

Joanna Pinińska

Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski

ZASTOSOWANIE BADAŃ NIENISZCZĄCYCH W WYTRZYMAŁOŚCIOWEJ KLASYFIKACJI SKAŁ I MASYWÓW SKALNYCH

Streszczenie

W artykule przedstawiono poglądy na stosowanie i możliwości porównywania podstawowych klasyfikacji wytrzymałościowych skał oraz zaproponowano wykorzystanie wyników laboratoryjnych badań ultradźwiękowych jako głównego tła do ich kompleksowych porównań. Zamieszczono diagramy korelujące parametry badań *in situ* opisami makroskopowymi: odbojność, określoną młotkiem Schmidta i wskaźników GSI z gęstością objętościową, wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie próbek skalnych i prędkością propagacji falowej. Dane te charakteryzują główne odmiany litologiczne skał Polski i umożliwiają określenie tak cech masywu skalnego (*rock mass*), nienaruszonego elementu skalnego (*rock material*), jak i próbki laboratoryjnej (*rock*).

Przedstawione analizy bazują na zunifikowanych badaniach wytrzymałościowych, akustycznych i polowych, prowadzonych w Zakładzie Geomechaniki UW od ponad dwudziestu lat. Dane te są sukcesywnie gromadzone w Bazie Danych Geomechanicznych (BZG). Duże zbiory danych umożliwiły porównanie cech skał magmowych, osadowych i metamorficznych z różnych regionów Polski i wyznaczenie ogólnych tendencji zmian. W porównaniach zwrócono uwagę na szczególną rolę anizotropii i cech strukturalnych ośrodków skalnych, bez uwzględnienia których wyznaczenie szczegółowych tendencji korelacyjnych nie jest możliwe.

Application of non-destructive tests in rock and rock mass strength classification

Abstract

The article presents views on the application and comparison possibilities of basic rock strength classifications and proposes to use the results of ultrasonic laboratory tests as main background for their complex comparisons. Diagrams have been inserted, correlating the parameters of *in situ* tests with macroscopic descriptions: reboundability, measured by means of Schmidt's hammer and GSI indices with volumetric density, uniaxial compressive strength of rock samples and wave propagation velocity. These data characterize the main lithological forms of Poland's rocks and enable to determine both the features of rock mass, non-disturbed rock material, as well as rock laboratory sample.

The presented analyses are based on unified strength, acoustic and field tests, conducted in the Department of Geomechanics of UW from twenty years. The data are successively collected in the Geomechanical Data Base (BZG). Large data sets enabled to compare the features of magmatic, sedimentary, and metamorphic rocks from different regions of Poland and to determine general change tendencies. In comparisons attention was paid to the special role of anisotropy and structural features of rock media; without their regard the determination of detailed correlative tendencies is not possible.

1. WSTĘP

Skały, w odróżnieniu od gruntów, charakteryzują duże siły wiązań strukturalnych, których niszczenie następuje w sposób wyraźny. W szczególności jednak sposób po

zniszczeniu nadal mogą przenosić znaczne obciążenia. W ich wytrzymałościowej klasyfikacji należy zatem uwzględniać nie tylko cechy skały nienaruszonej, lecz również cechy spękanego masywu skalnego. Geotechniczne klasyfikacje wytrzymałościowe skał są jednak bardzo różnorodne, ze względu na zróżnicowanie potrzeb inżynierskich. Stąd porównywanie wytrzymałości skał na podstawie zasad dostosowywanych do danej gałęzi budownictwa jest znacznie utrudnione. Pomimo bowiem, że w kompleksowych inżynierskich systemach klasyfikacyjnych skał wykorzystywana jest głównie charakterystyka wytrzymałościowa, z dominującym udziałem wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, kryteria podziału na klasy wytrzymałościowe są niejednolite [16].

Podwaliny systemu klasyfikacji skał stworzył w roku 1908 Protodiakonow dzieląc 10 klas skał o różnej wytrzymałości, uzupełnionych opisem litologicznym. W latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku do klasyfikacji wprowadzono również charakterystykę odkształcalności skały, opierając się na module sprężystości.

Podstawy klasyfikacji masywów skalnych stworzyli natomiast Deere i Miller [6], wprowadzając w latach siedemdziesiątych elementy wskaźnikowej oceny rozdrobnienia masywu skalnego, takie jak RQD lub rozstaw spękań. Pojawiły się wtedy także pierwsze klasyfikacje oparte na pomiarze prędkości propagacji fal w ośrodku skalnym [18, 22], lecz były one zbyt mało upowszechniane. Geotechniczne klasyfikacje skał i masywów skalnych bazujące na nowoczesnych nieniszczących pomiarach laboratoryjnych prędkości propagacji falowej w ośrodku skalnym z nawiązaniem do jego cech genetycznych i strukturalnych praktycznie są na świecie proponowane dopiero od przełomu ostatniego stulecia [19, 23].

Kamieniem milowym w ocenie cech masywów skalnych było wprowadzenie w latach siedemdziesiątych, przez E. Hoecka, „małych i dużych” nieciągłości kształtujących cechy ośrodków skalnych, czyli pojęć zaczerpniętych z geologii strukturalnej i odróżnienie cech skały (*rock*) od zespołu różnie skonfigurowanych jej bloków (*rock element*) [8].

W konsekwencji od tamtej pory narzucona została konieczność inżynierskiego klasyfikowania całych masywów skalnych, a nie tylko jego wybranych elementów. Powstały wtedy, klasyczne obecnie, kategoryzacje właściwości masywów skalnych według N. Bartona [1], których podstawę stanowią badania norweskie oraz Z. Bieniawskiego [2], wywodzące się z doświadczeń RPA. Opracowano także szereg klasyfikacji i norm branżowych oraz cząstkowych klasyfikacji regionalnych. Nie została jednak opracowana żadna formalna kompleksowa klasyfikacja wytrzymałościowa skał, a przedmiotem uzgodnień do dzisiaj pozostało znaczenie pojęć „skała” i „grunt” oraz granic ocen ich wytrzymałości.

