

Podsumowanie badań laboratoryjnych piaskowca pod kątem analizy wyrywania kotwy*

Jakub Gontarz¹, Jerzy Podgórski², Marek Kalita³, Michał Siegmund⁴

¹ Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: j.gontarz@pollub.pl

² Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: j.podgorski@pollub.pl

³ Zakład Maszyn i Urządzeń, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice, e-mail: mkalita@komag.eu

⁴ Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice, e-mail: msiegmund@komag.eu

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań mechanicznych dwóch rodzajów piaskowca pochodzącego z dwóch kopalń kamienia w Polsce. Wykonano badania ściskania próbek sześciennych, trójpunktowego zginania belek, zginania belek z nacięciami i badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz przy ściskaniu metodą kwazi-brazylijską. Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono wartości wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie, moduły Younga i współczynniki Poissona. Z testu zginania naciętych belek wyznaczono krytyczny mnożnik intensywności naprężeń w pierwszej modzie pęknięcia oraz krytyczną energię pęknięcia. Wyznaczone wartości docelowo mają służyć jako parametry modeli komputerowych używanych w symulacjach badania mającego na celu wyrywanie fragmentu skały za pomocą zakotwionej w niej kotwy samopodcinającej.

Słowa kluczowe: mechanika pęknięcia skał, piaskowiec, kotwa samopodcinająca, badania laboratoryjne, parametry materiałowe

1. Wstęp

Autorzy poniższej pracy wykonali serię badań laboratoryjnych dotyczących dwóch rodzajów piaskowca. Celem opisywanych badań było uzyskanie parametrów materiałowych skał, na podstawie których autorzy planują opracować model numeryczny, którego zadaniem będzie szacowanie siły krytycznej potrzebnej do wyrwania fragmentu skały za pomocą kotew samopodcinających, co określane jest zwykle w literaturze jako test "pull-out". Standardową procedurą mocowania tego typu kotwy jest osadzenie jej na takiej głębokości aby niemożliwe było jej wyrwanie siłą gwarantowaną przez wytwórcę. Opisywane analizy mają odmienny cel, tzn. oszacowanie siły potrzebnej do wyrwania kotwy wraz z jak największym fragmentem skały oraz określenie głębokości zakotwienia, przy której takie wyrwanie będzie możliwe. Celem autorów jest zaproponowanie modelu obliczeniowego takiego procesu oraz zaprojektowanie urządzenia służącego do wyrywania fragmentów skał tą metodą. W prezentowanej pracy przedstawiono procedury i wyniki badań parametrów

* Opisane badania zostały wykonane w ramach Funduszu Statutowego Katedry Mechaniki Budowli, WBiA, PL i współfinansowane przez Polskie Narodowe Centrum Nauki, projekt RODEST nr 2015/19/B/ST10/02817

mechanicznych skał, co posłuży do skalibrowania modelu numerycznego tworzonego na potrzeby analizy zjawiska wrywania fragmentów skały.

2. Opis materiałów i wybór badań

Badaniom poddano dwa rodzaje piaskowca. Piaskowiec pochodzący ze złóż w Śmiłowie, zwany dalej ze względu na swoją barwę – "białym", oraz piaskowiec z kopalni Braciszów, który będzie określony jako "szary". Próbki użyte do badań piaskowca białego zostały zakupione bezpośrednio z kopalni, natomiast próbki do badań piaskowca szarego pozyskano z fragmentów uzyskanych podczas prób wrywania kotwy. Serie prób wrywania wykonano w kopalni Śmiłów (piaskowiec biały) oraz w laboratorium KOMAG (piaskowiec szary). Do wykonania testów "pull-out" w kopalni Śmiłów wybrano kotwę samopodcinającą Hilti HDA-P o długości 10 cm i standardowym urządzeniem testującym Hilti (rys. 2a). W laboratorium KOMAG użyta została kotwa Hilti HDA-P o długości 20cm, osadzona na głębokości ok. 10cm oraz urządzenie skonstruowane przez Zakład Maszyn i Urządzeń KOMAG w Gliwicach (rys. 2b).



