

Kalibracja współczynnika N_{kt} w normalnie skonsolidowanych i przekonsolidowanych gruntach organicznych

Mgr inż. Łukasz Kaczyński, dr inż. Tomasz Godlewski

Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Konstrukcji Budowlanych, Geotechniki i Betonu

Zapewnienie wymogów bezpieczeństwa oraz racjonalnego projektowania obiektów budowlanych sprawia, że przy określaniu interakcji konstrukcji z podłożem gruntowym potrzebna jest znajomość odpowiednio dobranych do danego zagadnienia parametrów współpracy. W tym celu powszechne staje się stosowanie badań *in situ*. Niemniej poprawność uzyskiwanych parametrów wymaga odpowiedniego i świadomego doboru „klucza interpretacyjnego”, najlepiej w odniesieniu do warunków lokalnych. Jednym ze sposobów walidacji użytej zależności korelacyjnej jest odniesienie uzyskiwanych wyników do wyników oznaczeń z metody, gdzie pomiar taki można wykonać w sposób bezpośredni. W kontekście szybkich i dokładnych badań terenowych, na przykład w postaci sondowań CPTU, wartość wytrzymałości na ścinanie c_u^1 jest determinowana przez współczynnik stożka N_c opisany przez Lunne i in. 1997 [3]. W zależności od rodzaju sondowania (CPT lub CPTU) przy wyznaczaniu wytrzymałości na ścinanie stosuje się odpowiednio współczynnik N_k lub N_{kt} , którego wartość w literaturze podawana jest często w szerokim zakresie. Bezpośrednie, punktowe pomiary wartości wytrzymałości na ścinanie wykonywane w terenie przy użyciu zautomatyzowanej sondy FVT pozwalają na walidację i doprecyzowanie stosowanego współczynnika korelacyjnego dla danego rodzaju gruntu i warunków lokalnych.

W artykule zestawiono wyniki zebrane na poletkach badawczych uwzględniających zarówno grunty normalnie skonsolidowane w postaci młodych torfów i namulów oraz przekonsolidowanych gruntów organicznych, gytii. Analiza wyników potwierdza wpływ konsolidacji na uzyskiwane wartości współczynnika N_{kt} .

Wytrzymałość gruntu na ścinanie w warunkach bez odplywu c_u można określić zarówno na podstawie badań laboratoryjnych, jak i terenowych.

Do pierwszej grupy można zaliczyć badania laboratoryjną ścinarką obrotową VT, badania w aparacie prostego ścinania, w aparacie bezpośredniego ścinania, badania typu *ring shear test* oraz w aparacie trójosiowego ściskania. Pierwsze trzy badania dają możliwość określenia również resztkowej wytrzymałości na ścinanie. Wartości uzyskiwane z badań laboratoryjnych, zwłaszcza tych bardziej zaawansowanych, pozwalają dokładnie określić parametry wytrzymałościowe badanych próbek.

Należy zwrócić jednak uwagę, że badania laboratoryjne obarczone są pewnymi ograniczeniami. Najważniejsze z nich to mała objętość pobranego gruntu, który może być niereprezentatywny dla całego wydzielenia, a także zmiany zachodzące w strukturze próbki podczas jej pobierania, transportu i przygotowania do badania.

Nowoczesne systemy pobierania próbek, a także coraz większa świadomość zarówno personelu badawczego, jak i zlecających wymuszających właściwą jakość próbek poprzez akredytację i certyfikaty, w znacznym stopniu przyczyniają się do poprawy, niemniej nie eliminują ostatecznie problemu. W przypadku „młodych” gruntów organicznych, o wrażliwej strukturze, pobranie próbki o wysokiej jakości (klasy 1 i 2) jest często niemożliwe ze względu na ograniczenia technologiczno-logistyczne, brak możliwości dostarczenia odpowiednio wyposażonych wiertnic do punktu badań zlokalizowanego na przykład na bagnach.

