

Pomiar siły w kotwach w skali technicznej

Jednym z elementów, które determinują efektywność techniczną i ekonomiczną obudowy wykopu są siły w kotwach lub rozporach. Większość metod obliczeniowych ich wyznaczenia opiera się na założeniach teoretycznych lub empirycznych [14], które opracowano przed kilkudziesięciu laty [1, 10]. Część współcześnie opracowanych metod pozwala na rozróżnienie obciążenia gruntu spoistego w warunkach „z odpływem” i „bez odpływu” lub/i uwzględnienie sił hydrodynamicznych w gruntach niespoistych nawodnionych [2, 14]. Większość przyjmowanych założeń rzadko podlega weryfikacji w skali technicznej. Najczęściej wykonywanym pomiarem w pełnej skali jest pomiar sił w rozporach [7, 9]. Bardzo rzadko wykonuje się pomiary siły w kotwach.

Uzasadnienie prowadzenia badań

W Polsce z reguły projektuje się konstrukcje oporowe z wykorzystaniem parametrów wytrzymałościowych gruntów według [18]. W obliczeniach zakłada się działanie parcia wody gruntowej na obudowę, gdy jej obecność została wykazana w dokumentacji geotechnicznej. Rzadko zwraca się uwagę na indeks „*u*”, którym są opatrzone parametry gruntów spoistych, co oznacza, że zostały one wyznaczone w warunkach bez odpływu. Tymczasem przyjęcie warunków bez odpływu i jednoczesnego działania parcia wody stoi w logicznej sprzeczności, jako że woda, która nie odpłynęła z porów, nie może wywołać parcia na ścianę.

Współczesne wytyczne [17] zalecają w gruntach spoistych sprawdzenie stanu granicznego nośności w warunkach z odpływem jako stanu miarodajnego w przypadku długotrwałego użytkowania oraz w warunkach bez odpływu w okresie krótkotrwałym. Przez okres „długotrwały” i „krótkotrwały” rozumie się tutaj na ogół relację między czasem niezbędnym do zaniku nadwyżek ciśnienia wody w porach, wzbudzonego wykonaniem robót, a czasem użytkowania konstrukcji. W przypadku zabezpieczenia wykopu realny czas trwania robót nie jest zwykle znany na etapie projektowania, a prowadzenie obliczeń z uwzględnieniem konsolidacji gruntu jest trudne i obarczone znaczną niepewnością. Tak więc założenia w odniesieniu do pośrednich warunków odpływu projektant przyjmuje na własne ryzyko i w praktyce w wymiarowaniu konstrukcji uwzględnia wynik bardziej niekorzystny, chyba że ma podstawy przyjąć inaczej [8].

Opisane podejście usuwa w zasadzie z rozważań pojęcie „rzeczywistej” pracy budowli, zastępując je przedziałem warunków, który z założenia powinien obejmować wszelkie możliwe w praktyce stany konstrukcji. Takie podejście ma logiczne podstawy, choć w polskiej rzeczywistości projektowej może wydawać się niezrozumiałe. Ma ono jednak istotną wadę. Autorzy pracy [9] zestawili wyniki pomiarów sił w rozporach w przypadku znacznej liczby budów, głównie na terenie Wielkiej Brytanii. Okazało się, że w większości przypadków rozpory są znacząco przewymiarowane, a rzeczywiste ich obciążenia zarejestrowane na różnych etapach budowy nie przekraczają 70% wartości, na jaką były projektowane. Można więc przypuszczać, że przyjęcie górnego oszacowania siły w podparciu w przedziale <warunki z odpływem, warunki bez odpływu> wiąże się z reguły z nieekonomicznym projektowaniem podparcia ścian.

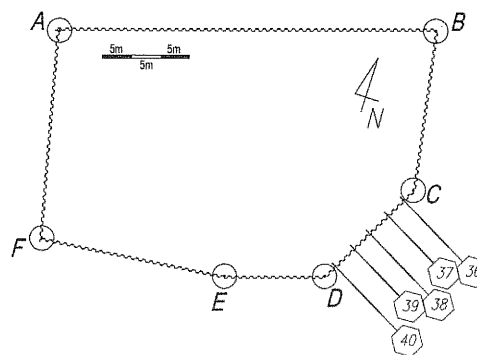
Badania sił w kotwach, zaplanowane i przeprowadzone przez autorów, stanowią weryfikację założeń przyjętych do projektowania obudowy wykopu w Białymstoku i przyczynek do przyszłego rozstrzygnięcia nakreślonego problemu.