Rys. 1. Kotwa samopodcinająca Hilti HDA-P



Rys. 2. Badanie wrywania kotwy. a) badanie w kopalni w Śmiłowie, b) badanie kamienia z kopalni Braciszów

Montaż kotwy samopodcinającej polega na wywierceniu otworu o zadanej głębokości i średnicy, prostopadłego do powierzchni skały. Kotwa umieszczana jest w tym otworze, a następnie głowicę trzpienia kotwy podciąga się co powoduje rozchylenie "skrzydełek" głowicy, których zadaniem jest podcięcie dna otworu o zamocowanie kotwy. Tak osadzona kotwa, podczas próby wrywania, wywiera nacisk na wnętrze otworu poprzez odchylone "skrzydełka" w głowce. Mniejsza średnica trzonu kotwy nie pozwala na kontakt między ściankami otworu a powierzchnią boczną płaszcza kotwy. W celu wykonania próby wrywania, na kotwę zakłada się urządzenie hydrauliczne, które zadaje siłę wrywającą. Stan-

dardowa procedura mocowanie kotew Hilti zapewnia brak możliwości wyrwania kotwy przed osiągnięciem siły gwarantowanej przez wytwórcę.

Próba wrywania kotwy z piaskowca białego pozostała zatem nieudana, ponieważ dopuszczalna siła dla urządzenia użytego w tym badaniu to 50 kN. Po przekroczeniu tej siły stal, z której wykonany jest trzon kotwy zaczyna się uplastyczniać.

Podczas badania piaskowca szarego, kotwę HDA-P o długości 20 cm, zamontowano do połowy długości, aby otrzymać mniejszą siłę krytyczną. Dzięki temu udało się wyrwać fragment kamienia, z którego pozyskano próbki do badań cech materiałowych.

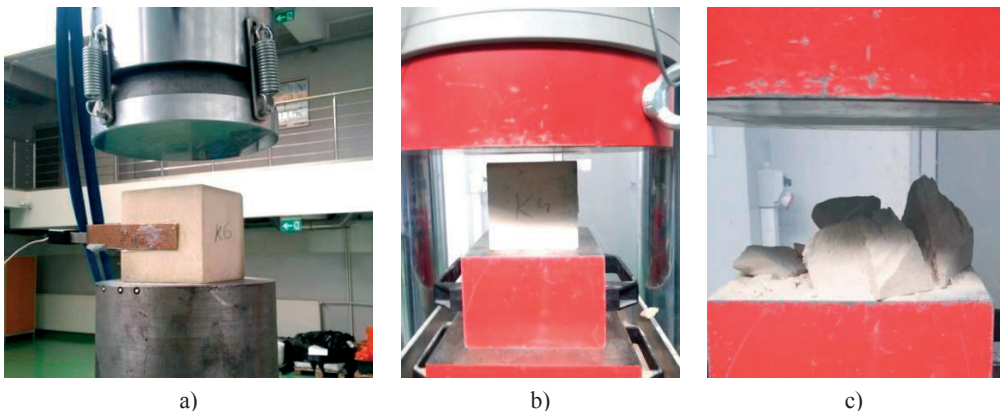
Dla wyżej opisanych dwóch rodzajów kamienia wykonano badania wytrzymałości na ściskanie, modułu Younga i współczynnika Poissona przy jednoosiowym ścisaniu próbek prostopadłościennych, wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu próbek belkowych oraz badanie energii pęknięcia przy zginaniu belek z nacięciami. Dodatkowo podjęto próbę określenia wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek sześciennych.

3. Opis badania parametrów mechanicznych piaskowca

3.1. Badanie ściskania kostek

Autorzy wykonali badania jednoosiowego ściskania dla obu rodzajów piaskowca. Zbadano 13 próbek sześciennych o wymiarach 10x10x10 cm z piaskowca białego, z czego 5 próbek wykorzystano do zbadania współczynnika Poissona i modułu Younga. Dla piaskowca szarego wykorzystano 5 próbek, z czego wszystkie posłużyły do wyznaczenia wyżej wymienionych parametrów. Niestety próbki z piaskowca szarego miały nieregularne wymiary, gdyż pozyskano je z niewielkiego fragmentu wyrwanego stożka otrzymanego, podczas próby wrywania kotwy.

Próbki Kb1-Kb5 (5 próbek) z piaskowca białego i próbki Ks1-Ks5 (5 próbek) z piaskowca szarego zostały najpierw przebadane na maszynie wytrzymałościowej MTS 319.25, z zamocowanym ekstensometrem, który rejestrował przemieszczenia poziome (prostopadłe do kierunku siły ścisającej), na szerokości próbki. Następnie po zdjęciu urządzeń pomiarowych próbkę obciążano do zniszczenia. Próbki b1a-b4c (8 próbek) z piaskowca białego zbadano na ściskanie na maszynie wytrzymałościowej WalterBai bez ekstensometrów. Wymiary próbek ustalono jako średnie z długość każdej z czterech krawędzi danego wymiaru. Przykładowe zdjęcia z badań przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Test ściskania próbek sześciennych z piaskowca białego. a) badanie z ekstensometrem, b) badanie do zniszczenia, c) zniszczona próbka