Już w latach osiemdziesiątych R. Krajewski [13] proponował, aby grunt od skały rozróżniać na podstawie kryterium wytrzymałościowego i odporności na rozmakanie. Zgodnie z tym kryterium jako skałę należy traktować ośrodek geologiczny o wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie $R_c > 1,0$ MPa i podatności na rozmakanie $> 0,5$. Zgodnie z normą PN-86/B-02480 [21] za „grunt skalisty” uważa się natomiast grunt rodzimy lity, bądź spękany o nieprzesuniętych blokach (najmniejszy wymiar bloku > 10 cm), którego próbki nie wykazują zmian objętości ani nie rozmakają pod

działaniem wody destylowanej i mają wytrzymałość na ściskanie $R_c > 0,2$ MPa”, a PN-84/B-01080 [20] „Kamień dla budownictwa i drogownictwa” wyróżnia klasy skał o różnej wytrzymałości – od bardzo małej < 15 do bardzo dużej > 200 MPa. Tak więc pojęcia „grunt” i „skała” znajdują swe miejsce w mechanice gruntów i mechanice skał, ale nadal podział ten ma charakter zwyczajowy, a nie formalny i zakres podziału w zależności od normy waha się od 0,2 do 1,5 MPa [14].

Harmonizacja i unifikacja poglądów stała się zatem ważkim przedmiotem prac branżowych Komisji Europejskich. Prace te jednak posuwają się bardzo wolno, natrafiając na opór środowisk wykonawczych, które podchodzą do zagadnień unifikacji bardzo tradycyjnie.

Projekt CEN (Europejskiego Komitetu Normalizacji) w dokumencie ENV-1997-1 „Eurocode 7” pt. „Projektowanie geotechniczne cz. 1. Zasady ogólne” [5] zaleca stosowanie w klasyfikacji skał kompleksowego opisu geologicznego, bardzo rozbudowanego oznaczania parametrów fizyczno-mechanicznych, wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, nie zajmuje się jednakże wyznaczaniem klas kategoryzacji. Pozytywnie jednak, jako novum zaleca laboratoryjną ocenę własności akustycznych ośrodka skalnego przez pomiar prędkości fal ultradźwiękowych.

Jednocześnie przez ISO (International Standard Organization) zostały przedstawione już dwie wersje projektu normy dla skał ISO/DIS 14689 pt. „Geotechnika w budownictwie – identyfikacja i opis skał”. W ostatniej z nich ISO/2000 [10] bardzo szeroko ujęty jest stan wiedzy i wyniki osiągnięć geotechnicznej praktyki międzynarodowej zawarte w pracach IAEG [9], ISRM [11], Bartona [1], Bieniawskiego [2], Browna [3] i wielu innych. Tak kompleksowy opis skał nie był dotychczas ujęty w żadnej normie międzynarodowej.

Według ISO granica między „skałą” a „gruntem” określana jest na podstawie kryterium wytrzymałościowego, zgodnie z którym grunt charakteryzuje wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie $R_c < 0,6$ MPa. Pod terminem „skała” (rock) rozumiany jest naturalny zbiór minerałów, skonsolidowany i zcementowany lub związany ze sobą tak, że jego wytrzymałość jest większa niż wytrzymałość gruntu. Pod terminem „masyw skalny” (rock mass) rozumiana jest skała in situ wraz z nieciągłościami i profilem wietrzeniowym. Pod terminem „materiał skalny” (rock material) rozumiana jest skała nienaruszona wewnątrz powierzchni nieciągłości.

Na podstawie kryterium wytrzymałościowego w propozycji ISO, w stosunku do klasyfikacji Deere’a i Millera [6], zwiększono liczbę klas wytrzymałości z 5 do 7 i nawiązano do klasyfikacji Browna [3]. Według ISO wyróżnia się następujące klasy skał: wyjątkowo mocne, bardzo mocne, mocne, średnio mocne, średnio słabe, słabe i bardzo słabe. Terminy te nie znajdują jednak odzwierciedlenia w innych klasyfikacjach.

Krótki przegląd głównych geotechnicznych klasyfikacji skał i masywów skalnych wskazuje, że podstawę większości stosowanych w praktyce inżynierskiej klasyfikacji stanowią, co prawda podobne kryteria, takie jak wytrzymałość próbki skalnej, odkształcalność, ocena stopnia spękania masywu, szorstkość powierzchni spękań, warunki zawodnienia, lecz w większości z nich granice kategorii są różne i ostateczna kompleksowa ocena wytrzymałościowa jest mało porównywalna.

Równocześnie mimo, że wspomniane klasyfikacje są obecnie bardzo złożone i zawierają skomplikowane, rozbudowane opisy geologiczne, nie przewiduje się ich powszechnego stosowania, do kategoryzacji wytrzymałościowej, laboratoryjnych metod ultradźwiękowych, które łatwiej niż inne można transformować z warunków laboratoryjnych na ekwiwalentne parametry spękanego masywu skalnego o ile dysponuje się prawidłowo sporządzonym opisem makroskopowym.

Wydaje się zatem, że w istniejącej sytuacji rozproszenia i niejasności pojęć co do granic klasyfikacyjnych i metod badawczych, należy w większym zakresie stosować identyfikacyjne badania akustyczne i na ich podstawie dążyć do wskaźnikowych regionalnych ocen masywu skalnego [17].

2. UWAGI METODYCZNE

Badania cech ośrodków skalnych przy zastosowaniu technik ultradźwiękowych mają w Polsce blisko pięćdziesięcioletnią tradycję. Pomiary czasu przejścia fal sprężystych o dużej częstotliwości wprowadził Kołtoński [12], a szersze ich upowszechnienie w laboratoriach nastąpiło w końcu lat siedemdziesiątych [15].

