

MARIA BRONIATOWSKA*

MODELOWANIE MASYWÓW FLISZOWYCH I DOBÓR PARAMETRÓW DO OBLICZEŃ STATECZNOŚCI ZBOCZY FLISZOWYCH

FLYSCH MASSIFS MODELLING AND SELECTION OF PARAMETERS FOR SLOPE STABILITY CALCULATIONS

Streszczenie

W niniejszym artykule zawarto rozważania na temat przyjmowania założeń w analizie stateczności zbozczy w Karpatach fliszowych. Podstawą tych założeń powinno być przyjęcie modelu strukturalnego masywu fliszowego, a w konsekwencji wybór powierzchni poślizgu i parametrów wytrzymałościowych do obliczeń stateczności. W artykule zamieszczono wybrane wyniki badań laboratoryjnych materiału skalnego, pochodzącego z rejonu budowy zbiornika wodnego na rzece Skawie w Świnnej Porębie.

Słowa kluczowe: flisz karpacki, osuwisko, piaskowiec, ilolupki, próba ściskania, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na ścinanie, analiza stateczności zbozcza

Abstract

The article presents considerations of the assumptions acquired in the analysis of slope stability in the flysch Carpathians. The assumptions should be based on the acceptance of the model of the structural flysch massif, and in consequence, the choice of the surface of skid and performance shearing strength parameters for the calculations of sedateness. The considerations are illustrated with the selected results of laboratory tests performed on the rock material collected on the area of the water reservoir construction on the Skawa river in Świnna Poręba.

Keywords: carpathian flysch, earthslide, sandstone, clay shale, compression test, compressive strength, shear strength, the slope stability analysis

* Mgr inż. Maria Broniatowska, Instytut Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

1. Charakterystyka fliszu karpackiego

Znaczną część terenów Polski południowej zajmuje masyw Karpat. Karpaty są to góry fałdowe, powstałe w okresie kredy i trzeciorzędu w wyniku alpejskiej fazy ruchów górotwórczych. W łańcuchu Karpat wyróżnia się Karpaty wewnętrzne, obejmujące Tatry polskie i słowackie oraz Karpaty zewnętrzne zwane fliszowymi.

Karpaty wewnętrzne zbudowane są głównie ze skał krystalicznych, magmowych oraz z wapieni i dolomitów powstałych w mezozoiku. Utwory fliszowe osadzone w paleogenie i sfałdowane w neogenie zachowały się jedynie w nieckach i dolinach oddzielających masywy górskie. Flisz Karpat wewnętrznych jest słabo zaburzony tektonicznie – warstwy zalegają na ogół płasko, są nieznacznie pofałdowane i przecięte nielicznymi uskokami.

Karpaty fliszowe (zewnętrzne) stanowią zewnętrzne obrzeżenie łańcucha karpackiego, które ciągnie się nieprzerwanym pasmem wzdłuż całej jego długości od Moraw aż po rumuńskie Karpaty południowe. Zbudowane są z kredowych i trzeciorzędowych osadów fliszowych. Masyw fliszowy jest zespołem skał osadowych o różnym charakterze mechanicznym. Piaskowce należałoby traktować jako skały „twarde” o właściwościach bliskich ciału kruchemu, natomiast łupki ilaste oraz iłolupki są skałami miękkimi wykazującymi właściwości plastyczne podczas deformacji i zniszczenia. Naprzemianległe warstwy piaskowców i łupków stanowią swoisty materiał kompozytowy.

2. Modele strukturalne materiału fliszowego

Do opisu tego skomplikowanego tworu przyrody, jakim jest flisz karpacki, prof. Thiel z zespołem [1] wprowadzili kilka modeli strukturalnych (tab. 1, rys. 1) różniących się zawartością i sposobem rozmieszczenia warstw piaskowca oraz zaproponowali modele mechaniczne, odpowiednie dla poszczególnych modeli strukturalnych.

Tabela 1

Modele strukturalne fliszu karpackiego oraz ich zasadnicze cechy

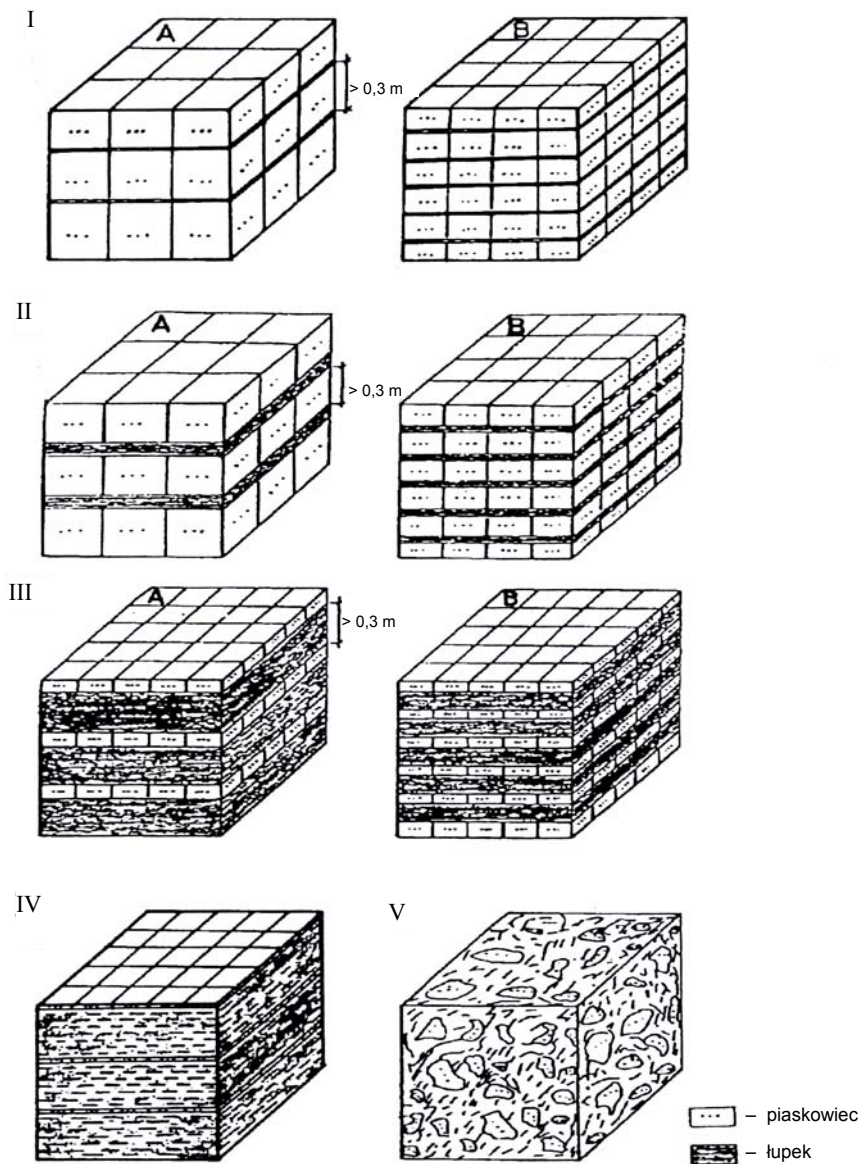
Oznaczenie modelu	Zawartość piaskowców [%]	Grubość warstw [m]	Zaburzenia tektoniczne (+ = tak, – = nie)
I A B	> 85	> 0,3 (P) < 0,3 (P)	–
II A B	85–50	> 0,3 (P ₁) < 0,3 (P ₁)	–
III A B	50–15	> 0,3 (Ł _p) < 0,3 (Ł _p)	–
IV	< 15		–
V	nieistotna		+

P – masyw piaskowcowy,

P₁ – masyw piaskowcowo-lupkowy,

Ł_p – masyw łupkowo-piaskowcowy.

Przy konstruowaniu powyższych modeli wzięto pod uwagę przede wszystkim zawartość piaskowca – grubość warstw skały litej, jak również występowanie zaburzeń tektonicznych.



Rys. 1. Modele strukturalne masywów fliszowych

Fig. 1. Structural models of the Carpathian flysch

Jeżeli modelowi strukturalnemu przypisze się sposób zachowania pod obciążeniem i odpowiednie parametry, powstanie model mechaniczny ośrodka. Modele I (piaskowcowy) i IV (łupkowy) można uznać za jednorodny i nieciągły, modele II i III – jako niejednorodny i nieciągły, natomiast model V, wobec całkowicie zaburzonej struktury pierwotnej, można potraktować jako makroskopowo jednorodny, nieciągły, ale izotropowy.

