

Nośność pionowa kolumn zawieszonych GEC

Mgr inż. Iwona Chmielewska

Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

W związku z rozwojem budownictwa, a w szczególności budownictwa drogowego, coraz częstszym problemem jest konieczność wykorzystania pod budowę terenów charakteryzujących się niekorzystnymi warunkami geotechnicznymi. Przykładem może być budowa obwodnicy Bargłowa Kościelnego w województwie podlaskim. Na obwodnicy o łącznej długości około 12 km występuje odcinek o długości 285 m, na którym w podłożu zalegają grunty organiczne (torfy i namuły) o miąższości dochodzącej do 8 m. Pod warstwą gruntów organicznych (torfów) występują gliny piaszczyste w stanie miękkoplastycznym i plastycznym. Poniżej zalegają gliny piaszczyste w stanie twardoplastycznym [9, 10]. W związku z dużą miąższością gruntów organicznych na opisywanym odcinku obwodnicy wykonano wzmocnienie kolumnami piaszkowymi w otoczkach geosyntetycznych GEC (*Geosynthetic Encased Columns*).

W projekcie wzmocnienia kolumnami GEC założono zagłębienie kolumn w warstwie gruntu nośnego na głębokość 0,5 m. Jako grunt nośny traktowano grunt o module $M_0 \geq 5$ MPa [9]. Badania wykonane za pomocą sondy CPTU wykazały, że podstawy kolumn GEC są usytuowane od 1,5 do 2,0 m poniżej stropu glin piaszczystych w stanie miękkoplastycznym i plastycznym [9]. Zatem podstawy kolumn znajdują się w gruntach słabonośnych i kolumny mogą być traktowane jako zawieszone (*floating columns*).

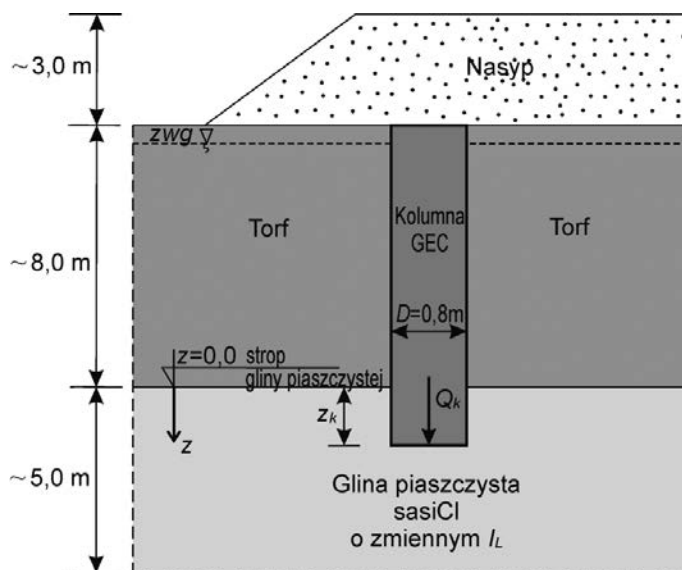
W pracy przedstawiono inżynierskie metody określania nośności kolumn zawieszonych.

Po pierwsze „zawieszoną” kolumnę GEC potraktowano jako fundament bezpośredni i nośność kolumny określono korzystając z wzorów podanych w Eurokodzie 7 [5]. Ze względu na występowanie w podłożu glin piaszczystych o stosunkowo dużym współczynniku filtracji nośność kolumny określono w warunkach z odpływem. Taką metodykę określania nośności nazwano *metodą klasyczną*.

