

1. WPROWADZENIE

Postęp technologiczny ostatnich kilkudziesięciu lat, rozwój infrastruktury drogowej kraju oraz rosnące potrzeby energetyczne i konieczność magazynowania węglowodorów zwiększają zainteresowanie budownictwem podziemnym. Powstają projekty tuneli drogowych i kolejowych, na cele magazynowe adaptuje się podziemne wyrobiska i szyby, a także buduje się podziemne zbiorniki do składowania i/lub magazynowania ropy naftowej oraz gazu ziemnego. Szacowane bogate zasoby niekonwencjonalnych złóż gazu spowodowały wzrost liczby głębokich wierceń, a potencjalna ich eksploatacja narzuca konieczność stosowania zabiegów udrażniających górotwór w postaci szczelinowania hydraulicznego. Współczesna geomechanika wymaga zatem dokonania charakterystyki procesu deformacji skał w złożonym stanie naprężenia, odwzorowującym warunki rzeczywiste w górotworze.

Zachowanie się skał podczas badań jednoosiowego ściskania jest dość dobrze rozpoznane, do czego znacząco przyczyniło się rozpowszechnienie pras o dużej sztywności, pozwalających rejestrować nie tylko przedkrytyczną, ale także i pokrytyczną ścieżkę deformacji. W warunkach trójosiowego ściskania, w złożonym stanie naprężenia, opis deformacji skał jest jednak ciągle niepełny i aby był wiarygodny, musi uwzględniać zarówno wysokie ciśnienie panujące na znacznych głębokościach, jak i zmieniającą się w skorupie ziemskiej temperaturę. Konieczne staje się zatem stosowanie w badaniach geomechanicznych komór trójosiowych (termociśnieniowych), dzięki którym jest możliwe modelowanie (w przybliżeniu) warunków panujących na różnych głębokościach.

Pierwsze testy wytrzymałościowo-odkształceniowe skał w podwyższonym ciśnieniu wykonywano już na początku XX w., jednak dopiero w latach 80. Międzynarodowe Towarzystwo Mechaniki Skał (ISRM) wydało zalecenia dotyczące badań w warunkach trójosiowego ściskania.

Literatura naukowa z tej dziedziny wskazuje, że w warunkach niskiego ciśnienia okólnego skały pękają krucho. Zjawisku temu towarzyszy wyzwolenie się energii sprężystej m.in. w postaci efektu akustycznego. Wzrost ciśnienia okólnego powoduje jednak, że po przekroczeniu charakterystycznego dla danej odmiany litologicznej poziomu skały zaczynają odkształcać się ciągliwie, nabierając zdolności do przenoszenia dużych odkształceń trwałych bez efektów kruchości pęknięcia. Wyznaczenie progów, przy którym skała przechodzi ze stanu kruchości w stan ciągliwy, jest jednym z aktualnych zadań geomechaniki.

Obserwowane w laboratorium w skali mikro zjawiska kruchości pęknięcia skał są odpowiednikiem zjawisk rzeczywistych – tektonicznych trzęsień ziemi, mających często tragiczne skutki w zaludnionych obszarach globu. Odkształcenia plastyczne (zachowanie ciągliwe) odpowiadają natomiast deformacjom ciągłym, np. fałdowym, przebiegającym w czasie i nie mającym gwałtownego, katastroficznego przebiegu. Poznanie mechanizmów zniszczenia skał jest więc bardzo istotnym problemem naukowym, nie tylko w zakresie geomechaniki, ale także ma znaczenie dla geologii strukturalnej, tektoniki i tektonofizyki.

Podstawą oceny geomechanicznej ośrodków skalnych są przede wszystkim klasyczne badania jednoosiowego ściskania, wykonywane powszechnie w laboratoriach na całym świecie. W zależności od możliwości technicznych, stopnia zaawansowania aparatury badawczej i złożoności procedur, badania te pozwalają w różnym stopniu scharakteryzować proces deformacji materiału skalnego w tzw. warunkach normalnych – przy ciśnieniu atmosferycznym i temperaturze pokojowej. Opis zachowania się skał w takich warunkach jest więc bardzo szeroki i wielowątkowy, obejmuje różne grupy litologiczne i często ma bardzo szczegółowy charakter.

Głównym celem naukowym tego opracowania jest jednak charakterystyka odkształcalności (deformacji) skał w złożonym stanie naprężenia, w warunkach osiowo-symetrycznego stanu naprężeń ściskających ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = p$).

