

Mirosława Bukowska, Antoni Kidybiński

WPLYW CZYNNIKÓW NATURALNYCH MASYWU SKALNEGO NA JEGO WYTRZYMAŁOŚĆ OKREŚLONĄ METODAMI PENETROMETRYCZNĄ I LABORATORYJNĄ

Streszczenie

W latach siedemdziesiątych w Głównym Instytucie Górniczym opracowano penetrometryczną metodę badania wytrzymałości skał w otworach wiertniczych wykonywanych na ogół w stropie wyrobisk górniczych. Wyniki badań wytrzymałościowych skał tworzących strop wyrobisk, uzyskiwane tą metodą, stanowią podstawę do oceny jego stateczności i doboru optymalnej obudowy podporowej lub kotwiowej.

Ze względu na to, że do obliczania stateczności górotworu używa się standardowych wyników badań laboratoryjnych, takich jak: wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (R_c , MPa), wytrzymałość na rozciąganie (R_r , MPa), moduł odkształcenia (E_o , MPa) itp., konieczne było znalezienie korelacji między wynikami tych badań a oporem (krytycznym ciśnieniem) penetracji, będącym wynikiem badań penetrometrycznych. Dokonano tego sposobem przybliżonym, bez szczegółowej analizy wilgotności i szczelinowości skał i otrzymano współczynnik przeliczeniowy krytycznego ciśnienia penetracji na wytrzymałość na ściskanie wynoszący 1,2 i współczynnik przeliczeniowy krytycznego ciśnienia penetracji na wytrzymałość na rozciąganie równy 0,077. Stosowanie tych współczynników przez wiele lat wykazało, że w szeregu przypadkach zachodzą znaczne odchylenia uzyskanych w ten sposób wyników od wyników badań laboratoryjnych. Wobec powyższego przeprowadzono powtórne próby korelacji, w których uwzględniono zmienność litologiczną skał, ich wilgotność oraz stan spękania.

Dla skał płonnych oraz dla węgla pokładów GZW obliczono liczbę $a = R_c / p_m$ wyrażającą stosunek wytrzymałości na ściskanie do maksymalnego ciśnienia penetrometrycznego oraz liczbę $b = R_r / p_m$ będącą stosunkiem wytrzymałości na rozciąganie do niszczonego ciśnienia penetrometrycznego. Rozrzut wartości liczby a dla wszystkich przebadanych skał wraz z wartościami średnimi przedstawiono na rysunku 1. Wartości liczby a zależą od rodzaju skały i wynoszą 0,7–1,9, średnio dla całej populacji przebadanych próbek skalnych $a = 1,3$. Zmienność wartości liczby a dla poszczególnych odmian litologicznych z tych rejonów badań, gdzie pomiary ciśnień niszczących nie były obniżone oddziaływaniem różnych czynników naturalnych, w tym spękań i powierzchni osłabienia, przedstawiono na rysunku 2. Mieszczą się one w przedziale wartości 0,72–1,18. Zróżnicowanie wartości liczby b wyrażającej stosunek laboratoryjnej wytrzymałości na rozciąganie do niszczonego ciśnienia penetrometrycznego in situ zilustrowano na rysunku 5. Wartości liczby b zależą od rodzaju skały i zawierają się w przedziale wartości 0,037–0,073.

Badania laboratoryjne wytrzymałości skał na ściskanie wykonano na próbach w stanie powietrzno-suchym (ps) oraz, po raz pierwszy w badaniach geomechanicznych, w stanie nasycenia kapilarnego (nk). Spośród badanych typów skał najwyższy współczynnik korelacji pomiędzy wytrzymałością na ściskanie określoną w stanie powietrzno-suchym i w stanie nasycenia kapilarnego wykazały piaskowce (rys. 4). Spadek wytrzymałości na ściskanie w stanie nasycenia kapilarnego w stosunku do wytrzymałości w stanie powietrzno-suchym wyniósł od 20 do 40%. Z uwagi na różnice w wilgotności naturalnej górotworu i próbek laboratoryjnych, zalecono przeprowadzanie badań laboratoryjnych piaskowców w stanie nasycenia kapilarnego nawiązującego do wilgotności naturalnej skał i do nasycenia skał wodą w strefie przyotworowej, do którego dochodzi w strefie oddziaływania płuczki wiertniczej, a badania mułowców, iłowców i węgla w stanie powietrzno-suchym, który w przybliżeniu odpowiada wilgotności naturalnej po odsączeniu z górotworu wody wolnej.

Różnice w wytrzymałości próbek laboratoryjnych oraz ciśnień krytycznych iglicy penetrometru otworowego mogą również wynikać z oddziaływania tzw. czynnika skali, czyli różnicy wielkości (objętości) obciążanego w badaniach obszaru skały. Autorzy przeprowadzili obliczenia wpływu defektów strukturalnych na różnice wytrzymałości według teorii Weibulla i Hoeka/Browna, na podstawie których stwierdzili, że wzrost wymiaru próbki z 5 mm (średnica iglicy) do 50 mm (wymiar próbki laboratoryjnej) powoduje spadek wytrzymałości skał średnio od 33,7% (wg Hoeka/Browna) do 57,7% (wg Weibulla) i tylko w nieznacznym stopniu jest uzależniony od rodzaju skały. Wyższe wartości p_m w stosunku do R_c tych samych skał mogą być interpretowane jako skutek odmiennego stanu naprężeń w badaniach laboratoryjnych (jednoosiowe ściskanie) oraz próbie penetrometrycznej (wciskanie tłoczniaka w półprzestrzeń materialną), jakkolwiek przy małej grubości warstwy obciążanej tłoczkiem penetrometru wpływ tego czynnika jest zapewne niewielki.