Warunki gruntowo-wodne na terenie badań

Budowa, na której przeprowadzono pomiary, znajduje się u zbiegu ulic Krętej i Wiejskiej w Białymstoku. Rzędne terenu na obszarze działki są zróżnicowane i mieszczą się w przedziale 151,1 ÷ 152,6 m n.p.m. W obrębie działki występuje jednolity układ warstw gruntowych. Pod warstwą niespoistych nasypów o miąższości około 0,5 m do głębokości około 4 ÷ 8 m zalegają piaski drobne wodnolodowcowe o stopniu zagęszczenia $I_D = 0,4 \div 0,5$. Na znacznym obszarze działki w obrębie warstwy piasków drobnych występują przewarstwienia z pospółki o podobnym zagęszczeniu. Poniżej, do głębokości co najmniej 18 m, zalegają gliny piaszczyste morenowe o stopniu plastyczności $I_L = 0,1 \div 0,15$. Pozornie duże zróżnicowanie miąższości warstwy piasków drobnych wynika ze znacznej deniwelacji terenu. W rzeczywistości rzędna stropu gruntów spoistych mieści się w przedziale 144,2 ÷ 146,3 m n.p.m. Swobodne zwierciadło wody gruntowej nawiercono w warstwie piasków na niemal jednakowej rzędnej 147,5 m n.p.m., co odpowiada głębokości 3,7 ÷ 5,1 m p.p.t. Oprócz swobodnego zwierciadła wody, w obrębie glin zwałowych stwierdzono występowanie sączeń z przewarstwień piaszczystych o bardzo małej miąższości [11]. Bezpośrednio przed przystąpieniem do robót na terenie inwestycji wykonano dodatkowo sondowania CPT stożkiem mechanicznym do głębokości 12 ÷ 15 m [12].

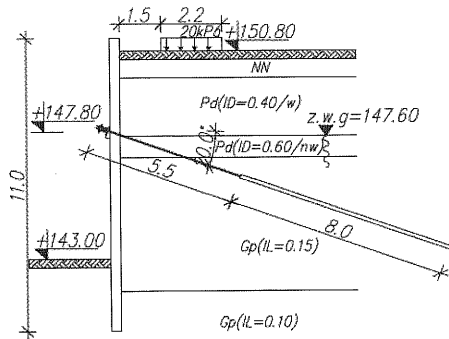
Charakterystyka przekroju pomiarowego

Odcinek pomiarowy znajdował się w rejonie południowo-wschodniego narożnika działki. Badania wykonano na prostym odcinku długości około 21 m, zabezpieczonym grodzicami stalowymi długości 11 m (odcinek C-D na rys. 1).



Rys. 1. Rzut zabezpieczenia wykopu

Obudowę wykopu o głębokości całkowitej 7,8 m podparto jednym rzędem prętowych kotew gruntowych długości całkowitej 13,5 m (rys. 2). Zaprojektowano kotwy z buławą długości 8 m i nośności obliczeniowej $R_d = 530$ kN. Ciężna badanych kotew stanowiły pręty średnicy 50 mm ze stali St500/550. Ciężna prętowa przyjęto ze względu na możliwość spawania tensometrow. Z obserwacji dokonanych na placu budowy wynika, że przez cały okres budowy nazwom wzdłuż odcinka C-D prze-

