

Danuta Domańska, Andrzej Wichur***

MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA POMIARÓW INKLINOMETRYCZNYCH DO OCENY STATECZNOŚCI SKARP***

1. Wprowadzenie

Skarpy oraz zbocza (systemy skarp) (PN-64/G-02400) są spotykane w postaci naturalnej formy ukształtowania terenu bądź mogą być formowane w sposób sztuczny (jako elementy różnych budowli, np. zbiorników, wykopów, hałd, nasypów, wałów ziemnych); często występują również w górnictwie odkrywkowym. Ze względu na takie samo podejście do realizacji analiz wytrzymałościowych dla obydwu wymienionych budowli ziemnych, w niniejszej pracy posłużono się pojęciem skarpy w odniesieniu zarówno do skarpy, jak i zbocza.

Ponieważ utrata stateczności skarpy może pociągnąć za sobą tragiczne skutki dla ludzi oraz powodować duże straty materialne, wynika stąd potrzeba oceny warunków jej pracy i to zarówno w procesie projektowania (prognoza stateczności), jak i jej eksploatacji (bieżący monitoring).

Oceny stateczności skarp dokonuje się zwykle przy użyciu współczynnika (stopnia) pewności (bezpieczeństwa) skarpy lub współczynnika (wskaźnika) stateczności skarpy.

Klasyczne metody obliczeniowe, np. Felleniusa, Taylora, Bishopa, Janbu (por. [4, 9, 10, 11, 17]) wprowadziły w tym zakresie pojęcie współczynnika pewności (bezpieczeństwa), rozumianego jako stosunek wartości granicznej siły potrzebnej do wywołania przesuwu rozpatrywanej bryły gruntu do wartości działającej siły zsuwającej (lub momentu powodującego jej obrót do rzeczywistego momentu obracającego).

* Centrum Mechanizacji Górnictwa KOMAG, Gliwice

** Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

*** Praca naukowa nr 4 T12A 014 27 finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2004–2006

Określenie współczynnik bezpieczeństwa funkcjonuje również obecnie w programach komputerowych (np. w Z_Soil jako Safety Factor SF [19], por. [7]), przy czym jego szacowania dokonuje się w trakcie generacji stanu granicznego ośrodka w wyniku fikcyjnego zmniejszenia jego parametrów wytrzymałościowych, przy rezygnacji z arbitralnego założenia kształtu powierzchni poślizgu. Przedstawionej definicji odpowiada także pojęcie wskaźnik stateczności zbocza (por. [1, 2]) czy też współczynnik stateczności (por. [1, 2, 16]), przy czym ostatnie z wymienionych określeń pojawiło się już wcześniej w pracy [14]. Używa się także równoległe pojęć współczynnik stateczności i współczynnik pewności [3].

W niniejszej pracy posłużono się określeniem współczynnik stateczności skarpy i oznaczono go symbolem *SF*.

Znaczenie bezpieczeństwa skarp dla życia ludzkiego i dla gospodarki powoduje, że obiekty te obejmuje się bieżącą kontrolą (monitoringiem), wykonywaną m.in. przy użyciu pomiarów inklinometrycznych (por. [18]).

Zastosowanie pomiarów inklinometrycznych do oceny stateczności skarpy pozwala na rezygnację z wielu uproszczeń stosowanych w obliczeniach oraz na uwzględnienie wpływu na pracę rozpatrywanej konstrukcji (którą jest skarpa) wszystkich czynników zewnętrznych, wynikających m.in. z sytuacji geologicznej i hydrogeologicznej oraz eksploatacji prowadzonej na kopalni odkrywkowej.