Wpływ spękań i powierzchni osłabienia obserwowany był w przypadku piaskowców i iłowców. Badaniami stwierdzono spadek niszczonego ciśnienia penetrometrycznego w stosunku do wytrzymałości na ściskanie o 23÷66%.

Mając na uwadze fakt, że w czasie badań wykonywanych penetrometrem otworowym szczegółowe zidentyfikowanie odmiany litologicznej w otworze na określonej głębokości jest często bardzo trudne, można zalecić stosowanie ogólnego współczynnika przeliczeniowego a o wartości 1,0, a współczynnika b o wartości 0,055.

Impact of natural features of the rockmass on its strength determined by penetrometric and laboratory methods

Summary

In the 1970s at the Central Mining Institute a penetrometric testing method was worked out, related to rock strength in boreholes, made mostly within roof strata of mine openings. Results of strength tests on rocks obtained when using this method made it possible to assess roof stability and to select optimum standing supports or roof bolting system.

Having in mind that for rock mass stability calculations standard laboratory test results are used, such as uniaxial compressive strength (R_c , MPa), tensile strength (R_r , MPa) and deformation modulus (E_o , MPa) it was necessary to find correlation between results of these tests and penetration resistance (ultimate pressure) resulting from penetrometer tests. This was carried out by means of an approximate method, without detailed analysis of rock humidity and fracturing, and coefficient of ultimate pressure conversion to compressive strength, valued 1.2, was obtained (0.077 for tensile strength). The use of these coefficients throughout the years has shown that in some cases deviations of results obtained in this manner from the results of laboratory tests were considerable. New correlation tests were carried out therefore taking account of lithologic variety of rocks, their humidity and fracturing status.

For barren rocks and coal from Silesian seams the number $a = R_{c\ ps}/p_m$ has been calculated, where $R_{c\ ps}$ is compressive strength and p_m is maximum penetrometric pressure, as well as number $b = R_{r\ ps}/p_m$, where $R_{r\ ps}$ is tensile strength. The scatter of a for all tested rocks along with the average values were presented in Fig. 1. The value of a depends on type of rock and amounts 0.7÷1.9, (1.3 being an average). Variation of a for lithologic species from those areas where pressure measurements were not affected by structural factor such as fissures and cleats is presented in Fig. 2 and ranges from 0.72 to 1.18.

The scatter of b is shown in Fig. 5 where various rocks differ from 0.037 to 0.073.

Laboratory tests of compressive strength were carried out on samples in air-dry state (ps) and in capillary saturation state (nk). Among tested types of rocks sandstones have the highest correlation coefficient between compressive strength determined in air-dry state and capillary saturation (Fig. 4). Drop of compressive strength in capillary saturation state in relation to strength in air-dry state amounted from 20 to 40 per cent. Considering differences between natural humidity of rockmass and laboratory samples it is recommended to carry out laboratory tests on sandstones in capillary saturation state but tests on mudstones, shales, and coal in air-dry state.

Differences regarding strength of laboratory samples and ultimate pressures at borehole penetrometer plunger can also result from scale factor, i.e. difference between magnitude (volume) of rock area loaded. Authors performed calculations related to effect of structural defects on strength according to Weibull's and Hoek/Brown's theories. It was found that increasing of sample size from 5 mm (plunger diameter) to

50 mm (laboratory sample size) causes strength drop of 33.7% (Hoek/Brown) to 57.7% (Weibull) of laboratory value and do not depend on rock type. Higher p_m in relation to R_c of the same rocks can be interpreted as a result of different stress state in laboratory tests (uniaxial compression) and penetrometric test (piston element penetration) however in case of low thickness of layer loaded effect of this factor is insignificant.

The influence of fissures and fractures was observed in case of sandstones and shales, as a drop of penetrometer pressure in relation to laboratory tests by 23-66 per cent.

Finally, having in mind that during penetrometer testing lithological layers in borehole are hard to detect it is recommended to use conversion coefficient a of 1.0 but coefficient b of 0.055 value.

1. WSTĘP

W latach siedemdziesiątych w Głównym Instytucie Górnictwa opracowano penetrometryczną metodę badania wytrzymałości skał w otworach wiertniczych, wykonywanych na ogół w stropach wyrobisk górniczych. Wyniki badań wytrzymałości skał tworzących strop wyrobisk, uzyskiwane tą metodą, stanowią podstawę do oceny jego stateczności i doboru optymalnej obudowy podporowej lub kotwiowej. Konieczność opracowania takiej metody była spowodowana małym uzyskiem rdzeni wiertniczych służących do sporządzania próbek laboratoryjnych do badań wytrzymałościowych, wynikającym z niskiego poziomu wiertnictwa kopalnianego. Pobrane z otworów rdzenie i wycięte z nich próbki reprezentowały tylko najmocniejsze skały warstw karbońskich, wyniki badań laboratoryjnych były więc zawyżone w stosunku do rzeczywistych właściwości pakietu skał.