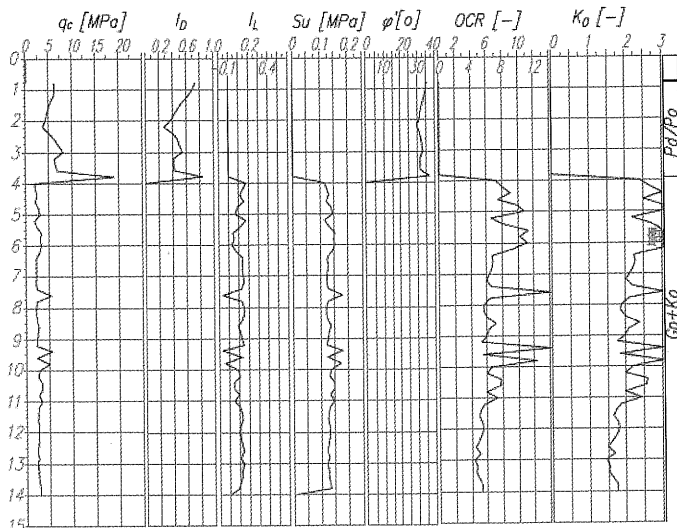


Rys. 2. Przekrój zabezpieczenia wykopu w rejonie badanych kotew

znaczono do składowania stali zbrojeniowej. Z przybliżonych obliczeń wynika, że obciążenie naziomu w tym rejonie wynosiło około 20 kPa (por. rys. 2).

Na etapie planowania badań przeanalizowano wpływ sąsiedztwa narożników C i D na przemieszczenia obudowy i wartość siły w kotwach. Istniała obawa, że pomiary nie będą reprezentatywne w odniesieniu do typowej obudowy wykopu, w której zwyczajowo przyjmuje się warunki płaskiego stanu odkształcenia (PSO). Na podstawie [4] i [14] stwierdzono, że wpływ narożników jest największy w odległości do $0,5H_w$ od nich, a następnie zanika na odcinku H_w , gdzie H_w jest głębokością wykopu. Ostatecznie przyjęto, że odcinek zabezpieczenia długości całkowitej około 21 m jest odpowiedni do przeprowadzenia pomiarów.

W interpretacji sondowania CPT4, wykonanego w bezpośrednim sąsiedztwie rejonu badań, podano m.in. stopień plastyczności i stopień zagęszczenia, wytrzymałość na ścinanie gruntu spoistego w warunkach bez odpływu, efektywny kąt tarcia wewnętrznego gruntu niespoistego według formuły Schmertmanna [5], profile wskaźnika prekonsolidacji OCR i współczynnika parcia w spoczynku K_0 gruntu spoistego (rys. 3). Wartości OCR i K_0 zostały wyznaczone wyłącznie na podstawie wyników sondowania, a zatem ich dokładność jest ograniczona [5].



Rys. 3. Profil sondowania CPT w rejonie badanych kotew wraz z interpretacją

Założenia do obliczeń statycznych siły w kotwach

Obliczenia sprawdzające przeprowadzono zgodnie z wytycznymi [17], w których w odniesieniu do gruntów spoistych jest zalecane przeprowadzenie obliczeń z uwzględnieniem warunków z odpływem i bez odpływu. W przypadku warunków z odpływem od strony naziomu przyjęto zwierciadło wody gruntowej na rzędnej nawierconej, zgodnie z [11]. Założono hydrostatyczny rozkład parcia wody aż do spodu ścianki, w tym tak-

że w gruntach spoistych. Od strony wykopu przyjęto poziom zwierciadła wody w dnie wykopu. W warunkach bez odpływu działanie parcia hydrostatycznego uwzględniono wyłącznie w gruntach niespoistych. W gruntach spoistych przyjęto brak parcia wody gruntowej na ściankę i brak wpływu wyporu na szkielet gruntowy. W tablicy 1 zestawiono parametry gruntów przyjęte do obliczeń. Parametry w warunkach z odpływem dobrano głównie na podstawie wytycznych [15], a w warunkach bez odpływu na podstawie wyników sondowania CPT4 [12].