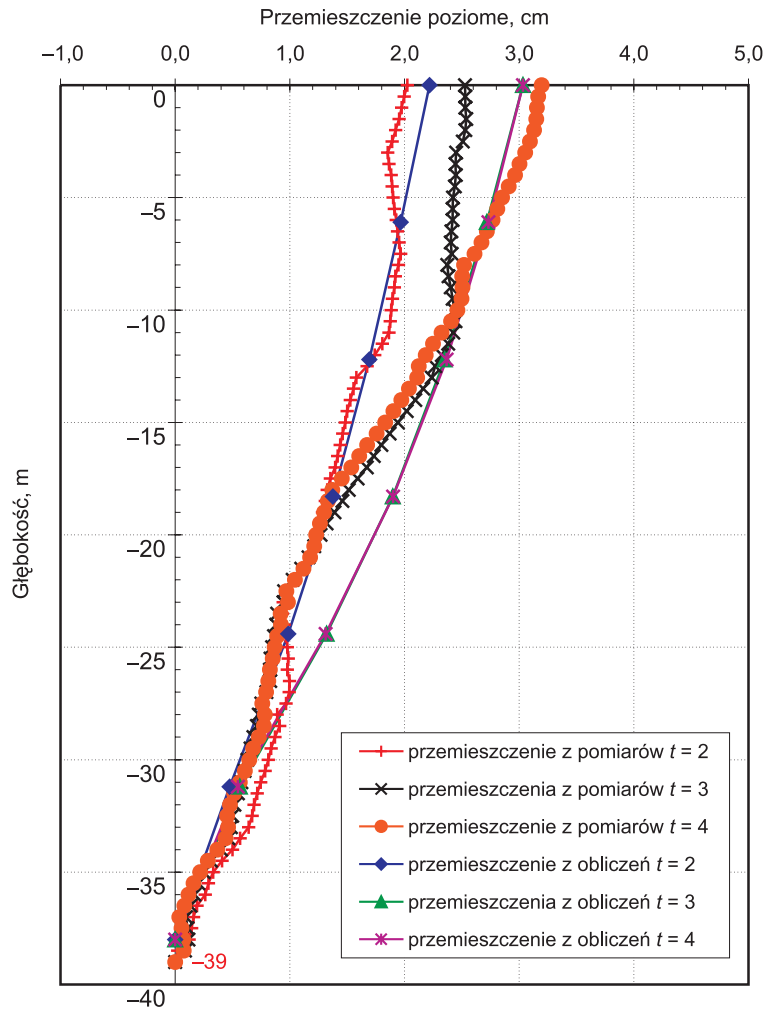
W celu pełnego wykorzystania wyników pomiarów bardzo ważna jest ich prawidłowa interpretacja, a w szczególności — określenie krytycznej wartości mierzonego parametru, która stanowi podstawę do oceny stateczności skarpy. Możliwości te stwarza opracowana metodyka oceny stateczności ośrodka gruntowego na podstawie analizy wartości przemieszczeń poziomych mierzonych za pośrednictwem inklinometrów [5, 6].

2. Opis metodyki

Podstawę do analizy stanowi przebieg przemieszczeń poziomych osi otworu inklinometrycznego uzyskany z pomiarów, którego przykład przedstawiono na rysunku 1. W celu określenia kryterium stateczności skarpy (zbocza) opracowano dwie metody: metodę I redukcji wartości współczynnika sprężystości gruntu oraz metodę II analizy stanu wyężenia górotworu w osi otworu inklinometrycznego i jego związku ze statecznością skarpy [5, 6].

Zgodnie z pierwszą metodą krytyczną wartość przemieszczenia poziomego gruntu określa się z uwzględnieniem wyników obliczeń komputerowych dla odpowiednio zamodelowanych warunków pracy rozpatrywanych inklinometrów na drodze równoczesnej redukcji spójności, tangensa kąta tarcia wewnętrznego i modułu sprężystości gruntu, wzorując się na normie (PN-81/B-03020).

Zgodnie z drugą metodą krytyczną wartość przemieszczenia poziomego określa się w oparciu o związek stateczności skarpy z wyężeniem gruntu w osi otworu inklinometrycznego. Szczegółowe wyniki badań opublikowano w pracy [6].



Rys. 1. Porównanie przemieszczeń poziomych wypadkowych z pomiarów oraz przemieszczeń z obliczeń komputerowych w osi wybranego otworu inklinometrycznego

W świetle przeprowadzonych badań opracowana metodyka szacowania stateczności skarpy (zbocza) na drodze redukcji współczynnika sprężystości gruntu oraz oceny stanu wyczerpania górotworu w osi otworu inklinometrycznego jest następująca:

- wyznaczenie zależności przemieszczenia poziomego osi otworu od jego głębokości i jego wyrównanie za pomocą aparatu regresji liniowej;
- wyznaczenie za pośrednictwem programu komputerowego wartości współczynnika stateczności skarpy SF ;

- oszacowanie krytycznej wartości przemieszczenia poziomego według metody I przy użyciu wzoru

$$u_{xd} = u_x \cdot m \begin{cases} m = N_E & \text{dla } N_E \leq SF \\ m = SF & \text{dla } N_E > SF \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