Wymiary próbek piaskowca białego oraz uzyskane w wyniku testu laboratoryjnego wartości przedstawione są w Tabeli 1. Te same wartości dla piaskowca szarego przedstawiono w Tabeli 2. W tabelach oznaczono poszczególne wartości jako h – uśredniona wysokość próbki, a i b – uśrednione wymiary podstaw próbki, $A = a \cdot b$ – pole przekroju, P – siła, przy której maszyna do badań zarejestrowała zniszczenie próbki, R_c – wytrzymałość na ściskanie, otrzymana ze wzoru: $R_c = P/A$, κ – nachylenie krzywej zależności siły do przemieszczeń pionowych, rejestrowanych przez maszynę (Rys. 4), E – moduł Younga, obliczony według wzoru:

$$E = \frac{h \cdot \kappa}{A} \quad (1)$$

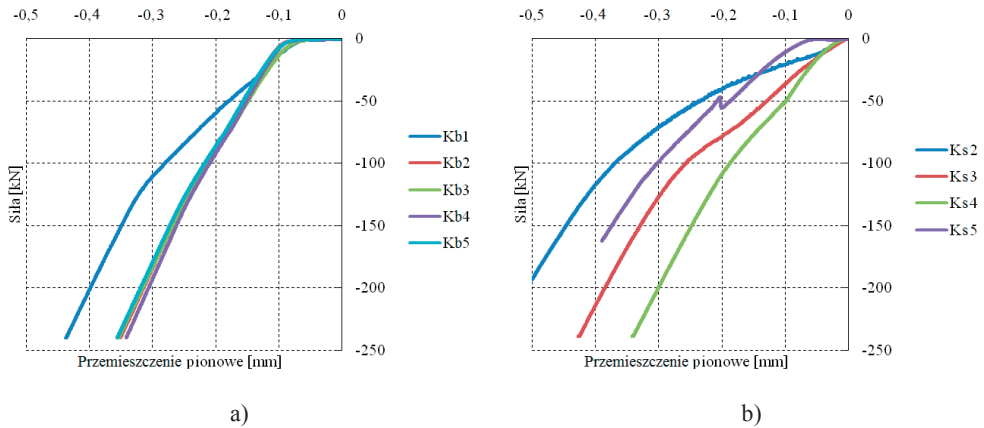
ν – współczynnik Poissona, wyznaczony jako nachylenie krzywej zależności przemieszczeń poziomych, zarejestrowanych przez ekstensometr, a przemieszczeń pionowych zarejestrowanych przez maszynę ścisającą (Rys. 5).

Tabela 1. Wymiary próbek i wyniki otrzymane w próbie jednoosiowego ściskania dla piaskowca białego

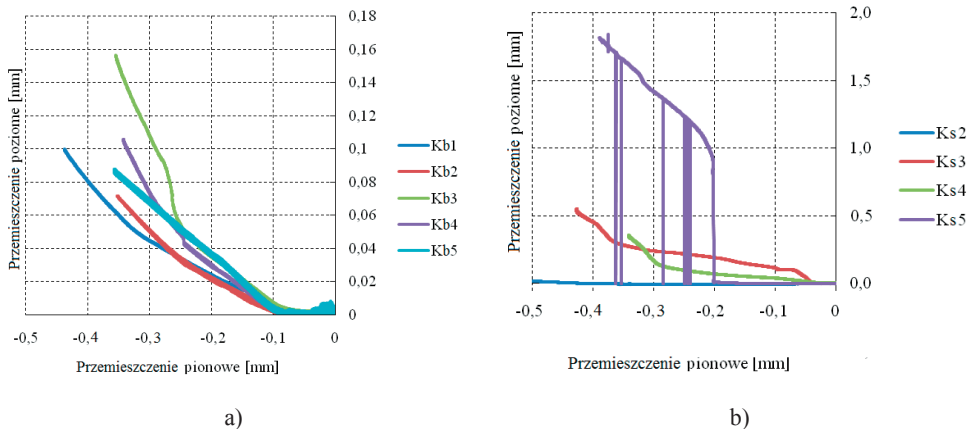
Próbka	h [mm]	a [mm]	b [mm]	A [cm ²]	P [kN]	R_c [MPa]	κ [kN/mm]	E [GPa]	ν [-]
Kb1	100,65	102,15	100,61	102,77	567,715	55,24	894,58	8,761	0,391
Kb2	102,63	100,68	100,85	101,53	698,975	68,84	923,95	9,340	0,306
Kb3	99,23	100,57	98,89	99,45	464,865	46,74	912,06	9,100	0,666
Kb4	98,87	99,73	99,18	98,91	708,895	71,67	982,10	9,817	0,421
Kb5	99,82	98,67	99,77	98,44	654,45	66,48	928,54	9,416	0,29
b1a	90,50	101,12	101,28	102,42	674,5	65,86	-	-	-
b1b	97,13	101,25	101,24	102,50	702,7	68,56	-	-	-
b2a	92,33	101,05	100,85	101,91	446,8	43,84	-	-	-
b2c	89,02	100,84	101,05	101,90	615,1	60,37	-	-	-
b3a	90,54	101,16	101,26	102,44	628,9	61,39	-	-	-
b3b	93,93	101,05	101,25	102,31	711,1	69,51	-	-	-
b3d	91,09	101,26	101,26	102,53	587,7	57,32	-	-	-
b4c	91,03	101,06	100,89	101,95	538,5	52,82	-	-	-