Po drugie kolumnę GEC potraktowano jako szczególny rodzaj „pala” i nośność kolumny określono za pomocą procedur stosowanych do obliczenia nośności pala na podstawie wyników badań CPTU. Metodykę opracowaną przez Bustamante i Ganeselli [1] nazwano *metodą LCPC* (*Laboratoire Central des Ponts et Chausees*), metodykę opracowaną przez Beringena i DeRuitera [2] nazwano *metodą europejską*, natomiast metodykę przedstawioną w normie DIN 4014 [8] nazwano *metodą DIN 4014*. Dla wybranych lokalizacji policzono charakterystyczne wartości nośności kolumn zawieszonych GEC o średnicy 0,8 m przy różnym zagłębieniu kolumn w warstwie glin piaszczystych w stanie miękkoplastycznym i plastycznym. Przyjęto, że sąsiednie kolumny nie mają wpływu na nośność analizowanej pojedynczej kolumny.

CHARAKTERYSTYCZNA NOŚNOŚĆ KOLUMNY GEC

Geometrię zagadnienia przedstawiono schematycznie na rys. 1.



Rys. 1. Geometria zagadnienia

Jako „nośność” kolumny traktuje się graniczną wartość charakterystyczną siły Q_k (rys. 1) w poziome podstawy kolumny.

Metoda klasyczna

Zagadnienie nośności kolumny GEC w metodzie klasycznej przedstawiono schematycznie na rys. 2.

Charakterystyczną wartość nośności kolumny GEC (Q_k) dla warunków z odpływem można obliczyć z wzoru [5]:

$$Q_k = A(c'N_c s_c + q'N_q s_q + 0,5\gamma'BN_\gamma s_\gamma) \quad (1)$$

gdzie:

- A – pole podstawy kolumny $\left(A = \frac{\pi D^2}{4}\right)$,
- c' – spójność efektywna,
- q' – obciążenie naziomu,
- B – dla fundamentu kołowego $B = D\sqrt{\frac{\pi}{4}}$,
- γ' – ciężar objętościowy gruntu z uwzględnieniem wyporu wody,
- N_c, N_q, N_γ – współczynniki nośności wyznaczone ze wzorów:

$$N_q = e^{\pi \tan \phi'} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (2)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi' \quad (3)$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \phi' \quad (4)$$

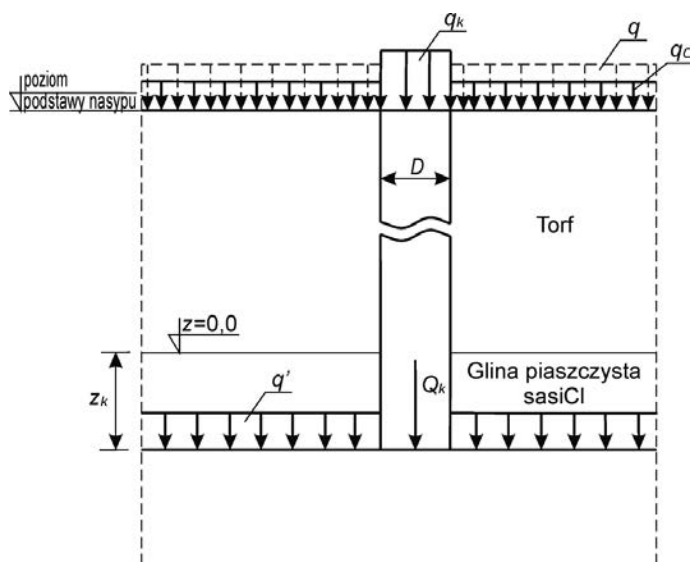
s_q, s_c, s_γ – współczynniki kształtu:

$$s_q = 1 + \sin \phi' \quad (5)$$

$$s_\gamma = 0,7 \quad (6)$$

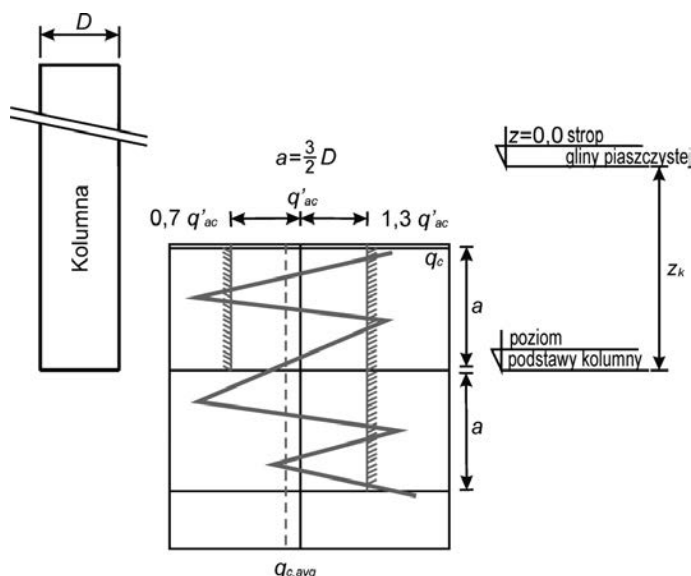
$$s_c = \frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1} \quad (7)$$

ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego.



Rys. 2. Schemat fundamentu bezpośredniego

Obciążenie naziomu q' jest sumą obciążenia jednostkowego w poziomie podstawy kolumny działającego na słabonośne podłoże od nasypu, ruchu samochodowego oraz ciężaru warstw gruntu zalegającego powyżej poziomu posadowienia. Obciążenie przekazywane przez nasyp oraz obciążenie od warstw gruntu zalegającego powyżej poziomu posadowienia na słabonośne podłoże jest funkcją rozdziału obciążenia na kolumnę i słabonośne podłoże w komórce jednostkowej. Jest ono zmienne w czasie. Wartość obciążenia naziomu q' wyznaczono z wzoru:



Rys. 3. Sposób wyznaczania średniego równoważnego oporu stożka [8]

$$q' = \gamma'_\alpha h_\alpha + \gamma'_i h_i + \alpha q \quad (8)$$

$$q' = \gamma'_g h_g + \gamma'_t h_t + \alpha q \quad (8)$$

gdzie:

γ'_g, γ'_t – ciężar objętościowy gliny i torfu z uwzględnieniem wyporu wody,
 h_g, h_t – miąższość gliny i torfu,

α – współczynnik redukcji obciążenia $\alpha = \frac{q_0}{q}$,

q – suma obciążenia wywołanego ciężarem nasypu i ruchem samochodowym,

q_0 – średnie jednostkowe obciążenie wywołane ciężarem nasypu i ruchem samochodowym w poziomie podstawy nasypu.

Jako obciążenie od ruchu samochodowego przyjęto obciążenie ciągle o intensywności 25 kPa. Do wyznaczenia wielkości obciążenia wywołanego ciężarem nasypu przyjęto miąższość nasypu $h_n = 3$ m oraz ciężar objętościowy nasypu $\gamma_n = 19$ kN/m³. Natomiast wartość współczynnika redukcji przyjęto z zakresu $\alpha = 0,2 \div 0,8$.

Metoda LCPC

Całkowita charakterystyczna nośność kolumny Q_k jest sumą nośności podstawy Q_b oraz pobocznicy Q_s [8].

$$Q_k = Q_h + Q_s = Aq_h + A_s f_n \quad (9)$$

gdzie:

A – powierzchnia podstawy pala,
 A_s – powierzchnia poboczniczy pala,
 q_b – jednostkowy opór podstawy pala,
 f_n – średni jednostkowy opór poboczniczy.

W metodzie LCPC opór podstawy pala q_b oraz opór pobocznicy f_s można wyznaczyć bezpośrednio na podstawie wartości oporu stożka q_c , z wzorów [1, 8]:

$$q_b = k_c q_{c,avg} \quad (10)$$

$$f_p = \frac{q_{c,z}}{\alpha'} \quad (11)$$

gdzie:

k_c, α' – współczynniki zależne od rodzaju gruntu oraz od wartości oporu stożka z tabel przedstawionych w [8],

$q_{c,avg}$ – średni równoważny opór stożka na głębokości $1,5D$ powyżej i $1,5D$ poniżej poziomu podstawy pała wyznaczony zgodnie z rys. 3,

q_{cz} – wartość oporu stożka na głębokości z_k .