Ze względu na to, że podstawę obliczeń stateczności górotworu stanowią standardowe wyniki badań laboratoryjnych, takie jak: wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (R_c , MPa), wytrzymałość na rozciąganie (R_r , MPa), moduł odkształcenia (E_o , MPa) itp., konieczne było znalezienie korelacji między wynikami tych badań a oporem (krytycznym ciśnieniem) penetracji, będącym wynikiem badań penetrometrycznych. Dokonano tego sposobem przybliżonym bez szczegółowej analizy wilgotności i szczelinowatości skał, otrzymując współczynniki przeliczeniowe (krytycznego ciśnienia penetracji płaskiego tłoczka o średnicy 5 mm, MPa) p_m na wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie R_c i rozciąganie R_r . Stosowanie tych współczynników przez wiele lat wykazało, że w niektórych przypadkach odchylenia uzyskanych w ten sposób wyników od wyników porównawczych badań laboratoryjnych są znaczne – zaistniała przeto potrzeba przeprowadzania systematycznych prób korelacyjnych uwzględniających zmienność litologiczną skał, ich wilgotność oraz stan spękania.

2. WPŁYW RÓŻNIC LITOLOGICZNYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ

Wśród karbońskich skał osadowych formacji węglonośnej Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW), stanowiących otoczenie pokładów węglowych, występują głównie piaskowce, mułowce i iłowce, podrzędnie zlepieńce. Warstwy karbońskie nie są jednorodne, często w obrębie każdego z wymienionych typów skał występują inne, w postaci przewarstwień, konkrekcji lub innych form.

Badaniami objęto piaskowce drobnoziarniste, wśród których często występował detrytus roślinny, czasem obecne były kongregacje syderytów ilastych, a laminacja podkreślona była sedymentacją substancji węglowej. W niektórych próbkach widoczne były żyłki węglanowe grubości kilku milimetrów, a czasem warstewki mułowca. Ponadto, przebadano mułowce, które charakteryzowały się obecnością lamin i warstewek piaskowców drobnoziarnistych, a także ilowce. Iłowce cechowały się zmiennym zapiaszczeniem, obecnością lamin węgla błyszczącego, żyłek węglanowych i lokalnie detrytusu roślinnego.

Metodą laboratoryjną oznaczono wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie i rozciąganie skał pochodzących z poligonów badawczych (tabl. 1). Na tych samych poligonach określono wytrzymałość skał w warunkach naturalnego ich zalegania za pomocą penetrometru otworowego.

Tablica 1. Udział skał w profilu pionowym poligonowych otworów wiertniczych

Grupa stratygraficzna	Udział skał w profilu pionowym otworów wiertniczych, %			
	warstwy łaziskie	skała	KWK Piast, strop p. 207 (6 m)	
p-c		100		100
warstwy rudzkie	skała	KWK Makoszowy strop p. 404/2 (7 m)	KWK Makoszowy strop p. 407/1 (4,2 m)	KWK Szczygłowice strop p. 403/1 (2,6 m)
	p-c	–	29	100
	m-c	–	62	–
	i-c	100	9	–
warstwy siodłowe	skała	ZG Piekary, strop p. 510 (4 m)		
	p-c	25		
	i-c	75		

Dla wymienionych skał oraz dla węgla pokładów 351/1, 401/1, 403/1 i 407/2 z KWK Szczygłowice obliczono liczbę $a = R_{c\ ps}/p_m$ oraz liczbę $b = R_{r\ ps}/p_m$ obrazujące wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie obliczone obiema metodami.

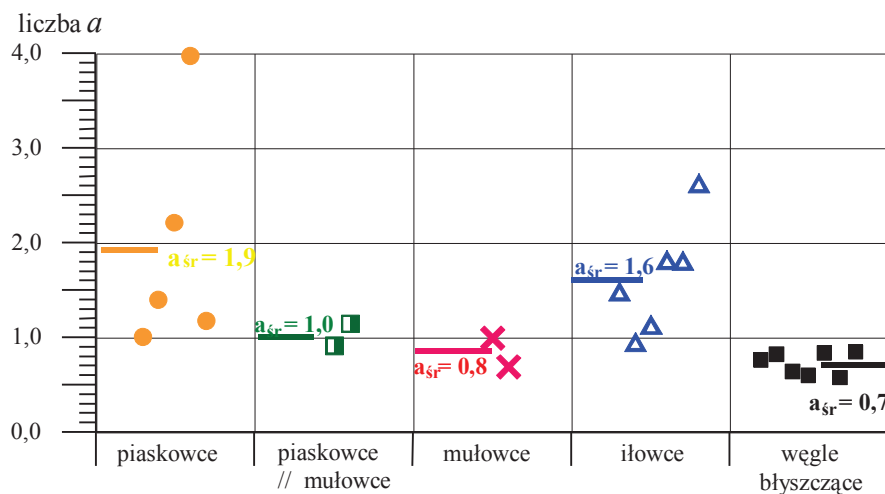
Rozrzut wartości liczby $a = R_{c\ ps}/p_m$ dla wszystkich przebadanych skał wraz z wartościami średnimi (gdzie $R_{c\ ps}$ – wytrzymałość na ściskanie w stanie powietrzno-suchym) przedstawiono na rysunku 1.

Z rysunku tego wynika, że wartości liczby a w obrębie poszczególnych rodzajów skał są zróżnicowane i wynoszą: dla piaskowców $1,0 \div 4,0$, dla piaskowców warstwowanych mułowcami $0,9 \div 1,2$, dla mułowców $0,7 \div 1,0$, dla ilowców $0,9 \div 2,6$, dla węgla błyszczących $0,6 \div 0,8$. Wartość średnia liczby a dla całej populacji przebadanych próbek skalnych wynosi 1,3. Nie wydaje się jednak właściwe stosowanie tej wartości jako przelicznika krytycznego ciśnienia penetrometrycznego na wytrzymałość na ściskanie skał w masywie. Wysokie wartości przelicznika dla piaskowców i ilowców należy wiązać z wpływem czynników naturalnych w postaci spękań i powierzchni osłabienia występujących w górotworze, których odzwierciedleniem są niskie wartości maksymalnego ciśnienia penetrometrycznego p_m , a także ze zróżnicowaną wilgotnością w badaniach wytrzymałości na ściskanie w warunkach laboratoryjnych i w warunkach in situ.

