

*Halina Konderla**

STATECZNOŚĆ SKARP I ZBOCZY W UJĘCIU EUROKODU 7

1. Wprowadzenie

Od wielu lat trwają w Polsce prace nad wdrożeniem europejskiej normy dotyczącej projektowania geotechnicznego, popularnie zwanej Eurokodem 7 [2]. Jednym z najważniejszych zadań geotechniki jest analiza stateczności skarp i zboczy, zarówno naturalnych, jak i powstałych w wyniku działalności człowieka. Problematyka jest szczególnie istotna w górnictwie odkrywkowym, gdzie wykonuje się wykopy o głębokości powyżej stu metrów.

W celu przybliżenia specyficznych zasad projektowania, nowych pojęć i przepisów, jakie wprowadzono w Eurokodzie 7 (EC 7), w artykule podano jego krótką charakterystykę. Omówiono ogólne zasady dotyczące sprawdzania stateczności skarp i zboczy według nowej normy. W przykładzie liczbowym, dotyczącym skarpy wykopu, porównano wyniki trzech podejść obliczeniowych zaproponowanych w EC 7 z podejściem klasycznym.

2. Charakterystyka Eurokodu 7

Europejski Komitet Normalizacyjny CEN od 1990 r. prowadzi prace nad ustaleniem jednolitych zasad projektowania w państwach Unii Europejskiej. Normy europejskie zawierające zasady projektowania w budownictwie noszą nazwę Eurokodów (EC). Przewiduje się ich wprowadzenie do 2010 r. Nowy system norm stworzono na podstawie stanów granicznych z zastosowaniem częściowych współczynników bezpieczeństwa. Eurokodów jest w sumie dziesięć, przy czym norma oznaczona EN 1997, popularnie zwana Eurokodem 7, dotyczy projektowania geotechnicznego. EC 7 składa się z dwóch części: EN 1997-1, część 1 — Zasady ogólne [2], EN 1997-2, część 2 — Badania podłoża gruntowego [3]. Część 1 została ustanowiona przez CEN w 2004 r., a od października 2005 r. ma status Polskiej

* Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wroclawska, Wrocław

Normy (PN-EN 1997-1). Ostatnio jej polska wersja została przekazana do tzw. „ankiety powszechnej” i równocześnie trwają prace nad Załącznikiem Krajowym. W styczniu 2007 r. CEN ustanowił część 2, która od kwietnia 2007 ma również status Polskiej Normy (PN-EN 1997-2). Do EN 1997-1 dołączone są załączniki: jeden normatywny (oznaczony jako A) i osiem informacyjnych (ozn. od B do J). Załącznik A jest szczególnie ważny, gdyż zawiera współczynniki częściowe i korelacyjne do stanów granicznych nośności oraz ich minimalne **zalecane** wartości. Mogą one być zmienione przez Polski Komitet Normalizacyjny (PKN) i podane w Załączniku Krajowym. Możliwości zmian są jednak ograniczone, albowiem wartości obciążeń i współczynniki częściowe do oddziaływań zostały już określone w normie PN-EN 1990:2004 (Podstawy projektowania konstrukcji), którą Polska akceptowała bez zmian krajowych. Natomiast załączniki informacyjne (rozważające różne kwestie szczegółowe) Komitet Techniczny PKN nr 254 „Geotechnika” zaakceptował bez poprawek.

Norma PN wdrażająca Eurokod powinna zawierać jego pełny tekst łącznie z załącznikami oraz może mu towarzyszyć Załącznik Krajowy, który daje możliwość wpłynięcia na ostateczną postać normy EN 1997-1, jaka będzie wprowadzona w Polsce.

Zgodnie z zaleceniami Eurokodu 7 projektowanie konstrukcji geotechnicznych obejmuje sprawdzenie stanów granicznych nośności (ULS) oraz użyteczności (SLS). Norma ta wyróżnia pięć rodzajów stanu granicznego nośności:

- GEO — zniszczenie lub nadmierna deformacja podłoża, np. osuwisko naturalnego zbocza lub nasypu drogowego posadowionego na słabym gruncie,
- STR — utrata nośności lub nadmierne odkształcenia konstrukcji lub jej elementów, np. wypiętrzenie gruntów w dnie wykopu,
- EQU — globalna utrata stateczności obiektu,
- HYD — zniszczenie spowodowane ciśnieniem sphywowym, np. przebicie hydrauliczne w podłożu,
- UPL — utrata równowagi budowli lub podłoża wskutek wyporu wody.

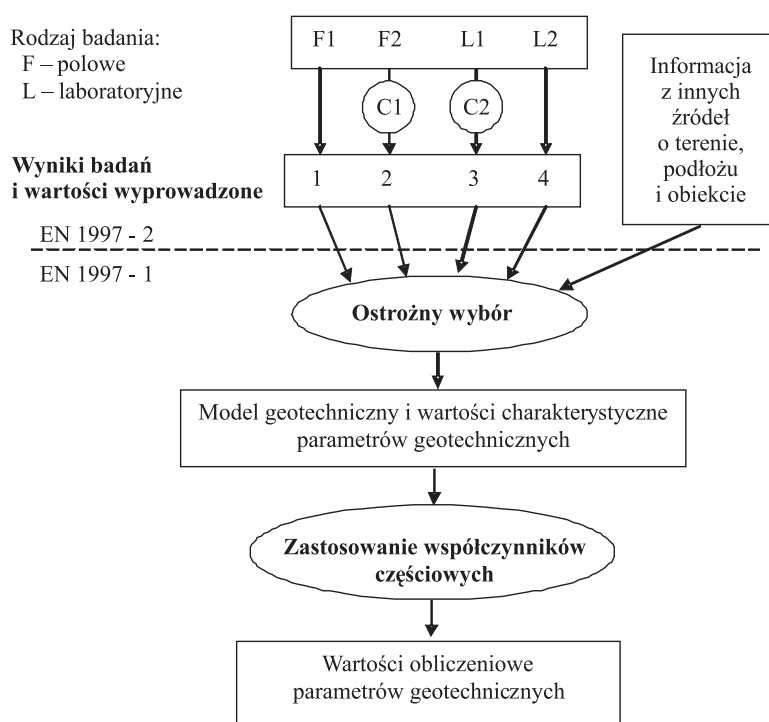
Do projektowania wykorzystuje się wartości charakterystyczne i obliczeniowe parametrów geotechnicznych (rys. 1).

Zasady wyznaczania charakterystycznych wartości parametrów według Eurokodu 7 istotnie różnią się od norm krajowych. Dotychczas były one równoznaczne z wartościami średnimi. W EC 7 podano zasady i reguły ustalania **wartości charakterystycznych** (kursywą wyróżniono fragmenty cytowane z Eurokodu). *Charakterystyczną wartość parametru geotechnicznego należy wybrać jako ostrożne oszacowanie wartości decydującej o wystąpieniu stanu granicznego.* Metody statystyczne są tylko wspomniane jako jedna z możliwości. *Jeżeli są stosowane metody statystyczne, to zaleca się wyznaczyć taką wartość charakterystyczną, żeby obliczone prawdopodobieństwo wystąpienia mniej korzystnej wartości, decydującej o powstaniu rozpatrywanego stanu granicznego, nie było większe niż 5%.* W uwadze dodano: *w ten sposób ostrożne oszacowanie wartości średniej polega na ustaleniu wartości średniej z ograniczonego zbioru wartości parametrów geotechnicznych, z poziomem ufności*

95%; w przypadku rozpatrywania zniszczenia lokalnego ostrożne oszacowanie wartości dolnej odpowiada fraktylowi 5%. Czyli są to wartości znacznie mniejsze od średnich. **Wartości obliczeniowe** parametrów geotechnicznych X_d ocenia się bezpośrednio lub wyprowadza się z wartości charakterystycznych X_k za pomocą równania:

$$X_d = X_k / \gamma_M \quad (1)$$

gdzie γ_M oznacza współczynnik częściowy do parametru geotechnicznego, tablica A.4 [2].



Rys. 1. Schemat wyboru wartości wyprowadzanych, charakterystycznych i obliczeniowych parametrów geotechnicznych [3]

Część badań geotechnicznych, szczególnie polowych, nie pozwala bezpośrednio określać parametrów geotechnicznych, np. dotyczących wytrzymałości. W tej sytuacji wartości parametrów muszą być „wyprowadzone” przy użyciu korelacji teoretycznych lub doświadczalnych. **Wartości wyprowadzone** parametru geotechnicznego są więc podstawą do wyznaczenia jego wartości charakterystycznej. W zrozumieniu roli, jaką odgrywa wartość wyprowadzona, pomocny może być rysunek 1 [3]. Wynika z niego, że wymagania dotyczące pomiarów właściwości gruntów i ich wartości wyprowadzonych zawarte są w Części 2 [3]. Natomiast wyznaczanie wartości charakterystycznych i obliczeniowych reguluje Część 1.

3. Projektowanie skarp i zboczy według Eurokodu 7

W zestawie nowych pojęć wprowadzonych przez EC 7-1 znajdują się **oddziaływania geotechniczne**. Oddziaływania uwzględniane przy ocenie stateczności skarp i zboczy można podzielić na bezpośrednie (obciążenia) i pośrednie (wymuszone przez zmiany warunków w gruncie). Za oddziaływania bezpośrednie przyjmuje się ciężar gruntu i wody, parcie gruntu, ciśnienie sphywowe, obciążenie naziomu, siły kotwienia. Do oddziaływań pośrednich zalicza się: pęcznienie i skurcz, przemieszczenia związane z pelżaniem lub osiadaniem gruntu, przyspieszenia wywołane trzęsieniami ziemi.

W przypadku skarp i zboczy należy sprawdzić ich stateczność ogólną ze względu na stany graniczne nośności GEO i STR, w których wytrzymałość gruntu podczas zniszczenia lub nadmiernego odkształcenia ma decydujące znaczenie. Jedną z istotnych zmian w projektowaniu skarp i zboczy są wprowadzone w omawianej normie **podejścia obliczeniowe**. Różnią się one sposobem rozkładu współczynników częściowych pomiędzy oddziaływania, parametry wytrzymałościowe i opory gruntu. Współczynniki częściowe podzielono na trzy grupy: A, M i R. W grupie pierwszej (A) wyróżniono współczynniki od obciążeń konstrukcji (A1) i od oddziaływań geotechnicznych (A2). Zestaw drugi dotyczy parametrów gruntowych. M1 odnosi się do wartości charakterystycznych, a M2 do obliczeniowych. Grupa trzecia (R) przypisana jest do oporów lub nośności.

W normie sformułowano trzy podejścia obliczeniowe (oznaczane dalej jako PO), w których należy uwzględnić następujące kombinacje współczynników częściowych:

- Podejście obliczeniowe 1 (PO 1)
 - kombinacja 1: $A1 + M1 + R1$ (ozn. K1),
 - kombinacja 2: $A2 + M2 + R1$ (ozn. K2),
- Podejście obliczeniowe 2 (PO 2)
 - kombinacja 1: $A1 + M1 + R2$,
- Podejście obliczeniowe 3 (PO 3)
 - kombinacja 1: $A2 + M2 + R3$.

Wartości powyższych współczynników podaje norma [2] w tablicach A.3, A.4 i A.14. Wynika z nich, że w podejściu 1 kombinacja 1 wartości obliczeniowe parametrów gruntu są równe wartościom charakterystycznym, a w kombinacji 2 współczynniki częściowe są stosowane na początku obliczeń do wartości charakterystycznych parametrów wytrzymałościowych, przy czym kombinacja 2 jest zalecana przy sprawdzaniu stateczności skarp i zboczy [4]. W podejściu 2 wykorzystuje się współczynniki częściowe do oporów gruntu, a w podejściu 3 do parametrów wytrzymałościowych i cała analiza jest prowadzona z użyciem wartości obliczeniowych.

Stateczność ogólną można opisać za pomocą współczynnika stateczności ogólnej (F) i współczynnika pomocniczego (ODF). W metodach klasycznych, np. równowagi granicz-

nej, współczynnik F jest uzyskiwany bezpośrednio z obliczeń, a współczynnik $ODF = F/F_{\text{dop}}$, gdzie F_{dop} jest minimalną wymaganą wartością współczynnika stateczności. W nowoczesnych metodach numerycznych, na przykład w metodzie różnic skończonych, współczynnik stateczności F wyznacza się metodą redukcji parametrów wytrzymałościowych gruntu [1]. Współczynnik pomocniczy otrzymuje się z równania: $ODF = F/\gamma_G \cdot \gamma_{R,e}$ gdzie γ_G — współczynnik częściowy do oddziaływania stałego z tablicy A.3, $\gamma_{R,e}$ — współczynnik częściowy oporu gruntu z tablicy A.14 [2]. Gdy $ODF > 1$ tzn. że zapas bezpieczeństwa dla stateczności ogólnej jest większy od wymaganego i skarpa jest przeprojektowana, $ODF = 1$ — zapas bezpieczeństwa jest wystarczający i skarpa jest stateczna, $ODF < 1$ oznacza, że bezpieczeństwo skarpy nie jest zapewnione.

Z ankiety przeprowadzonej w krajach CEN w 2006 r. a dotyczącej wdrażania EC 7-1 wynika, że:

- prawie wszystkie te kraje (oprócz Hiszpanii) przyjmują do sprawdzania stateczności skarp i zboczy trzecie podejście obliczeniowe, ale żaden kraj nie akceptował w pełni współczynników z Załącznika A; na przykład Niemcy będą je stosowali tylko do parametrów geotechnicznych [7];
- wszystkie kraje przyjęły zalecaną w tablicy A.4 [2] wartość współczynnika do ciężaru objętościowego $\gamma_\gamma = 1,0$, uznaną za najbardziej racjonalną i praktyczną.

Norma EC 7 wymienia cztery metody projektowania:

- 1) na podstawie obliczeń analitycznych oraz modeli numerycznych (najczęściej stosowana),
- 2) przy zastosowaniu wymagań przepisów,
- 3) z użyciem próbnych obciążeń i badań na modelach,
- 4) w oparciu o metodę obserwacyjną.

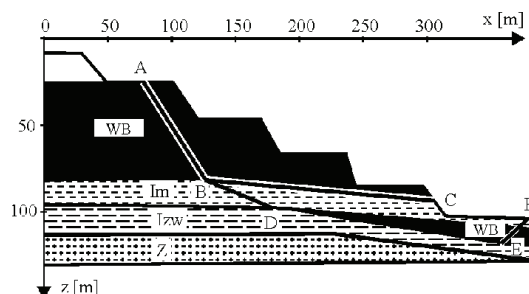
Metody obserwacyjne są ważną nowością w EN 1997-1. Zaleca się je w sytuacjach, gdy zachowanie budowli jest trudne do przewidzenia i są szczególnie przydatne do dużych obiektów. Na przykład metody obserwacyjne są stosowane do kontroli wyrobiska górniczego dla BOT KWB Bełchatów [6]. W powiązaniu z obliczeniami stateczności metodami numerycznymi stanowią one efektywny sposób projektowania wyrobisk w złożonych warunkach geologiczno-inżynierskich.

4. Przykład liczbowy

W ramach dyskusji nad Załącznikiem Krajowym, dotyczącej wyboru podejścia obliczeniowego i częściowych współczynników bezpieczeństwa, przeprowadzono obliczenia ogólnej stateczności skarpy głębokiego wyrobiska kopalni odkrywkowej.

Wymiary geometryczne skarpy oraz jej budowę geologiczną przedstawia rysunek 2.

Górotwór zbudowany jest z następujących warstw gruntowych: WB — węgiel brunatny, I_m — ily międzywęglowe, I_{zw} — ił zawęglony, Z — zwietrzelina [5]. Wartości charakterystyczne i obliczeniowe oddziaływań oraz parametrów wytrzymałościowych zestawiono w tabeli 1.



Rys. 2. Schemat obliczeniowy

TABELA 1

Wartości charakterystyczne i obliczeniowe oddziaływań oraz parametrów wytrzymałościowych gruntu

Oddziaływania i parametry	Seria gruntowa	Podejście obliczeniowe			
		PO 1 K2	PO 2	PO 3	Klasyczne
Wartość charakterystyczna ciężaru objętościowego gruntu	WB	13,00	13,00	13,00	13,00
	Im	19,20	19,20	19,20	19,20
	Izw	15,50	15,50	15,50	15,50
Współczynnik częściowy do oddziaływań (do ciężaru gruntu), γ_G	WB Im	1,00	1,35	1,00	1,00
	Izw				
Wartość obliczeniowa ciężaru objętościowego gruntu [kN/m ³]	W	13,00	13,00	13,00	13,00
	Im	19,20	19,20	19,20	19,20
	Izw	15,50	15,50	15,50	15,50
Wartość charakterystyczna efektywnego kąta tarcia wewnętrznego, ϕ' [°]	WB	12	12	12	12
	Im	6	6	6	6
	Izw	4	4	4	4
Wartość charakterystyczna efektywnej spójności, c' [kPa]	W	68	68	68	68
	Im	146	146	146	146
	Izw	35	35	35	35
Współczynnik częściowy do parametrów wytrzymałościowych gruntu, γ_M	WB	1,25	1,00	1,25	0,90
	Im				
	Izw				
Wartość obliczeniowa efektywnego kąta tarcia wewnętrznego, ϕ' [°]	WB	10	12	10	11
	Im	5	6	5	5
	Izw	3	4	3	4
Wartość obliczeniowa efektywnej spójności, c' [kPa]	WB	54	68	54	61
	Im	117	146	117	131
	Izw	28	35	28	32
Współczynnik częściowy do oporu gruntu, $\gamma_{R,e}$		1,00	1,10	1,00	1,00

Przy ustalaniu schematu obliczeniowego uwzględniono budowę geologiczną górotworu. Rozpatrzono dwie powierzchnie poślizgu: ABC i ABDEF. Ocenę ogólnej stateczności wykonano metodą Janbu za pomocą autorskiego programu o nazwie FILAR. Przy sprawdzaniu stateczności uwzględniono trzy podejścia obliczeniowe zaproponowane w EN 1997-1 oraz metodę klasyczną, dla której przyjęto $F_{dop} = 1,3$.

TABELA 2
Wyniki obliczeń ogólnej stateczności

Podejście obliczeniowe	Linia poślizgu			
	ABC		ABDEF	
	F	ODF	F	ODF
PO 1, K2	2,13	2,13	0,95	0,95
PO 2	2,64	1,78	1,19	0,80
PO 3	2,13	2,13	0,95	0,95
Klasyczne	2,35	1,81	1,09	0,84

Wyniki obliczeń zebrane w tabeli 2 pokazują, że:

- Podejście obliczeniowe 1, kombinacja 2 i podejście obliczeniowe 3 dają identyczne wyniki, jak można się było spodziewać.
- Dla wartości współczynników częściowych zalecanych w Załączniku A Eurokodu 7 wynik według podejścia PO 2 jest nieznacznie wyższy od otrzymanego metodą klasyczną.
- Drugie podejście obliczeniowe jest najbezpieczniejsze spośród proponowanych przez EN 1997-1, daje bowiem najniższą wartość współczynnika pomocniczego ODF.

5. Podsumowanie

Na podstawie analizy Eurokodu 7 stwierdzono, że problem stateczności skarp i zboczy został w nim potraktowany marginalnie, pomimo iż z praktyki inżynierskiej wynika, że na przykład utrata stateczności wyrobisk górniczych w kopalniach odkrywkowych należy do największych zagrożeń geotechnicznych. Istnieje jeszcze możliwość uzupełnienia tej „luki” (lub nadrobienia tej zaległości) przez ustanowienie oddzielnej normy krajowej poświęconej tej tematyce.

Zaproponowany przykład liczbowy nie jest skomplikowany zarówno pod względem oddziaływań, jak i warunków gruntowych, ale pozwala zauważyć powtarzalność wyników uzyskanych za pomocą różnych podejść obliczeniowych. Powstaje więc pytanie, jakie będą wyniki w przypadku złożonych obciążeń i skomplikowanych warunków geotechnicznych.

Odpowiedź jest potrzebna do dokonania wyboru podejścia obliczeniowego, które znajdzie się w Załączniku Krajowym.

LITERATURA

- [1] *Cala M., Flisiak J.*: Analiza stateczności skarp i zboczy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych. XXIII ZSMG, KGBiG, Kraków 2000, s. 27–37
- [2] EN 1997-1: 2004 Eurocode 7. Geotechnical design. Part 1. General rules
- [3] EN 1997-2: 2007 Eurocode 7. Geotechnical design. Part 2. Ground investigation and testing
- [4] *Frank R., Bauduin C., Driscoll R., Kavvas M., Ovesen N.K., Orr T., Schuppener B.*: Designers' Guide to EN 1997-1, Eurocode 7, London, Th. Telford 2004
- [5] *Konderla H.*: Metody numeryczne w analizie stateczności skarp i zboczy. Współczesne problemy naukowo-badawcze budownictwa lądowego i wodnego, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007, s. 113–120
- [6] *Szymański J., Czarnecki L.W., Dynowska M.*: Przemieszczenia konturu zbocza wyrobiska odkrywkowego jako parametr do oceny jego stateczności. XXIX ZSMGiG, KGBiG AGH, Kraków — Krynica 2006, s. 377–391
- [7] *Vogt N., Schuppener B., Weissenbach A., Gajewska B., Kłosiński B.*: Podejścia obliczeniowe stosowane w Niemczech w projektowaniu geotechnicznym według Eurokodu 7-1. Inżynieria i Budownictwo, 6, 2006, s. 326–330