W celu wyznaczenia $q_{c,avg}$ należy określić wartość q'_{ac} , uśredniając wartości q_c na głębokości $1,5D$ powyżej i $1,5D$ poniżej poziomu podstawy kolumny i eliminując wartości wyższe od $1,3 q'_{ac}$ i niższe od $0,7 q'_{ac}$. Wartość $q_{c,avg}$ jest średnią obliczoną dla wartości, które nie zostały odrzucone.

Metoda europejska

W metodzie europejskiej całkowitą charakterystyczną nośność kolumny można wyznaczyć stosując wzór (9). W metodzie tej, w odróżnieniu do metody LCPC, opór podstawy q_b i poboczniczy kolumny f_p , wyznaczany jest na podstawie wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu $s_{w,0}$ z wzorów [2]:

$$q_b = 9s_y \quad (12)$$

$$f_n = \beta s_n \quad (13)$$

gdzie:

$\beta = 1$ dla gruntów normalnie konsolidowanych, $\beta = 0,5$ dla gruntów prekonsolidowanych.

s_u – wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu, którą można wyznaczyć z wzoru [6]:

$$s_u = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{N_k} \quad (14)$$

gdzie:

σ_{v0} – całkowite napężenie pierwotne na rozpatrywanej głębokości (od warstw torfu i gliny piaszczystej),

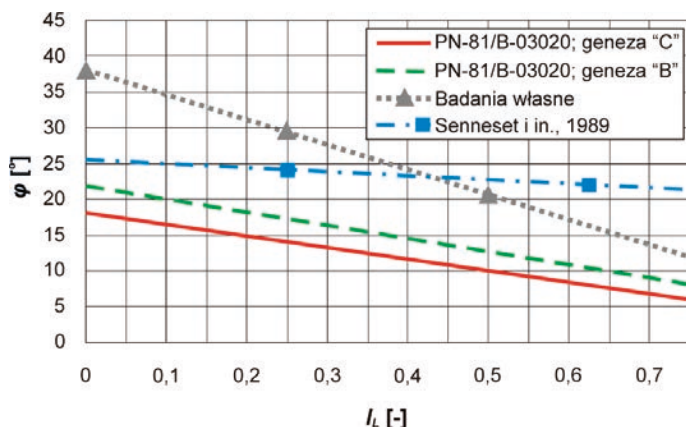
N_k – współczynnik oszacowany na podstawie lokalnego doświadczenia, $N_k = 15 \div 20$. W pracy przyjęto do obliczeń $N_k = 15$.

Metoda DIN 4014

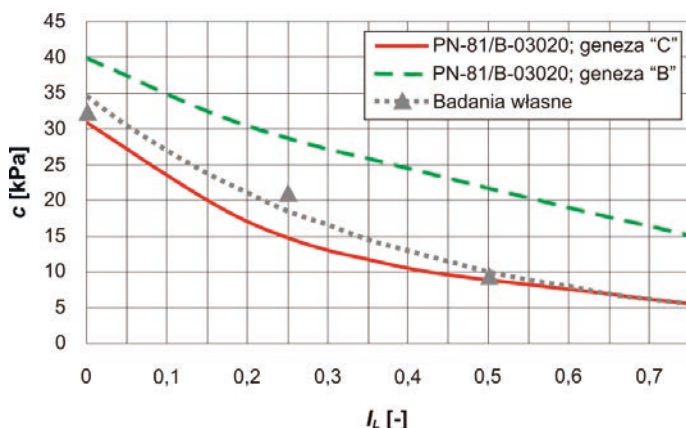
W metodzie DIN 4014 [8] opór poboczny f_p i podstawy kolumny q_b w gruntach spoistych wyznaczany jest bezpośrednio z tabel zamieszczonych w [8], w zależności od wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu s_u . Do wyznaczenia oporu podstawy pała q_b należy użyć wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu wyznaczonej dla uśrednionej wielkości oporu stożka q_c na głębokości równej $3D$ poniżej poziomu podstawy pała. Do obliczenia wartości s_u można zastosować wzór (14). Całkowitą charakterystyczną nośność kolumny należy wyznaczyć zgodnie z wzorem (9).

