ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: BUDOWNICTWO z. 97 Nr kol. 1573

Anna SIEMIŃSKA-LEWANDOWSKA
Politechnika Warszawska

PROJEKTOWANIE ŚCIAN GŁĘBOKICH WYKOPÓW NA PODSTAWIE WYNIKÓW BADAŃ KOTEW GRUNTOWYCH

Streszczenie. W referacie przedstawiono znaczenie wyników badań kotew iniekcyjnych w procesie projektowania i realizacji kotwionych ścian głębokich wykopów. Omówiono rodzaje badań oraz opisano przeprowadzone na kilku warszawskich budowach badania próbne, związane z wyznaczaniem wolnej długości cięgna, zerwaniem kotew, a także odkopywaniem buław kotwiących. Wyniki badań i wnioski przedstawiono w podsumowaniu pracy.

THE INFLUENCE OF GROUND ANCHORS TESTING ON DEEP EXCAVATION WALLS DESIGN

Summary. The influence of testing of ground anchors on design and construction of anchored deep excavation walls has been described in the paper. The methods of anchors testing has been discussed and the examples of tests application, considering evaluation of the apparent tendon free length, braking anchors, as well as the exploration of the grout body, has been described. In the summing up the results of tests and conclusions have been presented.

1. Wstęp

Projektując kotwione ściany głębokich wykopów określa się cechy układu ściana-kotew-grunt, zapewniające jego wytrzymałość, stateczność, bezpieczeństwo i ograniczenie do minimum niekorzystnego wpływu na obiekty sąsiadujące z budową. Te cechy to: rodzaj i parametry wytrzymałościowe zaproponowanej konstrukcji (ściana szczelna, berlińska, szczelinowa, palościanka), przemieszczenia poziome i pionowe ściany wykopu oraz przyległego terenu w każdej fazie realizacji, wartości sił w kotwach iniekcyjnych oraz

ich parametry geometryczne i wytrzymałościowe, a także stateczność globalna układu obejmującego kotwioną konstrukcję i przyległy obszar.

W ostatnich latach czyni się wiele starań nad wprowadzeniem podejścia przemieszczeniowego do powszechnego projektowania kotwionych ścian głębokich wykopów. Podejście to związane jest z badaniami w skali naturalnej: długotrwałą obserwacją odkształceń konstrukcji i przyległego terenu oraz obszernymi badaniami kotew stanowiących o stateczności ściany i bezpieczeństwie prowadzonych robót. Zdarza się, że wyniki wykonanych wcześniej testów decydują o zmianach w projekcie, a doświadczenia z badań przeprowadzonych na innych obiektach są jednym z elementów projektowania tego typu konstrukcji.

Obecnie, zasady przeprowadzania badań kotew gruntowych reguluje polska norma [3], która jest oficjalnym tłumaczeniem normy europejskiej [4]. W latach poprzednich korzystano z normy niemieckiej [5] oraz zaleceń francuskich [6]. Poniżej przedstawiono krótki opis aktualnie wymaganych badań.

2. Opis badań kotew gruntowych

W normie PrPN-EN-1537 wyróżnia się trzy rodzaje badań in situ. Są to: badania wstępne, przydatności oraz odbiorcze.

Badania wstępne wykonuje się na kotwach próbnych, przed realizacją kotew użytkowych. Ich celem jest określenie wytrzymałości kotwy na styku buława/grunt; wyznaczenie krytycznego naciągu pełzania lub krzywej pełzania na różnych poziomach obciążenia aż do zerwania; krzywej spadku naciągu pod obciążeniem użytkowym oraz umownej swobodnej długości cięgna. Badania te wykonuje się, gdy kotwy wykonywane są w nowych lub trudnych warunkach gruntowych lub gdy przewiduje się, że naciągi użytkowe będą większe od dotychczas stosowanych w podobnych warunkach gruntowych. Wyniki badań wstępnych dostarczają projektantowi informacji o wartości granicznej nośności kotwy z uwzględnieniem rzeczywistych warunków geotechnicznych, potwierdzają możliwości techniczne wykonawcy lub służą sprawdzeniu nowego typu kotwy poprzez jej zniszczenie na styku buława/grunt (wyrwanie). Ponieważ kotwy do badań wstępnych są obciążane większymi siłami niż użytkowe, nie mogą być wykorzystywane w obiektach trwałych. Dodatkową korzyścią wynikającą z badań wstępnych jest czasami możliwość odkopania kotwy i ocena kształtu i wymiarów buławy kotwiącej w danych warunkach geotechnicznych.