Zaletą badań ultradźwiękowych jest nieniszczący charakter pomiarów. W próbce o znanej gęstości można oznaczyć stałe sprężystości materiału: moduł sprężystości dynamicznej E_d i dynamiczny współczynnik Poissona ν_d oraz skojarzone z nimi moduły sprężystości postaciowej G_d i objętościowej K_d na podstawie pomiaru prędkości fali podłużnej V_p oraz poprzecznej V_s lub powierzchniowej V_R [15].

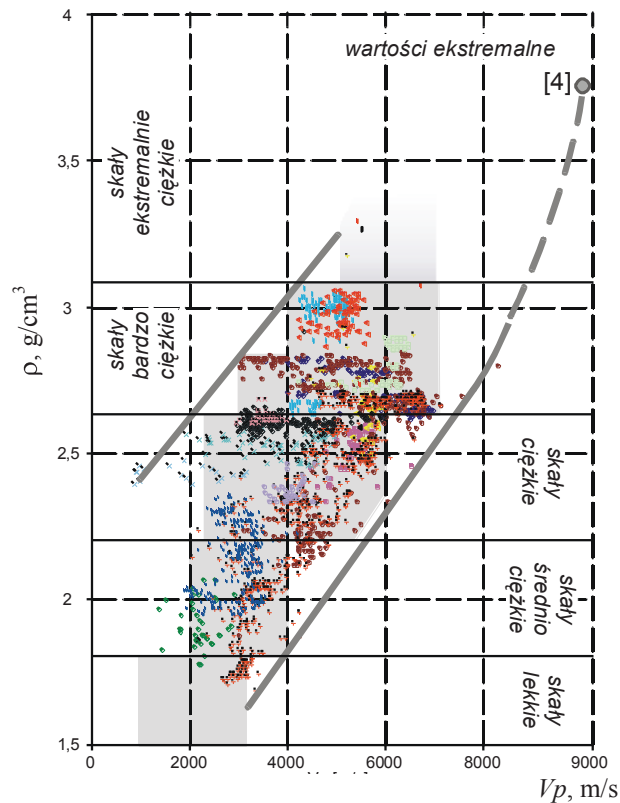
Określenie związku prędkości fali z wytrzymałością skały jest możliwe na drodze empirycznej. Utraty wytrzymałości w skałach, w wyniku procesów kruchego pęknięcia i przejścia materiału próbki skalnej ze stanu quasi-ciągłego w nieciągły, nie można bowiem bezpośrednio ująć formułami teorii sprężystości. Równocześnie wiadomo, że prędkość fali w głębokich partiach litosfery lub w badaniach in situ jest często jedynym wskaźnikiem oceny gęstości i mineralnego składu magmy, ustalonym również na drodze empirycznej.

Dzięki dużym zbiorom danych, uzyskanych z wieloletnich badań wytrzymałościowych, akustycznych i polowych, gromadzonych sukcesywnie w Bazie Danych Geomechanicznych (BDG) Zakładu Geomechaniki Uniwersytetu Warszawskiego, można było powiązać empirycznie i porównać prędkość fali podłużnej z gęstością i wytrzymałością skały oraz wskaźnikowymi parametrami polowymi strukturalnej i wytrzymałościowej zmienności masywu skalnego o dużej różnorodności litologicznej. Dane te były bowiem oznaczone na podstawie zunifikowanej laboratoryjnej metodyki badawczej.

Jak stwierdzono, prędkość podłużnych fal ultradźwiękowych w niezwiędzniętych skałach litych Polski, badana w warunkach laboratoryjnych na znormalizowanych próbkach o średnicy 5 cm i smukłości 1, zmienia się w zakresie od 1400 do 7100 m/s, gęstość objętościowa w zakresie od 1,5 do ponad 3 g/cm³, a wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe od kilku MPa do blisko 400 MPa.

Generalny trend korelacyjny tych parametrów sporządzony dla dużych zbiorów wskazuje, że wzrost gęstości oraz związanej z jej zmianą wytrzymałości ośrodka

skalnego wraz ze wzrostem prędkości fali podłużnej charakteryzuje znaczny przedział zmienności (rys. 1).



Rys. 1. Zmienność prędkości fali podłużnej V_p w skałach Polski w zależności od klasy gęstości objętościowej skały ρ . Wydzielenia klas gęstości wg PN-84/B-01080 uzupełnieniem klasy skał ekstremalnie ciężkich $>3,2 \text{ g/cm}^3$

Fig. 1. Variability of longitudinal wave velocity V_p in Poland's rocks, depending on the class of rock volumetric density ρ . Density class separation according to PN-84/B-01080 standard with supplement of class of extremely heavy rocks $>3,2 \text{ g/cm}^3$

Tak wzrost prędkości rozchodzenia się fal sprężystych, jak i wytrzymałości i gęstości skał, podstawowych elementów ich geotechnicznej charakterystyki, jest ograniczony warunkami brzegowymi. Znane z literatury skrajnie wysokie prędkości fali podłużnej, oznaczone laboratoryjnie dochodzą w warunkach pokojowych do 8100 m/s w eklogitach i w dunitach. W warunkach nawodnienia, wysokiego ciśnienia lub temperatury prędkości mogą być nieco wyższe. W eklogicie i dunitach po nawodnieniu prędkość wzrasta do 8400 m/s, a w temperaturze 200°C i przy ciśnieniu 5 kBa nawet do 8900 m/s. Gęstość pozorna tych skał dochodzi w takich warunkach do 3,74 g/cm³, a ich skrajna wytrzymałość na ściskanie osiąga wartość 450 MPa [4].