PARAMETRY WYTRZYMAŁOŚCIOWE GLINY PIASZCZYSTEJ

Do wyznaczenia nośności metodą klasyczną niezbędna jest znajomość wartości parametrów gruntowych, takich jak: kąt tarcia wewnętrznego, spójność, ciężar objętościowy z uwzględnieniem wyporu wody.



Rys. 4. Zależność kąta tarcia wewnętrznego od stopnia plastyczności

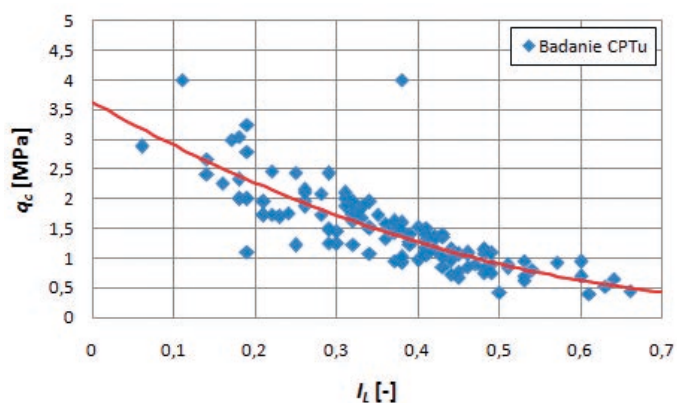


Rys. 5. Zależność spójności od stopnia plastyczności

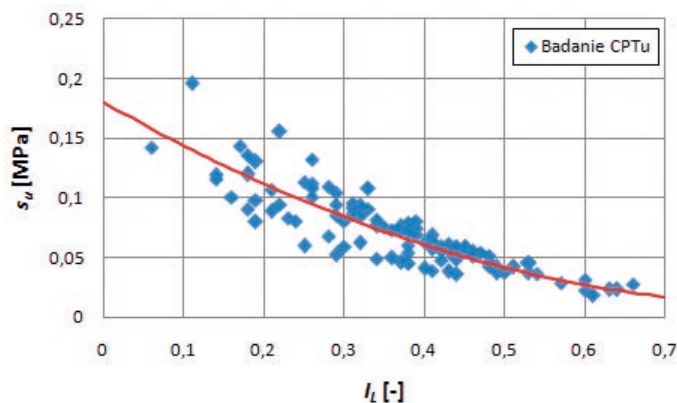
Na podstawie normy PN-81/B-03020 [4], literatury [7, 8] oraz badań laboratoryjnych sporządzono wykresy zależności kąta tarcia wewnętrznego i spójności od stopnia plastyczności gliny piaszczystej (rys. 4 i 5).

Wartości kąta tarcia wewnętrznego otrzymane z literatury oraz na podstawie badań własnych są wyższe od wartości podanych w normie PN-81/B-03020 [4]. Dla stopnia plastyczności I_L od 0 do 0,5 wartości spójności otrzymane na podstawie badań laboratoryjnych są o około 10% wyższe do wartości podanych w normie PN-81/B-03020 [4] dla gruntów spoistych nieskonsolidowanych o genezie „C”. Dla stopnia plastyczności I_L powyżej 0,5 wartości spójności otrzymane z normy i z badań są prawie identyczne. Do obliczenia charakterystycznej nośności kolumny metodą klasyczną przyjęto uśrednione wartości parametrów wytrzymałościowych pomiędzy wartościami uzyskanymi w badaniach własnych i tymi przedstawionymi w normie PN-81/B-03020 [4] dla gruntów o genezie „C”.

