)$$

Według Eurokodu 7 nośność podłoża przy założeniu warunków z odpływem obliczamy ze wzoru:

$$R/A' = c' N_c b_c s_c i_c + q' N_q b_q s_q i_q + 0,5 \gamma' B' N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma \quad (7)$$

gdzie R jest to wartość oporu przeciw oddziaływaniu (w przypadku sprawdzenia pierwszego stanu granicznego będzie to wartość obliczeniowa R_D), $A' = B' \times L'$ jest to efektywne obliczeniowe pole powierzchni fundamentu, γ' jest to obliczeniowy efektywny ciężar objętościowy gruntu poniżej poziomu posadowienia, q' jest to obliczeniowe efektywne naprężenie od nadkładu w poziomie podstawy fundamentu, c' jest to spójność efektywna, N_q , N_c , N_γ są to współczynniki nośności, s_q , s_c , s_γ są to współczynniki kształtu fundamentu, b_q , b_c , b_γ są to współczynniki nachylenia podstawy fundamentu (przyjęto wartość równą jedności), i_q , i_c , i_γ są to współczynniki nachylenia obciążenia spowodowanego obciążeniem poziomym H (przyjęto wartość równą jedności).

Istotne różnice w podejściach według obydwu norm dotyczą współczynników nośności i współczynników kształtu fundamentu (Tab. 4).

5. Porównanie wyników obliczeń

Przeprowadzono obliczenia nośności podłoża pod ławą fundamentową (przyjęto szerokość ławy $B = B' = 1,2\text{m}$, głębokość posadowienia $D_{\min} = 1,2\text{m}$). Analizie poddano grunty niespoiste i spoiste. Dla czytelności przeprowadzonych porównań wykorzystano klasyfikację gruntów według PN-81/B-03020. Należy jednak zaznaczyć, że norma Eurokod 7 opiera się na klasyfikacji gruntów według PN-EN ISO 14688.

Tab. 4. Współczynniki nośności i kształtu fundamentu według normy PN-81/B-03020 i Eurokodu 7

PN-81/B-03020	Eurokod 7
Współczynniki nośności:	
$N_D = e^{\pi g \phi} \tan^2(45 + \phi/2)$	$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2(45 + \phi/2)$
$N_C = (N_D - 1) \text{ctg } \phi'$	$N_c = (N_q - 1) \text{cot } \phi$ (Eurocode 7) ^b
$N_B = 0,75(N_D - 1) \text{tg } \phi'$	$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \phi$
Współczynniki kształtu:	
$1 + 1,5B/L$	$s_q = 1 + (B'/L') \sin \phi'$
$1 - 0,25B/L$	$s_\gamma = 1 - 0,3(B'/L')$
$1 + 0,3B/L$	$s_c = (s_q N_q - 1)/(N_q - 1)$

^b Zależność określającą wielkość współczynnika nośności N_c zaczerpnięto z angielskiej wersji normy Eurocode 7. Wzór podany w polskim tłumaczeniu Eurokodu 7 zawiera błąd.

Tab. 5. Wyniki przeprowadzonych obliczeń dla gruntów niespoistych uzyskane przy zastosowaniu charakterystycznych wartości parametrów geotechnicznych

Rodzaj gruntu niespoistego	I_D	q_{gr} (kPa) (PN-81/B-03020)	R/A' (kPa) (Eurokod 7)	$R/A' / q_{gr}$
Ż, Po	0,25	1501	1575	1,05
	0,50	1948	2059	1,06
	0,75	2554	2720	1,06
Pr, Ps	0,25	726	745	1,03
	0,50	888	918	1,03
	0,75	1093	1137	1,04
Pd, Pπ	0,25	500	508	1,02
	0,50	583	596	1,02
	0,75	683	701	1,03

Tab. 6. Wyniki przeprowadzonych obliczeń dla gruntów spoistych uzyskane przy zastosowaniu charakterystycznych wartości parametrów geotechnicznych

Rodzaj gruntu spoistego	I_L	q_{gr} (kPa) (PN-81/B-03020)	R/A' (kPa) (Eurokod 7)	$R/A' / q_{gr}$
A	0,10	1158	1166	1,01
	0,30	745	747	1,00
	0,50	488	483	0,99
B	0,10	773	772	1,00
	0,30	494	488	0,99
	0,50	317	310	0,98
C	0,10	421	415	0,99
	0,30	243	236	0,97
	0,50	150	144	0,95
D	0,10	595	589	0,99
	0,30	425	418	0,98
	0,50	300	294	0,98

Wyniki obliczonych nośności, uzyskane przy zastosowaniu charakterystycznych wartości parametrów geotechnicznych, zamieszczono w tabelach 5 i 6. Zwraca uwagę fakt, że uzyskuje się nieznacznie wyższe nośności podłoża ustalane według Eurokodu 7 dla gruntów niespoistych. W przypadku gruntów spoistych różnice są minimalne.