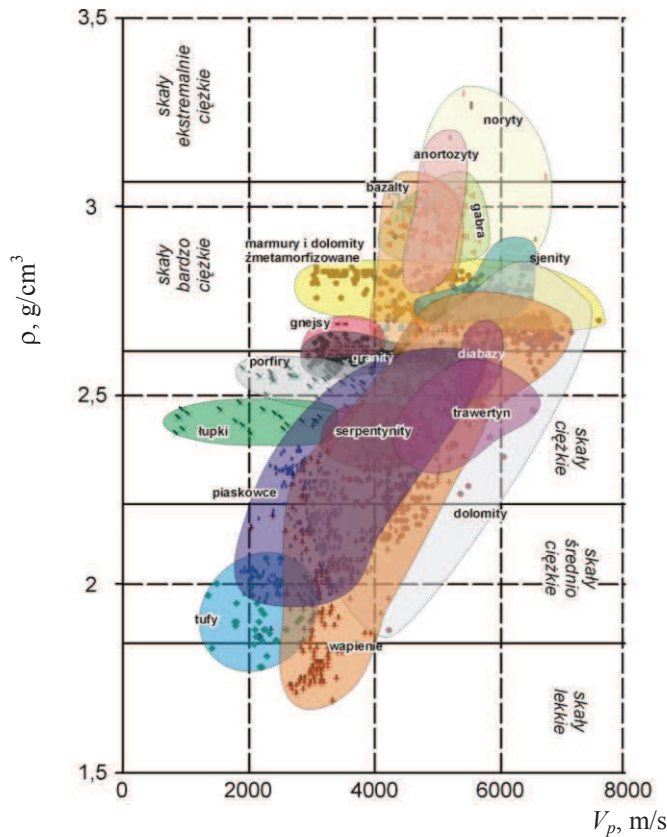
Na tym tle, ustalona na podstawie badań laboratoryjnych Zakładu Geomechaniki UW, zmienność parametrów geotechnicznych skał Polski jako całości odpowiada

ogólnemu założeniu, że im skała jest bardziej zwięzła i ma wyższą gęstość objętościową, tym szybciej rozchodzą się w niej sygnały ultradźwiękowe (rys. 1). Przy czym w skałach bardzo ciężkich zależność ta przybiera charakter wykładniczy i niewielki wzrost prędkości fali świadczy o znacznym wzroście gęstości ośrodka skalnego. Ograniczenie tego nieliniowego charakteru wzrostu wykazano dla warunków ekstremalnych, dla prędkości zbliżonych do 8000 m/s.

Przyjmując kategoryzację skał na klasy gęstości objętościowej ρ , zgodne z normą PN-84/B-01080 [20], można przyjąć dla skał lekkich przedział prędkości V_p od 1500 do 3000 m/s, średnio ciężkich od 2000 do 4000 m/s, ciężkich od 2300 do 6000 m/s, a bardzo ciężkich od 3000 do 7000 m/s.

Wydzielając dodatkowo klasę o gęstości ekstremalnej powyżej $3,2 \text{ g/cm}^3$ należałoby charakteryzować ją prędkością zmieniającą się w zakresie od 5000 do $> 8000 \text{ m/s}$.

Wydzielone klasy gęstości i przedziały prędkości są reprezentowane przez różne typy litologiczne skał, których obszary zmienności prędkości falowej są rozmyte i zachodzą na siebie nawzajem (rys. 2).



Rys. 2. Zmienność litologiczna zbadanych typów skał Polski na tle gęstości objętościowej ρ oraz prędkości fali podłużnej V_p

Fig. 2. Lithological variability of tested types of Poland's rocks against the background of their rock volumetric density ρ and longitudinal wave velocity V_p

Rozmyty charakter obszarów zmienności prędkości falowej i gęstości utrudnia zatem wyróżnienie odmian litologicznych znajdujących się na diagramie blisko siebie. W zakresie wysokich prędkości rzędu 6000 m/s trudne jest na przykład odróżnienie sjenitu od dolomitu, a w zakresie prędkości rzędu 4000 m/s granitu od wapienia.

Generalnie jednak, ocena prędkości fali podłużnej jest selektywnym kryterium klasyfikacji skał tak pod względem litologicznym, jak i pod względem ich gęstości i wytrzymałości, o ile spełnione są warunki pomiaru w ośrodku nieograniczonym oraz gdy przy interpretacji znane są lokalne defekty i inne wtórne czynniki geologiczne wpływające na zmianę pierwotnych właściwości skały. Szczególną uwagę należy zwracać na anizotropię, losowe przejawy mineralizacji oraz spękania, które zależnie od warunków należy wydzielić jako zbiór danych o nietypowo wysokich bądź niskich wartościach prędkości fali dla danej odmiany litologicznej. I tak na przykład w brekcjach wtórnie zmineralizowanych może zaznaczać się kierunkowe silne tłumienie fali, lecz wytrzymałości mogą być bardzo wysokie, a w łupkach kwarcytowych, mimo nieznacznych różnic gęstości, prędkość propagacji fali podłużnej V_p w zależności od kierunku badania w stosunku do uwarstwienia może się różnić nawet dwukrotnie. Podobny wpływ może mieć kierunkowy rozkład porów, kawern lub pęknięć w próbce skalnej. Zatem prędkości fal akustycznych powinny być interpretowane dla różnych kierunków pomiarów i na tle zmienności geologicznej. W badaniach laboratoryjnych dane takie są łatwe do uzyskania na podstawie analizy makroskopowej każdej próbki.