3. Analiza adekwatności modeli w odniesieniu do konkretnych sytuacji

Jeżeli w masywie i odpowiadającym mu modelowi przeważa jeden typ skały, tak jak w modelach I i IV, można potraktować go jako jednorodny. Również masyw, który odpowiada modelowi V – najbardziej „wymieszany”, a więc homogenizowany – traktuje się jako jednorodny.

O tym, czy w modelu należy uwzględniać niejednorodność decydują wymiary obiektu, którego współpracę z masywem się analizuje. Jeżeli są one porównywalne z grubością warstw, należy posłużyć się modelem niejednorodnym i wprowadzić właściwości wszystkich materiałów budujących masyw. Natomiast w sytuacji, gdy obiekt ma wymiary dużo – kilkadziesiąt razy – większe, rzeczywistą strukturę masywu zastępuje się modelem ekwiwalentnym ośrodka o uśrednionych parametrach. Najczęściej masywy fliszowe stanowią kombinację dwóch typów materiałów skalnych – „twardych” piaskowców i „miękkich” łupków, parametry wytrzymałościowe tych skał różnią się nawet stukrotnie. Ze względu na tak znaczne zróżnicowanie właściwości materiałów „kompozytowych” nie zawsze można wprowadzać model zastępczy o uśrednionych parametrach.

Przy modelowaniu nieciągłości wynikającej z obecności spękań również istotne są wymiary obiektu, który ma współpracować z masywem. Przy niewielkich wymiarach obiektu spękania można uwzględniać jako dyskretne obiekty geometryczne. W przeciwnym razie, konstruując model zastępczy, uwzględnia się obecność spękań i ich cechy, a model wynikowy jest pozornie ciągły (quasi-ciągły). Model V jest makroskopowo ciągły i stosuje się do niego prawa mechaniki ośrodków ciągłych.

Mechaniczna anizotropowość ośrodka fliszowego wynika z warstwowej budowy i obecności systemów spękań. W przypadku modeli I i IV można mówić o anizotropii tektonogenetycznej, spowodowanej obecnością spękań. Natomiast modele II i III charakteryzuje silna anizotropia właściwości mechanicznych spowodowana znacznym zróżnicowaniem właściwości materiałów skalnych budujących masyw. W modelu V nastąpiła tak silna dezintegracja pierwotnych struktur kierunkowych – warstwowania, systemów spękań, że można go traktować jako izotropowy.

Przyjęcie powyższych schematów pozwala zastosować do opisu modeli ośrodka fliszowego równania mechaniki ośrodków ciągłych, przy odpowiednich założeniach idealizujących rzeczywisty materiał.

Zakłada się liniowe związki pomiędzy naprężeniami i odkształceniami w obszarze sprężystym – izotropowe dla modeli I, IV i V oraz transwersalnie izotropowe dla modeli II i III. Dla wszystkich modeli przyjmuje się kryterium zniszczenia Coulomba–Mohra. Dla modeli, w których przeważa łupek (III, V) wprowadza się idealną plastyczność, a dla modeli z przewagą piaskowca (I, II) zakłada się natychmiastowe obniżenie wytrzymałości na ścinanie po zniszczeniu, traktując materiał skalny jako ciało kruche. Te i inne założenia pozwalają skonstruować matematyczny opis masywu skalnego. Równie istotne jak wła-

ściwe dobranie modelu jest wprowadzenie do niego odpowiednich parametrów odzwierciedlających właściwości materiałów skalnych.

Konstruując model mechaniczny ośrodka rzeczywistego – w tym przypadku masywu skalnego – jesteśmy zmuszeni do uśrednienia parametrów poszczególnych skał. Wyniki niektórych badań polowych są faktycznie danymi dotyczącymi kompozytu, jaki stanowią piaskowiec i łupki, a nie poszczególnych skał z osobna. Przykładem takich parametrów są moduły odkształcenia i sprężystości pomierzone w masywie skalnym.

Należy też pamiętać o anizotropii ośrodka fliszowego – uzyskane z badań wyniki odpowiadają jedynie zadanemu w badaniu kierunkowi obciążenia. Wartości modułów dla innych kierunków można obliczyć, trzeba jednak znać stopień anizotropii masywu uzyskany z badań laboratoryjnych. Możemy tu spodziewać się zawyżenia wartości modułów – w laboratorium badane są próbki skały litej, w masywie często występuje skała rozdrobniona.

Modelowanie tak zróżnicowanego podłoża jak podłoże fliszowe wymaga specjalnego podejścia – o ile możliwe jest tworzenie uogólnionych modeli, o tyle przypisywanie ich konkretnym rejonom mija się z celem – w jednym odsłonięciu można zaobserwować różne układy strukturalne lub zróżnicowanie parametrów mechanicznych. Rejon badań może zostać scharakteryzowany kilkoma modelami strukturalnymi lub mechanicznymi. Celowe jest również określenie przedziałów wartości parametrów mechanicznych poszczególnych modeli.

Analizując pracę masywu skalnego pod obciążeniem, należy zawsze pamiętać o celu tej analizy. W niektórych sytuacjach uzasadnione jest zaproponowanie ekwiwalentnego modelu podłoża skalnego o uśrednionych parametrach. W innych przypadkach takie podejście byłoby błędem – przy analizie stateczności zbocza należy trafnie przewidzieć potencjalną powierzchnię zniszczenia i sprawdzić kryterium wytrzymałościowe dla materiału, w którym przebiega powierzchnia poślizgu. Obliczenia należy przeprowadzić na parametrach konkretnych skał, z uwzględnieniem wszystkich niekorzystnych czynników, jakie teoretycznie mogą wystąpić. Celowe jest też wprowadzenie do równań parametrów z powierzchni kontaktu dwóch sąsiadujących ze sobą warstw, jeżeli podejrzewa się, że zniszczenie może wystąpić na tej powierzchni. Tego typu sytuacje są powszechne w masywach fliszowych, gdzie cięższe warstwy piaskowców mogą przemieszczać się po stropie warstw ilastego materiału skalnego (łupki ilaste, iłołupki).

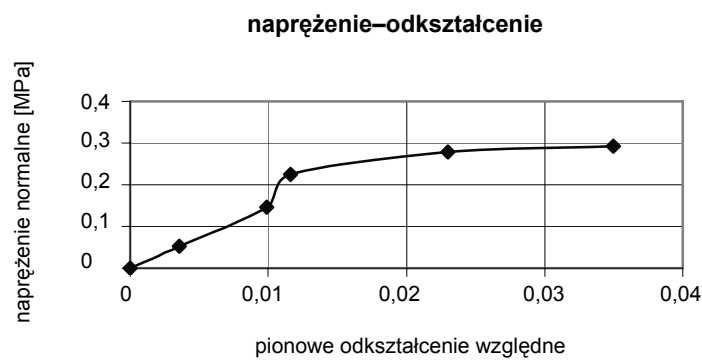
Zniszczenie w masywie może wystąpić zarówno na powierzchni kontaktu różnych warstw (piaskowców i łupków), jak i wewnątrz którejś warstwy. Charakter zniszczenia będzie zależał od umiejscowienia powierzchni poślizgu w masywie. Mechanizm zniszczenia skały kruchej przebiega zupełnie inaczej niż miękkiej skały plastycznej. Różnice te można zaobserwować nawet w procesie jednoosiowego obciążania próbek skalnych w prasie hydraulicznej, chociaż, oczywiście, pełny obraz deformacji próbek otrzymuje się w wyniku badań w trójosiowym stanie naprężenia (komora trójosiowego ściskania).

4. Prezentacja wybranych wyników badań laboratoryjnych

W polskich Karpatach fliszowych przeprowadzono badania rozpoznawcze w ok. 40 rejonach oraz badania szczegółowe w celu określenia warunków posadowienia i eksploatacji przyjętych do realizacji budowli hydrotechnicznych. Obecnie terenem badawczym

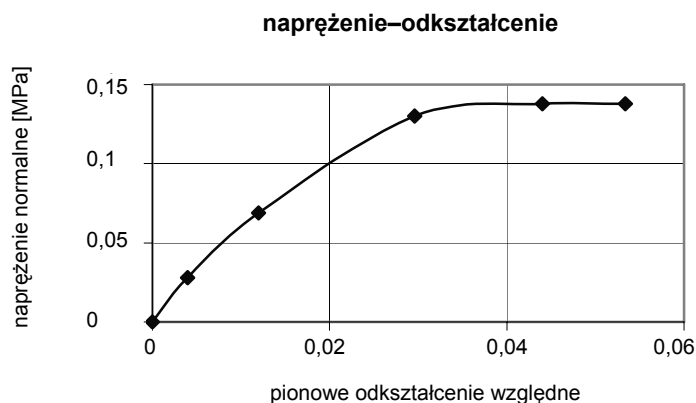
jest obszar realizowanego zbiornika wodnego Świnna Poręba na rzece Skawie. Jest to rejon położony na południowy zachód od dna doliny Skawy, w pobliżu granic z Beskidem Śląskim, obniżeniem Jabłonkowskim i Beskidem Żywieckim, należący do Pogorza Wielickiego.

Na przestrzeni kilku ostatnich lat w Instytucie Geotechniki PK przebadano wiele prób materiału skalnego z okolic zapory w Świnnej Porębie [4, 5]. Oznaczano jego właściwości fizyczne i mechaniczne w celu uzgodnienia parametrów dla analizy stateczności projektowanych skarp drogowych. Badania wykonywano zarówno na fragmentach rdzeni wiertniczych w prasie hydraulicznej, jak i metodami laboratoryjnymi przeznaczonymi dla gruntów – w ten sposób badano skały miękkie (zwietrzałe iłolupki) i tzw. lepiszcze.



Rys. 2. Charakterystyki materiałowe dla skał „miękkich” (iłolupek otw. 23 gł. 11,7–12,0)

Fig. 2. Material characteristics of “soft” rocks (clay shale)



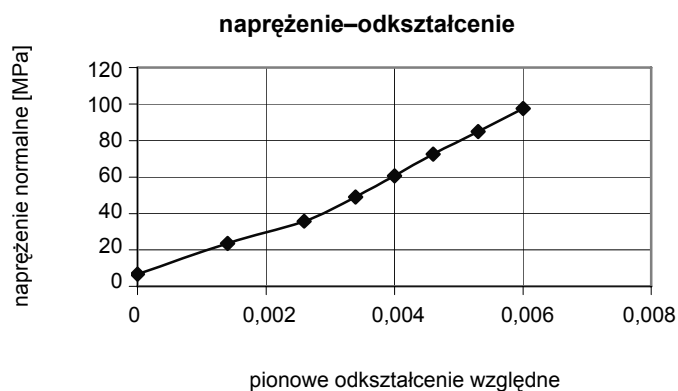
Rys. 3. Charakterystyki materiałowe dla skał „miękkich” (iłolupek otw. 27 gł. 14,6–15,0)

Fig. 3. Material characteristics of “soft” rocks (clay shale)

Poniżej zamieszczono przykładowe charakterystyki uzyskane podczas badania odkształcalności dla próbek piaskowca i iłolupka jako ilustrację zróżnicowania cech materiałowych

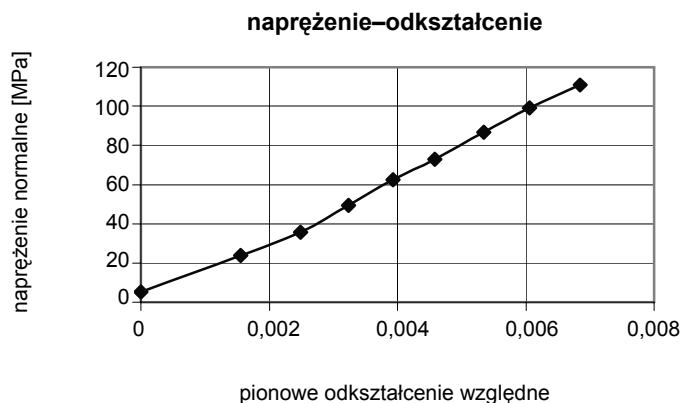
tych dwóch materiałów oraz adekwatności założeń przyjmowanych przy konstruowaniu modeli mechanicznych.

Charakter wykresów dla dwóch badanych materiałów różni się zasadniczo. Dla piaskowca przebieg zależności jest liniowy (rys. 4, 5), co daje możliwość zastosowania opisu jak dla materiału liniowo-sprężystego – w zakresie przyłożonych obciążeń. Dla skały rozdrobnionej o lepszemu ilastym, jaką jest łożupka, przebieg zależności naprężenie–odkształcenie jest inny niż dla piaskowca – odcinek prostoliniowy jest krótki, następnie wykres nabiera charakteru krzywoliniowego, aby po osiągnięciu pewnej wartości obciążenia przyjąć przebieg równoległy do osi odkształcenia pionowego (rys. 2, 3).



Rys. 4. Charakterystyki materiałowe dla skał „twardych” (piaskowiec otw. 8 gł. 21,0–21,6)

Fig. 4. Material characteristics of “hard” rocks (sandstones)



Rys. 5. Charakterystyki materiałowe dla skał „twardych” (piaskowiec otw. 8 gł. 20,5–20,8)

Fig. 5. Material characteristics of “hard” rocks (sandstones)

Maksymalna wartość obciążenia, w odniesieniu do powierzchni przekroju próbki, odpowiada granicy plastyczności. Kształt charakterystyk uzyskanych dla próbek łożupka ukazuje złożony charakter właściwości tego materiału.

Dla tych skał przeważają odkształcenia niesprężyste, których szczególną cechą jest rozwój przy stałym obciążeniu, bez wyraźnego zniszczenia badanej próbki (nie uwiadcniają się spękania). Ten typ deformacji jest charakterystyczny dla materiału o właściwościach reologicznych (pełzanie). Deformacje te zachodzą tak długo, jak długo działają obciążenia. Mają one charakter głównie postaciowy, tj. ich rezultatem jest wyraźna zmiana kształtu próbki, przy niewielkiej zmianie objętości.

Charakterystyki materiałowe pozwalają poznać właściwości materiału rzeczywistego – w tym przypadku utworów fliszowych. Jednak głównym celem badań laboratoryjnych wykonywanych w celu rozpoznania podłoża okolic Świnnej Poręby było dostarczenie parametrów mechanicznych, niezbędnych do analizy stateczności zboczy – kąta tarcia wewnętrznego i kohezji.

Potencjalna powierzchnia poślizgu na pewno nie wystąpi w skale litej – a z takiej tylko można przygotować próbki do badań. Parametry wytrzymałościowe, uzyskane dla próbek piaskowców, nie będą więc przydatne w analizie stateczności zboczy fliszowych. Zdecydowanie słabszym materiałem jest iłołupek – w warstwach tego materiału należy szukać zaistniałych lub przewidywanych powierzchni zniszczenia, dlatego więc i parametrów wytrzymałościowych.

Badania tego materiału były wykonywane w kilku wariantach. Badano próbki będące fragmentami rdzenia (w prasie) – a więc w przybliżeniu o nienaruszonej strukturze, z tego typu próbek formowano też próbki do badań w aparacie bezpośredniego ścinania, nazywając je „nieprzerobionymi”. Większość próbek była jednak „przerobiona” – z części wyeliminowano grubsze ziarna, żeby umożliwić uformowanie próbki do aparatu bezpośredniego ścinania (w przypadku, kiedy fragmenty zwietrzliny były zbyt duże). Badania w aparacie trójosiowego ściskania zostały wykonane na paście gruntowej, sporządzonej z materiału ilastego, stanowiącego lepsze. Oczywiście, sposób badania rzutuje na otrzymane wyniki.

Średnie wartości kąta tarcia wewnętrznego dla próbek nieprzerobionych otrzymane w wyniku badań w aparacie bezpośredniego ścinania wykazują zbieżność z wynikami uzyskanymi na fragmentach rdzenia wiertniczego, w prasie hydraulicznej (próba ściskania i rozciągania), mimo różnych metod badania. Wartość kąta tarcia wewnętrznego wynosi 23° . Dla próbek przerobionych otrzymano niższe wartości kąta tarcia, rzędu kilkunastu stopni – w aparacie bezpośredniego ścinania $17,3^\circ$, w aparacie trójosiowego ściskania $14,8^\circ$. Zmienność wartości kohezji w zależności od metody badania jest zdecydowanie większa. Im większa ingerencja w strukturę próbki, tym uzyskuje się niższą wartość spójności właściwej. Zestawienie uśrednionych wyników przedstawiono w tab. 2.

Spośród tych wartości kąta tarcia i kohezji należy wytypować najbardziej wiarygodne do obliczeń stateczności skarp. Dobór parametrów powinna zawsze poprzedzić analiza rzeczywistej sytuacji geomorfologicznej w terenie.

Jeżeli zbocze utrzymuje się dotychczas w równowadze, nie stwierdza się śladów osunięcia – przyjęcie do obliczeń kąta tarcia wewnętrznego ok. 23° wydaje się prawidłowe, tym bardziej że wartość ta pojawiła się w dwóch badaniach wykonanych zupełnie innymi metodami. Natomiast wartość kohezji otrzymana w prasie jest prawdopodobnie za wysoka. Trzeba pamiętać, że badania w prasie wykonywane są na jednolitych, nieuszkodzonych fragmentach rdzenia, o ciągłej strukturze materiału gruntowego, jaka na pewno nie występuje w warstwie rozpatrywanej jako całość. Bliższa rzeczywistości jest zapewne wartość

spójności otrzymana w aparacie AB dla próbek tzw. nieprzerobionych – ok. 30 kPa. Z badań tych wynika zresztą, że naruszanie struktury gruntu niweluje siły kohezji.

Tabela 2

Średnie wartości parametrów mechanicznych dla ilolupków z okolic Świnnej Poręby

Liczba próbek	Rodzaj próbki	Urządzenie badawcze	Kąt tarcia wewnętrzznego [°]	Kohezja [kPa]
12	nieprzerobione	AB	23,2	30,5
46	przerobione	AB	17,3	11,6
29	przerobione (pasta gruntowa)	AT	14,8	7,4
7	nieprzerobione (fragmenty rdzenia)	prasa	22,7	108,6

W sytuacji, gdy rozpoczęły się już ruchy masowe, wystąpiły osunięcia fragmentów zbocza, do obliczeń należy przyjmować znacznie niższe wartości kohezji – takie, jakie uzyskano dla próbek przerobionych – ok. 10 kPa. Wartości kąta tarcia zmieniają się trochę mniej – ze względu na to, że tarcie zależy od zawartości zwietrzliny, a ta nie ulega zmianie na skutek ruchów mas gruntowo-skalnych. W związku z tym średni kąt tarcia uzyskany w aparacie trójosiowego ściskania ma wartość zaniżoną w stosunku do rzeczywistego, wartości otrzymane dla próbek przerobionych w aparacie AB też mogą być mniejsze od rzeczywistych, ponieważ usunięto z nich grubszy materiał skalny. Jednak wystąpienie powierzchni poślizgu w przeszłości sugeruje konieczność obniżenia wartości kąta tarcia wewnętrzного w obliczeniach stateczności, w stosunku do analizy stateczności zboczy w równowadze. Wartość pomiędzy 17° a 23° powinna okazać się bliska rzeczywistej.

Literatura

- [1] Praca zbiorowa pod kierunkiem K. Thiel, *Właściwości fizyko-chemiczne i modele masywów skalnych polskich Karpat fliszowych*, IBW PAN, Biblioteka Naukowa, Hydrotechnika 19, Gdańsk 1995.
- [2] Zabuski L., Thiel K., Bober L., *Zjawiska osuwiskowe w polskich Karpatach fliszowych – Geologiczno-inżynierskie właściwości wybranych osuwisk*, IBW PAN, Gdańsk 1997.
- [3] Zabuski L., Thiel K., Bober L., *Osuwiska we fliszu Karpat polskich*, IBW PAN, Gdańsk 1999.
- [4] *Dokumentacja geologiczno-inżynierska i geotechniczna dla określenia stabilności osuwisk w rejonie Zbiornika Wodnego Świnna Poręba na rzece Skawie wraz z siecią kompleksowego monitoringu i programem obserwacji oraz wytycznymi dla sporządzenia mapy ruchów masowych* (Badania laboratoryjne – kierownik zespołu dr inż. Zbigniew Pabian).
- [5] *Dokumentacja geologiczno-inżynierska i geotechniczna dla przełożenia linii kolejowej Kraków–Sucha Beskidzka, odcinek: Stryszów–Zembrzyce* (Badania laboratoryjne – kierownik zespołu dr inż. Zbigniew Pabian).