



Robert KACZMARCZYK\*, Sylwia TCHÓRZEWSKA\*\*\*, Jacek STANISZ\*\*, Aleksandra BORECKA\*

## Wskaźniki zmian wytrzymałości na ścinanie w strefach zagrożenia osuwiskowego na obszarze kopalni węgla brunatnego Turów i Bełchatów

Streszczenie: W artykule omówiono wyniki badań wytrzymałości na ścinanie dla 215 prób pobranych z utworów obejmujących strefy zagrożeń osuwiskowych w górotworze złóż węgla brunatnego Turów i Bełchatów. Opisano związki pomiędzy budową geologiczną nadkładu, genezą, cechami geologiczno-inżynierskimi oraz czynnikami wpływającymi na powstawanie lub rozwój osuwisk. Scharakteryzowano procesy zachodzące w ośrodku gruntowym mające wpływ na zmianę parametrów wytrzymałościowych w górotworze. Omówiono metody wyznaczania wartości obliczeniowej według normy PN-B-03020:1981 oraz Eurokod 7 (PN-EN 1997-1:2008P). Przedstawiono zalety i ograniczenia zastosowania „normowych” metod oznaczania parametrów wytrzymałości na ścinanie do analiz stateczności skarp i zboczy w warunkach skomplikowanej budowy geologicznej.

Badania testowe wykonano dla 11 różnych powierzchni osłabień strukturalnych, oznaczając parametry wytrzymałości pierwotnej, rezydualnej oraz po zawodnieniu powierzchni poślizgu. Porównując wyniki zmian parametrów, autorzy zaproponowali współczynniki korekcyjne: wskaźnik zmian kąta tarcia wewnętrznego ( $\lambda_{\phi}$ ,  $\lambda_{\phi W}$ ) oraz wskaźnik zmian spójności ( $\lambda_c$ ,  $\lambda_{cW}$ ).

Wyniki badań wskazują, że wskaźniki zmiany parametrów wytrzymałościowych są wyraźnie zróżnicowane dla kąta tarcia wewnętrznego i spójności. W próbkach pobranych z powierzchni nienaruszonych zmniejszenie oporów ścinania było w znacznej mierze wynikiem redukcji spójności. Na powierzchniach o naruszonej strukturze tendencje zmian parametrów wytrzymałościowych nie są tak wyraźne i zależą od wielu różnych czynników.

Analiza wyników potwierdziła, że w strefach zagrożeń osuwiskowych obserwuje się znaczne zmniejszenie parametrów wytrzymałościowych względem parametrów uzyskanych z badań laboratoryjnych nawet po uwzględnieniu ich redukcji do wartości obliczeniowych. Proponowane rozwiązanie, zdaniem autorów, pozwoli na lepsze odzwierciedlenie rzeczywistych warunków geologiczno-inżynierskich, co będzie prowadzić do bezpiecznego projektowania geologiczno-inżynierskiego oraz geotechnicznego.

Słowa kluczowe: wytrzymałość na ścinanie, kopalnie odkrywkowe, wskaźniki zmian wytrzymałości na ścinanie, powierzchnie strukturalne, Eurokod 7

\* Dr inż., \*\* Mgr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków; e-mail: rkaczmar@op.pl

\*\*\* Mgr inż., Podhalańska Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nowym Targu.

## Indicators of changes in shear strength parameters of landslide hazard zones in the Turów and Bełchatów brown coal mines areas

**Abstract:** The article presents results of shear strength tests for 215 samples collected from formations including landslide hazard zones of the Turów and Bełchatów brown coal mine. The relationships between the geological structure of the overlay, genesis, geological-engineering properties, and factors influencing the formation of the landslide have been described. The processes occurring in the ground, influencing change of strength parameters have been characterized. Methods of determining the design value according to PN-B-03020:1981 and Eurocode 7 (PN-EN 1997-1:2008P), have been discussed. Advantages and limitations of using standard methods of determining shear strength parameters for the analysis of slope stability in the complicated geological conditions have been presented.

Tests have been realized for 11 various areas of structural weakenings, determining the peak strength, residual strength, and after water accumulation in the slide surface. In comparing the results of parameters change, the authors have proposed the following correction coefficients: index of friction angle change ( $\lambda_{\phi}$ ,  $\lambda_{\phi w}$ ) and index of cohesion changes ( $\lambda_c$ ,  $\lambda_{cw}$ ).

The indices of change of strength parameters are distinctly diversified for the friction angle and cohesion. The limitation of shear stress resulted mostly from reduction of cohesion in the samples collected from intact surfaces. The trends of strength parameters changes are not as clear and depend on many different factors in terms of the surfaces of disturbance structure.

The analysis of results has confirmed that in the landslide hazard areas the significant reduction of strength parameters in relation to parameters obtained in the laboratory tests is observed, even after taking their reduction to the design values into consideration. In the authors' opinion, the proposed solution allows for a better representation of the actual geological engineering and geotechnical conditions, leading to safe designing.