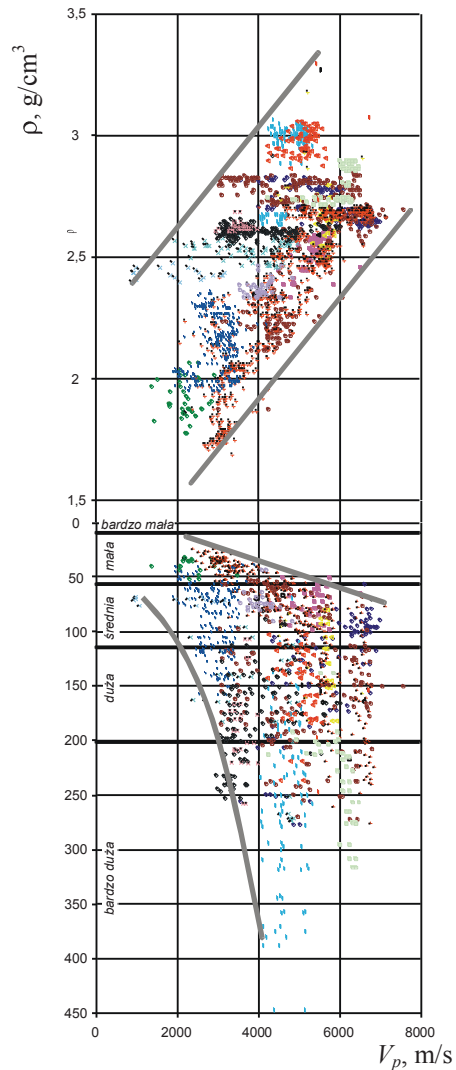
Gdy badania służą do oceny masywu skalnego, przy selekcji wyników konieczna jest identyfikacja kierunku ciosu i głównych struktur geologicznych w odniesieniu do osi próbki i kierunków pomiaru. Aby zatem poprawnie klasyfikować skały na podstawie identyfikacyjnych korelacji z wynikami badań ultradźwiękowych, należy badania prowadzić:

- na próbkach zorientowanych względem geometrii warstw, struktur tektonicznych i sedymentacyjnych oraz względem stron świata,
- w nie mniej niż dwóch wybranych, wzajemnie prostopadłych kierunkach, w odniesieniu do osi próbki laboratoryjnej,
- ze zwiększeniem liczby pomiarów przy każdej stwierdzonej makroskopowo zmienności litologicznej lub strukturalnej ośrodka,
- z zastosowaniem uzupełniających pomiarów tłumienia fali w wybranych kierunkach,
- przy uwzględnieniu ewentualnego wpływu dodatkowych czynników zewnętrznych, jak na przykład temperatury, nawodnienia, korozyjnego działania roztworów porowych, ciśnienia.

3. ASPEKTY KLASYFIKACYJNE

Gdy brak informacji o kierunku pomiarowym oraz o dodatkowych cechach zmienności strukturalnej ośrodka skalnego, przedziały zmienności prędkości falowej w obrębie klas wytrzymałościowych mogą być duże, aczkolwiek wyznaczają ogólną tendencję zmienności (rys. 3). Trudność i brak tradycji w interpretowaniu tego

rozrzutu na tle cech strukturalnych jest zapewne przyczyną małego zainteresowania zastosowaniem ultradźwiękowych technik badawczych do wytrzymałościowej klasyfikacji skał.



Rys. 3. Ogólny przedział zmienności gęstości objętościowej ρ i wytrzymałości R_c na tle zmienności prędkości fali podłużnej V_p

Fig. 3. General variability interval of volumetric density ρ and strength R_c against the background of variability of longitudinal wave velocity V_p

Stosując, bez odpowiedniej selekcji, podział na klasy wytrzymałościowe według normy PN-54/B-02480 [21] w klasie skał o wytrzymałości R_c średniej, można znaleźć skały o prędkości fali podłużnej V_p od <2000 do >6000 m/s, zależnie od warunków badania. Zatem skała o wytrzymałości w granicach 100 MPa może lokalnie wykazywać prędkości wyższe niż spotykane w skałach o dużej i bardzo dużej wytrzymałości.

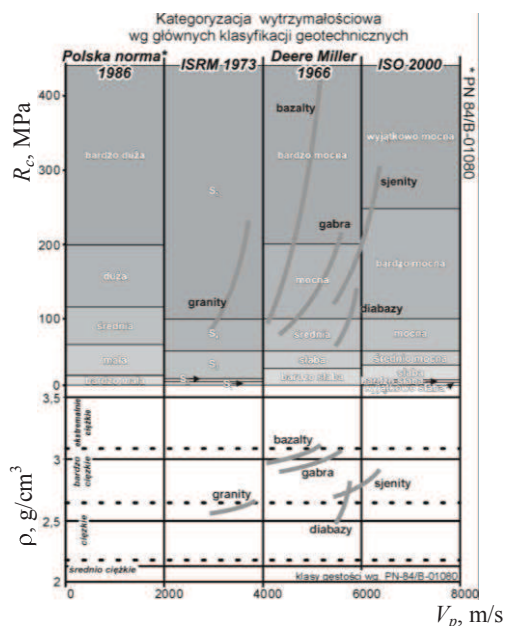
Z tej przyczyny w skałach anizotropowych o znanej litologii pomiary prędkości muszą być prowadzone w kilku kierunkach, a pojawianie się nietypowych prędkości musi być interpretowane na tle kierunku pomiarów wytrzymałości, powiązanego z charakterem anizotropii akustycznej skały.

W łupkach kwarcytowych, gnejsach oraz w zmetamorfizowanych i zdolomityzowanych skałach węglanowych obserwuje się na przykład wysokie prędkości fali wzdłuż powierzchni nieciągłości lub laminacji, czego nie odzwierciedla ocena wytrzymałości osłabionej spękaniami w tym kierunku. Kierunki pomiarów akustycznych muszą być zatem miarodajnie odniesione do kierunku badań wytrzymałościowych. Niezbędne jest również odróżnienie wytrzymałości pierwotnej od wtórnej.