Tabela 2. Wymiary próbek i wyniki otrzymane w próbie jednoosiowego ściskania dla piaskowca szarego

Próbka	h [mm]	a [mm]	b [mm]	A [cm ²]	P [kN]	R_c [MPa]	κ [kN/mm]	E [GPa]	ν [-]
Ks1	68,66	72,75	42,51	30,92	330,515	106,88	-	-	-
Ks2	54,95	75,65	64,72	48,96	443,295	90,53	706,73	7,931	-
Ks3	70,29	89,99	64,53	58,07	506,305	87,19	798,18	9,661	-
Ks4	67,93	87,13	56,77	49,47	559,605	113,13	822,82	11,300	-
Ks5	59,71	71,04	60,33	42,86	351,575	82,03	649,24	9,044	-



Rys. 4. Wykres zależności siły i przemieszczenia pionowego w badaniu ściskania. a) dla piaskowca białego, b) dla piaskowca szarego



Rys. 5. Wykres zależności przemieszczenia poziomego do przemieszczenia pionowego w badaniu ściskania. a) dla piaskowca białego, b) dla piaskowca szarego

Wyniki dla piaskowca białego wydają się być wystarczająco zbliżone do siebie. Średnia arytmetyczna wartość wytrzymałości na ściskanie wyniosła 60,67 MPa, a odchylenie standardowe 8,99 MPa, co daje 14,81% błęd. Średni moduł sprężystości E wyniósł 9,287 GPa, odchylenie standardowe 0,391 GPa, a więc błąd wyniósł 4,21%. Jest to niewielka wartość, biorąc pod uwagę prostotę metody wyznaczania modułu Younga. Współczynnik Poissona ν wyniósł 0,415, a błąd oszacowania wyszedł dość duży: 36,38%.

Wyniki badań piaskowca szarego wskazują na jego dużą niejednorodność. Wytrzymałość na ściskanie wyniosła 95,95 MPa (błąd 13,93%), a Moduł Younga 9,484 GPa (błąd 14,83%). Jak widać na Rys. 5b wyniki te są bardzo zróżnicowane, więc zrezygnowano z wyznaczenia współczynnika Poissona dla piaskowca szarego.

3.2. Badanie zginania belek

W celu wyznaczenia wytrzymałości na rozciąganie przebadano 3 małe belki (mb1-mb3) z piaskowca białego o nominalnych wymiarach 300x50x50 mm i 6 (ms1-ms6)

z piaskowca szarego, o nieregularnych wymiarach. Rozstaw podpór L dla próbek z piaskowca białego przyjęto 260 mm. Dla próbek szarych ms1-ms3 rozstaw przyjęto jako 230 mm, a dla pozostałych ms4-ms6 150 mm. Schemat do wyznaczania wytrzymałości na rozciąganie z tego badania przedstawiono na Rys. 6a. Badanie wykonano na maszynie wytrzymałościowej MTS 319.25.



Rys. 6. Badanie wytrzymałości na rozciąganie metodą trójpunktowego zginania. a) Schemat badania, b) fotografia wykonana w trakcie badania

Ze względu na to, że próbki z szarego piaskowca nie pękały na środku (Rys. 6b), postanowiono wyznaczyć wartość momentu zginającego w miejscu powstania szczeliny. Na Rys. 6a oznaczono wartości h – średnia wysokość próbki, b – średnia szerokość próbki, L – odległość między podporami, c – odległość między podporą, a miejscem inicjacji szczeliny, P – maksymalna siła pionowa na środku próbki odczytana z wykresów, przedstawionych na Rys. 7, M – wartość momentu zginającego:

$$M = \frac{P \cdot L}{4} \cdot \frac{2c}{L} = \frac{P \cdot c}{2} \quad (2)$$

Próbki z piaskowca białego pękały w środku rozpiętości, dlatego w tym przypadku $c = L/2$. Wymiary próbek i wyniki obliczeń przedstawiono w Tab. 3 dla piaskowca białego i w Tab. 4 dla piaskowca szarego. W poniższych tabelach $A = a \cdot b$ – przekrój próbki, $W = bh^2/6$ – wskaźnik wytrzymałości na zginanie, $R_t = M/W$ – wytrzymałość na rozciąganie.