**Keywords:** shear strength, open pit mines, indicators of shear strength, structural surfaces

## Wprowadzenie

W trakcie eksploatacji złóż węgla brunatnego, w odkrywkowych zakładach górniczych często dochodzi do powstawania nowych oraz odmłodzenia starych osuwisk. Praktyka inżynierska wskazuje, że w takich warunkach, projektowanie skarp na podstawie parametrów otrzymanych z tradycyjnych metod badań wytrzymałości na ścinanie dla próbek NNS, nie zawsze prowadzi do uzyskania rzeczywistych wskaźników stateczności. Fakt ten związany jest z tym, że zdecydowana większość osuwisk rozwija się w strefach osłabień strukturalnych w górotworze, które bardzo trudno jest odwzorować w badaniach laboratoryjnych.

Uwzględniając niejednorodność ośrodka gruntowo-skalnego w projektowaniu geotechnicznym istotne jest uzyskanie miarodajnych wartości obliczeniowych pozwalających na bezpieczne projektowanie. W praktyce projektowej stosowane są dwa podejścia:

- norma polska – PN-B-03020:1981 – wycofana, ale nadal powszechnie stosowana,
- norma europejska – PN-EN 1997-1:2008P – obowiązująca.

W pierwszym przypadku parametry obliczeniowe wyznacza się ze średnich (charakterystycznych) parametrów w taki sposób, aby prawdopodobieństwo wystąpienia mniej korzystnych wartości decydujących o wystąpieniu stanu granicznego było mniejsze niż 5%, wartość parametru obliczeniowego  $x^{(r)}$  oblicza się przez pomnożenie wartości parametru charakterystycznego  $x^{(n)}$  przez współczynnik materiałowy (bezpieczeństwa)  $\gamma_m$ , który dla metody A wyznacza się ze wzoru:

$$\gamma_m = 1 \pm 1/x^{(n)} \cdot [1/n \cdot \Sigma(x_i - x^{(n)})^2]^{1/2} \quad (1)$$

gdzie:

- $x_i$  – kolejne wartości parametru charakterystycznego,
- $n$  – liczba wyników określonego parametru charakterystycznego (przynajmniej 5).

Najczęściej, ze względu na pojedyncze oznaczenie parametru charakterystycznego, stosowana jest metoda B, dla której współczynnik korygujący wynosi 0,9. Takie podejście pozwala przyjmować do obliczeń 90% wartości parametrów wyznaczonych z bezpośrednich badań laboratoryjnych i/lub terenowych.

Norma Eurokod 7 zaleca wyznaczanie wartości obliczeniowej  $X_d$  poprzez podzielenie wartości charakterystycznej przez określoną wartość współczynnika częściowego (bezpieczeństwa)  $\gamma_M$  (Olek i in. 2014). Ich wartość dla parametrów efektywnych wynosi 1,25 oraz 1,40 przy wyznaczaniu parametrów wytrzymałości na ścinanie bez odpływu oraz parametrów wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Takie założenie daje stosunkowo duży, odpowiednio 20- i niemal 30-procentowy zapas bezpieczeństwa. Wydaje się być to w pełni bezpieczne dla wyznaczenia stanu granicznego nośności GEO oraz analiz stateczności wykopów i niewielkich skarp zbudowanych z jednorodnego materiału gruntowego np. w przypadku analiz ryzyka powstania osuwisk asekwentnych. W przypadku dużych osuwisk powierzchnia poślizgu rozwija się zwykle w strefach osłabień strukturalnych, w których parametry wytrzymałości na ścinanie mogą się znacząco różnić od parametrów względnie jednorodnych warstw geotechnicznych.

Doświadczenia autorów wskazują, że w analizach stateczności skarp dla już istniejących powierzchni poślizgu osuwisk oraz w strefach osłabień ośrodka gruntowego współczynniki korygujące, wyznaczane w opisywanych normach, mogą być niemiernodajne.

## **1. Wpływ powierzchni strukturalnych na wartości parametrów wytrzymałościowych**

W oznaczeniach parametrów oporu na ścinanie najbardziej uzasadnione jest stosowanie takich metod, które zapewniają maksymalne podobieństwo badań modelowych do stanów i procesów zachodzących obecnie oraz w historii naturalnego ośrodka gruntowego, pozwalających na odtworzenie historii obciążenia przy uwzględnieniu stanu naprężenia dla przewidywanej pracy gruntu. Na podstawie wyników badań terenowych można z dużym prawdopodobieństwem określić przebieg powierzchni poślizgu osuwiska. Precyzyjny pobór próbek z samej powierzchni poślizgu jest bardzo trudny, co w znaczący sposób ogranicza możliwość dokładnego wyznaczenia parametrów wytrzymałościowych do obliczeń stateczności.