Wyznaczanie związków korelacyjnych, łączących ultradźwiękowe pomiary laboratoryjne z wytrzymałością skał, wymaga więc dokładnego rozpoznania lokalnych czynników geologicznych wpływających tak na zmienność prędkości fal ultradźwiękowych, jak i wytrzymałości. Zmienność ta w naturalnych warunkach ośrodków skalnych jest efektem pierwotnych procesów litogenetycznych oraz lokalnych, bardzo zróżnicowanych procesów wtórnych, które tak w skali próbki, jak i w skali masywu można scharakteryzować wskaźnikiem GSI (Geological Strength Index) wprowadzonym przez Hoekka [7]. Na podstawie makroskopowych opisów geologicznych można wtedy ocenić na ile, w niejednorodnym, anizotropowym ośrodku skalnym, zmienny czas przejścia fali jest lokalnym wyrazem losowo zmiennej wytrzymałości ośrodka skalnego. O ile zatem pomiary czasu przejścia sygnałów ultradźwiękowych mają służyć do oceny wytrzymałości, muszą być odpowiednio selekcjonowane w nawiązaniu do charakteru niejednorodności ośrodka i celów badawczych.

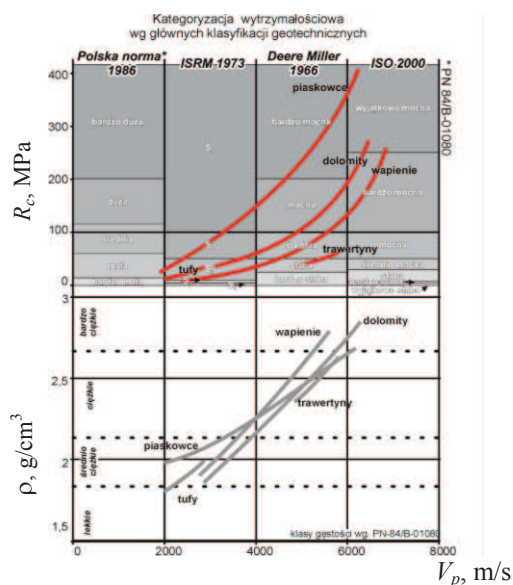
Szczegółowe zależności klasyfikacyjne należy tworzyć na tle tendencji ogólnych, charakteryzujących nie tylko zmienność prędkości falowej i wytrzymałości, lecz również gęstości ośrodka, w podziale litologicznym i genetycznym.

Poniżej przedstawiono generalne tendencje zmian prędkości fali podłużnej V_p w badanych skałach Polski na tle zmienności wytrzymałościowej R_c oraz gęstości objętościowej ρ . Na diagramach wyróżniono odrębne, swoiste zachowanie skał magmowych, osadowych i metamorficznych (rys. 4, 5 i 6). Ustalenia te przedstawiono porównawczo w odniesieniu do terminologii i przedziałów kategoryzacji stosowanych w głównych klasyfikacjach wytrzymałościowych Deere'a i Millera (1966), ISRM (1973), polskiej normy PN-86/B-02480 (86) oraz ISO (2000).



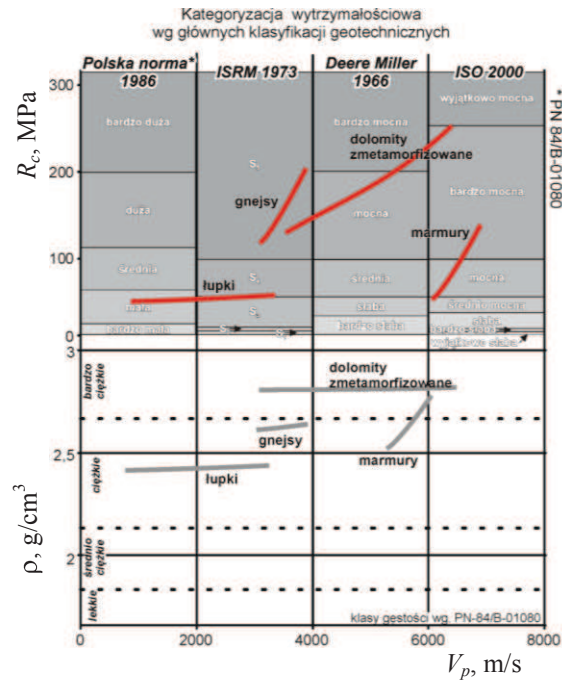
Rys. 4. Ogólny schemat zależności wytrzymałości na ściskanie R_c w skałach magmowych od prędkości fali podłużnej V_p oraz gęstości objętościowej ρ

Fig. 4. General scheme of dependence of compressive strength R_c in magmatic rocks on longitudinal wave velocity V_p and volumetric density ρ



Rys. 5. Ogólny schemat zależności wytrzymałości na ściskanie R_c w skałach osadowych od prędkości fali podłużnej V_p oraz gęstości objętościowej ρ

Fig. 5. General scheme of dependence of compressive strength in sedimentary rocks on longitudinal wave velocity V_p and volumetric density ρ



Rys. 6. Ogólny schemat zależności wytrzymałości na ściskanie R_c w skałach metamorficznych od prędkości fali podłużnej V_p oraz gęstości objętościowej ρ

Fig. 6. General scheme of dependence of compressive strength R_c in metamorphic rocks on longitudinal wave velocity V_p and volumetric density ρ

Charakterystyczną cechą **skał magmowych** jest wzrost prędkości fal sprężystych wraz ze wzrostem zasadowości ich składu magmowego. Zależność wytrzymałości na ściskanie R_c od prędkości fali V_p ma charakter wykładniczy, ale indywidualny dla poszczególnych odmian litologicznych. Istotną cechą tych zależności jest szybki wzrost wytrzymałości wraz ze wzrostem gęstości objętościowej i prędkości fali podłużnej (rys. 4).

Tak więc, szczególnie w klasach skał bardzo ciężkich, niewielkie różnice w ocenie prędkości i gęstości skał magmowych mogą skutkować zmianą kategoryzacji z klasy średniej wytrzymałości na klasę dużej, a nawet bardzo dużej wytrzymałości.