Jako przedmiot badań geomechanicznych wybrano piaskowce fliszu karpaccyjskiego, które w swej stosunkowo niedawnej historii geologicznej były poddawane działaniu sił tektonicznych. Na obszarze ich występowania obecne są struktury geologiczne, zarówno nieciągłe – łuski, uskoki, powstałe na skutek pęknięcia kruchości, jak i struktury ciągłe – fałdy, tworzące się w wyniku długotrwałych odkształceń. Geneza skał fliszowych jest związana z dynamiką prądów zawieszonych transportujących zróżnicowany materiał klasyczny w głębokim, dość monotonnym zbiorniku morskim, w tym przypadku w okresie kredy i paleogenu. Pod wpływem ruchów tektonicznych w neogenie zostały one odkłute od podłoża, podzielone na płaszczowiny i następnie przesunięte na odległość od kilkudziesięciu do kilkuset kilometrów na północ. Późniejsze procesy wietrzeniowe spowodowały, że sfałdowane, drobnoziarniste osady, takie jak mułowce i iłowce, są obecnie znane przede wszystkim z wierzeń, a na powierzchni terenu odsłaniają się praktycznie tylko w oknach tektonicznych. Wyraźnie dominują tutaj

bardziej odporne na wietrzenie piaskowce, tworząc wyniesienia i pasma górskie. Są one eksploatowane i wykorzystywane jako surowce skalne na potrzeby budownictwa, drogownictwa i innych dziedzin gospodarki. W ścianach kamieniołomów odsłaniają się w stanie niezwiędniętym i właśnie dzięki ułatwionej dostępności tę grupę skał wybrano do badań.

Piaskowce fliszu karpackiego były wielokrotnie badane pod kątem ich właściwości fizyczno-mechanicznych, przede wszystkim jednak w warunkach jednoosiowego ściskania, zatem istnieje wiele opracowań na ten temat. W warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania analizy wytrzymałościowo-odkształceniowe tych skał były znacznie rzadziej wykonywane i tym samym liczba publikowanych materiałów, dotyczących zależności między naprężeniem a odkształceniem osiowym, obwodowym i objętościowym w złożonym stanie naprężenia, jest ograniczona.

Badania właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych skał regionu karpackiego w warunkach jednoosiowego ściskania, prowadzone w ramach dwóch projektów badawczych, zakończonych w 2003 r. pod kierunkiem autora i w 2004 r. pod kierunkiem Joanny Pinińskiej (2004) w Środowiskowym Laboratorium Badania Ośrodków Skalnych Zakładu Geomechaniki Uniwersytetu Warszawskiego, wykazały, że mimo znacznego podobieństwa mineralnego w poszczególnych odmianach litologicznych występują duże różnice w przebiegu „ścieżek” deformacji. Do charakterystyki tego procesu powszechnie stosowany system wydzieleni rodzajów skał, oparty tylko na analizie petrograficznej, nie jest wystarczający, podobnie jak kryterium nawiązujące jedynie do uziarnienia. Piaskowce fliszowe wykazują bowiem duże zróżnicowanie frakcyjne oraz słabe wysortowanie materiału.

Do badań prezentowanych w niniejszej pracy dobierano materiał skalny pod względem jego zmienności facjalnej i na tej podstawie lokalizowano miejsca pobierania próbek. Przyjęty następnie, jako zasadniczy, podział na trzy główne typy badawcze został ustalony na podstawie charakterystycznych cech skał fliszowych: stopnia diagenety, wielkości uziarnienia i składu mineralnego.

Charakterystykę odkształcalności piaskowców fliszowych przeprowadzono na podstawie własnych badań geomechanicznych:

- wstępnych badań identyfikacyjnych właściwości fizycznych oraz pomiarów prędkości fal ultradźwiękowych;
- badań wytrzymałościowych w jednoosiowym stanie naprężenia;
- badań wytrzymałościowych w trójosiowym stanie naprężenia;
- badań chropowatości powierzchni zniszczenia uzyskanych z badań wytrzymałościowych.

Badania cech fizycznych miały na celu przede wszystkim ustalenie gęstości objętościowej i porowatości całkowitej niezbędnej do wstępnej charakterystyki badanego materiału skalnego oraz weryfikacji przyjętego podziału litologicznego, czemu służyły również nieniszczące badania ultradźwiękowe. Ich wyniki stano-

wiły jednocześnie wstępną prognozę przebiegu deformacji (odkształcalności) piaskowców fliszowych pod obciążeniem. Zmiennie ukierunkowane pomiary umożliwiły także ustalenie stopnia anizotropii badanych ośrodków skalnych, zarówno na podstawie rejestrowanych zmian prędkości fali podłużnej i poprzecznej, jak również poprzez ustalone na ich podstawie dynamiczne stałe sprężystości.

