

Analiza niezawodności zabezpieczenia wykopu na podstawie pomiarów inklinometrycznych oraz analiz numerycznych

Karolina Gorska, Marek Wyjadłowski

W artykule przedstawiono procedurę określenia parametrów geotechnicznych gruntów nasypowych oraz obliczenia niezawodności palisady z pali wierconych. Wykorzystano wyniki pomiarów inklinometrycznych, analizę odwrotną [1], obliczenia numeryczne oraz metody szacowania niezawodności konstrukcji. Proponowana procedura pozwala na projektowanie obudowy wykopu metodą obserwacyjną oraz aktywną modyfikację projektu zabezpieczenia wykopu w trakcie wykonywania konstrukcji w celu osiągnięcia wymaganego współczynnika niezawodności.

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW

data zgłoszenia do redakcji: 14.01.2013

data akceptacji do druku: 22.02.2013



dr inż. Karolina Gorska
Politechnika Wroclawska
Instytut Geotechniki
i Hydrotechniki
karolina.gorska@pwr.wroc.pl



dr inż. Marek Wyjadłowski
Politechnika Wroclawska
Instytut Geotechniki
i Hydrotechniki
marek.wyjadlowski@pwr.wroc.pl

Opis badanej konstrukcji

Przedmiotem badania jest obudowa wykopu - pionowa palisada z pali wierconych CFA o średnicy 500 mm i długości 9,0 m w układzie przenikającym się, zbrojonych co drugi kształtownikiem stalowym IPE330 (S355) o długości $L = 8,0$ m. W miejscu wykonania konstrukcji oporowej mamy do czynienia z uwarstwionym podłożem geotechnicznym. Pierwszą warstwę gruntu stanowią nasypy niekontrolowane o miąższości 2,0 m, które zawierają piaski, gliny piaszczyste, żwir, kamienie oraz gruz. Poniżej nasypu zalegają utwory rodzime (tabela 1).

W celu oszacowania parametrów warstwy nasypu przeprowadzono pomiary inklinometryczne przemieszczeń wspornikowego zabezpieczenia wykopu o głębokości

4,0 m. Rurę inklinometryczną przyspawano do profilu zbrojenia palisady. Pomiary inklinometryczne zostały przeprowadzone w dwóch stanowiskach badawczych, które przygotowano w konstrukcji - obudowy wykopu. Rury inklinometryczne z profili 50x50x3 przyspawano odcinkowo do zbrojenia palisady - profilu IPE330, a następnie wraz ze zbrojeniem zostały zawibrowane w palach. Rury inklinometryczne miały długość 8,0 m, co umożliwiło pomiar przemieszczeń do głębokości 4,0 m poniżej dna wykopu.

Zasady pomiaru inklinometrycznego

Sonda inklinometryczna zbudowana jest z cylindrycznego korpusu wyposażonego w dwa stalowe wózki jezdne i zamonto-

wanego wewnątrz czujnika pomiarowego. Czujnik pomiarowy to dwuosiowy servo-akcelerometr [4]. Sposób pomiaru przemieszczeń oparty jest o pomiar kąta wychylenia sondy inklinometrycznej. Przyrost przemieszczenia poziomego każdego odcinka oblicza się ze wzoru (1):

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

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).

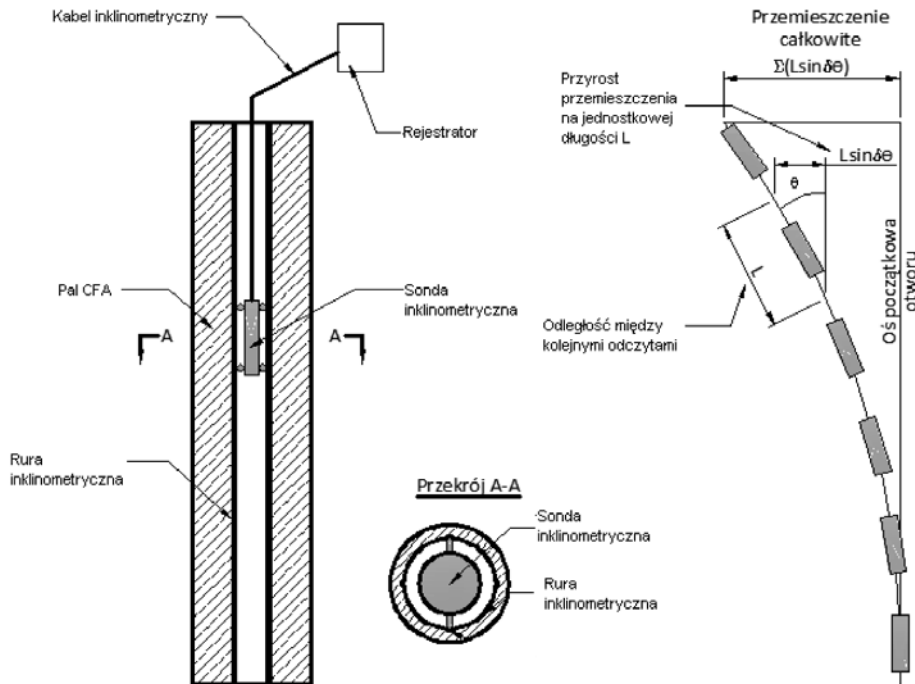
Aby uzyskać przyrost przemieszczenia na danej głębokości należy zsumować przyrosty przemieszczeń wszystkich odcinków pomiarowych poniżej tego punktu [3]. Pomiary prowadzi się w czterech prostopadłych kierunkach, zawsze zaczynając od „1-go” kierunku, a następnie zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Pozwala to na ustalenie przemieszczeń w dwóch założonych prostopadłych kierunkach oraz na ich podstawie przemieszczeń wypadkowych.

Każdy cykl pomiarów rozpoczyna się od pomiaru zerowego. Powinien być on wykonany przed rozpoczęciem odkopywania konstrukcji. Jest wykonywany w celu ustalenia pierwotnego kształtu i orientacji punktu pomiarowego. Następnie prowadzi się kolejne pomiary w odstępach czasowych uwzględniających postęp prac na placu budowy.

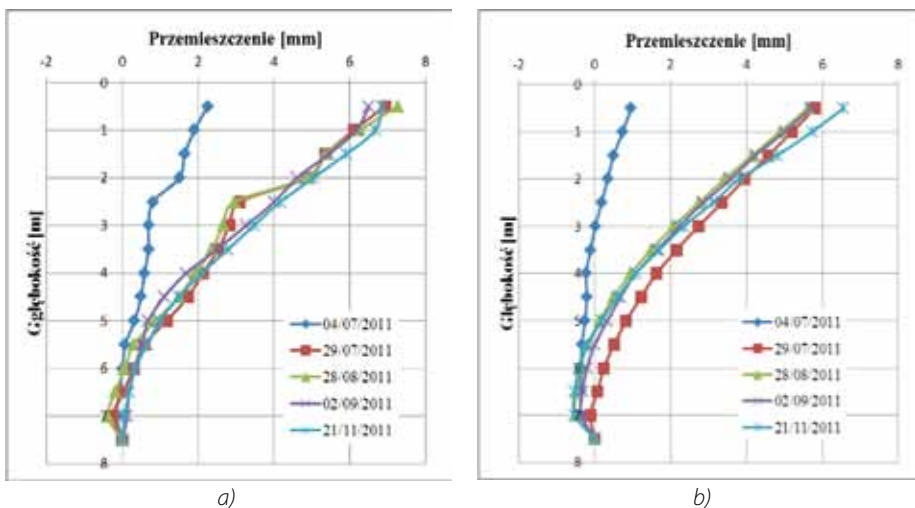
Pomiar zerowy został przeprowadzony bezpośrednio po wykonaniu palisady. Pierwszy pomiar wykonano dla głębokości wykopu 2,0 m. Przemieszczenia korony palisady dla stanowiska badawczego I1 wynoszą 2,0 mm (rysunek 2 a), zaobserwować

Tab.1: Parametry geotechniczne

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



1. Schemat sposobu przeprowadzania pomiaru



2. Przesunięcia w kierunku do wykopu, stanowiska badawcze: a) I1, b) I2

można wygięcie ściany w okolicy dna wykopu. Wykop o tej głębokości utrzymywany był przez następny miesiąc w trakcie którego wykonano dodatkowe pomiary. Dla stanowiska pomiarowego I1 wyraźnie zaznacza się zamocowanie palisady w gruncie poniżej dna wykopu. Kolejny pomiar został wykonany po osiągnięciu projektowanej głębokości wykopu 4,0 m. Końcowe pomiary po wykonaniu płyty dennej wykazują stabilizację przemieszczeń palisady.

Na stanowisku I2 pomiary prowadzone były w tych samych dniach co na stanowisku I1. Zaobserwowano wartości przemieszczeń nieznacznie większe niż w stanowisku I1. Na pierwszym etapie odkopania palisada nie wykazała znacznego wygięcia w poziomie dna wykopu.

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 podstawy palisady w czasie. W punkcie pomiarowym położonym o 0,5 m powyżej podstawy palisady wykresy rozsuwają się. Świadczy to o wzrastającym przemieszczeniu podstawy palisady, co zostało potwierdzone w obliczeniach numerycznych (rysunek 3). Potwierdzeniem tego stwierdzenia byłyby pomiary geodezyjne wierzchu punktu pomiarowego, ale w tym przypadku nie zostały one prowadzone.

Wyniki pomiarów inklinometrycznych przemieszczeń palisady palowej przedstawiono na rysunku 2.

Analizy obliczeniowe obudowy wykopu

Analizy obliczeniowe przemieszczenia palisady z pali wierconych przeprowadzono na etapie projektowania oraz po wykonaniu konstrukcji jako analizę wsteczną.

W praktyce można wyróżnić trzy rodzaje analizy statycznej zabezpieczenia wykopu:

- metody klasyczne, gdzie obudowa jest modelowana jako ustrój prętowy, obciążony parciem i odporem gruntu,
- obliczenie obudowy wykopu jako ustroju statycznie niewyznaczalnego, poddanego obciążeniu parciem gruntu i nieznaney reakcji podłoża modelowanego za pomocą analogu sprężynowego,
- analiza statyczna płaskiego ustroju, złożonego ze konstrukcji oporowej oraz współdziałającego masywu gruntowego za pomocą metody elementów skończonych.

Ostatnia metoda pozwala obliczyć przemieszczenia obudowy wykopu oraz otaczającego ośrodka gruntowego, zaleca się ją stosować do wstecznej analizy konstrukcji. Podstawy analizy wstecznej opisane zostały w pracach [2] i [9].

Analiza wsteczna stanowi grupę metod numerycznych, które polegają na poszukiwaniu takich wartości parametrów geotechnicznych, aby obliczenia numeryczne dały wyniki odpowiadające przemieszczeniom lub naprężeniom, które są obserwowane na istniejących obiektach lub konstrukcjach. Kryterium zbieżności opisane jest założoną funkcją celu. W algorytmie poszukiwawczym następuje minimalizacja wartości tej funkcji. Najczęściej funkcję celu stanowi suma najmniejszych kwadratów różnic pomiędzy wartościami zmierzonymi w doświadczeniu, a wartościami obliczeniowymi. Wartości obliczeniowe uzyskiwane są na podstawie analiz MES lub innych metod obliczeniowych przy zastosowaniu poszukiwanych parametrów materiałowych jako zmiennych modelu. Analiza wsteczna może być prowadzona jako deterministyczna oraz w powiązaniu z metodami probabilistycznymi [5].

Obliczenia numeryczne

W analizie teoretycznej przeprowadzono obliczenia dla modelu konstrukcji z zastosowaniem metody elementów skończonych. Symulacja komputerowa uwzględniała wykonanie palisady, wszystkich faz głębienia wykopu wraz z stopniowym obniżaniem zwierciadła wody w wykopie. Obliczenia wykonano w programie PLAXIS v. 7.2. [6]. Ośrodek gruntowy przyjęto uwzględniając wszystkie warstwy gruntu oraz stabilizując się poziom zwierciadła wody gruntowej.

Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla dwóch modeli podłoża gruntowego:

- modelu podłoża Coulomba-Mohra dla wszystkich warstw geotechnicznych,

- modelu hardening soil dla nasypu niekontrolowanego oraz modelu Coulomba-Mohra dla pozostałych warstw geotechnicznych.

Izotropowe parametry do obliczeń sprężysto-plastycznych dla modelu Coulomba-Mohra i niestowarzyszonego prawa plastycznego płynięcia zawiera tabela 1. Parametry gruntu przyjęto zgodnie z dokumentacją geotechniczną. Do modelowania gruntu wykorzystano typowe trójkątne sześciowęgłowe elementy skończone.

Podstawowym założeniem sformułowania modelu *hardening soil* (HS) jest hiperboliczna zależność pomiędzy odkształceniem pionowym ϵ_1 oraz naprężeniem ścinającym w stanie trójosiowego pierwotnego obciążenia [8]. Zasadnicza różnica pomiędzy modelem *hardening soil* (HS) a modelem Coulomba-Mohra polega na zastosowaniu hiperbolicznej krzywej zależności naprężenia od odkształcenia zamiast krzywej złożonej z dwóch prostych oraz na wprowadzeniu zmiennych modułów sztywności. W modelu *hardening soil* stosuje się współczynniki sztywności odniesione do naprężenia porównawczego:

E_{50}^{ref} - moduł odkształcenia, odpowiadający 50% niszczącej wartości naprężenia dewiatorowego, q_f z badania trójosiowego [kN/m²],

E_{50}^{ref} - moduł sztywności stycznej [kN/m²],

E_{ur}^{ref} - moduł odkształcenia przy odciążeniu – obciążeniu wtórnym [kN/m²].

Pozostałe parametry gruntu przyjmuje się jak dla modelu Coulomba-Mohra, tj.: spójność, kąt tarcia wewnętrznego oraz kąt dylatacji.

Zależność pomiędzy modułami sztywności E oraz modułem odkształcalności postaciowej wyraża się wzorem $E = 2(1+\nu) G$. Jeżeli moduł E_{ur} jest rzeczywistą sztywnością sprężystą to można zapisać $E_{ur} = 2(1+\nu) G_{ur}$. W przeciwieństwie do E_{ur} moduł E_{50} nie jest używany w zakresie sprężystości. Stąd nie istnieje prosta zależność pomiędzy E_{50} a G_{50} . Model sprężysto-plastyczny HS nie zawiera zależności pomiędzy E_{50} a edometrycznym modułem sztywności E_{oed} . Sztywności te powinny być podawane niezależnie.

Wartości modułów E_{50} , E_{ur} mają tendencję do wzrostu wraz z naprężeniem poziomym, czyli moduł E rośnie wraz z głębokością. Wartość modułu E zależy też od ścieżki naprężeń w gruncie, wzrasta po odciążeniu i wtórnym obciążeniu.

Palisadę palową zamodelowano jako element belkowy o parametrach wytrzymałościowych: $EA = 14,53 \text{ GN/m}$, $EI = 875 \text{ MNm}^2/\text{m}$. Założono, że nie ma przepływu wody gruntowej pod palisadą.

Wykonano ponad 200 serii obliczeń, w których zmieniano parametry gruntu nasypowego: kąt tarcia wewnętrznego oraz moduł Young'a. Kąt tarcia wewnętrznego zmie-

niał się w zakresie od 24 do 36°, natomiast moduł Young'a od 40 do 120 MPa.

Porównano kształt osi odkształconych palisady dla różnych głębokości wykopu. Istotne różnice wystąpiły dla fazy pośredniej głębokości 2,0 m. Oś odkształconą palisady przedstawiono na rysunku 3. Oś odkształcona dla modelu Coulomba-Mohra odbiega od osi krzywej uzyskanej w pomiarach inklinometrycznych ponieważ obliczone przemieszczenia podstawy palisady są większe od przemieszczeń korony. Dla nasypu o modelu HS przemieszczenia korony są większe od przemieszczeń podstawy palisady, co jest zgodne z wynikami pomiarów inklinometrycznych. Lepszą zgodność osi odkształconej w etapie pośrednim głębienia wykopu wykazuje model HS nasypu.

Analiza odwrotna

W rozpatrywanym przypadku przemieszczenie oczepu palisady stanowi odpowiedź układu, a parametry ośrodka gruntowego stanowią dane wejściowe. Parametrem szacowanym metodą analizy odwrotnej jest wartość kąta tarcia wewnętrznego oraz moduł Young'a warstwy nasypu. Istotne znaczenia ma również wybór modelu podłoża.

Zgodność wyników obliczeń numerycznych oraz rezultatów pomiarów inklinometrycznych oceniano zgodnie z równaniem funkcji:

$$\Psi = \sum_i^n (U_i - \bar{U}_i)^2 \quad (2)$$

dla zestawu n danych:

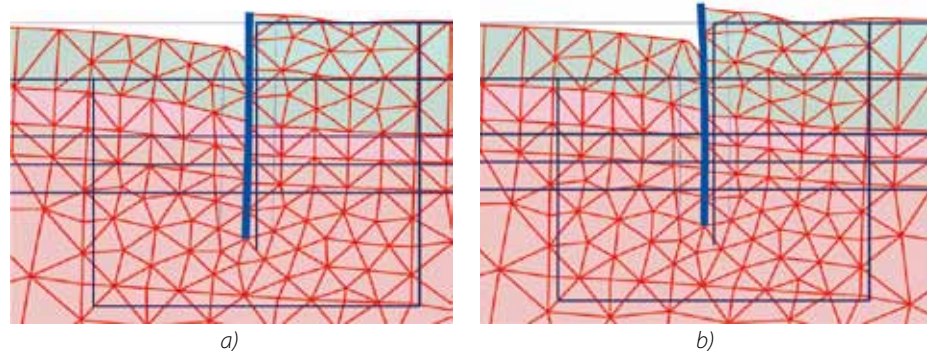
(U_i, X_i) , $i = 1, 2 \dots n$, $l = 1, 2 \dots m$.

Argumentami funkcji U są kąt tarcia wewnętrznego oraz moduł Younga oznaczone jako wektor X . Jako wartość U_i przyjęto przyrost przemieszczeń palisady pomiędzy rzędnymi: $-0,5 \div -4,0 \text{ m}$ na podstawie obliczeń numerycznych: $U_i = U_{i,0,5} - U_{i,4,0}$. Celem analizy numerycznej jest obliczenie wartości U_i dla każdego zestawu parametrów nasypu. Jako wartość U_i przyjęto przyrost przemieszczeń palisady pomiędzy rzędnymi: $-0,5 \div -4,0 \text{ m}$ na podstawie pomiaru inklinometrycznego.

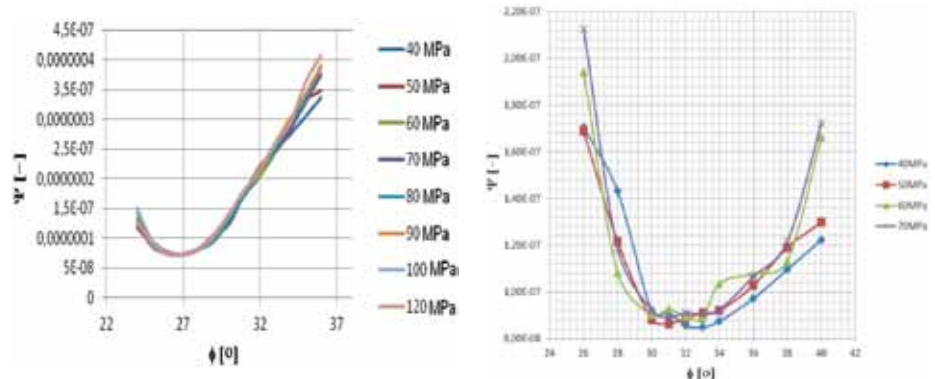
Na rysunku 4 a) przedstawiono wartości funkcji Ψ dla różnych wartości argumentów kąta tarcia wewnętrznego oraz modułu Younga. Obliczenia wykonano dla kombinacji z trzynastu wartości kąta tarcia wewnętrznego i ośmiu wartości modułu odkształcenia oraz dla wyników z dwóch stanowisk inklinometrycznych.

Obliczenia powtórzone dla nasypu niekontrolowanego zamodelowanego przy pomocy modelu *hardening soil* [5], wartości funkcji Ψ przedstawiono na rysunku 4 b).

Parametry geotechniczne obliczone na podstawie analizy odwrotnej zależą od przyjętego modelu gruntu dla nasypu niekontrolowanego. Dla modelu gruntu Coulomba-Mohra minimum funkcji celu w analizie



3. Oś odkształcona palisady: a) model CM dla nasypu, b) model HS dla nasypu



a) Wartości funkcji celu - model Coulomba-Mohra

b) Wartości funkcji celu - model hardening soil

4. Funkcja dopasowania parametrów wytrzymałościowych dla warstwy nasypu

odwrotnej wystąpiło dla wartości $\varphi = 27^\circ$ oraz $E = 60$ MPa, natomiast dla modelu nasypu hardening soil dla wartości $\varphi = 33^\circ$ oraz $E_{50} = 40$ MPa. Wpływ modułu Younga na uzyskane wyniki jest minimalny.

Analiza niezawodności palisady

W metodach probabilistycznych analizy niezawodności konstrukcji miarą bezpieczeństwa jest prawdopodobieństwo niezawodności p_f przy założonym stanie granicznym nośności lub użyteczności. Wartości dopuszczalne u_0 ze względu na rozpatrywany stan graniczny porównuje się z wartością docelową u . Jako dopuszczalne przemieszczenie palisady przyjęto $u_0 = 0,01$ m. Zadanie polega na znalezieniu następującego prawdopodobieństwa:

$$p_F = P\{U(X) > u_0\} \quad (3)$$

gdzie $U(X)$ jest przemieszczeniem głowicy palisady zależnym od wektora parametrów X , zawierającego zarówno losowe jak i nielosowe komponenty. Jako równoważną miarę stosuje się wskaźnik niezawodności β , związany z prawdopodobieństwem (3) zależnością:

$$p_F = \Phi_0(-\beta) \quad (4)$$

w której Φ_0 jest dystrybucją standardowego rozkładu normalnego.

Do obliczenia miar (3) oraz (4) zastosowano metody FORM i SORM rozpowszechnione w ramach teorii niezawodności konstrukcji [5].

W celu określenia funkcji $U(X)$ opisującej w sposób jawny przemieszczenie głowicy palisady w zależności od zmiennych stałych materiałowych (zmiennych losowych) zastosowano metodę powierzchni odpowiedzi. W podejściu probabilistycznym przemieszczenie głowicy palisady stanowi odpowiedź układu, a parametry osrodka gruntowego są danymi wejściowymi. Jako zmienne losowe przyjęto moduł E_{50} oraz kąt tarcia wewnętrznego φ . Zmienne losowe są o rozkładzie log normalnym. Powierzchnie odpowiedzi wyznaczano w postaci wyrażenia (5) zgodnie z procedurą przedstawioną w pracy [7]. Przyjęto powierzchnię odpowiedzi w postaci wielomianu:

$$U(E_{50}, \varphi) = B_1 + B_2 X_1 + B_3 X_2 + B_4 X_1 X_2 + B_5 X_1^2 + B_6 X_2^2 + \text{err} \quad (5)$$

Parametry wielomianu B_i wyznaczone za pomocą regresji nieliniowej. W tabeli 2 zamieszczono współczynniki B_i uzyskane w drugim kroku iteracyjnym.

W celu określenia wrażliwości wskaźnika niezawodności na wahania poszczególnych zmiennych losowych przeprowadzono obliczenia probabilistyczne dla podłoża o parametrach $\varphi = 38^\circ$ oraz $E_{50} = 60$ MPa. Wyniki obliczeń dla nieskorelowanych zmiennych losowych przedstawiono w tabeli 3.

Tab.2: Wartości współczynników B_i powierzchni odpowiedzi oraz odchylenia standardowego błędu

Iteracja	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	σ_{err}
I	2,502	-7,159E-2	1,407E-	8,715e-4	1,904E-5	-8,609E-5	3,548E-3
II	2,483	-6,964e-2	2,556E-4	8,482E-4	2,432E-5	-9,248E-5	3,604E-3

Tab.3: Analiza wrażliwości układu dla zmiennych nieskorelowanych

Współczynniki zmienności		β	p_f	Współrzędne punktu obliczeniowego		Współczynniki wrażliwości		
η_φ	$\eta_{E_{50}}$			φ^*	E_{50}^*	a_φ	$a_{E_{50}}$	a_{err}
5%	5%	2,853	2,17E-3	32,94	59,61	0,993	0,038	-0,113
5%	10%	2,843	2,24E-3	32,97	58,26	0,990	0,086	-0,113
10%	5%	1,399	8,09E-2	32,89	59,85	0,980	0,018	-0,057
10%	10%	1,397	8,12E-2	32,90	59,39	0,980	0,038	-0,057

Współczynnik wrażliwości dla kąta tarcia wewnętrznego a_φ jest bliski jedności, co oznacza, że związek funkcyjny pomiędzy kątem tarcia wewnętrznego, a granicznym przemieszczeniem głowicy palisady charakteryzuje się bardzo dużą wrażliwością na zmiany wartości kąta φ . Współczynnik wrażliwości modułu sztywności $a_{E_{50}}$ jest bardzo mały, moduł E_{50} nie ma istotnego wpływu na niezawodność konstrukcji. Współczynnik wrażliwości dla błędu wykazuje również małą wartość, co oznacza, że zmienna losowa błędu nie wprowadza istotnej zmienności stochastycznej do analizowanego modelu palisady.

Podsumowanie

Praca przedstawia procedurę wyznaczania nieznanymi parametrów geotechnicznych warstwy nasypu oraz rezultaty probabilistycznego modelowania przemieszczenia palisady z pali wierconych. Nieznane parametry gruntu nasypowego wyznaczono stosując analizę odwrotną z wykorzystaniem wyników pomiarów inklinometrycznych. Wybór modelu podłoża w obliczeniach numerycznych został dokonany na podstawie zgodności osi odkształconej palisady z osią określoną na podstawie pomiarów inklinometrycznych.

Palisada umieszczona jest w ośrodku uwarstwionym. Cechy losowe przyjęto dla warstwy nasypu niekontrolowanego. W zadaniu połączono obliczenia metodą klasyczną z metodą powierzchni odpowiedzi oraz metodami FORM i SORM wyznaczania wskaźników niezawodności. Analiza wrażliwości wskazuje, że o prawdopodobieństwie przekroczenia dopuszczalnej wartości przemieszczenia korony palisady decyduje przede wszystkim zmienność losowa kąta tarcia wewnętrznego warstwy nasypu. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Bui H.D., Tanaka M.: Inverse problems in engineering mechanics, Balkema, Paris, France 1994
- [2] Calvello M. and Finno R. J.: (2002) Calibration of soil models by inverse analysis. Proc. Int. Symposium on Numerical Models in Geo mechanics, NUMOG VIII, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 107–116.
- [3] Dunicliff J.: Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, Wiley, 2004
- [4] Inclinometers. Instruction manual. (09/05-Rev.4)
- [5] Ledesma A., Gens A., Alonso E.E.: Estimation of parameters in geotechnical back analysis- I. Maximum likelihood approach, Computers and Geotechnics 18, 1(1996) 7
- [6] Vermeer P.A.: Plaxis. Delft University of Technology, A.A.Balkema, 1994
- [7] Puła W.: Zastosowania teorii niezawodności konstrukcji do oceny bezpieczeństwa fundamentów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2004
- [8] 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
- [9] Srokosz P.E., Bartoszewicz A.: Zastosowanie analizy wstecznej do wyznaczania parametrów gruntu niespoistego na podstawie wyników badań modelowych Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Budownictwo z. 97, 2003