Tablica 1
Parametry gruntów przyjęte do obliczeń

Rodzaj gruntu	Wilgotność	Ciążar objętościowy	Warunki z odpływem		Warunki bez odpływu	
		γ/γ' kN/m ³	ϕ' stopni	c' kPa	ϕ_u stopni	c_u [kPa]
nN	–	17,5/n.d.	29	0	29	0
Pd, $I_D = 0,40$	wilgotny	17,5/ n.d.	33	0	33	0
Pd, $I_D = 0,60$	nawodniony	19,0/9,0	36	0	36	0
Gp, $I_L = 0,15$	–	22,0/12,0	30	15	0	120
Gp, $I_L = 0,10$	–	22,0/12,0	30	15	0	120

W celu uproszczenia obliczenia sprawdzające przeprowadzono według metody globalnego współczynnika bezpieczeństwa [14], przy założeniu mobilizacji 2/3 parcia biernego. Podejście to pozwala na wyznaczenie siły w kotwie, którą w przybliżeniu można traktować jako wartość charakterystyczną. Siły w kotwach wyznaczono metodą równowagi granicznej, przy dodatkowych założeniach podanych w tabl. 2. Podstawą wykorzystanych zależności według [13] jest założenie płaskiej powierzchni poślizgu w przypadku parcia czynnego i krzywoliniowej powierzchni poślizgu w przypadku parcia biernego.

Tablica 2
Założenia przyjęte do obliczeń

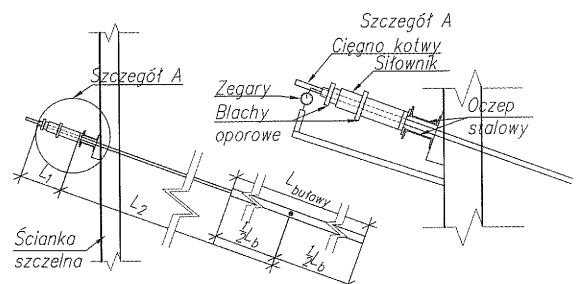
Rodzaj zagadnienia	Warunki „z odpływem”		Warunki „bez odpływu”	
	parcie	odpór	parcie	odpór
Wartość parcia	czynne	2/3 biernego	czynne	2/3 biernego
Kąt tarcia gruntu o ściankę wg [13]	$2/3\phi'$	$-2/3\phi'$	$1/2c_u$	$-1/2c_u$
Rozkład parcia od ciężaru własnego gruntu i obciążenia naziomu	prostokątny	trapezowy/trójkątny	prostokątny	trapezowy/trójkątny

Cel i opis pomiarów

Głównymi celami przeprowadzonych badań były:

- wyznaczenie rzeczywistych sił w kotwach,
- porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń statycznych i określenie rzeczywistego poziomu bezpieczeństwa,
- próba określenia miarodajnych warunków pracy ściany oporowej w gruntach twardeplastycznych w obecności wody gruntowej.

Na całym odcinku pomiarowym przyjęto kotwy z minimalnym naciąganiem blokowania (rys. 4). Takie podejście zbliża



Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego

w założeniu pracę przedmiotowych kotew do tzw. kotew biernych, w których siła pomierzona w zakotwieniu po wykonaniu wykopu do pełnej głębokości jest w przybliżeniu zmobilizowaną w sposób naturalny reakcją podporową. W celu uniknięcia nadmiernych przemieszczeń obudowy wbudowano kotwy prętowe o dużej średnicy ciągną. Pole przekroju prętów badanych kotew wynosiło około 1960 mm² i było zdecydowanie większe od wymaganego w odniesieniu do kotew linowych na pozostałych odcinkach budowy, równego 450 mm². Naciąg blokowania kotew linowych wynosił 390 kN (około 0,75R_d), a kotew badanych jedynie 50 kN (około 0,1R_d). Naciąg blokowania w kotwach prętowych wprowadzono wyłącznie w celu wybrania luzów montażowych i wyrównania przypadkowych różnic pomiędzy poszczególnymi kotwami. Obliczenia statyczne wykazały, że w przypadku takiego układu ścianka – kotwa przemieszczenie obudowy w poziomie podparcia wyniesie 10 ÷ 12 mm przy kotwie prętowej biernej i 12 ÷ 14 mm przy kotwie linowej czynnej. Wartości te zostały potwierdzone pomiarami kontrolnymi z dokładnością do około 3 ÷ 4 mm, co przy dokładności zastosowanych technik pomiarowych jest wynikiem zadowalającym, ponieważ błąd średni pomiarów geodezyjnych wynosił około 1 mm, a inklinometrycznych około 2 mm.

Z założenia pomiar siły miał się odbywać dwiema niezależnymi technikami. Taki sposób przeprowadzenia pomiarów znacznie zwiększa wiarygodność otrzymanych wyników. Nieestety kompletny pomiar udało się wykonać tylko w przypadku jednej kotwy. W odniesieniu do pozostałych kotew zastosowano jedną z dwóch technik pomiarowych przedstawionych niżej.

Charakterystyka technik pomiarowych

W tablicy 3 przedstawiono cykl robót w rejonie odcinka pomiarowego. Pomiar sił w kotwach prowadzono:

- przez sprzężenie kotew siłownikiem z jednoczesnym pomiarem przemieszczenia głowic kotew,
- przy użyciu tensometrów strunowych zamocowanych na ciągnach.

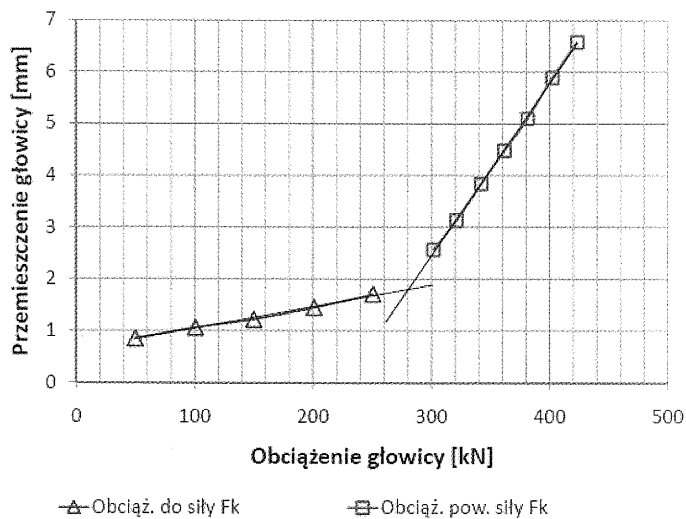
Tablica 3
Fazy robót na odcinku pomiarowym

Lp.	Faza robót	Data
1	Instalacja grodzic	15-21.04.2010
2	Wykonanie platformy roboczej pod kotwieniem do głębokości około 3,5 m	8-9.05.2010
3	Wiercenie i iniekcja kotew	11-12.05.2010
4	Powtórna iniekcja kotew	13.05.2010
5	Badania odbiorcze kotew	21.05.2010
6	Wykonanie wykopu na rzędną docelową tzn. do głębokości około 7,7 m	26-27.05.2010
7	Pomiar siły w kotwach	8.06.2010

Obie metody są w istocie technikami pośrednimi. W przypadku stosowania siłownika bazuje się na jego charakterystyce ciśnienie – siła znanej na podstawie kalibracji przeprowadzonej w kontrolowanych warunkach. W pomiarach tensometrycznych z kolei mierzy się odkształcenia i na ich podstawie określa się siłę w ciągnie. Jednoczesne zastosowanie dwóch technik umożliwia wzajemną weryfikację pomiarów i zmniejsza ryzyko popełnienia grubego błędu.

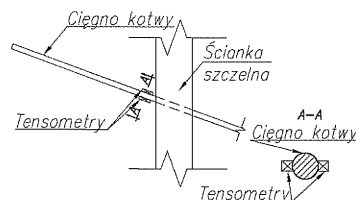
Pomiar siły w kotwach za pomocą siłownika i czujników przemieszczeń

Zakłada się, że przed rozpoczęciem pomiaru siła z kotwy jest w całości przekazywana na głowicę oporową. Część ciągną wystającą ponad głowicę można zamocować w siłowniku i dokonać badania w sposób zbliżony do badania odbiorczego. Aby uzyskać charakterystykę obciążenie – przemieszczenie badanej kotwy, na końcu ciągną jest mierzone jego przemieszczenie.