W wyniku przeprowadzonych badań CPTU oraz obliczeń sporządzono wykresy zależności oporu stożka q_c oraz wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu s_u od stopnia plastyczności (rys. 6 i 7). Do wyznaczenia charakterystycznej nośności kolumny metodą LCPC przyjęto wartości q_c odczytane z rys. 6, natomiast do wyznaczenia nośności kolumny metodami: europejską i DIN 4014 przyjęto wartości s_u odczytane z rys. 7.



Rys. 6. Zależność oporu stożka od stopnia plastyczności



Rys. 7. Zależność wytrzymałości na ścinanie bez odpływu od stopnia plastyczności

NOŚNOŚĆ KOLUMNY ZAWIESZONEJ GEC

Nośność kolumn zawieszonych wyznaczono dla czterech różnych warunków gruntowych określonych na podstawie sondowań CPTU przeprowadzonych w czterech charakterystycznych lokalizacjach. Rozpatrywane lokalizacje były oddalone od siebie o około 30 m. Wszystkie znajdowały się w obszarze, gdzie miąższość torfu dochodziła do 8 m. Warunki geotechniczne wybranych lokalizacji przedstawiono na rys. 8 i w tabl. 1.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano wykresy przedstawiające nośność kolumny w zależności od zagłębienia z dla czterech metod obliczeniowych (rys. 9).

Nośność kolumny wyznaczona metodą europejską jest prawie trzykrotnie wyższa od nośności obliczonej metodą LCPC. Różnica ta może wynikać z faktu, że obie metody były opracowane na podstawie badań CPTU przeprowadzonych w dwóch różnych regionach o zupełnie różnych warunkach geotechnicznych.

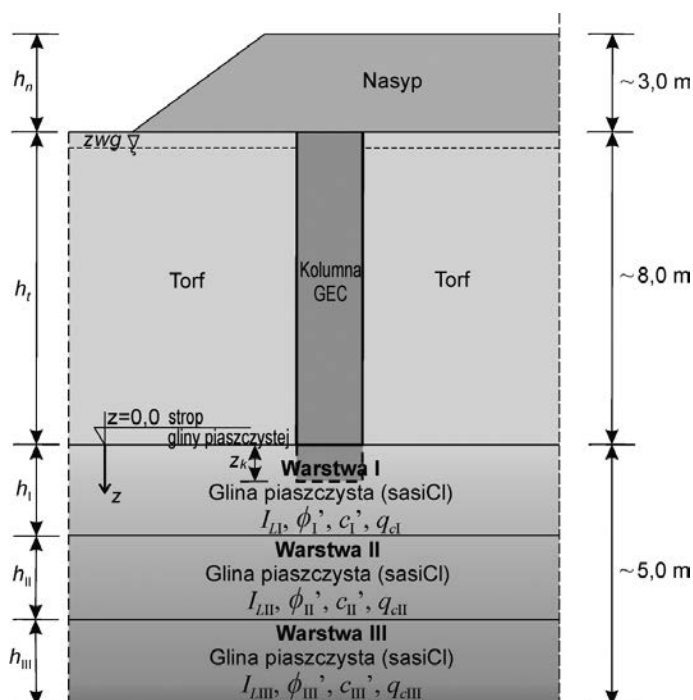
Podobne różnice w wynikach obliczeń nośności pali metodą europejską oraz LCPC otrzymano w pracy [3].

W pracy [3] zasugerowano stosowanie współczynników modyfikujących nośność wyznaczoną metodami europejską i LCPC. W przypadku metody europejskiej wartość współczynnika powinna wynosić od 0,45 do 0,5, natomiast dla metody LCPC wartość współczynnika modyfikacyjnego powinna mieścić się w zakresie $1,3 \div 1,35$.

Zauważmy, że mając określony współczynnik redukcji obciążenia α , można określić realną nośność charakterystyczną kolumny zawieszanej. Zagadnienie metodyki wyznaczania wartości współczynnika redukcji (α) nie jest w pracy rozpatrywane.