W **skałach osadowych** wzrost wytrzymałości sygnalizowany wzrostem prędkości zachodzi mniej gwałtownie niż w skałach magmowych. Jednakże wzrost obu tych parametrów świadczy o znacznym wzroście gęstości objętościowej ośrodka (rys. 5). Dolne zakresy prędkości i gęstości oraz wytrzymałości związane są ze skałami słabymi tak węglanowymi (margle, gezy, wapienie mszywiolowe), jak i okrucowymi (np. piaskowce o spoiwie żelazisto-ilastym). Zakresy górne dotyczą skał węglanowych ciężkich i bardzo ciężkich, głównie wapieni wtórnie zdolomityzowanych lub częściowo przeobrażonych oraz piaskowców kwarcytowych. Bardziej szczegółowa analiza tej zmienności wskazuje, że w piaskowcach wzrost wytrzymałości w klasie

bardzo dużej wytrzymałości jest sygnalizowany znacznie niższymi przyrostami prędkości niż w skałach węglanowych.

Cechą charakterystyczną skał **metamorficznych** jest zróżnicowanie prędkości fali zależnie od zawartości minerałów podstawowych. Skały o dużej zawartości krzemionów, jak na przykład łupki kwarcytowe czy gnejsy wskazują niższe parametry prędkości niż skały o składzie węglanowym, na ogół jednak wzrost parametrów wytrzymałościowych i falowych, z wyłączeniem marmurów, jest uwarunkowany niewielkimi zmianami gęstości objętościowej (rys. 6).

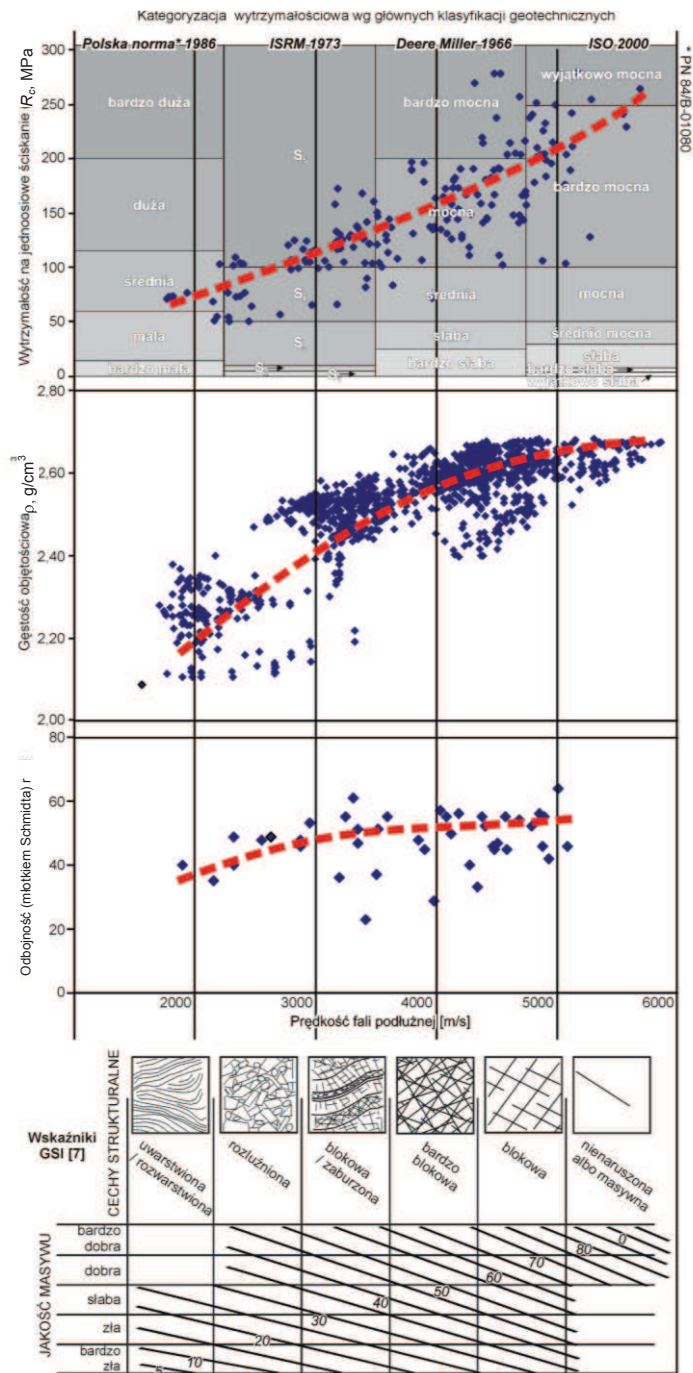
Przedstawione na diagramach tendencje zmian mogą być pomocne przy formułowaniu korelacji szczegółowych. Szczegółowe oceny powinny opierać się na korelacji kilku parametrów charakteryzujących cechy petrofizyczne skały oraz kilku parametrach charakteryzujących cechy akustyczne. Szczególnie pomocne stają się to, gdy kierunki pomiarowe nie są jednoznacznie zorientowane, a rozpoznanie zmienności litologicznej ośrodka skalnego nie jest dostateczne.

Posługiwanie się tylko jednym parametrem wiodącym, jakim jest prędkość fali podłużnej do oceny wytrzymałości, może być zatem w wielu przypadkach niewystarczające.

Skały o różnym wykształceniu litologicznym lecz podobnym stopniu spękania mogą się bowiem często charakteryzować zbliżoną prędkością.

Niezbędne stają się wtedy równoczesne posługiwanie się szczegółową analizą gęstości objętościowej i wytrzymałości oraz prędkością fali podłużnej lub innymi charakterystycznymi parametrami akustycznymi, jak na przykład prędkość fali poprzecznej lub współczynnik tłumienia.