Rys. 5. Wyznaczenie siły w kotwie nr 36

Obciążenie przykłada się „krokami”. Do momentu, gdy siła przyłożona przez siłownik nie przekracza siły w zakotwieniu, wydłużeniu ulega jedynie odcinek L1 (rys. 5). W tym etapie siła w ciągnie pomiędzy głowicą oporową a buławą nie zmienia się. W chwili przyłożenia przez siłownik obciążenia równego sile w kotwie, wydłużeniu ulega także długość wolna kotwy (por. odcinek L2 na rys. 5). Odształcalność dłuższego odcinka jest większa niż krótszego, co powinno znaleźć odzwierciedlenie w charakterystyce obciążenie – przemieszczenie. Przykładową charakterystykę jednej z badanych kotew przedstawiono na rys. 6. Wartość siły w kotwie wyznacza się, rysując styczne do krzywych odpowiadających zakresom obciążeń, przy których wydłużały się odcinki L1 oraz L1+L2. Wartość siły w kotwie wyznacza punkt przecięcia obu stycznych.



Rys. 6. Mocowanie tensometrów do ciągną kotew

Pomiary tensometryczne

Pomiary tensometryczne prowadzono przy użyciu tensometrów strunowych. Głównym elementem takiego czujnika jest struna z wysokogatunkowej stali. Struna znanej długości jest sprzężona i zamocowana pomiędzy dwoma punktami. Częstotliwość drgań własnych struny zależy (podobnie jak w fortepianie) od jej naprężenia. Odkształcenie określa się, mierząc częstotliwość drgań struny za pomocą układu indukcyjnego. Zaletą tensometru strunowego jest jego długookresowa stabilność [3].

Pomiary wykonano przy użyciu tensometrów firmy Geokon, model 4000. Każdy z tensometrów ma wbudowany termometr, co umożliwia wprowadzanie poprawki ze względu na zmiany temperatury.

Obliczenia odkształceń oraz korekty uwzględniające zmianę temperatury w czasie wykonywania pomiarów wykonano zgodnie z [16]. Naprężenia i siłę w ciągnie kotwy wyznaczono zgodnie z równaniami:

$$\sigma_a = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2} E, \quad (1)$$

$$F_a = A \sigma_a, \quad (2)$$

w których:

σ_a – naprężenie w ciągnie kotwy,

ε_1 – odkształcenie pomierzone tensometrem nr 1,
 ε_2 – odkształcenie pomierzone tensometrem nr 2,
 E – moduł Younga stali, równy 205 GPa,
 F_a – siła w ciągnie kotwy,
 A – pole przekroju cięga kotwy.

Omówienie wyników pomiarów

Wyniki pomiarów sił w kotwach, wykonanych obiema metodami, zestawiono w tabl. 4. Na podstawie wyników pomiarów kotwy nr 39 obiema technikami można stwierdzić, że różnica pomierzonej wartości siły była istotna i wynosiła około 55 kN. Pewną wskazówkę w rozwiązaniu tego problemu stanowić mogą pomiary w trakcie badań odbiorczych kotew nr 38 i nr 39.

Tablica 4
Zestawienie sił w kotwach

Nr kotwy	Wartość siły w kotwie	
	pomiar siłownikiem	pomiar tensometrem
	F_1 , kN	F_2 , kN
36	280	brak
37	375	brak
38	brak	331
39	315	260
40	320	brak

Porównanie wartości sił z pomiaru tensometrycznego z wartością wprowadzoną siłownikiem hydraulicznym wykazuje dobrą zgodność otrzymanych wyników w granicach $\pm 5\%$ (tabl. 5). Wskazuje to na wystarczającą wiarygodność pomiaru z użyciem siłownika hydraulicznego i czujników przemieszczeń oraz możliwość uszkodzenia jednego z tensometrów, co mogło być przyczyną stosunkowo słabej zgodności wyników pomiaru siły kotwiącej na etapie kompletnego wykopu.

Tablica 5
Wyniki pomiaru sił w trakcie badań odbiorczych kotew

Numer kotwy	Wartość siły w kotwie przy obciążeniu $0,75R_d$		Wartość siły w kotwie przy obciążeniu $1,25R_d$	
	pomiar siłownikiem	pomiar tensometrem	Pomiar siłownikiem	Pomiar tensometrem
	$F_1^{0,75}$, kN	$F_2^{0,75}$, kN	$F_1^{1,25}$, kN	$F_2^{1,25}$, kN
38	398	424	663	698
39	398	402	663	657

Analiza porównawcza wyników pomiarów z wynikami obliczeń

W tablicy 6 zestawiono pomierzone siły w kotwach z wartościami sił otrzymanymi z obliczeń statycznych.

Z obliczeń wykonanych przy założeniu w glinach warunków bez odpływu otrzymano mniejsze wartości sił w kotwach niż obliczone w warunkach z odpływem. W glinach o dużej wytrzyma-

Tablica 6
Zestawienie sił w kotwach mierzonych i obliczonych

Numer kotwy	Wynik obliczeń statycznych		Wynik pomiaru
	siła w kotwie, warunek z odpływem	siła w kotwie, warunek bez odpływu	siła w kotwie
	R_k^d , kN	R_k^u , kN	R_m , kN
36	417	169	280
37	551	224	383
38	551	224	331 ¹⁾
39	551	224	318
40	470	191	322

¹⁾ Wyłącznie pomiar tensometryczny.

łości jest to wynik zgodny z oczekiwaniami. W gruntach „słabych” tendencja jest z reguły odwrotna, tzn. warunkami miarodajnymi do wyznaczenia sił w konstrukcji są wówczas warunki bez odpływu.

W omawianym przypadku rozbieżność obu obliczonych wartości jest znacząca. Obciążenie w kotwie pomierzone na budowie mieści się pomiędzy siłami obliczonymi z uwzględnieniem warunków z odpływem i bez odpływu. Siła obliczona w warunkach z odpływem stanowi średnio 1,56 wartości siły zmierzonej, a obliczona w warunkach bez odpływu – średnio 0,64 tej wartości. Siły podane w tabl. 4 i 5 można traktować jako charakterystyczne, a kotwy projektowane są na ich podstawie z wymaganym zapasem bezpieczeństwa. Tak więc różnica pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów (tabl. 6) nie stanowi zwykłego zapasu bezpieczeństwa, lecz wskazuje na nadmierny konserwatyzm przyjęcia w przypadku glin warunków z odpływem. Takie założenie powodowałoby więc projektowanie nieekonomiczne. Z drugiej strony przyjęcie w odniesieniu do glin warunków bez odpływu wiązałoby się z projektowaniem niebezpiecznym.

Pewne wskazania w odniesieniu do sposobu obliczania konstrukcji w gruntach spoistych zawiera publikacja [6]. Postępując zgodnie z zasadą przyjętą przez jej autorów, przeprowadzono obliczenia statyczne, zakładając „mieszane” warunki odpływu wody z porów gruntu. Jedno z obliczeń polegało na przyjęciu warunków z odpływem po stronie naziomu, a bez odpływu po stronie wykopu (warunki mieszane, typ 1), drugie na przyjęciu sytuacji odwrotnej (warunki mieszane, typ 2). Pozostałe zasady postępowania przyjęto jak we wcześniejszych obliczeniach. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabl. 7.

Tablica 7
Zestawienie sił w kotwach (mierzonych i obliczonych) przy mieszanych warunkach odpływu

Numer kotwy	Wynik obliczeń statycznych		Wynik pomiaru
	siła w kotwie, warunki mieszane typ 1	siła w kotwie, warunki mieszane typ 2	siła w kotwie
	R_k^{m1} , kN	R_k^{m2} , kN	R_m , kN
36	351	170	280
37	464	224	383
38	464	224	331 ¹⁾
39	464	224	318
40	396	191	322

¹⁾ Wyłącznie pomiar tensometryczny.

Z powyższego zestawienia widać, że największą zgodność wartości pomierzonych z obliczonymi uzyskuje się, przyjmując warunki z odpływem po stronie parcia i bez odpływu po stronie odporu. Wartość obliczona siły w kotwie stanowi wówczas średnio 1,32 wartości mierzonej. Biorąc pod uwagę ogólnie dużą niepewność w projektowaniu geotechnicznym, można ten wynik uznać za zadowalający.