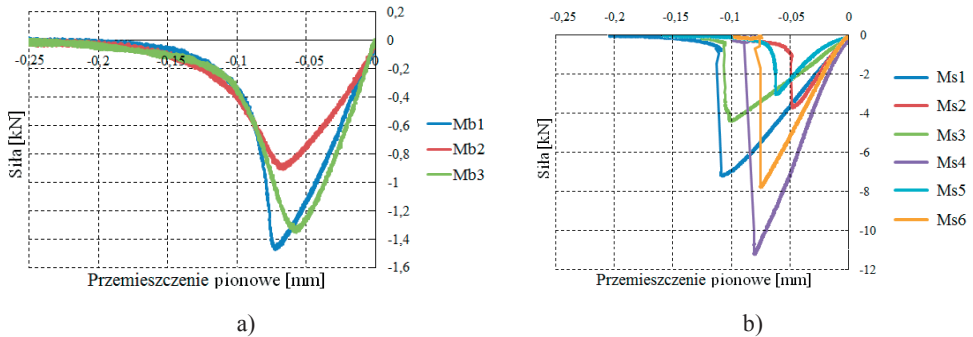
Podjęto również próbę wyznaczenia modułu Younga z powyższego badania, jednak dla piaskowca szarego wyniki okazały się na tyle odległe, że moduł wyznaczono tylko dla piaskowca białego. $J = bh^3/12$ – moment bezwładności przekroju, $k = 48J/L^3$, κ – nachylenie krzywej zależności siły do przemieszczenia pionowego w miejscu przyłożenia siły w fazie przed zniszczeniem (Rys. 7), E – moduł Younga, obliczony jako κ/k .

Tabela 3. Wymiary próbek i wyniki otrzymane w próbie trójpunktowego zginania dla piaskowca białego

Próbka	h [mm]	b [mm]	P [kN]	A [cm ²]	W [cm ³]	M [kNcm]	R_t [MPa]	J [cm ⁴]	k [cm]	κ [kN/mm]	E [GPa]
Mb1	52,30	54,71	1,4738	28,6147	24,9437	9,5799	3,841	65,23	0,1781	21,322	11,969
Mb2	50,89	49,56	0,909	25,216	21,3853	5,9086	2,763	54,41	0,1486	14,256	9,594
Mb3	52,69	52,80	1,353	27,8203	24,4309	8,7947	3,600	64,36	0,1758	27,279	15,519

Tabela 4. Wymiary próbek i wyniki otrzymane w próbie trójpunktowego zginania dla piaskowca szarego

Próbka	h [mm]	b [mm]	c [mm]	P [kN]	A [cm ²]	W [cm ³]	M [kNm]	R_t [MPa]
Ms1	58,85	53,74	49,0	7,205	31,62	31,01	17,665	5,696
Ms2	55,95	59,90	111,0	3,725	33,51	31,25	20,678	6,617
Ms3	60,08	53,46	56,5	4,418	32,12	32,16	12,473	3,878
Ms4	58,10	60,28	72,5	11,225	35,02	33,91	40,606	11,975
Ms5	60,10	39,25	62,5	3,034	23,59	23,63	9,499	4,021
Ms6	64,52	37,26	68,0	7,803	24,04	25,85	26,521	10,258

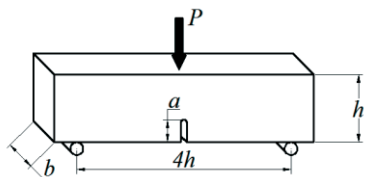


Rys. 7. Wykres zależności siły i przemieszczenia pionowego środka belki w badaniu zginania. a) dla piaskowca białego, b) dla piaskowca szarego