W grupie badań terenowych pozwalających na określenie wytrzymałości na ścinanie należy przede wszystkim wymienić sondy FVT mierzące w sposób bezpośredni wartość oporu przy obrocie krzyżaka. Nowoczesne urządzenia tego rodzaju pozwalają na ciągły zapis wartości momentu obrotowego przy zachowaniu stałej prędkości ścinania oraz uwzględniają wartość siły wynikającą z tarcia kolumny żerdzi o grunt powyżej końcówki sondy [1]. Mierzone w ten sposób wartości są najbardziej dokładne i obarczone niewielkim ryzykiem błędu. Badania pozwalające oznaczać wartość c_u w warunkach *in situ* w sposób pośredni to również sondowania DMT oraz CPTU. Opracowane dla badań dyktometrycznych wzory empiryczne [4] generalnie pozwalają na oszacowanie tych wartości.

$$c_{U,DMT} = 0,22\sigma'_{v0}(0,5K_D)^{1,25} \quad (1)$$

gdzie:

c_u – wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odplywu,
 σ'_{v0} – składowa pionowa naprężenia efektywnych w gruncie,
 K_D – wskaźnik naprężenia bocznego.

$$K_D = \frac{p_0 - u_0}{\sigma'_{v0}} \quad (2)$$

W praktyce na podstawie badań referencyjnych (innych metod bezpośrednich, na przykład sonda FVT) wymagane było wprowadzenie poprawek do oryginalnych wzorów Marchettiego, na przykład w [2] zaproponowano wzór na wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odplywu:

– dla namulów w postaci:

$$c_u = S\sigma'_{v0}(0,5K_D)^{1,25} \quad (3)$$

gdzie dla namulów $S = 0,35$ lub $0,40$,

– dla torfów i gytii w postaci:

$$c_u = S\sigma'_{v0}(0,45K_D)^{1,20} \quad (4)$$

gdzie dla torfów $S = 0,5$ a gytii wapiennej $0,40 \div 0,45$.

W przypadku sondowań CPTU w celu określenia wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odplywu stosuje się wzór, gdzie konieczne jest określenie parametru N_{kt} .

¹ Należy zauważyć, że według aktualnej wersji Eurokodu 7 (PN-EN 1997-2:2009) [8] wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odplywu oznacza się symbolem „ c_u ”, jednocześnie w literaturze związanej z tematyką badań *in situ* stosowany jest również symbol „ s_u ”, a w polskiej dotychczasowej literaturze ten parametr opisywano symbolem „ τ ”.

Tabl. 1. Proponowane wartości parametru N_k na podstawie normy [6]

Typ genetyczny gruntu		
Gliny pokrywowe i zwałowe zlodowacenia Wisły nieskonsolidowane lodowcem	$Q_c = 0,5$ $N_k = 12$	$q_c = 2,5$ $N_k = 25$
Gliny zwałowe starsze skonsolidowane	$q_c = 1,5$ $N_k = 12$	$q_c = 7,0$ $N_k = 20$
utwory zastoiskowe czwartorzędowe iły pylaste, gliny pylaste	$q_c = 1,2$ $N_k = 6$	$q_c = 3,5$ $N_k = 15$
Iły plioceńskie i mioceńskie	$q_c = 1,3$ $N_k = 8$	$q_c = 4,5$ $N_k = 14$
Lessy	brak danych	
Gytie	$q_c = 0,2$ $N_k = 1$	$q_c = 4,0$ $N_k = 6$

$$c_u = \frac{q_n}{N_{kt}} \quad (5)$$

gdzie:

q_n – opór stożka netto,

N_{kt} – empiryczny współczynnik stożka zależny od charakterystyki gruntu.

Opisane w literaturze wartości tego parametru dla poszczególnych grup litologicznych wahają się w szerokim zakresie i w niektórych przypadkach nie odpowiadają badaniom referencyjnym. W tabl. 1 przedstawiono proponowane wartości parametru N_{kt} .

W dalszej części artykułu przedstawiono wyniki badań ukie-
runkowanych na poszukiwanie własnych zależności korelacyjnych dla wybranych gruntów organicznych jako podstawę wiarygodnego określenia parametru wytrzymałości na ścinanie do celów projektowych.

MATERIAŁY I METODY

W ramach prac opisano wybrane badania na czterech poligonach badawczych obejmujących grunty organiczne i „słabe” (ściśliwe, plastyczne) grunty spoiste. Prace obejmowały bezpośrednie badania wytrzymałościowe w terenie oraz pobranie próbek do badań laboratoryjnych. Trzy poligony badawcze znajdowały się ciągach projektowanych dróg ekspresowych S 17 i S 2, jeden w Grójcu i jeden w Warszawie. W ramach prac wykonano łącznie 210 mb sondowań CPTU, 170 mb sondowań DMT i 54 ścięcia sondą FVT.

Ze względu na sedymentacyjną genezę analizowanych gruntów badania skupiały się głównie w rejonie występowania cie-

ków wodnych (doliny rzeczne) oraz bagnistych podmokłości (zagłębienia bezodpływowe).