Zmienność wartości liczby $a = R_{c\ ps}/p_m$ dla poszczególnych odmian litologicznych, z tych rejonów badań, w których wyniki pomiarów ciśnień niszczących nie

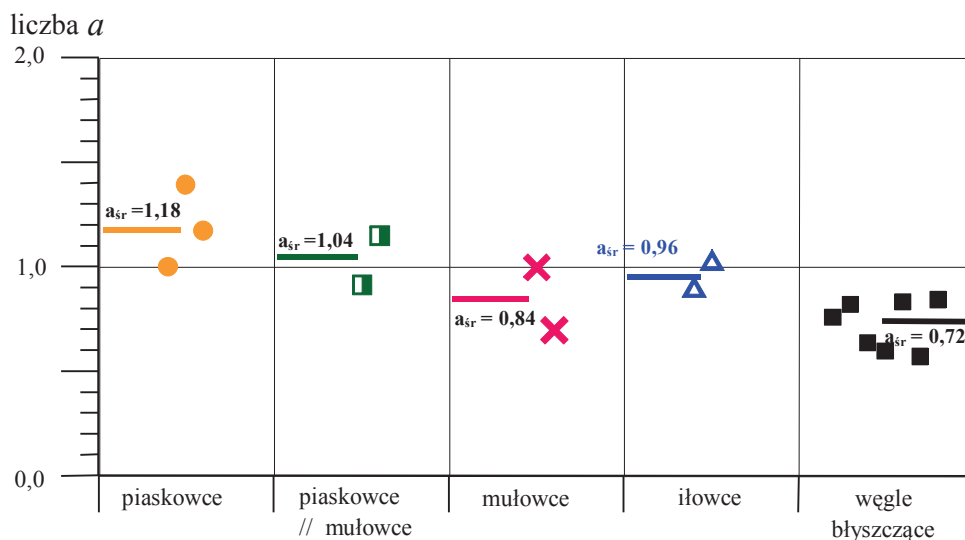
są obniżone oddziaływaniem różnych czynników naturalnych przedstawiono na rysunku 2.

Z porównania rysunków 1 i 2 wynika, że wpływ powierzchni osłabienia ujawnił się najsilniej w przypadku piaskowców oraz iłowców.



Rys. 1. Wartości liczby $a = R_{c\ ps}/p_m$ dla skał osadowych GZW z rejonów badań

Fig. 1. Value of the number $a = R_{c\ ps}/p_m$ for USCBA sedimentary rocks from investigation areas



Rys. 2. Wartość liczby $a = R_{c\ ps}/p_m$ dla skał osadowych GZW z rejonów badań bez większego wpływu spękań i powierzchni osłabienia

Fig. 2. Value of the number $a = R_{c\ ps}/p_m$ for USCBA sedimentary rocks from investigation areas free of extensive impact of fractures and surface of attenuation

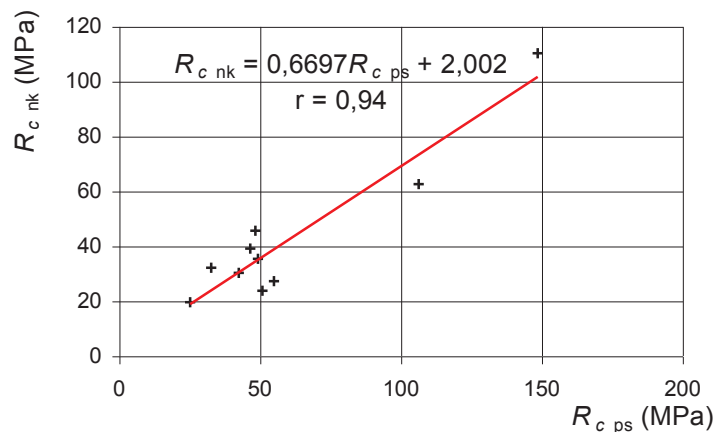
3. WPLYW WILGOTNOŚCI SKAŁ NA WYTRZYMAŁOŚĆ

Spękane masywy skalne są doskonałym typem wodonośca, a otwór wiertniczy jest swoistego rodzaju drenem. Stąd wynika konieczność szczegółowej analizy wytrzymałości w zależności od stopnia zawilgocenia górotworu i próbki skalnej, co ściśle wiąże się z rodzajem badanej skały.

W warunkach laboratoryjnych badano próbki skał o różnej wilgotności. Mogą być to próbki świeżo wycięte, w 24 h, a także w 48 h po wycięciu lub po stopniowym zanurzeniu w wodzie przez kilka do kilkudziesięciu godzin, jak również po wysuszeniu w temperaturze 105–110°C przez kilkadziesiąt godzin (Konopko, Kostyk 1974).

Badania laboratoryjne wytrzymałości skał na ściskanie, omawiane w niniejszym artykule, wykonano na próbkach w stanie powietrzno-suchym (ps) oraz w stanie nasycenia kapilarnego (nk). Stan nasycenia kapilarnego skał, związany ze zjawiskiem kapilarności czynnej, uzyskiwany i wykorzystywany był dotychczas w oznaczaniu odsączalności grawitacyjnej skał zwięzłych (Bukowski 1999). Według tego autora, stan ten najlepiej oddaje naturalne stosunki wilgotnościowe w skałach górotworu w warunkach naturalnego zalegania, po odsączeniu ich z wody wolnej.

Próbki skał w stanie powietrzno-suchym cechowały się następującą wilgotnością: i tak od 0,26 do 0,9% piaskowce drobnoziarniste, od 0,65 do 0,87% piaskowce warstwowane mułowcami, od 0,8 do 0,88% mułowce i 0,85% iłowce. Po nasyceniu wodą nastąpił wzrost wilgotności odpowiednio: 0,69÷5,61%, 1,27÷1,73%, 0,95÷1,24% i 1,4%. Zależność między wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie w stanie nasycenia $R_{c\ nk}$ a wytrzymałością w stanie powietrzno-suchym $R_{c\ ps}$ aproksymowano funkcją liniową o wysokim współczynniku korelacji (rys. 3).

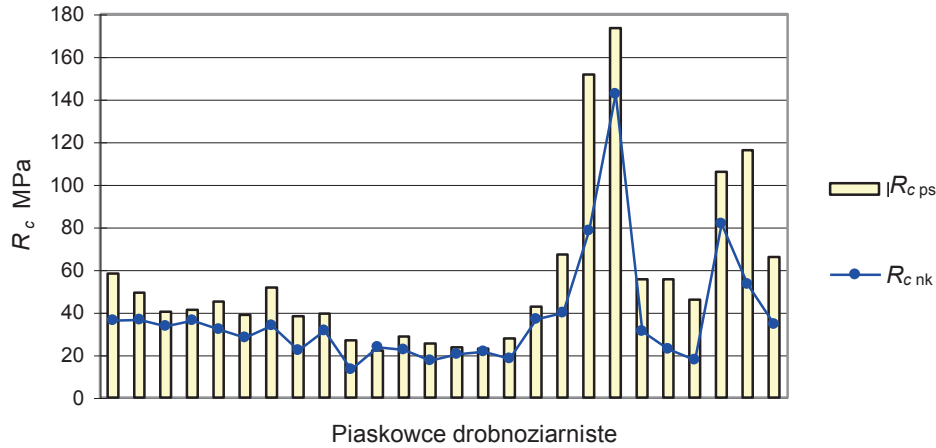


Rys. 3. Zależność $R_{c\ nk} = f(R_{c\ ps})$ dla piaskowców, mułowców i iłowców GZW (Bukowska 2001)
Fig. 3. Dependence $R_{c\ nk} = f(R_{c\ ps})$ for USBC sandstones, mudstones and claystones (Bukowska 2001)

Stwierdzono, że wskaźnik zmniejszenia wytrzymałości pod wpływem działania wody kształtował się na poziomie wartości 0,59÷0,74 dla piaskowców

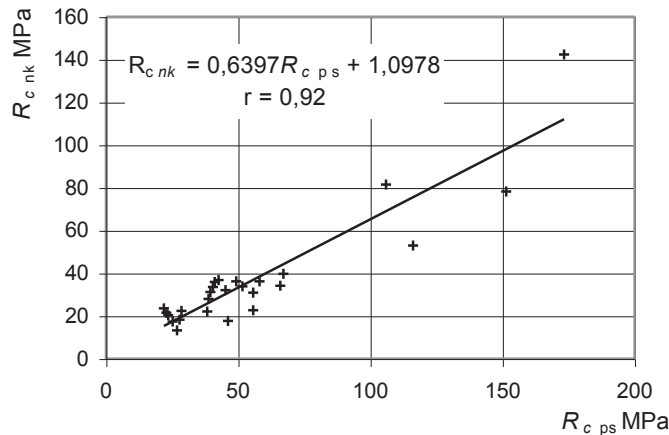
drobnoziarnistych, $0,46 \div 0,84$ dla piaskowców warstwowych mułowcami i $0,94 \div 0,98$ dla mułowców. W przypadku iłowca wskaźnik ten przyjął wartość 0,5. Oznacza to, że piaskowce w wyniku nasączenia wodą tracą przeciętnie na wytrzymałości 23÷40%, piaskowce warstwowane mułowcami 16÷53%, a iłowiec zmniejsza wytrzymałość o 50%. Najmniejszy spadek wytrzymałości (1,5÷5,5%) odnotowano w przypadku mułowców.

Zmiany wytrzymałości na ściskanie w zależności od wilgotności dla piaskowców drobnoziarnistych przedstawiono na rysunku 4, a zależność $R_{c\ nk} = f(R_{c\ ps})$ na rysunku 5.



Rys. 4. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w stanie powietrzno-suchym i w stanie nasycenia kapilarnego różnych piaskowców drobnoziarnistych GZW

Fig. 4. Uniaxial compressive strength in the air-dry state and capillary saturation state of different USCB fine-grained sandstones



Rys. 5. Zależność $R_{c\ nk} = f(R_{c\ ps})$ dla drobnoziarnistych piaskowców karbońskich GZW (Bukowska 2001)

Fig. 5. Dependence $R_{c\ nk} = f(R_{c\ ps})$ for USCB fine-grained carboniferous sandstones (Bukowska 2001)

Spośród badanych typów skał piaskowce wykazały najwyższy współczynnik korelacji, pomiędzy wytrzymałością na ściskanie badaną w stanie powietrzno-suchym i w stanie nasycenia kapilarnego, wynoszący 0,92. W odniesieniu do przeprowadzonych badań mułowców, zależność $R_{c\text{nk}} = f(R_{c\text{ps}})$ dobrze opisuje równanie $R_{c\text{nk}} = 0,71 R_{c\text{ps}} + 9,37$ o współczynniku korelacji wynoszącym 0,79.