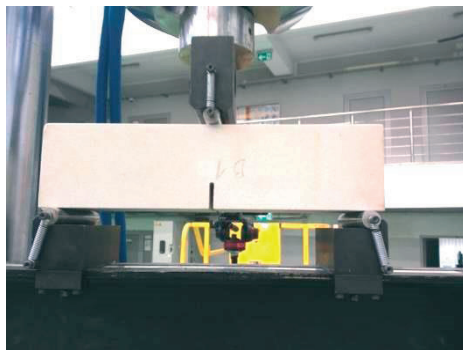
Z powyższych obliczeń wynika, że średnia wytrzymałość na rozciąganie dla piaskowca białego wyniosła 3,40 MPa, z błędem 16,6%, natomiast dla piaskowca szarego 7,07 z błędem 47,22%. Średni moduł sprężystości dla piaskowca białego, obliczony tą metodą, wyniósł 12,361 GPa z błędem 24,12%, przy czym jest on 33% większy, niż wyznaczony z próby jednoosiowego ściskania. Dodatkowo warto zaznaczyć, że stosunek wytrzymałości na ściskanie do wytrzymałości na rozciąganie wyniósł 17,84 dla piaskowca białego i 13,56 dla piaskowca szarego.

3.3. Wyznaczenie współczynnika intensywności naprężeń

W celu poprawnego zamodelowania symulacji pęknięcia za pomocą modelu numerycznego niezbędne jest wyznaczenie krytycznego współczynnika intensywności naprężeń dla obu skał. Energię tą wyznaczono tylko dla piaskowca białego i tylko dla pierwszego typu pęknięcia (przy rozciąganiu – mode I). Krytyczny współczynnik intensywności naprężeń dla pierwszej mody, oznaczany jako K_{Ic} jest stałą materiałową, która determinuje wielkość naprężeń w wierzchołku szczeliny w przypadku działania obciążeń rozciągających, działających prostopadłe do pęknięcia. Istnieje kilka metod wyznaczania tego współczynnika [1]. Autorzy przeprowadzili badania trójpunktowego zginania. Test ten przeprowadza się na próbkach z nacięciami w środku, aby mieć kontrolę nad miejscem inicjacji szczeliny oraz wielkością i kształtem "koncentratora" naprężeń. Schemat działania badania pokazano na Rys. 8. Przebadano 4 próbki oznaczone jako B1-B4 na maszynie wytrzymałościowej MTS 319.25.



a)



b)

Rys. 8. Badanie współczynnika intensywności naprężeń metodą trójpunktowego zginania belki z nacięciem. a) Schemat badania, b) fotografia wykonana w trakcie badania

Istnieje kilka sposobów na wyznaczenie krytycznego współczynnika intensywności naprężeń w modzie I dla powyższego badania [2,3]. Autorzy wybrali metodę opisaną przez Bowera [2], która wykorzystuje równanie:

$$K_{Ic} = \frac{4 \cdot P}{b} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{h}} \cdot \left[1.6 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{1}{2}} - 2.6 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{3}{2}} + 12.3 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{5}{2}} - 21.2 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{7}{2}} + 21.8 \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{9}{2}} \right] \quad (3)$$

gdzie P – maksymalna siła zarejestrowana przez maszynę do badań, b – średnia szerokość próbki, a – średnia głębokość nacięcia na środku belki. Jest to wzór, który działa dla zaokrąglonego wierzchołka nacięcia. Wyniki przedstawiono w Tabeli 5. Dodatkowo autorzy wyznaczyli krytyczną energię pęknięcia $G_{Ic} = K_{Ic}^2/E$ [1], która wykorzystywana jest w programach komputerowych do symulowania pęknięcia.

Tabela 5. Wymiary próbek i wyniki otrzymane w próbie trójpunktowego zginania próbki z nacięciem dla piaskowca białego

Próbka	h [mm]	b [mm]	a [mm]	P [kN]	K_{Ic} [kPa·m ^{0,5}]	G_{Ic} [J/m ²]
B1	101,3	101,0	31,0	2,715	510,40	121,47
B2	100,9	101,0	31,2	2,080	394,97	72,74
B3	101,3	101,1	32,0	2,331	449,03	94,01
B4	101,0	100,9	31,5	1,916	366,21	62,53

Z obliczeń wynika, że dla piaskowca białego średnie K_{Ic} wynosi 413,15 kPa·m^{0,5}, natomiast średnia energia pęknięcia G_{Ic} wyniosła 87,69 J/m², z błędem 29,72%.

Model numeryczny z użyciem metody elementów skończonych (MES) oraz elementów X-FEM z wbudowaną funkcją nieciągłości przemieszczeń, które służą do modelowania zjawiska pęknięcia został utworzony w środowisku Simulia Abaqus. W symulacji odwzorowano badanie trójpunktowego zginania z nacięciem, z zastosowaniem nominalnych wymiarów i wyznaczonych parametrów materiałowych. Okazało się, że w symulacji pęknięcie rozpoczyna się przy sile około 2,24 kN, natomiast średnia siła wynikająca z badań wyniosła 2,26 kN, co oznacza, że model numeryczny, użyte elementy X-FEM oraz parametry materiałowe prawidłowo symulują zjawisko pęknięcia skały.

3.4. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu

Autorzy podjęli się znalezienia metody poszukiwania wytrzymałości na rozciąganie metodą brazylijską w przypadku próbek sześciennych. Zazwyczaj tą metodą bada się próbki walcowe, jednak w tym przypadku zdecydowano się na badanie próbek kostkowych, gdyż walcowe byłyby bardzo trudne do uzyskania z fragmentów skał. Ponieważ w przypadku ściskania prostopadłościanu dwoma równoważącymi się liniowymi obciążeniami brak jest rozwiązania analitycznego, jak to jest w przypadku walca, posłużono się polem naprężeń wyznaczonym numerycznie z zastosowaniem MES i systemu Abaqus. Wymodelowano próbkę o wymiarach 10x10x10 cm, która została ściśnięta z siłą 1 kN rozłożoną liniowo w środku podstawy kostki. Z symulacji tych wyników, że maksymalne naprężenia rozciągające pojawiły się w środku próbki i wyniosły 0,0610 MPa. Dodatkowo, przyjęto, że wartość wytrzymałości na rozciąganie jest 1,018 razy większa niż wyznaczona maksymalna wartość naprężeń rozciągających co wynika z obecności w tym punkcie także naprężeń ściskających i dużą wrażliwość tego typu materiału na obecność tych. Szczegółową analizę tego przypadku można znaleźć w innej pracy autorów [4]. Stosunek naprężeń rozciągających do wytrzymałości na rozciąganie oznaczono jako ρ :

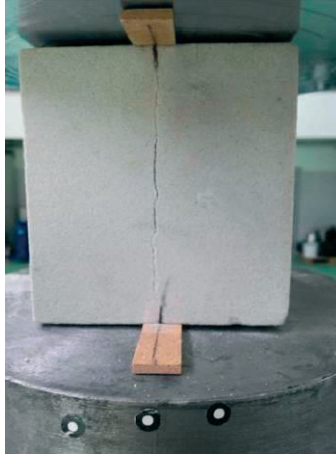
$$\rho = \frac{\sigma_{\max}}{R_t} = \frac{1}{1 + \gamma}, \text{ gdzie } \gamma = \frac{\kappa}{\eta} \quad (4)$$

gdzie κ jest to stosunek naprężeń rozciągających do ściskających w środku próbki, który zgodnie z wyznaczonym numerycznie polem naprężeń wynosi $\kappa = 0,322$, a η jest to stosunek wytrzymałości na ściskanie do wytrzymałości na rozciąganie, który dla opisywanego piaskowca białego wyniósł $\eta = 17,84$, zatem $\rho = 1,018$. Metodę tą będziemy dalej nazywać "kwazi-brazylijską".

Metodą kwazi-brazylijską przebadano 8 próbek (B1c-B4d) na maszynie MTS 319.25. Rys. 9 przedstawia zdjęcie, wykonane podczas jednego z badań. Wymiary i wyniki obliczeń wytrzymałości na rozciąganie przedstawiono w Tabeli 6, gdzie h – średnia wysokość próbki, a i b – średnie długości boków podstawy, P – siła, przy której wystąpiło zniszczenie, $\sigma_{\max} = P \cdot 0,0610/\text{m}^2$ – naprężenia rozciągające w środku próbki, $R_t = \sigma_{\max} \cdot \rho$ – wytrzymałość na rozciąganie.

Tabela 6. Wymiary próbek i wyniki otrzymane w próbie kwazi-brazylijskiej dla piaskowca białego

Próbka	h [mm]	a [mm]	b [mm]	P [kN]	σ_{\max} [MPa]	R_t [MPa]
B1c	98,06	101,19	101,33	78,65	4,797	4,884
B1d	87,99	101,16	101,38	72,70	4,434	4,515
B2b	95,31	101,05	100,93	47,90	2,922	2,975
B2d	95,80	101,03	100,81	48,72	2,972	3,025
B3c	97,58	101,29	101,28	64,32	3,923	3,994
B4a	98,05	100,72	100,96	57,34	3,498	3,561
B4b	95,73	100,85	100,87	51,63	3,149	3,206
B4d	93,97	101,11	100,87	62,17	3,792	3,861



Rys. 9. Widok próbki sześcienniej w trakcie badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu (test kwazi-brazylijski)

Z powyższych obliczeń otrzymano średnią wytrzymałość na rozciąganie 3,753 MPa z błędem 18,57%. Dodatkowo, warto zauważyć, że wytrzymałość ta jest większa o ok. 9% od wytrzymałości wyznaczonej na podstawie badania trójpunktowego zginania.

4. Podsumowanie

Wyżej wyznaczone wyniki prezentują się następująco (Tabela 7):

Tabela 7. Zestawienie wszystkich wyznaczonych wyników

Materiał	R_c [MPa]	R_t [MPa]	E [GPa]	ν [-]	K_{Ic} [kPa·m ^{0,5}]	G_{Ic} [J/m ²]
Piaskowiec biały	60,67	3,40	9,287	0,415	413,15	87,69
Piaskowiec szary	95,95	7,07	9,484	-	-	-

Jak widać, piaskowiec szary ma większe wytrzymałości, jednak jest on bardziej niejednorodny, ponieważ w przypadku badania trójpunktowego zginania pęknięcie często występowało w miejscu daleko od punktu maksymalnego momentu. Dodatkowo, większość wyników w poszczególnych badaniach bardzo różni się od siebie. Może to być powodem tego, że piaskowiec jest materiałem anizotropowym, ponieważ ma budowę warstwową. Niestety nie jest możliwe ustalenie kierunku warstw na podstawie obserwacji próbek. Z drugiej jednak strony wyniki dla piaskowca białego są podobne do siebie, mimo dowolnego układania próbek w urządzeniach do badań, bez uwzględnienia kierunku warstw materiału.

Ciekawym faktem jest to, że w trakcie badania ściskania piaskowca białego zniszczenie próbek było bardzo gwałtowne, próbki kruszyły się na drobne elementy (Rys. 3c), natomiast piaskowiec szary zachowywał się podobnie do betonu – zniszczenie było nagłe, ale nie występowało aż tak gwałtowne uwolnienie energii. Inaczej ma się sytuacja w przypadku badania trójpunktowego zginania. Pęknięcie w piaskowcu białym następowało powoli, natomiast w piaskowcu szarym było bardziej gwałtowne, co można zaobserwować na Rys. 7.

Autorzy przy okazji wyznaczania parametrów materiałowych zaproponowali również prostą metodę na wyznaczenie wytrzymałości na rozciąganiu przy badaniu metodą kwazi-brazylijską próbek sześciennych, z wykorzystaniem symulacji komputerowych. Na obecnym etapie prowadzone są analizy, które pozwolą na obliczenie wytrzymałości na rozciąganie z próbek prostopadłościennych o dowolnych rozmiarach i proporcjach.

Otrzymane wyniki parametrów materiałowych pozwolą na dalszą, planowaną analizę próby wrywania kotwy z powierzchniowej warstwy skały. Docelowo badania te mają umożliwić autorom opracowanie metody na oszacowanie siły wrywającej kotwę dla innych niż piaskowiec materiałów skalnych.

Literatura

1. Van Mier J.G.M. *Fracture Processes of Concrete*. CRC Press, 2000.
2. Bower A.F. *Applied mechanics of solids*. CRC Press, 2009.
3. Elices M., Guinea G.V., Gómez J., Planas J., *The cohesive zone model: advantages, limitations and challenges*, Engineering Fracture Mechanics 69 (2002) 137-163.
4. Gontarz J., Podgórski J., *Explanation of the mechanism of destruction of the cylindrical sample in the Brazilian test*, [w:] *Advances in Mechanics: Theoretical, Computational and Interdisciplinary Issues*. (ed. Kleiber M., Burczyński T., Wilde K., Górski J., Winkelmann K., Smakosz Ł.). Taylor and Francis Group, Boca Raton 2016.

Summary of laboratory tests of sandstone for pull-out test analysis

Jakub Gontarz¹, Jerzy Podgórski², Marek Kalita³, Michał Siegmund⁴

¹ *Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: j.gontarz@pollub.pl*

² *Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: j.podgorski@pollub.pl*

³ *Zakład Maszyn i Urządzeń, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice, e-mail: mkalita@komag.eu*

⁴ *Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice, e-mail: msiegmund@komag.eu*

Abstract: The paper presents the results of mechanical laboratory tests of two types of sandstone, white and gray, obtained from two stone quarries in Poland. Compression tests of cubic samples, three-point bending tests, bending of notched beams and quasi-Brazilian test were performed. Basing on these tests, the values of compressive strength, tensile strength, Young's modulus and Poisson's ratio were determined. From the bending test of notched beams, a critical stress intensity factor in mode I and critical energy release rate was determined. These values are intended to be used as parameters of numerical (FEM) model to simulate the pull-out test of an anchor pulled out from the rock surface.

Keywords: rock mechanics, fracture mechanics, sandstone, self-undercut anchor, laboratory tests, material parameters.