Testy wytrzymałościowe w jednoosiowym stanie naprężeń stanowiły pierwszy wariant badań w złożonym stanie naprężenia, gdy ciśnienie okólne było równe zero ($p = 0$ MPa) i przeprowadzono je głównie dla celów porównawczych. Ich wyniki posłużyły także do wyznaczenia związków empirycznych w postaci zależności funkcyjnych między podstawowymi parametrami geomechanicznymi.

Zasadniczą charakterystykę wytrzymałościowo-odkształceniową analizowanych piaskowców fliszowych przeprowadzono na podstawie badań w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania, na podstawie których wyznaczono:

- maksymalne naprężenie różnicowe i progowe wartości naprężenia na progu liniowości odkształceń osiowych oraz na progu dylatacji właściwej;
- krytyczne odkształcenia osiowe, obwodowe i objętościowe;
- statyczne stałe sprężystości – moduł Younga i współczynnik Poissona;
- wielkość energii krytycznej (niezbędnej do zniszczenia) oraz energii dylatacji (niezbędnej do zainicjowania pęknięcia niestabilnego na progu dylatacji właściwej).

Obok charakterystyki wytrzymałościowo-odkształceniowej badanych skał, dużo miejsca poświęcono części metodycznej, mającej istotne znaczenie dla poprawności wykonywanych testów w trójosiowym stanie naprężenia i doboru odpowiedniego wariantu badawczego. Wykorzystując możliwości techniczne stosowanej aparatury, badania prowadzono trzema metodami, odmiennie w każdej z nich osiągając punkt krytyczny i doprowadzając do ostatecznego zniszczenia próbki. Wykonywano pojedyncze testy klasyczne przy niezmiennym ciśnieniu okólnym oraz testy wielokrotnego i ciągłego zniszczenia, zwiększając poziomy ciśnienia okólnego w trakcie badania. Wyniki wykonanych w ten sposób badań pozwoliły ustalić znaczenie wariantu badawczego dla różnicowania się deformacji badanych piaskowców fliszowych przy różnych ścieżkach obciążenia.

Stosując w badaniach zmienne poziomy ciśnienie okólnych, starano się ustalić wpływ wartości $\sigma_2 = \sigma_3 = p$ na przebieg procesu dylatacji. Analizowano zależności między odkształceniami osiowymi i obwodowymi (podłużnymi i poprzecznymi) a wywołującymi je zmianami naprężenia tak, aby możliwie dokładnie ustalić znaczenie wartości ciśnienia okólnego dla inicjacji i rozwoju spękań. W ocenie ilościowej wykorzystano również wyznaczoną wartość energii dylatacji odniesionej do energii krytycznej, a zdefiniowany i otrzymany w ten sposób nowy wskaźnik energetyczny kwantyfikuje zróżnicowanie litologiczne badanych skał.

Wskutek kruchej pęknięcia i zniszczenia próbki skalnej w testach trójosiowego ściskania powstaje jedna główna powierzchnia pęknięcia, wzdłuż której na-

stępuje wzajemne przemieszczanie się ścianek bocznych szczeliny. Istotnego znaczenia nabierają wówczas siły tarcia powierzchniowego, przeciwstawiające się dalszej dezintegracji skały. Wielkość tarcia zależy od kształtu, formy i morfologii powierzchni kontaktu, im jest ona bardziej „szorstka”, tym bardziej siła tarcia wzrasta.

Uzyskane w badaniach wytrzymałościowych powierzchnie ściana poddano ocenie chropowatości w profilometrze, uzyskując ich parametryczną charakterystykę. Ustalono w ten sposób wpływ ciśnienia okólnego na zmiany morfologii szczelin, a co za tym idzie, na wielkość sił tarcia przeciwstawiającego się zniszczeniu.

W przeprowadzonych badaniach odniesiono się także do naturalnej dla skał fliszu karpackiego anizotropii, rejestrowanej wcześniej w badaniach ultradźwiękowych, ściskając w maszynie wytrzymałościowej próbki różnie zorientowane względem cech strukturalno-teksturalnych. Głównym celem tych badań było wyznaczenie uprzywilejowanego kierunku, w którym wytrzymałość i odkształcalność przyjmuje wartości ekstremalne – minimalne i maksymalne. Do tego typu badań wybrano jeden z typów litologicznych o stwierdzonej wcześniej dużej anizotropii ultradźwiękowej.

Podsumowaniem wyników badań są obwiednie wytrzymałości obrazujące stan graniczny wytrzymałości. Uwzględniono w nich zróżnicowanie litologiczne materiału i zmienne warunki ciśnieniowe, a także stosowane w badaniach różne ścieżki obciążenia. Ustalone na podstawie obwiedni wartości kątów tarcia wewnętrznego i spójności odniesiono do stałych materiałowych dla warunku eksperymentalnego według Coulomba–Mohra, Fairhursta oraz Hoeka–Brown.