Przeprowadzona analiza porównawcza wyników pomiarów in situ i wyników badań laboratoryjnych pozwoliła na zweryfikowanie przelicznika służącego do wyznaczania wytrzymałości na ściskanie skał w maszywie. W tabelicy 2 zestawiono wartości liczby $a = R_c/p_m$ wyznaczone na podstawie prezentowanych w pracy wyników badań laboratoryjnych iłowców i mułowców, badanych w stanie powietrzno-suchym (ps) oraz piaskowców w stanie nasycenia kapilarnego (nk). Ta ostatnia nawiązuje do wilgotności naturalnej skał oraz do nasycenia skał wodą w strefie przyotworowej, wynikającego z oddziaływania płuczki wiertniczej. Jednocześnie w tabelicy 2 przedstawiono wyniki badań porównawczych wytrzymałości na ściskanie R_c i oporów penetracji p_m piaskowców, przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych. Przedstawione w tabelicy 2 wartości liczby $b = R_c/p_m$ omówione są w dalszej części.

Tabela 2. Wartości liczby $a = R_c/p_m$ i liczby $b = R_c/p_m$

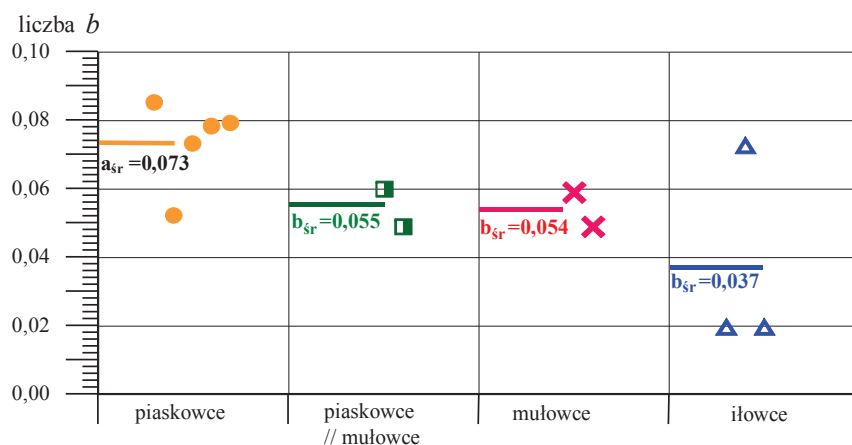
Skala	Stan górotworu	R_c laboratoryjna niszczące ciśnienie penetracji in situ <i>a</i>	R_c laboratoryjna w stanie powietrzno-suchym / opór penetracji iglicy – stan powietrzno-suchy	R_c laboratoryjna niszczące ciśnienie penetracji in situ <i>b</i>
piaskowce drobnziarniste; stan nasycenia kapilarnego zbliżony do stanu wilgotności naturalnej po odsączeniu z górotworu wody wolnej	średni – bardzo dobry, powierzchnie osłabienia zajmują do 25% długości odcinka pomiarowego, pologie zaleganie warstw	0,85 (nk)	0,82 ÷ 0,98 średnia = 0,89 (ps)	0,073
piaskowce drobnziarniste z mułowcami (zmiennie proporcje); stan nasycenia kapilarnego zbliżony do stanu wilgotności naturalnej po odsączeniu z górotworu wody wolnej	średni – bardzo dobry, powierzchnie osłabienia zajmują 30-60% długości odcinka pomiarowego, oddziaływanie struktur fałdowych	0,6-0,9 (m-c) średnia 0,75 (nk)	—	0,055
mułowce; stan powietrzno-suchy odpowiadający wilgotności naturalnej po odsączeniu z górotworu wody wolnej	dobry, powierzchnie osłabienia zajmują 36-40% długości odcinka pomiarowego, oddziaływanie struktur fałdowych	0,84 (ps)	—	0,054
iłowce; stan powietrzno-suchy odpowiadający wilgotności naturalnej po odsączeniu z górotworu wody wolnej	slaby, powierzchnie osłabienia zajmują 30-60% długości odcinka pomiarowego, oddziaływanie spekań i struktur fałdowych, prawdopodobne osłabienie ścianki otworu w wyniku działania płuczki wiertniczej	0,96 (ps)	—	0,037
węgle; stan powietrzno-suchy odpowiadający wilgotności naturalnej po odsączeniu z górotworu wody wolnej	brak danych	0,72 (ps)	—	brak danych

Średnia liczba a dla piaskowców w stanie nasycenia kapilarnego (nk) mułowców i iłowców, badanych w stanie powietrzno-suchym (ps) wynosi 0,83. Różnice wartości pomiędzy laboratoryjną wytrzymałością oznaczaną dla piaskowców w stanie nasycenia kapilarnego, dla iłowców i mułowców w stanie powietrzno-suchym a wartością niszczącego ciśnienia penetrometrycznego in situ są niewielkie, można przyjąć, że w granicach błędu (poniżej 20%). Wartość liczby a określonej dla skał w stanie powietrzno-suchym wynosi 0,95. Dla węgla błyszczących liczba a przyjmuje wartość 0,72.