Wnioski końcowe

Przedstawiono wyniki pomiarów siły w kotwach w skali technicznej. Biorąc pod uwagę te wyniki, podano ogólny komentarz do przyjętej w Polsce praktyki projektowania zabezpieczeń wykopów. Porównano wyniki pomiarów i obliczeń przeprowadzonych zgodnie z aktualnymi normami europejskimi. Obliczenia wskazują, że przy projektowaniu obudowy wykopu w gruntach spoistych twardoplastycznych przy założeniu warunków z odpływem uzyskuje się znacznie zawyżone siły w kotwie w stosunku do wartości występującej w rzeczywistości. Obecnie nie jest jasne, co jest przyczyną tak dużego przewymiarowania. Z drugiej strony przyjęcie warunków bez odpływu powoduje zaprojektowanie konstrukcji o zaniżonym poziomie bezpieczeństwa. Obliczenia przyniosły wynik najbardziej zbliżony do wy-

niku pomiarów przy założeniu warunków z odpływem po stronie naziomu i warunków bez odpływu po stronie wykopu.

★ ★ ★

Autorzy wyrażają podziękowania firmie Aarsleff Sp. z o.o. z Warszawy za umożliwienie przeprowadzenia pomiarów, ich sfinansowanie i udostępnienie wyników na potrzeby niniejszej publikacji.

PIŚMIENNICTWO I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] *Blum H.*: Wirtschaftliche Dalbenformen und ihre Berechnung. „Die Bau-technik”, Heft 5, 1932.
- [2] *Carder D.R., Symons I.F.*: Long-term performance of an embedded cantilever retaining wall in stiff clay. „Geotechnique”, No. 1, 1989.
- [3] *Dunnicliff J.*: Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. John Wiley & Sons, Inc, New York 1993.
- [4] *Ou C.-Y., Shiau B.-Y.*: Analysis of the corner effect on excavation behaviors. „Can. Geotech.”, J. 35, 1998.
- [5] *Lunne T., Robertson P., Powell J.*: Cone penetration testing in geotechnical practice. Blackie Academic and Professional, London 1997.
- [6] *Ng C.W.W., Simpson B., Lings M.L., Nash D.F.T.*: Numerical analysis of a multipropped excavation in stiff clay. „Can. Geotech.”, J. 35, 1998.
- [7] *Powrie W., Batten M.*: Comparison of measured and calculated temporary-prop loads at Canada Water Station. „Geotechnique”, No. 2, 2000.
- [8] *Powrie W., Simpson B.*: Embedded retaining walls, theory, practice and understanding. Perspective Lecture. Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul, August 2001.
- [9] *Twine D., Roscoe H.*: Temporary propping of deep excavations-guidance on design. CIRIA Publication C517. Classic House, London 1999.
- [10] *Weissenbach A., Baugruben*: Berechnunggrundlagen. Teil 2. Ernst & Sohn, Berlin 1975.
- [11] Dokumentacja geotechniczna wierceń i badań podłoża gruntowego projektowanego budynku przy ul. Krętej, róg Wiejskiej w Białymstoku. Aquapomp, mgr inż. *Paweł Rostkowski*. Białystok, październik 2007.
- [12] Dodatkowe badania geotechniczne. Białystok, ul. Kręta / Wiejska. „Geoteko” Sp. z o.o. Warszawa, luty 2010.
- [13] DIN 4085-2007 Subsoil-Calculation of earth pressure.
- [14] EAB 2003 Recommendations on Excavations. German Society for Geotechnics. Ernst & Sohn, Berlin 2003.
- [15] EAU 2004 Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen” Häfen und Wasserstraßen. Ernst & Sohn, Berlin 2005.
- [16] Instruction Manual. Model 4000. Vibrating Wire Strain Gage. Geokon Inc. 48 Spencer Street, Lebanon, New Hampshire, 03766 – USA.
- [17] PN-EN 1997-1:2004 Eurokod 7 (2004): Projektowanie geotechniczne – Część 1.
- [18] PN-B-03020:1981 Grunty budowlane – Posadowienie bezpośrednie budowli.