Wyniki prac i obserwacji prowadzonych na terenie kopalń odkrywkowych węgla brunatnego Turów i Bełchatów wskazują na istnienie silnych związków pomiędzy budową geologiczną nadkładu, a procesami osuwiskowymi (Kaczmarczyk 2004; Borecka i Kaczmarczyk 2008). Przeprowadzone analizy i badania wskazują, że procesy osuwiskowe w zdecydowanej większości przypadków (ok. 90% ogółu i prawie 100% dużych osuwisk) zachodziły na powierzchniach strukturalnych, które mogą mieć różną genezę, rozmiar, właściwości i położenie przestrzenne w obrębie rozpatrywanego górotworu.

Wyniki prac badawczych autorów, oparte na analizie parametrów geotechnicznych 215 próbek, pobranych z 11 powierzchni strukturalnych pozwalają stwierdzić, że czynni-

kiem odgrywającym najistotniejszą rolę w kształtowaniu wartości oporów ścinania na powierzchniach strukturalnych jest charakter naruszenia powierzchni (nienaruszone, naruszone bez przemieszczenia, naruszone z przemieszczeniem). Ważną rolę odgrywają również takie czynniki, jak: typ i morfologia powierzchni strukturalnej oraz stan konsystencji gruntów w obrębie takich powierzchni. W analizowanych odkrywkach naruszenie powierzchni strukturalnych było wynikiem zarówno naturalnych procesów geologicznych takich jak: ruchy tektoniczne, glacitektoniczne, paleosuwiskowe, jak i procesów wtórnych (antropogenicznych), będących wynikiem prowadzonych prac górniczych.

Różnorodność przyczyn powstania powierzchni strukturalnych sprawia, że mogą być one klasyfikowane według różnych kryteriów.

Przykładowe klasyfikacje – genetyczna i geologiczno-inżynierska zostały zamieszczone w pracy zespołu Rybickiego (2000) (tab. 1). Klasyfikacja genetyczna została oparta na kryteriach uwzględniających sposób powstania powierzchni i procesy jakim następnie podlegała, a klasyfikacja geologiczno-inżynierska – na kryteriach uwzględniających wpływ charakteru powierzchni na stateczność górotworu.

TABELA 1. Klasyfikacja powierzchni strukturalnych w górotworze kopalń węgla brunatnego (na podstawie Rybicki i in. 2000)

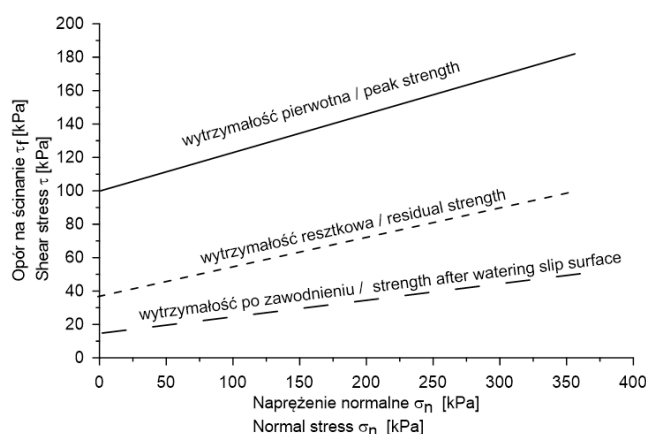
TABLE 1. Structural surfaces classification in the rock mass brown coal mines (by Rybicki et al. 2000)

Klasyfikacja	Kryteria wydzielenia i typy powierzchni strukturalnych
A – genetyczna  (uwzględnia sposób powstania powierzchni strukturalnej i procesy, jakim podlegała)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Powierzchnie akumulacyjne (powierzchnie graniczne warstw, lamin, ławic różnych lub podobnych odmian litologicznych gruntu o normalnym następstwie stratygraficznym).</li> <li>2. Powierzchnie degradacyjne (powierzchnie erozyjne, egzarycyjne).</li> <li>3. Powierzchnie deformacyjne (powierzchnie tektoniczne, glacitektoniczne, wczesnodiagenetyczne – powierzchnie uskoków, nasunięć, spękań, zlustrowań).</li> <li>4. Powierzchnie antropogeniczne (utworzone poprzez zwałowanie, nasypywanie, składowanie gruntów na podłożu rodzimym, lub nasypowym) ił–piasek, węgiel–piasek itp.).</li> </ol>
B – geologiczno-inżynierska  (uwzględnia wpływ różnych cech powierzchni na wytrzymałość i stateczność górotworu oraz jego warunki wodne)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Następstwo litologiczne warstw – (np. powierzchnie kontaktowe ił–węgiel, ił–piasek itp.).</li> <li>2. Cechy morfologiczno-strukturalne powierzchni (powierzchnie konsekwentne – zgodne z nachyleniem skarp lub zbocza; powierzchnie asekwentne – przeciwnie zapadające do kierunku nachylenia skarp lub zbocza; insekwentne – poziome lub zapadające zgodnie z rozciągłością skarp lub zbocza).</li> <li>3. Rozległość powierzchni strukturalnej (makropowierzchnie, mezopowierzchnie, mikropowierzchnie obejmujące odpowiednio całość, część lub nieznaczną część rozpatrywanego elementu górotworu).</li> <li>4. Częstotliwość występowania (powierzchnie sporadyczne samodzielne, powierzchnie występujące często i zespołowo, powierzchnie występujące nieregularnie i masowo np. mikrostruktury).</li> <li>5. Ukształtowanie powierzchni (powierzchnie płaskie, wklęsłe lub wypukłe, faliste).</li> <li>6. Stopień zawodnienia powierzchni (nawodnione – wypływy grawitacyjne wody; mokre – wilgotność powierzchni większa niż otoczenia; naturalnie wilgotne – wilgotność powierzchni taka jak otoczenia; podsuszone – wilgotność powierzchni mniejsza niż otoczenia).</li> </ol>

Odkrywkowy system eksploatacji złóż węgla brunatnego związany jest z koniecznością wydobywania i przemieszczenia bardzo dużych objętości gruntów. Zdejmowanie nadkładu złoża wpływa na wzrost objętości gruntów wskutek ich odprężenia. Niejednorodność budowy strukturalnej górotworu przyczynia się do zróżnicowania przyrostów objętości pomiędzy poszczególnymi warstwami geologicznymi powodując powstanie dodatkowych naprężeń stycznych na kontaktach różniących się warstw lub na innych powierzchniach strukturalnych (Burland i in. 1977). Zjawisko to jest szczególnie widoczne w przypadku kontaktów utworów o różnych właściwościach sprężystych np. węgla i łu, gruntów przekonsolidowanych i normalnie skonsolidowanych oraz w obrębie pokładów węgla (np. powstawanie szczelin odprężeniowych). Na takich kontaktach następuje znaczące zmniejszenie parametrów wytrzymałościowych.

Naruszenie powierzchni strukturalnych może oddziaływać na zmiany warunków wodnych w obrębie górotworu, co w konsekwencji prowadzi do powstania nowych dróg filtracji wód złożowych i opadowych. Konsekwencją zawodnienia powierzchni strukturalnych są zmiany parametrów fizyko-mechanicznych gruntów. Zwykle na naruszonych powierzchniach strukturalnych, grunty wykazują większy stopień plastyczności niż na powierzchniach nienaruszonych. Wzrost zawodnienia jest czynnikiem odgrywającym bardzo istotną rolę w projektowaniu geologiczno-inżynierskim i geotechnicznym, gdyż wynikające z niego zmiany wilgotności i stanu konsystencji gruntów zawsze prowadzą do dalszego zmniejszania się wytrzymałości na ścinanie.

W takich warunkach, sprawdzonym przez autorów sposobem, na uzyskanie realnych wartości parametrów wytrzymałościowych, jest oznaczenie wytrzymałości resztkowej wyznaczonej na długiej drodze ścinania, w wyniku kilkukrotnego ścięcia tej samej próbki. W warunkach zawodnienia powierzchni poślizgu osuwisk, wskazane jest wyznaczenie wytrzymałości resztkowej po zawodnieniu próbki (Kaczmarczyk 2004; Kaczmarczyk i in. 2006). Wzajemna relacja pomiędzy wytrzymałością pierwotną, resztkową oraz po zawodnieniu w funkcji naprężeń normalnych została zobrazowana na rysunku 1.



Rys. 1. Wzajemne relacje pomiędzy wytrzymałością na ścinanie dla parametrów pierwotnych, resztkowych i po zawodnieniu w funkcji naprężeń normalnych (Kaczmarczyk 2004)

Fig. 1. Determination of shear strength for peak, residual and after watering slip surface parameters in normal stress function (Kaczmarczyk 2004)

## 2. Współczynniki korygujące wartości parametrów wytrzymałościowych

Na powierzchniach poślizgu osuwisk do oceny zmniejszenia wytrzymałości na ścinanie przy przejściu od wytrzymałości maksymalnej ( $\tau_f$ ) do resztkowej ( $\tau_r$ ) można wykorzystać wskaźnik  $\lambda_R$  zaproponowany przez Haeefelego (1965) lub wskaźnik  $I_B$  podany przez Bishopa (1967):

$$\lambda_R = \frac{\tau_r}{\tau_f} \quad (2)$$

$$I_B = \frac{\tau_f - \tau_r}{\tau_f} \cdot 100\% \quad (3)$$

Wskaźnik Bishopa ( $I_B$ ) określa procent spadku wytrzymałości, który może być wynikiem postępującego zniszczenia w gruncie, zaś wskaźnik Haeefelego ( $\lambda_R$ ) określa wartość zmian dla wytrzymałości resztkowej lub wytrzymałości po zawodnieniu powierzchni ścicia w stosunku do wytrzymałości maksymalnej. Jeżeli zostanie on wyrażony w postaci procentowej, pomiędzy obydwoma wskaźnikami istnieje prosta zależność:

$$I_B = 100 - \lambda_R \quad (4)$$

Oba wskaźniki pozwalają na ilościowe oszacowanie zmian wytrzymałości całkowitej. Oznaczenie wielkości zmian oporu ścinania może być w wielu przypadkach niewystarczające. W obliczeniach stateczności skarp istotna jest nie tylko zmiana całkowitego oporu ścinania, ale przede wszystkim zmiana wartości każdego składnika parametrów wytrzymałości na ścinanie. Trudno jest precyzyjnie określić, w jakim stopniu spadek wytrzymałości jest powiązany ze zmianami kąta tarcia wewnętrznego i spójności. Także literatura nie zawiera jednoznacznej odpowiedzi na ten problem. Można spotkać opinie (np. [Instrukcja obserwacji i badań osuwisk drogowych 1999](#)), że na powierzchniach poślizgu osuwisk dochodzi do jednakowego (równomiernego) spadku zarówno kąta tarcia wewnętrznego oraz spójności gruntu. Przyjęcie takiego rozwiązania jest, zdaniem autorów, zbytnim uproszczeniem problemu. Parametry te zależą od wielu czynników, a niektóre z nich jak np. skład mineralny czy wielkość ziaren mogą mieć wpływ na wzrost jednego z nich i zmniejszenie się wartości drugiego. Zmiana oporów tarcia i sił spójności na powierzchniach poślizgu osuwisk (długiej drodze ścinania) jest zróżnicowana co do wartości, zatem do oceny stateczności wskazane jest oddzielne ich wyznaczenie.

Autorzy proponują przyjęcie dwóch wskaźników:

- $\lambda_\phi$  dla oceny zmian kąta tarcia wewnętrznego oraz
- $\lambda_c$  dla oceny zmian spójności, w następującej postaci:

$$\lambda_\phi = \frac{\phi_r}{\phi_f} \quad \text{lub} \quad \lambda_{\phi_w} = \frac{\phi_w}{\phi_f} \quad (5)$$

gdzie:

- $\lambda_\varphi$  – wskaźnik zmian kąta tarcia wewnętrznego (odpowiednio dla parametrów reszkowych i po zawodnieniu),
- $\varphi_r$  – rezydualny kąt tarcia wewnętrznego [°],
- $\varphi_w$  – kąt tarcia wewnętrznego po zawodnieniu [°],
- $\varphi_f$  – pierwotny kąt tarcia wewnętrznego [°].

$$\lambda_c = \frac{c_r}{c_f} \quad \text{lub} \quad \lambda_{cw} = \frac{c_w}{c_f} \quad (6)$$

gdzie:

- $\lambda_c$  – wskaźnik zmian spójności (odpowiednio dla parametrów reszkowych i po zawodnieniu),
- $c_r$  – rezydualna wartość spójności [kPa],
- $c_w$  – wartość spójności po zawodnieniu [kPa],
- $c_f$  – pierwotna wartość spójności [kPa].

### 3. Badania testowe

Przeprowadzono 380 ścięć 215 próbek pobranych z 11 powierzchni strukturalnych znajdujących się na terenie odkrywkowych zakładów górniczych Turów i Bełchatów.

Badania wytrzymałości na ścinanie wykonano w aparacie bezpośredniego ścinania typu AB-2a. Z uwagi na fakt, iż w wielu próbkach strefa oddzielności była stosunkowo nierówno, czasami nieostro wykształcona, pomiędzy dolną a górną częścią dwudzielnej karetki aparatu umieszczono 7–8 ramek o łącznej wysokości około 1,5 cm. Zastosowanie ramek pozwoliło na takie umieszczenie próbek w skrzynce aparatu, aby przebieg płaszczyzny poślizgu nie był wymuszany po ściśle określonej powierzchni. Próbki umieszczono w karetkie zgodnie z orientacją w warunkach *in situ*.

Badania prowadzono do odkształcenia około 20%. Po oznaczeniu wytrzymałości pierwotnej karetkę aparatu cofano do położenia początkowego powtarzając tą czynność, aż do ustalenia się oporów na ścinanie czyli osiągnięcia przez próbkę wytrzymałości reszkowej. Następnie próbka pozostając bez obciążenia w karetkie, była zalewana wodą w celu zawodnienia powierzchni poślizgu. Po zawodnieniu próbkę pozostawiano na co najmniej 5 godzin, a następnie oznaczano wytrzymałość na ścinanie. Zestawione wyniki badań (tab. 2) potwierdzają, że w strefach zagrożeń osuwiskowych obserwuje się znaczne zmniejszenie parametrów wytrzymałościowych względem tych, które wynikają z wyznaczenia parametrów obliczeniowych według normy polskiej i europejskiej. Przeciętnie dla parametrów reszkowych wartość kąta tarcia wewnętrznego zmniejszyła się o około 28%, a spójności o 40% w stosunku do parametrów pierwotnych. We wszystkich próbkach po zawodnieniu powierzchni poślizgu zaobserwowano dalsze kilkunasto-, a nawet kilkudziesięcioprocentowe zmniejszenie oporów ścinania. Średnia wartość parametrów wytrzymałości na ścinanie zmniejszyła się o około 50% dla kąta tarcia wewnętrznego i 60% dla spójności.