Grunty przekonsolidowane opisano na przykładzie osadów wypełniających paleodolinę Rynny Żoliborskiej w Warszawie. Litologicznie są to półzwarłe gytie występujące bezpośrednio pod warstwą namulów na głębokości w przedziale 7 ÷ 17 m p.p.t. Na tym poligonie wykonano sondowania DMT i CPTU oraz pobrano próbki do badań laboratoryjnych w aparacie trójosiowego ściskania (CIU). Ze względu na dotychczas zebrany materiał badawczy oraz brak technicznych możliwości wykonania obecnie dodatkowych badań wartości sondowania FVT zaczerpnięto z literatury [5] dla obiektu znajdującego się w bezpośrednim sąsiedztwie badanego poligonu.

Grunty występujące na pozostałych poletkach badawczych reprezentują osady normalnie skonsolidowane. Na terenie poligonów w Grójcu oraz Rykach są to głównie torfy i namuły. W rejonie Południowej Obwodnicy Warszawy występują miękkoplastyczne gliny pylaste i mady. Badane grunty występują od powierzchni terenu do głębokości 2 ÷ 3 m p.p.t. Wszystkie badane osady, ze względu na sedymentacje w warunkach aluwialnych w bliskim sąsiedztwie cieków wodnych, mają często nieregularne przewarstwienia piasków, które nawet w niewielkiej ilości mogą wpływać na wartości uzyskiwanych wyników punktowo mierzonych parametrów wytrzymałościowych. W ramach prac wykonano sondowania FVT, CPTU i DMT oraz pobrano próbki do badań laboratoryjnych, w tym do badań w aparacie trójosiowego ściskania (CIU).

Zestawienie podstawowych właściwości charakteryzujących grunt poszczególnych poligonów przedstawiono w tabl. 2.

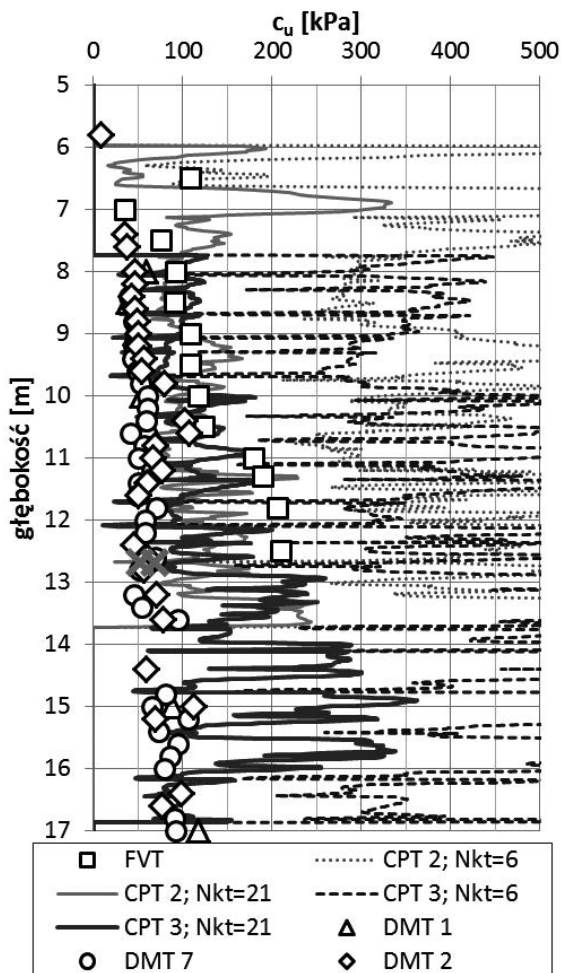
ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

W przypadku poligonu w Rynnie Żoliborskiej na podstawie badań trójosiowych pobranych gytii określono wytrzymałość na ścinanie i wartości te przyjęto za referencyjne. Na rys. 1 przedstawiono zestawienie wyników badań wraz z naniesionymi wartościami wytrzymałości na ścinanie dla parametru N_{kt} określonego dla skrajnej wartości przedstawionej w normie [6] zgodnie z tabl. 1.