PODSUMOWANIE

W metodzie klasycznej nośność kolumny zależy między innymi od wartości obciążenia oddziałującego na słabonośne podłoże gruntowe. W zależności od przyjętej wartości współczynnika redukcji obciążenia α otrzymano różne wartości nośności kolumny. Dla współczynnika $\alpha = 0,2$ otrzymano najniższe wartości nośności, natomiast dla współczynnika $\alpha = 0,8$ otrzymano najwyższą nośność kolumny, w porównaniu do pozostałych analizowanych w pracy metod.



Rys. 8. Warunki geotechniczne

Nośność kolumny obliczona metodami LCPC, europejską oraz DIN 4014 zależy głównie od wyników sondowań CPTU. Metody te nie pozwalają na uwzględnienie w obliczeniach obciążenia oddziałującego na słabonośne podłoże.

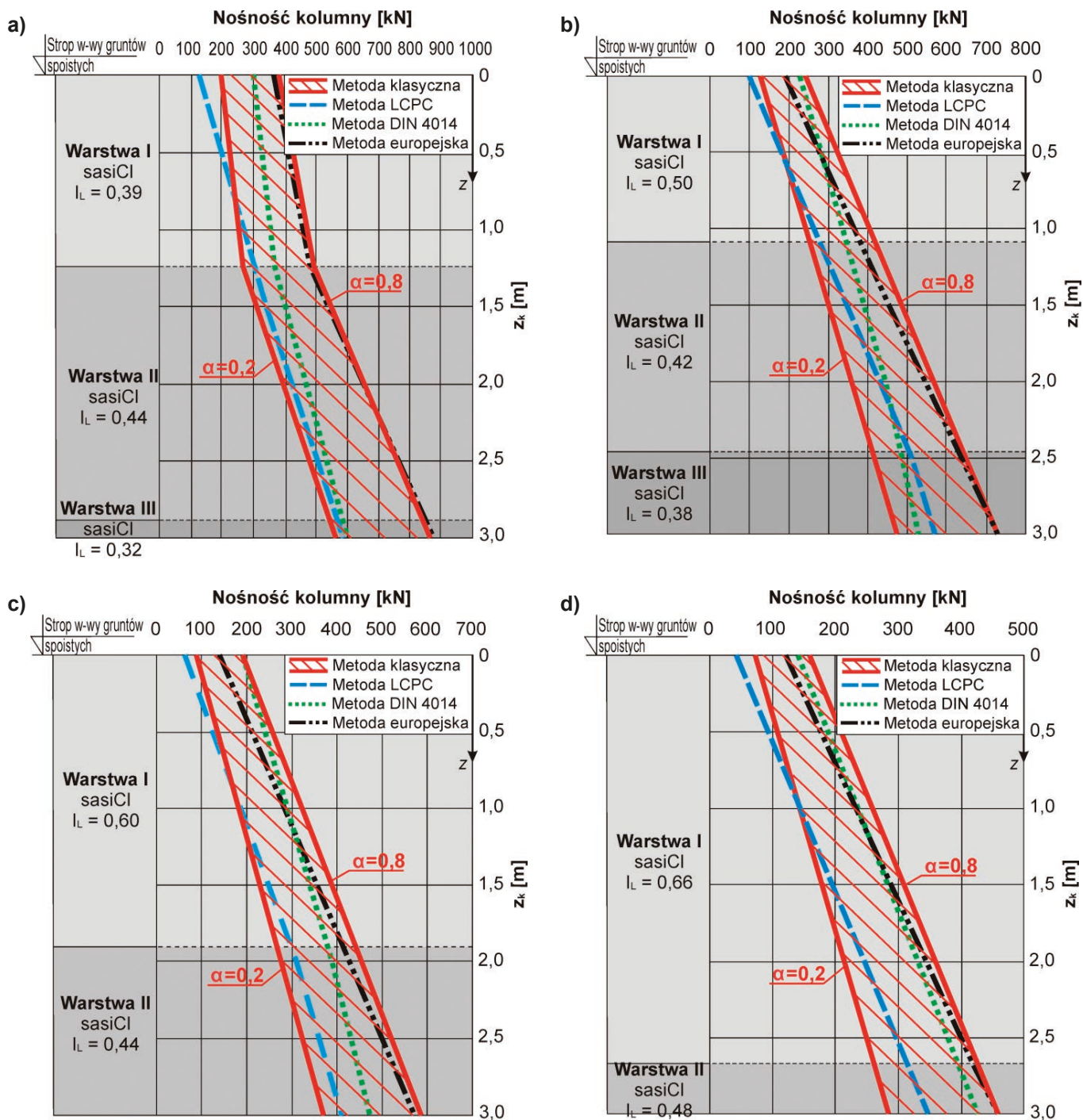
Z obliczeń przedstawionych w pracy wynika, że wiarygodną metodą wyznaczania nośności kolumny zawieszanej jest metoda klasyczna, gdyż uwzględnia ona współpracę kolumny z otaczającym ją słabonośnym podłożem gruntowym.