Różnice w wytrzymałości próbek laboratoryjnych oraz w ciśnieniach krytycznych iglicy penetrometru otworowego mogą również wynikać z oddziaływania tzw.

czynnika skali, czyli różnicy wielkości (objętości) obciążanego w badaniach obszaru skały. Różnice te ilościowo zostały ujęte w teoriach defektów strukturalnych, między innymi autorstwa Weibulla (Weibull 1939) i Hoeka/Browna (Hoek i Brown 1988). Przeprowadzone przez autorów niniejszego artykułu obliczenia z wykorzystaniem tych teorii wykazały, że wzrost wymiaru próbki z 5 mm (średnica iglicy) do 50 mm (wymiar próbki laboratoryjnej) powoduje spadek wytrzymałości skał średnio od 33,7% (wg Hoeka/Browna) do 57,7% (wg Weibulla) i tylko w nieznacznym stopniu jest uzależniony od rodzaju skały. Należy dodać, że różnica między pomierzonymi wartościami p_m i R_c dla słabszych skał karbońskich wynosi średnio 21,4% wartości R_c , tak więc jest zbliżona do efektu skali liczonego według nowszej z wymienionych teorii defektów strukturalnych, a mianowicie teorii Hoeka/Browna. Niezależnie od powyższego, wyższe wartości p_m w stosunku do R_c tych samych skał mogą być interpretowane jako skutek odmiennego stanu naprężeń w badaniach laboratoryjnych (jednoosiowe ściskanie) oraz próbie penetrometrycznej (wciskanie tłoczniaka w półprzestrzeń materialną), jakkolwiek przy małej grubości warstwy obciążanej tłoczkiem penetrometru wpływ tego czynnika jest zapewne niewielki.

W tabelicy 2 zestawiono również wartości liczby b wyrażającej stosunek laboratoryjnej wytrzymałości na rozciąganie do niszczonego ciśnienia penetrometrycznego in situ, których rozkład ilustruje rysunek 6.



Rys. 6. Wartości liczby $b = R_{r,ps}/p_m$ dla skał osadowych GZW z rejonów badań

Fig. 6. Value of the number $b = R_{r,ps}/p_m$ for USCB sedimentary rocks from investigation areas

4. WPŁYW SPEKAŃ I POWIERZCHNI OSŁABIENIA NA WYTRZYMAŁOŚĆ

Defekty strukturalne wynikające z występowania powierzchni osłabienia oraz powierzchni nieciągłości w postaci spękań (pęknięcie, rysa, fuga), szczelin, jak również niejednorodność budowy i anizotropia wytrzymałości są powodem występowania znacznych różnic w wartościach wytrzymałości oznaczanych na próbkach skalnych oraz metodą in situ. Wśród czynników wpływających na

wytrzymałość na ściskanie istotny jest kąt nachylenia powierzchni spękania w stosunku do kierunku działającej siły obciążającej. F.G. Horino i M.L. Ellickson, badając zależność między wytrzymałością na ściskanie skały osłabionej rysą a wytrzymałością skały litej stwierdzili, że najbardziej osłabiający wpływ rysy występuje przy wartości kąta nachylenia jej powierzchni do kierunku działającej siły około 30° (Horino i Ellickson 1970).

Wpływ spękań i powierzchni osłabienia strukturalnego w praktyce można ocenić w skali makro (rdzenia otworu wiertniczego) lub w skali mikro (otoczenia punktu penetracji iglicy w otworze). W skali makro najczęściej stan spękania ocenia się za pomocą wskaźnika jakości rdzenia (RQD), zaś stopień osłabienia masywu w obliczeniach geomechanicznych przyjmuje się jako współczynnik przy wytrzymałości zależnej od wartości RQD (np. $MIR = RQD/100$), znany w literaturze anglojęzycznej jako *mass/intact ratio*. W przypadku skały mikro zauważono (Kidybiński, Sołtys 1981), że w badaniach penetrometrycznych przy zbliżaniu się tłoczka do szczeliny lub rysy w ścianie otworu wiertniczego opór penetracji znacznie zmniejsza się w stosunku do wartości uzyskanych w większej odległości od szczelin. Badanie ilościowego wpływu spękań na wytrzymałość masywu wymaga jednak dużego i pracochłonnego zagęszczania ciągów pomiarowych (penetrometrycznych) w otworze do wzajemnych odległości wgniotów znacznie mniejszej od średniej odległości spękania skał wzdłuż osi otworu. Stwierdzany osłabiający wpływ spękań i powierzchni osłabienia na piaskowce karbońskie ($RQD = 39 \div 87\%$) wyraża się spadkiem p_m o $23 \div 66\%$ w stosunku do wartości $R_{c\ nk}$, zaś dla iłowców laminowanych ($RQD = 27 \div 82\%$) spadek ten wynosi $41 \div 62\%$ w stosunku do wartości $R_{c\ ps}$, przy czym w wymienionych przedziałach spadek p_m jest tym większy im mniejsza jest wielkość RQD. Zagadnienia te ilustruje tablica 3.

Tablica 3. Wartości liczby $a = R_c/p_m$ w rejonach spękanego górotworu

Skala	Stan górotworu	R_c laboratoryjna niszczące ciśnienie penetracji in situ	R_c laboratoryjna w stanie powietrzno- suchym / opór penetracji iglicy stan powietrzno-suchy
piaskowce drobnoziarniste; stan nasycenia kapilarnego zbliżony do stanu wilgotności naturalnej po odsączeniu górotworu z wody wolnej	dobry ($RQD = 87\%$)	1,3 (nk)	-
	słaby ($RQD = 39\%$), strefa spękań zajmuje do 86% długości odcinka pomiarowego	3,0 (nk)	
iłowce; stan powietrzno-suchy odpowiadający wilgotności naturalnej po odwodnieniu górotworu z wody wolnej	słaby ($RQD = 27\%$), strefa spękań zajmuje do 50% długości odcinka pomiarowego	2,6 (ps)	1,41÷1,47 średnia 1,44 (ps) próbki rozpadały się wzdłuż płaszczyzn osłabienia – można je traktować jako skały osłabione strukturalnie
	dobry ($RQD = 82\%$), strefa spękań zajmuje do 50% długości odcinka pomiarowego	1,7 (ps)	

5. WNIOSKI

Wykonane badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Wytrzymałość skał, określona dwiema metodami – laboratoryjną i in situ – jest uzależniona od:

- wilgotności (stanu nasycenia kapilarnego n_k lub stanu tzw. powietrzno-suchego p_s) powodującej spadek wartości $R_{c_{nk}}$ w stosunku do $R_{c_{ps}}$ o 20÷40%,
 - spękań i powierzchni osłabienia powodujących spadek wartości p_m w stosunku do $R_{c_{nk}}$ o 23÷66% dla piaskowców drobnoziarnistych, spadek wartości p_m w stosunku do $R_{c_{ps}}$ o 41÷62% dla iłowców.
2. Liczba $a = R_c/p_m$ zależy od typu litologicznego skały i wynosi:

	<i>Stan powietrzno-suchy</i>	<i>Stan nasycenia kapilarnego</i>
dla piaskowców	1,18	0,85
dla piaskowców // mułowcami	1,04	0,75
dla mułowców	0,84	–
dla iłowców	0,96	–
dla węgla błyszczących	0,72	–

Mając na uwadze fakt, że w czasie badań penetrometrem otworowym często trudno jest zidentyfikować na danej głębokości otworu szczegółową odmianę litologiczną występującą tam skały, można zalecić stosowanie ogólnego współczynnika przeliczeniowego a o wartości 1,0.

3. Liczba $b = R_r/p_m$ zależy od typu litologicznego:

dla piaskowców	0,073
dla piaskowców // mułowcami	0,055
dla mułowców	0,054
dla iłowców	0,037

Postać równania wyznaczającego wytrzymałość na rozciąganie skał w górotworze proponuje się zdefiniować następująco: $R_{r \text{ skał w górotworze}} = 0,055 p_m$.

4. Należy stwierdzić, że w wielu przypadkach wyniki badań laboratoryjnych i penetrometrycznych są trudno porównywalne, bowiem wilgotność skał w otworach penetrometrycznych nie jest określona, zaś stopień spękania ścianki otworu możliwy jest do określenia tylko w przypadku dysponowania kamerą endoskopową.
5. Metoda penetrometryczna nadal pozostaje podstawowym narzędziem badawczym skał stropowych do celów projektowania inżynierskiego, należy wspomagać ją jednak badaniami laboratoryjnymi – w celu zwiększenia dokładności wykonywanych oznaczeń.
6. Uwzględniając różnice w wilgotności naturalnej górotworu i próbki laboratoryjnej, badania laboratoryjne należy prowadzić w następujących stanach wilgotnościowych:
- a) piaskowce w stanie nasycenia kapilarnego nawiązującego do wilgotności naturalnej skał i do nasycenia skał wodą w strefie przyotworowej, do którego dochodzi w strefie oddziaływania płuczki wiertniczej,
 - b) mułowce, iłowce i węgle w stanie powietrzno-suchym, który w przybliżeniu odpowiada wilgotności naturalnej po odwodnieniu górotworu z wody wolnej.

Literatura

1. Bukowska M.: *Geomechaniczne uwarunkowania ryzyka wystąpienia tąpnięcia*. Etap II pt.: *Analiza czynników naturalnych masywu skalnego ze względu na wartości wytrzymałości określone metodą in situ i laboratoryjną*. Dokumentacja nr 11403001-142. Katowice, GIG 2001.
2. Bukowski P.: *Chłonność wodna górotworu karbońskiego i jej wpływ na przebieg zatapiania likwidowanych kopalń*. Katowice, GIG 1999 (praca doktorska).
3. Hoek E., Brown E.T.: *The Hoek-Brown failure criterion*. Proc. 15th Canadian Rock Mechanics Symposium. Toronto, Toronto University Press 1988.
4. Horino F.G., Ellickson M.L.: *A method for estimating strength of rock containing planes of weakness*. U.S. Bur. of Mines, Rep. of Invest. 7449, 1970.
5. Kidybiński A., Gwiazda J., Hładysz Z.: *Ocena mechanicznych własności skał oraz stateczności górotworu hydraulicznym penetrometrem otworowym*. Prace GIG, Seria dodatkowa. Katowice 1976.
6. Kidybiński A., Sołtys K.: *Metoda wyznaczania nośności i odkształcalności skalnego podłoża fundamentowego na podstawie badań wykonywanych w otworach wiertniczych*. Przegląd Geologiczny 1981 nr 9, s. 458-462.
7. Kidybiński A.: *Podstawy geotechniki kopalnianej*. Katowice, Wydaw. „Śląsk” 1982.
8. Konopko W., Kostyk T.: *Wpływ zawilgocenia na wytrzymałość skał karbońskich*. Biuletyn GIG 1974 nr 3, s. 7-9.
9. Weibull W.: *A statistical theory of the strength of materials*. IVA Handl. No. 151. Stockholm.

Recenzent: dr inż. Jan Drzewiecki