

dr inż. Karolina Gorska*
dr inż. Marek Wyjadłowski*

Wyznaczanie parametrów geotechnicznych podłoża w metodzie obserwacyjnej

Zastosowanie metody obserwacyjnej projektowania wykopów zaleca Eurokod 7-1, gdy zachowanie konstrukcji geotechnicznej jest trudne do przewidzenia. Metoda ta stanowi kombinację badań konstrukcji i podłoża oraz obliczeniowej prognozy połączonej z bieżącymi pomiarami zachowania się budowli i podłoża w trakcie budowy i użytkowania. Jest jedną z metod z grupy tzw. aktywnego projektowania. W artykule przedstawiono łączne zastosowanie pomiarów inklinometrycznych, analizy wstecznej [1] oraz metod numerycznych, co pozwala na projektowanie obudowy wykopu metodą obserwacyjną oraz aktywną modyfikację projektu zabezpieczenia wykopu w trakcie wykonywania konstrukcji.

Opis badanej konstrukcji

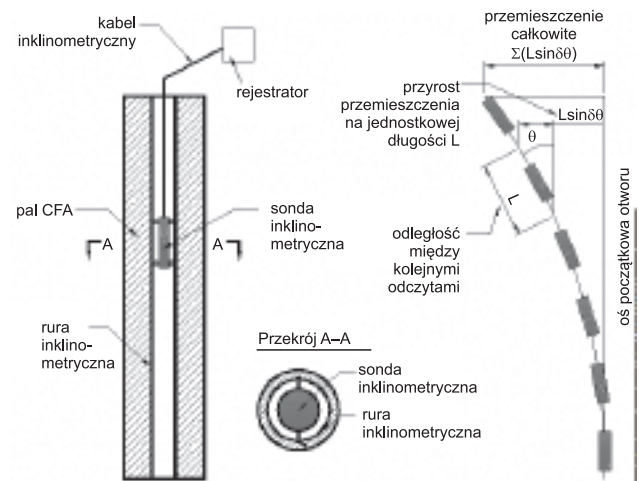
W celu oszacowania parametrów warstwy nasypu przeprowadzono pomiary inklinometryczne przemieszczeń wspornikowego zabezpieczenia wykopu głębokości 4,0 m. Obudowę wykopu stanowiła pionowa palisada z pali wierconych CFA średnicy 500 mm i długości 9,0 m w układzie przenikającym się, zbrojonych co drugi kształtownikiem stalowym IPE330 (S355) długości $L = 8,0$ m. Rurę inklinometryczną $50 \times 50 \times 3$ przyspawano do profilu zbrojącego palisadę i wprowadzono do pala. Wokół palisady występuje uwarstwione podłoże geotechniczne. Wierzchnią warstwę stanowią nasypy niekontrolowane o miąższości 2,0 m. Nasypy zawierają piaski, gliny piaszczyste, cegły, żwir, kamienie, glebę oraz gruz. Poniżej zalegają utwory rodzime (tabela). Pierwszą warstwę o miąższości 2,0 m stanowią piaski średnie/grube o stopniu zagęszczenia $I_p = 0,60$, dalej – grunty spoiste.

Parametry geotechniczne podłoża

Nazwa gruntu	Miąższość [m]	I_p/I_L	γ [kN/m ³]	E [MPa]	ν	c [kPa]	ϕ [°]
Nasyp niekontrolowany	2,0	-	18,0/21,0	10	0,3	0	28
MSa/CSa	2,0	0,60	18,5/19,5	94	0,25	0	34
saCl	1,0	0,29	20,5/20,5	21	0,3	26	15,5
saCl	1,0	0,10	22,0/22,0	50	0,3	44	23
saCl	-	0,09	21,5/21,5	50	0,3	50	25

Zasady pomiaru inklinometrycznego

Zestaw inklinometryczny (rysunek 1) składa się z: sondy inklinometrycznej, kabla inklinometrycznego, rejestratora, „ślepej” sondy, kabla oraz bloczka. Sonda inklinometryczna zbu-



Rys. 1. Schemat sposobu przeprowadzania pomiaru

dowana jest z cylindrycznego korpusu wyposażonego w dwa stalowe wózki jezdne i zamontowanego wewnątrz czujnika pomiarowego (dwuosowego serwoakcelerometru [2]). Czujnik może być stosowany w każdym rodzaju pionowej rurze inklinometrycznej średnicy wewnętrznej $38 \div 84$ mm. Sonda połączona jest stalowym wodoszczelnym złączeniem z kablem inklinometrycznym, pozwalającym na komunikację pomiędzy akcelerometrem a rejestratorem. Sposób pomiaru przemieszczeń oparty jest na pomiarze kąta wychylenia sondy (rysunek 1). Przyrost przemieszczenia poziomego każdego odcinka oblicza się ze wzoru:

$$\Delta u_{ij} = 500 \text{ mm} \times [\sin(\alpha_{ij}) - \sin(\alpha_{i0})] \quad (1)$$

gdzie:

α_{ij} – kąt nachylenia sondy zmierzony na i -tym odcinku w j -tym pomiarze;

α_{i0} – kąt nachylenia sondy zmierzony na i -tym odcinku w pomiarze zerowym (odniesienia).

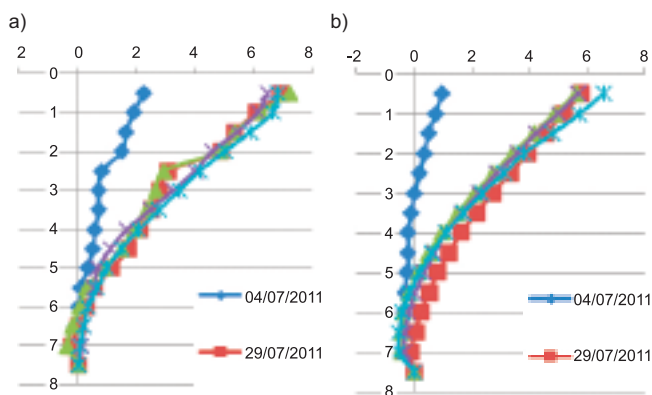
W celu uzyskania przyrostu przemieszczenia na danej głębokości należy zsumować przyrosty przemieszczeń wszystkich odcinków pomiarowych poniżej tego punktu [3].

Pomiary prowadzono w czterech prostopadłych kierunkach, co pozwala na ustalenie wypadkowych przemieszczeń w dwóch prostopadłych kierunkach. Pomiar zerowy został przeprowadzony bezpośrednio po wykonaniu palisady. Pierwszy pomiar wykonano dla głębokości wykopu 2,0 m. Przemieszczenia korony – stanowisko badawcze I1 – palisady wynoszą 2,0 mm. Zaobserwowano wygięcie ściany w okolicy dna wykopu. W związku z tym,

* Politechnika Wroclawska

że wykop o tej głębokości utrzymywany był przez następny miesiąc (29.07 ÷ 28.08), wykonano dodatkowe pomiary i zaobserwowano wyraźny przyrost przemieszczeń w krótkim czasie od wykonania poprzedniego pomiaru oraz następującą po nim stabilizację (przemieszczenie korony 6,8 mm).

Dla stanowiska pomiarowego nr I1 wyraźnie zaznacza się zamocowanie palisady w gruncie poniżej dna wykopu. Kolejny pomiar został wykonany po osiągnięciu projektowanej głębokości wykopu. Końcowe pomiary (21.11) wykazują stabilizację przemieszczeń. Charakterystyczne dla obu stanowisk badawczych jest wyraźne (1,5 mm) przemieszczenie podstawy konstrukcji oporowej. W pomiarach inklinometrycznych zakłada się utwierdzenie końca rury pomiarowej i wszystkie wykresy w podstawie wykazują zerowe przemieszczenia, co nie jest zgodne z rzeczywistym przemieszczeniem konstrukcji w czasie. W punkcie pomiarowym położonym o 0,5 m wyżej wykresy się rozsuwają. Wskazuje to na przemieszczenie całej palisady, co zostało potwierdzone w obliczeniach numerycznych i związane jest z przemieszczeniem poziomym oraz pionowym dna wykopu. Wyniki pomiarów inklinometrycznych przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przemieszczenia w kierunku wykopu, stanowiska badawcze: a) nr I1; b) nr I2