Dla poligonów z gruntami normalnie skonsolidowanymi w podłożu (Ryki, Grójec i POW) jako wartość referencyjną wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu przyjęto wartość z sondowań FVT. W przypadku namulów występujących na poligonach w Rykach i Grójcu współczynnik N_{kt} wyniósł odpowiednio 5,87 i 8,79, co odpowiada przedziałowi przedstawionemu w normie [6]. Dla miękkoplastycznych glin poligonu POW wartość empirycznego współczynnika stożka

Tabl. 2. Zestawienie właściwości gruntów dla poszczególnych poligonów

Poligon	Litologia	Średnia wilgotność [%]	Stan	Zawartość substancji organicznych I_{om} [%]
Rynna Żoliborska	gytia	68,0	pzw	12,1 ÷ 27,6
Ryki	namuł / torf	48,0 / 306	pl	12 ÷ 16
Grójec	namuł / pył z organiką	88,3	pl	8 ÷ 10
POW	glina pylasta / mada	19,2	mpl	2,3 ÷ 5,6



Rys. 1. Zestawienie wyników wytrzymałości na ścinanie c_u na podstawie różnych rodzajów badań dla poligonu Rynna Żoliborska

wyniosła najmniej 3,08, a dla pyłów z udziałem materiału organicznego na poligonie w Grójcu wyniosła 39,4. Te ostatnie wartości zdecydowanie wykraczają poza zakres przedstawiony w przywołanej normie.

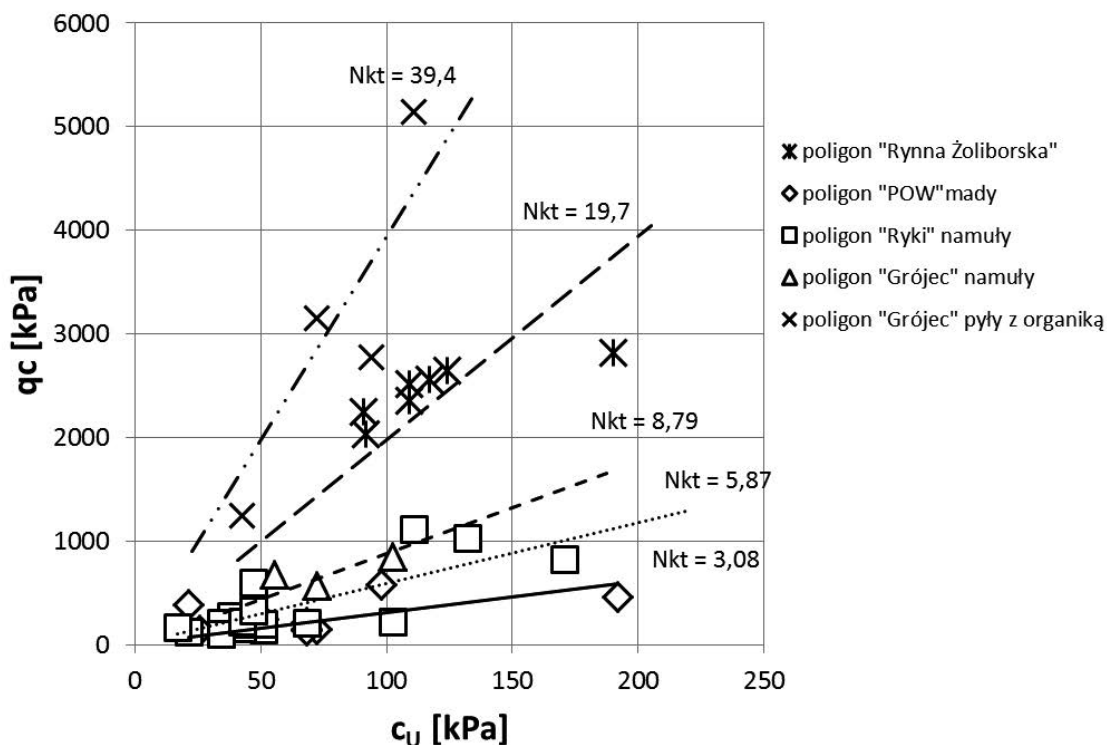
Zestawienie zależności wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu i średniej wartości oporu na stożku dla poszczególnych poligonów badawczych przedstawiono na rys. 2. Współczynniki kierunkowe naniesionych linii regresji zebranych danych są równe współczynnikom N_{kt} wybranych grup gruntów.