Wyniki badań wskazują na duże zróżnicowanie zmian oporów ścinania. Ogólnie biorąc, zmiana parametrów wytrzymałości na powierzchniach nieciągłości w stosunku do wytrzy-

TABELA 2. Wskaźniki zmian parametrów wytrzymałościowych

TABLE 2. Indicators of changes of strength parameters

Opis próbek	Rodzaj powierzchni	Stan konsystencji	Wskaźniki zmian dla parametrów resztkowych		Wskaźniki zmian dla parametrów po zawodnieniu	
			$\lambda_\phi = \frac{\phi_r}{\phi_f}$	$\lambda_c = \frac{c_r}{c_f}$	$\lambda_{\phi_w} = \frac{\phi_w}{\phi_f}$	$\lambda_{c_w} = \frac{c_w}{c_f}$
KWB Turów						
Próbki monolityczne (iły zawęglone)		zw	1,08	0,14	–	–
Powierzchnie Kontaktów ił-węgiel	akumulacyjne – nienaruszone	pzw/zw	0,61	0,19	0,57	0,18
	akumulacyjne – naruszone	tpl	0,63	0,61	0,63	0,35
	erozyjne – nienaruszone	zw	0,83	0,29	0,32	0,22
	erozyjne – naruszone	tpl	0,48	0,87	0,40	0,94
Powierzchnie kontaktów ił-węgiel	deformacyjne	tpl/pl	0,79	0,55	0,68	0,20
KWB Bełchatów						
Powierzchnie kontaktów ił-węgiel	akumulacyjne – naruszone	pzw	0,72	0,59	0,97	0,03
	akumulacyjno-deformacyjne	tpl/pl	0,50	0,98	0,22	0,86
Powierzchnie zlustrowań w iłach podwęglowych	akumulacyjno-deformacyjne	pzw	0,91	0,56	0,35	0,42
Powierzchnie zlustrowań w iłach zwietrzelinowych	deformacyjne	pzw	0,62	0,82	0,37	0,21
Powierzchnie zlustrowań w iłach (uskok)	deformacyjne	pzw	0,93	0,53	0,65	0,47
Powierzchnie zlustrowań w iłach zielonych z soczewkami piasku	deformacyjne	pzw	0,63	0,88	0,46	0,45
Powierzchnie zlustrowań w iłach z marglem	deformacyjne	pzw	0,94	0,34	0,7	0,40
Powierzchnia kontaktu zwietrzelin podłoża mezozoicznego z iłami kompleksu iłasto-piaszczystego	erozyjne – naruszone	pzw	0,86	0,65	0,56	0,52



małości masywu jest tym większa, im większa jest wytrzymałość utworów budujących masyw. Ten wpływ w próbkach gruntów o konsystencji zwartej i o nienaruszonej strukturze jest większy niż w tych samych gruntach o konsystencji twaroplastycznej i plastycznej. Największe spadki wytrzymałości zanotowano dla próbek o nienaruszonej strukturze w półzwarłym stanie konsystencji, mniejsze na powierzchniach strukturalnych w twaroplastycznym stanie konsystencji. Najmniejsze zmiany wytrzymałości zanotowano na naruszonych powierzchniach o konsystencji plastycznej.

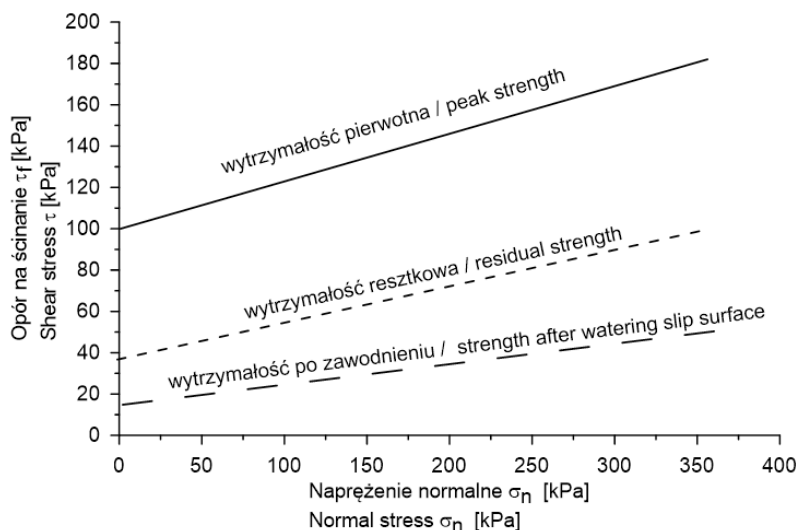
Celem dokonania szczegółowej analizy uzyskanych wyników zdecydowano się utworzyć grupy próbek, uwzględniając charakter powierzchni strukturalnej, rodzaj kontaktujących się utworów, stan konsystencji gruntu na powierzchni strukturalnej i w jej otoczeniu oraz stopień naruszenia powierzchni strukturalnej.