Badanie przydatności jest to próbne obciążenie, mające na celu wykazanie, że określona konstrukcja kotwy będzie odpowiednia w danych warunkach gruntowych. Celem badań przydatności jest potwierdzenie dopuszczalnych krzywych pełzania i spadku naciągu próbnego i siły blokowania na potrzeby przyszłych badań odbiorczych lub krytycznej siły pełzania; wyznaczenie kryteriów pełzania lub spadku naciągu, dopuszczalnych przy naciągu próbnym podczas badań odbiorczych oraz wyznaczenie umownej, swobodnej długości cięgna. Badanie przydatności przeprowadza się na co najmniej 3 kotwach użytkowych, reprezentatywnych w danych warunkach gruntowych, przed realizacją pozostałych. Ich wyniki potwierdzają założenia projektowe oraz są podstawą do prawidłowego przebiegu badań odbiorczych.

Badanie odbiorcze jest to próbne obciążenie kotwy wykonywane w celu potwierdzenia, iż spełnia ona kryteria odbiorcze określone w normie. Celem badań odbiorczych jest wykazanie, że kotwa przenosi naciąg próbny, którego wartość zależy od metody badań, lecz najczęściej odpowiada 120% nośności obliczeniowej kotwy; wyznaczenie, jeśli to konieczne, krzywych pełzania i spadku naciągu w stanie granicznym użytkowania oraz umownej, swobodnej długości cięgna. Badaniom odbiorczym poddawane są wszystkie kotwy obiektu. Ich wyniki są podstawą do dopuszczenia kotwy do eksploatacji, informacją o uzyskaniu przewidywanej w projekcie nośności, zapewniającej stateczność ściany wykopu. W Polsce, wzorując się na normie niemieckiej DIN 4125, przeprowadza się dodatkowo tzw. badania częściowe. Procedura badań częściowych odpowiada badaniom odbiorczym, lecz naciąg próbny wynosi 150% nośności obliczeniowej. Badaniom częściowym poddaje się 10% wszystkich kotew obiektu.

Przebieg badań odbiorczych i częściowych jest dokumentowany w metryce kotwy, gdzie opisuje się tok sprężania, pomiary przemieszczeń cięgna oraz wyznacza jego wydłużenie sprężyste. Wartość ta pozwala na wyznaczenie swobodnej długości cięgna L_{app}, a na tej podstawie globalnej stateczności układu. Zbyt mała wartość swobodnej długości cięgna może spowodować konieczność zmian długości kotew realizowanych w dalszej kolejności (np. głębiej położonych). Przebieg przemieszczeń cięgna oraz stabilizacji siły w kotwie na poszczególnych poziomach obciążania pozwalają na ocenę zjawisk reologicznych, tj. pełzania. Jest to szczególnie istotne podczas wykonywania kotew, których buławy są posadowione w gruntach spoistych. Informacje zawarte w metryce kotwy dotyczą również technologii wykonania, sposobu wiercenia oraz iniekcji (jednokrotna, wielokrotna selektywna itp.), ilości iniektu oraz terminów. Metryka zawiera też opis rzeczywistych warunków gruntowych, jakie stwierdzono podczas wiercenia kotwy. Kotew iniekcyjna jest

głębokim fundamentem trudnym do bezpośredniej obserwacji. Dane z metryki są dla projektanta jedynym źródłem informacji w przypadku wystąpienia nadmiernych przemieszczeń poziomych ściany wykopu lub awarii. Dlatego obowiązkiem wykonawcy jest sporządzanie oraz archiwizacja metryk wszystkich wykonanych na obiekcie kotew.

3. Opis przeprowadzonych badań

W referacie przedstawiono badania kotew iniekcyjnych wykonane na stacji warszawskiego metra oraz podczas budowy głębokiego wykopu pod budynek biurowy.

Na stacji metra Centrum zabezpieczenie wykopu o głębokości 17,45 m stanowiła kotwiona ściana szczelinowa o grubości 80 cm połączona w górnej części ze ścianą berlińską. Stateczność ściany berlińskiej zapewniał pierwszy poziom kotew iniekcyjnych o nośności 500 kN w rozstawie 2,7 m, a ściany szczelinowej trzy lub cztery poziomy kotew o nośności 550 lub, w najniższym poziomie 600 kN, w rozstawie - 1,35 m. Całkowita długość kotew była zmienna: od 25 m do 15,0 m w zależności od poziomu. Buławy kotwiące, których długość była stała i wynosiła 8,5 m, posadowiono w bardzo zróżnicowanych gruntach – od piasków drobnych i średnich po gliny piaszczyste zwarte. Łącznie na stacji wykonano 1241 kotew. Konstrukcja kotwy zawierała element oddzielający buławę od swobodnej długości cięgna tzw. separator. Sposób jego wykonania nie zabezpieczał przed penetracją zaczynu podczas iniekcji w strefę wolnej długości cięgna, co potwierdzały wartości sprężystego wydłużenia cięgna Δl pomierzone podczas badań odbiorczych, przeprowadzonych dla pierwszego poziomu kotwienia. Umowna, swobodna długość cięgna L_{app} jest obliczana na podstawie następującego wzoru [3]:

$$L_{app} = (A_t E_t \Delta l)/ \Delta P \tag{1}$$

gdzie:

A_t – powierzchnia przekroju poprzecznego cięgna, E_t – moduł sprężystości cięgna, Δl – wydłużenie sprężyste cięgna, ΔP – różnica pomiędzy naciągiem próbnym a wstępnym.

Wartość dolnej granicy L_{app} wynosi:

$$L_{app} = 0{,}8\, L_{tf} + L_e \tag{2}$$

gdzie:

L_{tf} – swobodna długość cięgna, L_e – zewn. długość cięgna pomiędzy głowicą a naciagarką

Po przeanalizowaniu wyników sprężania stwierdzono, że nastąpiło skrócenie umownej, swobodnej długości cięgna o około 20%, co wpłynęło na stateczność zewnętrzną układu ściana-kotew-grunt, z uwagi na zmianę położenia głębokiej płaszczyzny odłamu. Wartość współczynnika stateczności wyznaczonego metodą Kranza dla drugiego poziomu kotew zmalała poniżej dopuszczalnej wartości [2]. Dlatego projektant ściany dokonał korekty projektu, wydłużając kotwy niższych poziomów.

Drugim obiektem, na którym prowadzono badania, był wykop pod budynek biurowy w Warszawie [1]. Celem badań miała być ocena rzeczywistej nośności kotew wykonanych w złożonych warunkach geotechnicznych oraz analiza pełzania buław posadowionych w zaburzonych glacitektonicznie, silnie pęczniejących iłach plioceńskich. Stateczność ściany szczelinowej wykopu zapewniały jeden lub dwa poziomy kotew o długości całkowitej od 12 do 16m (w tym buławy 7 i 9 m) i nośności 500 kN. Dla celów badawczych wykonano wewnątrz wykopu blok oporowy oraz trzy kotwy oznaczone literami **A, B, C**, przeznaczone do całkowitego zerwania. Całkowita długość kotew **A** i **B** wynosiła 14 m, w tym buława 8 m, a kotwy **C** – 16 m, w tym buława 10 m. Stanowisko badawcze przedstawiono na fot.1, a próbne obciążenie na fot. 2.

Fot. 1. Widok stanowiska badawczego
Phot. 1. The view of testing site

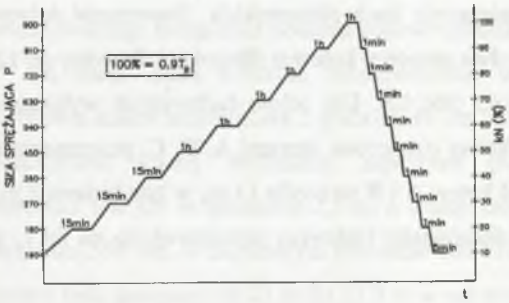
Fot. 2. Bania wstępne
Phot. 2. Investigation test

Ustalono następujący przebieg badań:

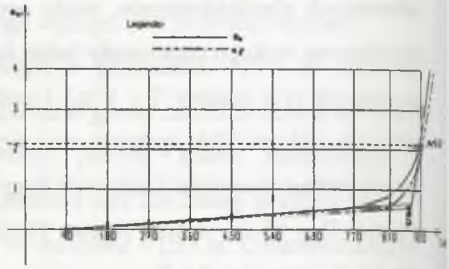
- sprężanie stopniami odpowiadającym następującym siłom: 90, 180, 270, 360, 450, 540, 630, 720, 810, 900 kN,
- czas utrzymywania obciążenia dla stopni 20, 30, 40% – 15 minut, a powyżej 40% – 60 minut
- pomiary przemieszczeń cięgna w 1, 2, 5, 10, 15 minucie dla stopni do 40% oraz w 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 i 60 minucie dla stopni powyżej 40%,

- odciążanie takimi stopniami, jak sprężanie, czas utrzymywania siły - 1 min., pomiar przemieszczeń po 1 minucie.