- u_{xd} — krytyczna wartość przemieszczenia poziomego w danym punkcie gruntu;
- u_x — ekstremalne przemieszczenie poziome na długości inklinometru wyznaczone za pomocą programu komputerowego w danej chwili czasowej, w której jest wykonywany pomiar *in situ* dla $SF = 1,0$;
- m — mnożnik przemieszczenia;
- N_E — współczynnik redukcyjny sprężystości gruntu, odpowiadający współczynnikowi stateczności skarpy SF ;

- wyznaczenie wartości parametru t_0 z równania regresji liniowej zależności przemieszczenia poziomego osi otworu od jego głębokości — według wzoru

$$t_0 = -\frac{u_o E}{2H(1 + \nu)} \quad (2)$$

gdzie:

- u_o — wyrównana wartość przemieszczenia poziomego głowicy otworu inklinometrycznego w stosunku do dna otworu w chwili wykonania analizy stateczności skarpy (określenia wartości współczynnika SF), m;
- H — długość otworu inklinometrycznego, m;
- E — współczynnik sprężystości wzdłużnej (moduł Younga) górotworu (gruntu);
- ν — liczba Poissona górotworu (gruntu);

- oszacowanie krytycznej wartości przemieszczenia poziomego według metody II zgodnie ze wzorem

$$|u_{okr}| = |u_o| \cos \Phi \sqrt{SF^2 + \operatorname{tg}^2 \Phi} \quad (3)$$

gdzie:

- u_{okr} — krytyczna wartość przemieszczenia głowicy otworu inklinometrycznego w stosunku do dna otworu, m;
- SF — współczynnik stateczności skarpy;
- Φ — kąt tarcia wewnętrznego materiału skarpy;

- wybór krytycznej wartości przemieszczenia poziomego (wartość mniejsza z uzyskanych ze wzorów (1) i (3)).

Przykładowe wyniki zastosowania omówionej metodyki obliczeń przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Porównanie obliczonych krytycznych wartości przemieszczeń osi otworu inklinometrycznego

Nr otworu/ chwila czasowa	Współczynnik stateczności skarpy <i>SF</i>	Kąt tarcia wewnętrz- nego ϕ	Przemie- szenie ekstremalne z pomiaru inklino- metrycznego	Metoda redukcji wartości współczynnika sprężystości				Metoda analizy stanu wyżeżenia w osi otworu inklinometrycznego		
				Mnożnik przemie- szenia	Wartość maksymalna przemie- szenia z obliczeń	Krytyczna wartość przemie- szenia z obliczeń	Spełnienie warunku stateczności kol. 7/ kol. 4	Wyównana wartość przemie- szenia głowicy otworu	Krytyczna wartość przemie- szenia głowicy otworu	Spełnienie warunku stateczności kol. 10/ kol. 9
	-	...°	cm	-	cm	cm	cm	cm	cm	cm
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1/3	1,1	12	2,54	1	2,95	2,95	1,16	3,11	3,41	1,10
2/3	1,2	8	0,95	1,2	1,25	1,5	1,58	1,19	1,42	1,19
3/3	1,7	13	2,54	1,7	3,03	5,16	2,03	2,93	4,9	1,67
3/4	1,7	13	3,2	1,7	3,03	5,16	1,61	3,22	5,39	1,67
4/3	2,5	13	3,53	2,5	2,84	7,1	2,01	3,91	9,57	2,45
5/3	1,7	11	1,13	1,7	1,59	2,7	2,39	1,2	2	1,67
5/4	1,7	11	1,55	1,7	1,59	2,7	1,74	1,72	2,88	1,67
6/3	2	13	3,16	2	4,22	8,43	2,67	3,3	6,47	1,96
7/3	1,6	8	9,35	1,6	10	16,01	1,71	10,02	15,94	1,59
8/3	1,8	13	3,55	1,8	4,99	8,99	2,53	1,72	3,04	1,77
9/3	1,8	8	1,34	1,8	3,76	6,77	5,05	1,23	2,2	1,79
10/3	1,9	11	1,22	1,9	0,94	1,79	1,47	1,19	2,23	1,87

3. Podsumowanie

W związku z coraz częstszym wykorzystywaniem inklinometrów do monitorowania warunków pracy skarp i zboczy opracowana została metodyka oceny stateczności wymienionych budowli ziemnych w oparciu o wartości rzeczywistych przemieszczeń poziomych gruntu uzyskanych z pomiarów *in situ*.