Wyniki badań przedstawiono w tabeli 2.

Analizując wyniki zmian wytrzymałości, należy zwrócić uwagę na fakt, że przedstawiają one względną zmianę wytrzymałości na ścinanie, tj. wartość zmniejszenia się wytrzymałości w stosunku do wytrzymałości maksymalnej w danej grupie próbek (rys. 2 i 3).

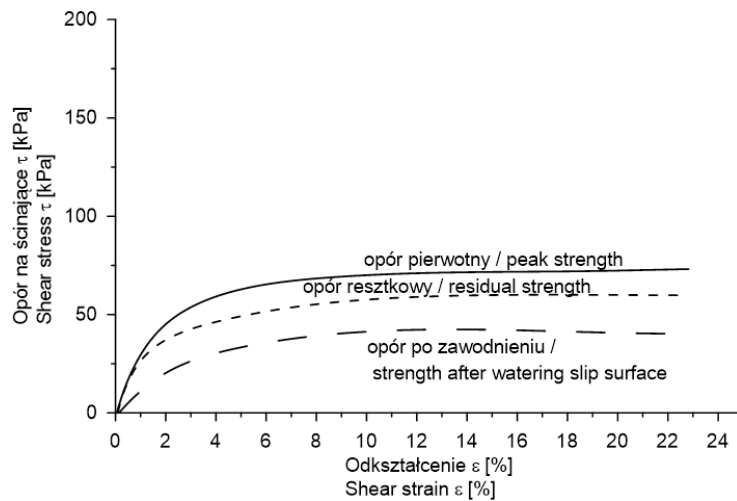
W gruntach o konsystencji zwartej i nienaruszonej strukturze wytrzymałość przy ścięciu pierwotnym była znacząco większa niż w próbkach o strukturze naruszonej. W próbkach o strukturze nienaruszonej pomimo znacznej nawet 70-procentowej redukcji oporów ścinania, wartość wytrzymałości resztkowej i wytrzymałości po zawodnieniu była zwykle większa niż w próbkach o naruszonej strukturze dla tego samego rodzaju gruntu.

W próbkach monolitycznych o konsystencji zwartej podczas ścinania zazwyczaj nie występowała wyraźna pojedyncza płaszczyzna poślizgu, lecz strefa ścięcia, w obrębie której dochodziło do zniszczenia i kruszenia gruntu (rys. 4). W obrębie ramek karetki aparatu bezpośredniego ścinania badany grunt ulegał pękaniu i kruszeniu, wpłynęło to na wysokie wartości kąta tarcia wewnętrznego dla ścięć pierwotnych i resztkowych. Spadek oporów



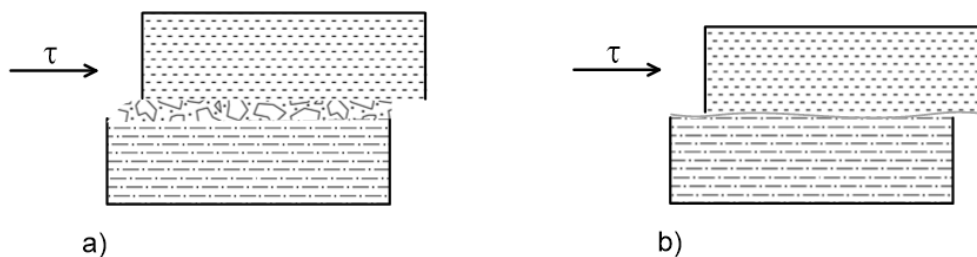
Rys. 2. Wykresy zmian oporu na ścinanie dla gruntów o strukturze nienaruszonej

Fig. 2. Determination of shear strength for soils structure intact



Rys. 3. Wykresy zmian oporu na ścinanie dla gruntów o strukturze naruszonej

Fig. 3. Determination of shear strength for soils structure disturbed



Rys. 4. Przebieg powierzchni ścięcia w próbkach o konsystencji zwartej i nienaruszonej (a) i próbkach o konsystencji plastycznej lub naruszonej strukturze (b)

Fig. 4. The failure zone of solid intact structure samples (a) and plastic consistency samples or disturbed structures (b)

ścianania był wynikiem niszczenia spójności strukturalnej gruntu. Jest to spójność nieodwracalna, ulegająca całkowitemu zniszczeniu podczas ścinania.

W gruntach ilastych zwłaszcza o konsystencji plastycznej oprócz spójności strukturalnej występuje spójność wodno-koloidalna, która jest spójnością odwracalną. Sprawia ona, że naruszenie struktury w gruncie ilastym (jego ścięcie, osunięcie, spękanie itp.), nie powoduje znaczącej zmiany parametrów wytrzymałościowych. Dla naruszonych powierzchni strukturalnych spadek oporów ścinania był wynikiem zarówno zmian kąta tarcia wewnętrznego, jak i spójności. We wszystkich próbkach po zawodnieniu powierzchni poślizgu zaobserwowano znaczne kilkunasto-, kilkudziesięcioprocentowe zmniejszenie oporów ścinania w stosunku do wytrzymałości resztkowej. Wielkość zmian oporów ścinania zależała od wypadkowej

kilku czynników, były to głównie: rodzaj gruntu, jego podatność na rozmakanie, morfologia przebiegu powierzchni nieciągłości, typ powierzchni strukturalnej oraz stan konsystencji gruntu przed zawodnieniem itp.