Na rys. 1. przedstawiono zaproponowany w badaniach przebieg sprężania kotew **B** i **C**, a na rys. 2 [7] wykres krzywej pełzania kotwy **C**, którą obciążano aż do zerwania. Obciążenie wprowadzono bez stopni pośrednich do siły 810 kN, a następnie stopniami 5-minutowymi: 900 kN, 960 kN, 1000 kN, 1100 kN, 1150 kN, 1200 kN i 1250 kN. Kotew była stabilna przy sile 950 kN, a zerwanie nastąpiło w przedziale 1200 do 1250 kN. Pełzanie osiągnęło wartość 2,03 mm.



Rys. 1. Sposób obciążania kotew **B** i **C**
Fig. 1 Loading procedure for anchor **B** i **C**



Rys. 2. Krzywe pełzania kotwy **C**
Fig. 2. Creep displacement for anchor C

Na podstawie wyników sprężania oraz zerwania stwierdzono, że posadowione w trudnych warunkach gruntowych, jakimi są iły plioceńskie, buławy kotew gwarantowały współczynnik bezpieczeństwa kotwy w granicach 2, przy założonej nośności projektowej 500 kN. Wynika to z faktu, że kotwy o długości buławy równej 8 m przy sile 900 kN były stabilne, a utrata nośności nastąpiła w przedziale pomiędzy 900 a 1000 kN, natomiast kotew o długości buławy równej 10m była stabilna dla siły 950 kN, a zerwanie nastąpiło w przedziale 1200 i 1250 kN.

W projekcie przyjęto, że średnica buławy wynosi od 16,5 do 18 cm, przy średnicy wiercenia 150 mm. Dlatego buławy kotwi odkopano i stwierdzono, że ich średnice wynoszą około 20 cm. Odkopany i wycięty fragment buławy przedstawiono na fot. 3.

Fot. 3. Widok odkopanej buławy kotwy C
Phot. 3. The view of explorated grout body of anchor C

Na podstawie [6] wyznaczono graniczną nośność kotwy, która wynosi:

$$T_u = \pi D_S L_S q_S \tag{3}$$

gdzie:

D_s – średnica buławy, L_S – długość buławy, q_S – jednostkowe tarcie na pobocznicy, wg [6] 200 kPa.

Po podstawieniu odpowiednich wartości (D_s=0,2 m; L_s= 8 m i 10 m) T_u wynosi około 1000 kN i 1256 kN dla kotew o buławie 8 m i 10 m.

4. Posumowanie

W podsumowaniu należy zwrócić uwagę na wpływ, jaki mają wyniki przeprowadzonych badań na projektowanie kotwionych konstrukcji. Na przykładzie pierwszego z opisanych przypadków można stwierdzić, że rezultaty badań odbiorczych wykonanych dla pierwszego poziomu kotwienia pozwoliły na zachowanie bezpiecznych współczynników stateczności całej konstrukcji. Analiza budowy separatora pozwoliła wykonawcy na dokonanie poprawek i uniknięcie dalszych błędów. W drugim przykładzie wyniki obliczeń nośności kotew posadowionych w iłach plioceńskich, wykonane dla rzeczywistej średnicy buławy są zgodne

z projektem oraz potwierdzone rezultatami badań wstępnych. Jest to cenna informacja dla projektanta oraz doświadczenie, które zostanie wykorzystane w praktyce.

LITERATURA

1. Siemińska-Lewandowska A., Wojnarowicz M., Analiza kotwionej ściany szczelinowej na budowie Saski Bussines Park w Warszawie, Inż. Morska i Geotechnika 2000, nr 3, s. 133-136.
2. Siemińska-Lewandowska A.,Wpływ technologii wykonania kotwi na stateczność układu ściana-kotew-grunt. Sesja Naukowa IDiM PW i SG KILiW PAN, Warszawa 1996, s.105-111.
3. PrPN-EN-1537, Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych, Kotwy gruntowe, PKN/2001.
4. EN 1537, Execution of special geotechnical work-Ground anchor, CEN/1999.
5. DIN 4125, Kurzzeitanker und Daueranker, Bemessung, Ausfürung und Prüfung, 1990.
6. Reccomandation TA 95 Comité Français de la Mécanique des Sols et des Travaux.
7. Hydrobudowa-bis, Dokumentacja badań kotwi, Warszawa 1998.

Recenzent: Prof. zw. dr hab. inż. Bohdan ZADROGA

Abstract

Ground anchors investigation and control test results are important in designing of anchored structures. The outcome of tests should be taken into account in the execution stage of a ground anchor or in the design of deep excavation anchor system.