W przypadku zastosowania obliczeniowych wartości parametrów geotechnicznych i obciążeń ocena nośności podłoża uzależniona jest od zastosowanego podejścia

obliczeniowego 1, 2 lub 3 według Eurokodu 7. W celu porównania wyników przyjęto następujące założenia:

- fundament posadowiony jest na piasku drobnoziarnistym o $I_D = 0,50$,
- obciążenie stałe ławy wynosi 240 kN/m,
- obciążenie zmienne śniegiem przekazywane na ławę wynosi 40 kN/m,
- obciążenie zmienne wiatrem przekazywane na ławę wynosi 20 kN/m,
- do wyznaczania parametrów geotechnicznych zastosowano metodę A, dlatego wartość współczynnika korekcyjnego m według PN-81/B-03020 wynosi 0,9.

Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 7. Miarą oceny będzie współczynnik wykorzystania nośności WN .

Tab. 7. Wyniki przeprowadzonych obliczeń przy zastosowaniu obliczeniowych parametrów geotechnicznych i obciążeń

Podjęcie obliczeniowe	R/A' (kPa)	E/A' (kPa)	$WN = \frac{E}{R} \cdot 100\%$
PO1/1 Eurokod 7	596	345	57,6%
PO1/2 Eurokod 7	381	265	69,5%
PO2 Eurokod 7	426	345	81,1%
PO3 Eurokod 7	381	368	96,4%
PN-81/B-03020	$q_f = 418$	292	69,8%

6. Wnioski

Otrzymane wyniki obliczeń według Eurokodu 7 oraz normy PN-81/B-03020 nie wykazują znaczących różnic oporów granicznych podłoża dla analizowanych gruntów w przypadku zastosowania charakterystycznych wartości parametrów geotechnicznych. Zależności w obydwu normach oparte są na wzorze Terzagiego ze zmodyfikowanymi wartościami współczynników kształtu fundamentu i współczynników nośności podłoża. Jednakże okazuje się, że zróżnicowanie tych współczynników w obydwu algorytmach projektowania nie prowadzi do uzyskania znacząco rozbieżnych wyników nośności podłoża pod ławą fundamentową.

Odmienne należy podsumować przypadek zastosowania obliczeniowych wartości oddziaływań, parametrów geotechnicznych i oporów podłoża zastosowanych do obliczeń według Eurokodu 7 oraz normy PN-81/B-03020. Wyniki uzyskiwane przy użyciu tych wartości wskazują wyraźne różnice w ocenie nośności podłoża, co uzależnione jest od zastosowanego podejścia obliczeniowego. Przeprowadzone obliczenia prowadzą do wniosku, że najbardziej bezpiecznym podejściem przy projektowaniu jest podejście obliczeniowe 3 według Eurokodu 7 (współczynnik wykorzystania nośności $WN = 96,4\%$). Podejściem wykazującym największy zapas nośności jest natomiast

kombinacja 1 podejścia obliczeniowego 1 według Eurokodu 7 (PO1/1).

Dość zaskakujący rezultat daje porównanie wyników obliczeń według Eurokodu 7 z wynikami uzyskanymi według PN-81/B-03020. Można zauważyć, że najbardziej zbliżona wartość współczynnika WN odpowiada w tym przypadku zastosowaniu kombinacji drugiej podejścia obliczeniowego 1 według Eurokodu 7 (PO1/2). Formalnie wydaje się, że najbardziej zbliżone do dotychczasowej metodyki obliczeń według PN-81/B-03020 jest podejście obliczeniowe 3. Jednakże należy zauważyć, że współczynniki częściowe w podejściu obliczeniowym 3 mają większą wartość.

Problemem pozostaje więc wybór podejścia obliczeniowego, który z założenia może być decyzją projektanta. Pewnym ułatwieniem w tym zakresie byłoby wejście w życie Załącznika krajowego do Eurokodu 7, uściślającego sposób podejmowania decyzji o wyborze konkretnego podejścia obliczeniowego.

Literatura

- EN 1997-1:2004. Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules.
- Galas P., Kiziewicz D. (2009). Ocena nośności podłoża pod stopą fundamentową według Eurokodu 7 oraz PN-81/B-03020. *Problemy Geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoża ekspansywnych*. Wydawnictwa Uczelniane UTP. Bydgoszcz, 575-582.
- Pieczyrak J. (2006). Nośność graniczna podłoża gruntowego według PN-81/B-03020 i Eurokodu 7. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej*. Budownictwo, Z28, 197-211.
- Pieczyrak J. (2009). Stany graniczne i warunki obliczeniowe w geotechnice. *XXIV ogólnopolskie warsztaty pracy projektanta konstrukcji*. Wisła, 17-20 marca 2009r. Tom 1, 247-270.
- PN-EN 1997-1:2008. Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne.
- PN-EN ISO 14688 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów.

THE BEARING CAPACITY OF SUBSOIL UNDER CONTINUOUS FOUNDATION BASED ON EUROCODE 7 AND PN-81/B-03020

Abstract: This paper presents results of calculations of bearing capacity of subsoil under the continuous foundation. These calculations were based on Eurocode 7 and Polish Standard PN-81/B-3020 (Building soils. Foundation bases. Static calculation and design). It was shown that calculated on the basis of these two documents bearing capacity of subsoil gives comparable results for characteristics values of geotechnical parameters. Calculations for design values of geotechnical parameters and loads give different values of bearing capacity of subsoil depending on applied design approach.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji pracy statutowej nr WBiŚ/5/2010 finansowanej ze środków MNiSW w latach 2010-2013