### Podsumowanie

Rezultaty przeprowadzonych badań wskazują, że w strefach zagrożenia osuwiskowego zastosowanie do obliczeń stateczności skarp wartości obliczeniowych wyznaczonych według normy polskiej – PN-B-03020:1981 lub europejskiej – Eurokod 7 (PN-EN 1997-1:2008P) może być niewystarczające dla uzyskania prawidłowej oceny stateczności. Zwykle na powierzchniach osłabień strukturalnych obserwuje się spadek wartości parametrów wytrzymałościowych. Wyniki ścinania próbek nie pozwalają na jednoznaczne wskazanie uniwersalnych wartości zmian wskaźników parametrów wytrzymałościowych dla wszystkich powierzchni osłabień strukturalnych. Zmiany te są wyraźnie zróżnicowane dla kąta tarcia wewnętrznego i spójności. W próbkach pobranych z gruntów o strukturze nienaruszonej zmniejszenie się oporów ścinania było w znacznej mierze wynikiem redukcji spójności. Z kolei na powierzchniach o naruszonej strukturze tendencje zmian parametrów wytrzymałościowych nie są tak wyraźne i zależą od wielu różnych czynników. Są to: rodzaj gruntu, morfologia powierzchni strukturalnej, stan konsystencji i zmiany zachodzące na powierzchni strukturalnej po jej naruszeniu.

Bardzo istotny wpływ na wartości kąta tarcia wewnętrznego mają również fragmenty gruntu słabo związane z powierzchnią nieciągłości, takie jak wzajemnie zazębające się i klinujące fragmenty ilu lub węgla. Opór ścinania w strefach kontaktów warstw określany był jako wytrzymałość powierzchni nieciągłości (efekt ruchu translacyjnego) oraz swobodnym przemieszczaniem się elementów niezwiązanych z powierzchnią (okruchów i kawałków) o różnym kształcie i wymiarach (efekt ruchu translacyjnego i rotacyjnego). Powierzchnie spękań w gruntach ilastych są w wielu przypadkach sklezione (zabliźnione). Spójność na takich powierzchniach jest wartością zależną od takich czynników jak: rodzaj gruntu, jego stopień plastyczności, wielkość nacisku nadkładu i czas oddziaływania oraz wtórnych procesów fizykochemicznych na powierzchniach.

### LITERATURA

- Bishop, A. 1967. Progressive failure-with special reference to the mechanism causing it [W:] *Proc. of the Geotechnical Conference of Shear Strength Properties of Natural Soils and Rock*, Oslo, Norway, s. 142–150.
- Borecka, A. i Kaczmarczyk, R. 2008. Czynniki wpływające na parametry wytrzymałości na ścinanie w strefach zagrożeń osuwiskowych na przykładzie odkrywek węgla brunatnego. *Geologia: kwartalnik AGH* 34 (4), s. 709–719.
- Burland i in. 1977 – Burland, J.B, Longworth, T.J. i Moore, J.F 1977. A study of ground movement and progressive failure caused by a deep excavation in Oxford Clay. *Geotechnique* 27 (4), s. 557–591.
- Haefeli, R. 1965. *Creep and progressive failure in snow, soil, rock and ice* [W:] *Proceedings 6th Int. Conference Soil Mechanics*, Montreal, Canada.
- Instrukcja obserwacji i badań osuwisk drogowych. Generalna Dyrekcja dróg publicznych. Warszawa 1999.
- Kaczmarczyk, R. 2004. *Geologiczno-inżynierska charakterystyka głównych powierzchni strukturalnych w górotworze wybranych złóż węgla brunatnego*. Dysertacja doktorska. Kraków.

- Kaczmarczyk i in. 2006 – Kaczmarczyk, R., Woźniak, H. i Borecka, A. 2006. Wytrzymałość na ścinanie stref kontaktów warstw w górotworze złóż węgla brunatnego. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budownictwo* 28 (1), s. 147–154.
- PN-B-03020:1981 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- Olek i in. 2014 – Olek, B., Woźniak, H. i Stanisław, J. 2014. Metody statystyczne stosowane do wyznaczania parametrów geotechnicznych. *Przegląd Geologiczny* 62, s. 657–663.
- PN-EN 1997-1:2008P Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- Rybicki i in. 2000 – Rybicki, S., Herzig, J., Kaczmarczyk, R. i Tylikowski, M. 2000. Geologiczno-inżynierska charakterystyka głównych powierzchni strukturalnych w nadkładzie niektórych złóż węgla brunatnego. *Górnictwo Odkrywkowe* XLII, s. 106–120.