Analiza wsteczna

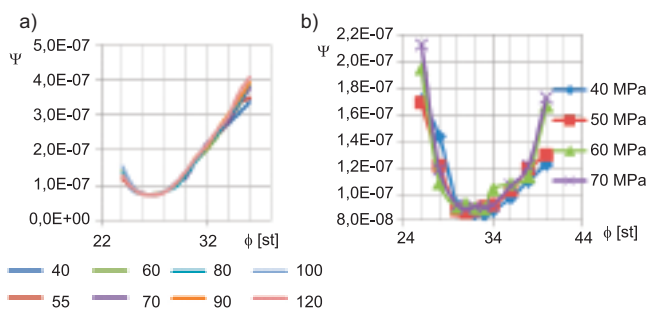
W rozpatrywanym przypadku przemieszczenie oczepu palisady stanowi odpowiedź układu, a parametry ośrodka gruntowego stanowią dane wejściowe. Parametrem szacowanym metodą analizy wstecznej jest wartość kąta tarcia wewnętrznego oraz moduł Younga warstwy nasypu. Zgodność wyników teoretycznych i rezultatów pomiarów inklinometrycznych oceniano zgodnie z równaniem funkcji celu:

$$\Psi = \sum_{i=1}^n (U_i - \hat{U}_i)^2 \quad (2)$$

dla zestawu n danych: $(U_i, X_{ij}), i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$.

Poszukiwane jest minimum funkcji celu. Dziedzina funkcji celu jest ograniczona do fizycznych, dodatnich wartości parametrów gruntu, gdzie X jest wektorem argumentów funkcji U . Argumentami (zmiennymi decyzyjnymi) są kąt tarcia wewnętrznego oraz moduł Younga. Jako wartość U_i przyjęto przyrost przemieszczeń palisady w przedziale rzędnych: $-0,5 \div -4,0$ m na podstawie obliczeń numerycznych: $U_i = U_{i,0,5} - U_{i,4,0}$.

Jako wartość U_i przyjęto przyrost przemieszczeń palisady powyżej dna wykopu w przedziale: $-0,5 \div -4,0$ m na podstawie pomiaru inklinometrycznego. Pierwotnie obliczenia MES w programie PLAXIS [4] wykonano dla modelu Coulomba-Mohra podłoża oraz dla przedziału kąta tarcia wewnętrznego $\Phi = 24 \div 36^\circ$ oraz modułu Younga $E = 40 \div 120$ MPa. Na rysunku 3a przedstawiono wartości funkcji celu Ψ dla różnych wartości argumentów kąta tarcia wewnętrznego oraz modułu Younga. Wykonano obliczenia dla kombinacji z trzynastu wartości kąta tarcia wewnętrznego i ośmiu wartości modułu odkształcenia oraz dla wyników z dwóch stanowisk inklinometrycznych. Obliczenia powtórzono dla nasypu zamodelowanego za pomocą modelu *hardening soil* [5]. Przyjęto niestowarzyszone prawo plastycznego płynięcia oraz wartość kąta dylatacji dla nasypu $\psi = 2^\circ$. Wartości funkcji celu Ψ przedstawiono na rysunku 3b.



Rys. 3. Funkcja celu Ψ w zależności od parametrów wytrzymałościowych warstwy nasypu: a – model Coulomba-Mohra; b – model *hardening soil*

Wnioski

Przedstawiona procedura pozwala oszacować parametry gruntu nasypowego niezbędne do projektowania zabezpieczenia wykopu metodą obserwacyjną. Dla modelu nasypu Coulomba-Mohra wyraźne minimum funkcji celu wystąpiło dla $\phi = 27^\circ$, natomiast dla modelu nasypu *hardening soil* dla $\phi = 33^\circ$. Wpływ zmiany wartości modułu Younga nasypu w obu modelach jest bardzo mały. Analiza pozwala stwierdzić, że zgodność obliczonych numerycznie przyrostów przemieszczeń obudowy z pomierzonymi inklinometrycznie zależy od przyjęcia parametrów geotechnicznych oraz od zastosowanego modelu ośrodka gruntowego. Zastosowany tok postępowania może być wykorzystany w procesie projektowania zabezpieczeń wykopów, w którym istotną rolę ma przyjęcie zazwyczaj pominiętych w dokumentacjach geotechnicznych parametrów geotechnicznych gruntów nasypowych.

Literatura

- [1] Bui H. D., Tanaka M., Inverse problems in engineering mechanics, Balkema, Paris, France 1994.
- [2] Dunncliff J., Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, Wiley, 2004.
- [3] Incl2 User's Manual. Release 4.0 – July 2006.
- [4] Vermeer P. A., Plaxis. Delft University of Technology, A. A. Balkema, 1994.
- [5] Shantz T., Vermeer P. A., Bonnier P. G., The hardening soil model: Formulation and verification, Beyond 2000 Computational Geotechnics – 10 Years PLAXIS s. 1–16. Balkema, Rotterdam 1999.