LITERATURA

1. Bustamante M., Ganeselli L.: Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT. Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, Vol. 2, 1982, 493-500.
2. DeRuiter J., Beringen F. L.: Pile foundation for large North Sea structures. Marine Geotechnolgy, Vol. 3, No. 3, 1979, 267-314.

Tabl. 1. Wartości parametrów

Lokalizacja	Warstwa I					Warstwa II					Warstwa III				
	h_I	I_{LI}	ϕ'_I	c'_I	q_{cI}	h_{II}	I_{LII}	ϕ'_{II}	c'_{II}	q_{cII}	h_{III}	I_{LIII}	ϕ'_{III}	c'_{III}	q_{cIII}
	[m]	[-]	[°]	[kPa]	[MPa]	[m]	[-]	[°]	[kPa]	[MPa]	[m]	[-]	[°]	[kPa]	[MPa]
1	1,24	0,39	20,0	12,5	1,280	1,64	0,44	18,9	11,7	1,160	2,86	0,32	23,5	15,5	1,720
2	1,07	0,50	15,0	9,0	0,900	1,39	0,42	19,0	12,0	1,333	1,59	0,38	22,0	13,5	1,400
3	1,89	0,60	13,0	7,5	0,686	3,02	0,44	18,9	11,7	1,160	—	—	—	—	—
4	2,65	0,66	11,5	6,5	0,448	2,96	0,48	17,5	11,0	0,832	—	—	—	—	—



Rys. 9. Nośność kolumny w zależności od zagłębienia z:
 a) lokalizacja 1, b) lokalizacja 2, c) lokalizacja 3, d) lokalizacja 4

3. Eslami A., Aflaki E., Hosseini B.: Evaluating CPT and CPTu based pile bearing capacity estimation methods using Urmieh Lake Causeway piling records. Scientia Iranica, Vol. 18, No. 5, 2011, 1009-1019.

4. PN-81/B-03020. Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.

5. PN-EN 1997-1. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.

6. PN-EN 1997-2. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.

7. Senneset K., Sandven R., Janbu N.: The evaluation of soil parameters from piezocone tests. Transportation Research Record, No. 1235, 1989, 24-37.

8. Schnaid F.: In situ testing in geomechanics. The main tests. Taylor & Francis, London and New York, 2009.

9. Szypcio Z., Dołżyk K., Chmielewska I.: Ekspertyza techniczna wykonania wzmocnienia podłoża metodą kolumn piaskowych na odcinku od km 243+485,00 do km 243+770,00, 2014.

10. Szypcio Z., Dołżyk K., Chmielewska I.: Ekspertyza techniczna przyspieszenia konsolidacji wzmocnionego podłoża na odcinku od km 243+485 do km 243+770. Etap I: Metoda przyspieszenia konsolidacji, 2015.

Badania zostały zrealizowane w Politechnice Białostockiej w ramach pracy nr S/WBiS/2/2018 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.