W celu określenia kryterium stateczności skarpy (zbocza) opracowano dwie metody:

- 1) metodę redukcji wartości współczynnika sprężystości gruntu,
- 2) metodę analizy stanu wyężenia górotworu w osi otworu inklinometrycznego i jego związku ze statecznością skarpy.

W wyniku zastosowania tych metod otrzymuje się ocenę krytycznej wartości przemieszczenia poziomego osi otworu (wartość mniejsza z uzyskanych ze wzorów (1) i (3)).

Uzyskana w ten sposób krytyczna wartość przemieszczenia poziomego jest miarodajna przy ocenie stateczności skarpy (zbocza) w oparciu o wyniki pomiarów inklinometrycznych. Przy praktycznym zastosowaniu metody zaleca się ze względów bezpieczeństwa zmniejszenie tej wartości — w przypadku braku innych przesłanek należy przyjąć zasady ujęte w warunkach technicznych [15] lub stosowane za granicą [8].

LITERATURA

- [1] *Cala M., Flisiak J., Tajduś A.*: Slope stability analysis with modified shear strength reduction technique. [W:] Landslides: evaluation and stabilization, June 28 to July 2, Rio de Janeiro, A.A. Balkema Publishers, 2004, 1085–1089
- [2] *Cala M., Flisiak J., Tajduś A.*: Numeryczne metody analizy stateczności skarp i zboczy, [w:] Warsztaty Górnicze z cyklu „Zagrożenia naturalne w górnictwie”. Bełchatów, 2–4 czerwca 2004, Wydawnictwo IGSMiE PAN, 37–50
- [3] *Chudek M. et al.*: Kompleksowa metoda prognozowania oddziaływania wpływu podziemnej eksploatacji złóż oraz wstrząsów górotworu na chronione obiekty powierzchniowe w brzeżnym obszarze niecki obniżeniowej. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2003
- [4] *Dembicki E., Tejchman A.*: Wybrane zagadnienia fundamentowania budowli hydrotechnicznych. Warszawa – Poznań, PWN 1974
- [5] *Domańska D., Dynowska M., Wichur A.*: Metoda oceny i prognozy stateczności skarp i zboczy na podstawie pomiarów inklinometrycznych. Projekt badawczy nr 4 T12A 014 27. Centrum Mechanizacji Górnictwa „Komag”, Gliwice, październik 2006
- [6] *Domańska D., Wichur A.*: The researches on slope stability evaluation with inclinometric measurements. Archives of Mining Sciences, 51, 4, Kraków, Wydawnictwo Instytutu Mechaniki Górotworu PAN 2006, 503–528
- [7] *Griffiths D.V., Lane P.A.*: Slope stability analysis by finite elements. Geotechnique, 49, 3, 1999, 387–403
- [8] *Gunaratne M. et al.*: The foundation engineering handbook. Boca Raton – London – New York, CRC Press Taylor & Francis Group 2006
- [9] *Jeske T., Przedecki T., Rossiński B.*: Mechanika gruntów. Warszawa – Wrocław, PWN 1966
- [10] *Lambe T. W., Whitman R.V.*: Mechanika gruntów. T. 2, Warszawa, Arkady 1978
- [11] *Piętkowski R., Czarnota-Bojarski R.*: Mechanika gruntów. Warszawa, Arkady 1964
- [12] PN-64/G-02400: Górnictwo odkrywkowe. Wyrobisko i zwalowisko. Podział, nazwy i określenia
- [13] PN-81/B-03020: Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [14] *Rossiński B. et al.*: Fundamenty. Budownictwo betonowe. T. IX, Warszawa, Arkady 1963

- [15] Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 20 grudnia 1996 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane gospodarki wodnej i ich usytuowanie (Dz.U. z 1997 r. Nr 21, poz. 111)
- [16] *Thiel K.*: Mechanika skał w inżynierii wodnej. Warszawa, PWN 1980
- [17] *Wilun Z.*: Zarys geotechniki. Warszawa, WKŁ 1982
- [18] *Wolski B.*: Pomiary geodezyjne w geotechnice. Politechnika Krakowska 2001
- [19] *Z_Soil*. PC 2003. User manual. Soil, Rock and Structural Mechanics in dry or partially saturated media. Zacc Services Ltd. Lausanne