WNIOSKI

W przypadku gruntów przekonsolidowanych (gytii) wartość parametru N_{kt} określona na podstawie zależności wynikającej z badań trójosiowych wynosi 21. Wartości określane na podstawie korelacji sondowań CPTU z opisanym w literaturze [5] sondowaniem FVT wynosi $\sim 19,7$. Osiągnięta zbieżność wartości jest duża i znacznie przekracza wartości sugerowane w normie (na poziomie $1 \div 6$).

W przypadku normalnie skonsolidowanych gruntów organicznych parametr N_{kt} mieści się w przedziale $3 \div 9$. Na podstawie przeanalizowanych badań widoczna jest różnica dla poszczególnych typów litologicznych stwierdzonych na poszczególnych poligonach. Różnice mogą być częściowo spowodowane występowaniem przewarstwień piaszczysto-pylastych związanych ze zmiennością cykli sedimentacji w obrębie kompleksów gruntów organicznych.

Wartości parametru N_{kt} przyjmują większe wartości w przypadku gruntów przekonsolidowanych (~ 20) w stosunku do gruntów normalnie skonsolidowanych ($3 \div 9$). Wyjątek w opisanych badaniach stanowią grunty z dużą zawartością pyłu,



Rys. 2. Zestawienie zależności wytrzymałości na ścinanie c_u i średniego oporu na stożku q_c dla analizowanych poligonów badawczych

Tabl. 3. Zestawienie wybranych wartości parametru N_{kt}

Typ litologiczno-genetyczny	Wartość parametru N_{kt}		Autor
	Badania własne	Wartości z literatury	
Namuły NC	6 ÷ 9	6 ÷ 15 (<i>utwory zastoiskowe</i>) 7,0 (<i>namuł</i>) 12,9 (<i>torf</i>)	Norma EC7 [6] Młynarek i in. [4]
Mady (miękkoplastyczne grunty pylaste) NC	~3	7 ÷ 10 (<i>very soft clay</i>) 7 ÷ 10 (<i>grunty pylaste</i>) 6 ÷ 15 (<i>utwory zastoiskowe</i>)	Lune 1997 et al. [3] Stefaniak 2015 [8] Norma EC7 [6]
Gytia OC	~20 ($OCR \sim 3 \div 15$)	30 (<i>stiff clay</i>) 12 ÷ 20 (<i>gliny</i>) 1 ÷ 6 7,9 <i>gytia</i> ($OCR \sim 1 \div 1,6$)	Lune 1997 [3] Norma EC7 [6] Młynarek i in. [4]

gdzie parametr N_{kt} wyniósł 39. Zestawienie wybranych wartości współczynnika stożka z literatury oraz uzyskanych wyników dla grupy gruntów normalnie skonsolidowanych i przekonsolidowanych przedstawiono w tabl. 3.

Analiza zebranych danych wskazuje na widoczny wpływ efektu przekonsolidowania gruntów organicznych na wartości współczynnika N_{kt} .

W celu dokładnego określenia korelacji wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odplywu oraz wyeliminowania przypadkowości związanej z niejednorodnością warstw konieczne jest przeprowadzenie dalszych badań i zebranie istotnie statystycznej próby.

LITERATURA

1. Godlewski T., Kaczyński L.: O wyznaczaniu wytrzymałości gruntu na ścinanie połową sondą krzyżakową w świetle nowych wymagań norm europejskich. Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, Warszawa, vol. 25(3), nr 73, 2016, 356-365.

2. Lechowicz Z., Rabarjoele S.: Ocena stanu podłoża organicznego na podstawie badań dylatometrycznych. Przegląd Naukowy Wydziału Melioracji i Inżynierii Środowiska, SGGW, Warszawa, z. 15, 1998, 209-218.

3. Lunne T., Robertson P. K., Powell J. J. M.: Cone penetration testing in geotechnical practice, Blackie Academic & Professional, London, Marchetti S. (1980) In situ Test by Flat Dilatometer. J. Geotech. Eng. Div., ASCE, 106, GT3, 1997, 299-321.

4. Młynarek, Z., Wierzbicki, J., Bogucki, M.: Geotechnical characterization of peat and gytja by means of different in-situ tests. Proc. of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. Edinburgh, September, 2015, 3097-31.

5. Pietrzykowski P.: Rozprawa doktorska. Charakterystyka geologiczno-inżynierska eemskich gytii i kredy jeziornej z terenu Warszawy, 2014

6. PN-B-04452:2002 Geotechnika Badania polowe.

7. PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.

8. Stefaniak K.: Assessment of shear strength in silty soils. Studia Geotechnica et Mechanica, vol. 37, no. 2, 2015, 51-55.