Przykład kompleksowej oceny skał na podstawie pomiarów ultradźwiękowych obrazuje diagram (rys. 7). Przedstawiono na nim zróżnicowany strukturalnie i ziarnowo zespół piaskowców fliszowych z rejonu Polskich Karpat.



Rys. 7. Diagram korelacji cech wytrzymałościowych i petrofizycznych ze zmiennością strukturalną piaskowców fliszowych

Fig. 7. Diagram of correlation of strength and petrophysical features with structural variability of flysch sandstones

Na diagramie oceny szczegółowej, skorelowano prędkość fali podłużnej jako parametru wiodącego z gęstością objętościową, wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie oraz cechami strukturalnymi ośrodka.

Dane do analizy cech strukturalnych pochodzą z oceny makroskopowej próbek skalnych, badań polowych odbojności młotkiem Schmidta r oraz wskaźnika dezintegracji masywu skalnego GSI.

Zróznicowanie terminologii klasyfikacji wytrzymałościowej przedstawione jest porównawczo dla ocen stosowanych w czterech ważniejszych zaleceniach klasyfikacyjnych (Deere'a i Millera/66, ISRM/73, polskiej normy PN-86/B-02480 oraz ISO/20000) podobnie jak tendencje ogólne dla skał magmowych, osadowych i metamorficznych.

Z przedstawionych rozważań wynika, że sporządzanie diagramów wskaźnikowych umożliwia szybkie, nieniszczące charakteryzowanie cech wytrzymałościowych i przydatności geotechnicznej skał i masywów skalnych niezależnie od stosowanej klasyfikacji. Ocena taka związana jest jednak z koniecznością indywidualnego opracowania i praktycznego zweryfikowania diagramów porównawczych dla poszczególnych regionów geologicznych.

Literatura

1. Barton N.: *General report Concerning Some 20th Century Lessons and 21st Century Challenges in Applied Rock Mechanics, Safety and Control of the Environment*. Paris, Proc. 9th Int. Congr. Rock Mech. ISRM. 1999.
2. Bieniawski Z. T.: *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley. 1989.
3. Brown E.T. (ed.): *Rock characterisation, testing and monitoring – ISRM suggested methods*. Oxford: Pergamon. 1981.
4. Carmichael R. S.: *Practical handbook of physical properties of rock and minerals*. Boston, CRC. 1990.
5. CEN. ENV – 1. „Eurocode 7”: *Projektowanie geotechniczne* 1997.
6. Deere D.U., Miller R.P.: *Engineering classification and index properties for intact rock: Tech. Rep., AFWL-TR-65-116*, Univ. of Illinois, Urbana 1966.
7. Hoek E.: *Putting numbers to geology-an engineer's viewpoint*. „Felsbau” Rock and Soil Engineering. J. of Eng. Geol., Geomechanics and Tunnelling 3. Innsbruck 1999.
8. Hood M., Brown E.T.: *Mining rock mechanics, yesterday, today and tomorrow*. Paris, Proc. 9th Int. Congr. Rock Mech. ISRM. 1999 s. 26–51.
9. IAEG: *International Association of Engineering Geology Rock and Soil Description and Classification of Engineering Geological Mapping*. Bull. of IAEG 1981. Vol. 24, s. 235–274.
10. ISO – 1: *Geotechnical engineering – Identification and description of rock*. ISO 14689.CEN/TC 250/S.C. 7. N 324. 2000.
11. ISRM: *International Society of Rock Mechanics suggested methods for quantitative description of discontinuities in rock masses*. Inter. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1978 Vol. 15, s. 319–368.
12. Kołtoński W.: *O możliwościach zastosowania fal ultradźwiękowych w geologii i górnictwie*. Przeg. Geol. 1955 nr 7.
13. Krajewski R.: *Terminologia i klasyfikacja masywów skalnych*. Przeg. Geol. 1984 nr 12, s. 617–620.

14. Pinińska J.: *Od skały do gruntu – mechanizmy pękania w skałach*. Warszawa, PAN. Wyd. Polit. Warszawskiej, Inst. Dróg i Mostów. Zakład Geotech. i Budowli Podziemnych 2000.
15. Pinińska J.: *Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał*. Warszawa, Z. Geom. IHiGI W. Geol. UW. 1994–2000 T. 1 do 6.
16. Pinińska J.: *Klasyfikacja gruntów skalistych*. Mat. Konf. Tech.: Harmonizacja Polskich norm geotechnicznych z systemem norm europejskich. Warszawa, Wyd. ITB. 2000, s. 117–133.
17. Pinińska J.: *Ku wskaźnikowym oceną geotechnicznej przydatności masywów skalnych*. Wrocław, Wyd. Pol. Wroc. XXIV Zim. Szk. Mech. Górntw. 2001 s. 395–404.
18. Pinińska J.: *Systemy geologiczno-inżynierskiej oceny skał i masywów skalnych*. Przeg. Geol. 2001 nr 9, s. 804–814.
19. Pinińska J. Płatek P.: *Badania ultradźwiękowe w ocenie wytrzymałościowej skał* Górnictwo odkrywkowe 2002 nr 2/3 s. 89–96.
20. Polska Norma PN-84/B-01080: *Kamień dla budownictwa i drogownictwa. Podział i zastosowanie wg własności fizyczno-mechanicznych*. Warszawa, PKN i M.
21. Polska Norma PN-86/B-02480: *Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów*. Warszawa, PKN i M.
22. Thiel K.: *Mechanika skał w inżynierii wodnej*. Warszawa, PWN 1980.
23. Thiel K.: *Wprowadzenie. Mat. Sem. Nauk. Budowle podziemne wykonywane w złożonych warunkach geologicznych*. Warszawa. Wyd. Inst. Meteorologii i Gosp. Wodnej 1993.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Józef Dubiński

Joanna Pinińska jest pracownikiem Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego