

*Danuta Flisiak\**

## METODYKA BADAŃ SOLI KAMIENNEJ W WARUNKACH KONWENCJONALNEGO TRÓJOSIOWEGO ŚCISKANIA DLA PROJEKTOWANIA PODZIEMNYCH MAGAZYNÓW\*\*

---

### 1. Wstęp

Specyficzna budowa geologiczna wysadów solnych ma bardzo duży wpływ na sposób projektowania i budowy podziemnych magazynów. Znaczne zróżnicowanie struktury wewnętrznej powoduje, że wielkogabarytowym obiektom podziemnym towarzyszą serie solneo zmiennych własnościach, także pod względem geomechanicznym. Ponadto użytkowanie magazynów powoduje zmianę warunków w otaczającym je górotworze: jego początkowe wychłodzenie, spowodowane ługowaniem komór i powrót do pierwotnej temperatury, wynikającej z głębokości, a w przypadku magazynowania gazu lub powietrza — cykliczne zmiany stanu naprężenia [3]. Mimo prowadzenia licznych prac badawczych nad zachowaniem się górotworu solnego, w wielu przypadkach obserwuje się niekorzystne zjawiska, stwarzające zagrożenie dla prawidłowego funkcjonowania tych obiektów. Przykładem może być nadmierna konwergencja komór, znacznie przekraczająca wartości prognozowane, wzrost przepuszczalności górotworu i migracja magazynowanej substancji [2, 7], a także niekontrolowany rozwój komór i powstanie połączeń między nimi. Wymienione zjawiska pokazują, że problem opracowania skutecznych metod projektowania podziemnych magazynów jest nadal otwarty. W szczególności dotyczy on sformułowania kryteriów wytrzymałościowych w przestrzennym stanie naprężenia oraz prognozowania procesów deformacyjnych, mających istotny wpływ na funkcjonalność magazynów.

Dotychczasowe badania soli kamiennej w testach trójosiowego ściskania w temperaturze pokojowej i w zakresie ciśnień otaczających do 30 MPa doprowadziły do opracowania warunku równowagi granicznej [10] oraz hipotezy o związku długotrwałej wytrzyma-

---

\* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

\*\* Artykuł przygotowano na podstawie badań własnych, umowa nr 10.10.100.117

łości z przekroczeniem granicy względnego przyrostu odkształceń objętościowych [5]. Istotnym wynikiem badań własności odkształceniowych jest stwierdzenie, że wbrew panującemu przekonaniu o zdolności soli do zachowania ciągłości przy dużych odkształceniach, w przestrzennym stanie naprężenia, wywołanym użytkowaniem podziemnych magazynów, istnieje wyraźna granica, po przekroczeniu której pojawia się względny przyrost objętości skały, prowadzący do zniszczenia [11]. Zaobserwowano także wyraźną, potęgową zależność prędkości pełzania od stopnia zdylatowania próbek [6].

Rozwój laboratoryjnych technik badawczych, a zwłaszcza zastosowanie serwosterowalnej maszyny wytrzymałościowej, pozwala na rozszerzenie zakresu badań między innymi o testy trójosiowego ściskania i trójosiowego pełzania, symulujące warunki panujące w górotworze w miejscu lokalizacji projektowanych komór magazynowych (większe wartości naprężeń i podwyższona temperatura). Równocześnie dostępna technika obliczeń numerycznych umożliwia wykorzystanie wyników badań laboratoryjnych do formułowania złożonych równań konstytutywnych, dokładniej modelujących procesy wywołane użytkowaniem magazynów.

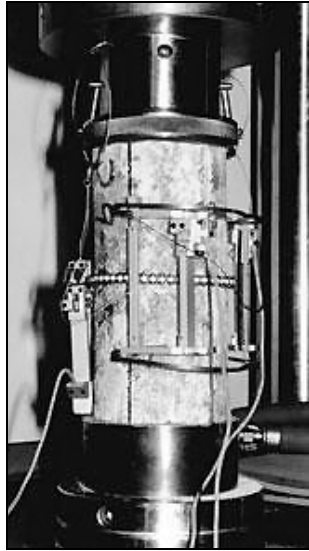
W artykule przedstawiono metodykę badań soli kamiennej w warunkach trójosiowego, osiowosymetrycznego ściskania przy ciśnieniach otaczających do 60 MPa i temperaturach od 20 do 60°C oraz zaproponowano sposób wykorzystania wyników do oceny długotrwałej wytrzymałości górotworu.

## 2. Przebieg prób trójosiowego ściskania

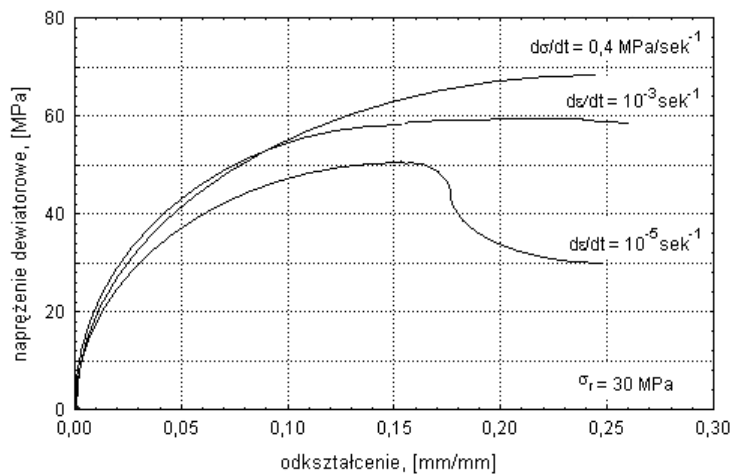
Wykorzystując wyniki wcześniejszych badań nad efektem skali dla soli kamiennej [9] ustalono wymiary próbek i liczebność poszczególnych prób. Wszystkie badania były prowadzone na próbkach walcowych o smukłości 2, wykonanych z rdzeni wiertniczych metodą toczenia na sucho. Ze względu na sposób pomiaru odkształceń w komorze do badań trójosiowych średnicę próbek ograniczono do 55 mm. Ponieważ celem badań nie było statystyczne dokumentowanie własności geomechanicznych wysadu, liczebność prób w każdej serii badawczej była ustalana indywidualnie na podstawie wartości odchylenia standardowego i zależnie od rozrzutu wyników wynosiła od 3 do 10 próbek.

Próby ściskania realizowano w sztywnej maszynie wytrzymałościowej MTS, sterowanej cyfrowo systemem TestStar, wyposażonej w komorę do badań trójosiowych ze sterownikiem ciśnienia oraz urządzenie grzewcze z pomiarem temperatury wewnątrz komory. Pomiar odkształceń prowadzono za pomocą ekstensometrów umieszczonych bezpośrednio na próbce, a wyniki rejestrowano w sposób ciągły w plikach programu sterującego (rys. 1). Zakres badań obejmował próby ściskania w temperaturach: 20, 40 i 60°C, przy ciśnieniach otaczających: 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 i 60 MPa w każdej temperaturze.

Istotnym problemem jest wybór sposobu sterowania maszyną wytrzymałościową. Wstępne testy trójosiowego ściskania wykazały ścisłą zależność wyników od czynnika sterującego i jego wartości, zwłaszcza przy wyższych ciśnieniach otaczających (rys. 2).



Rys. 1. Próbkę soli kamiennej do badań w serwo sterowanej maszynie wytrzymałościowej

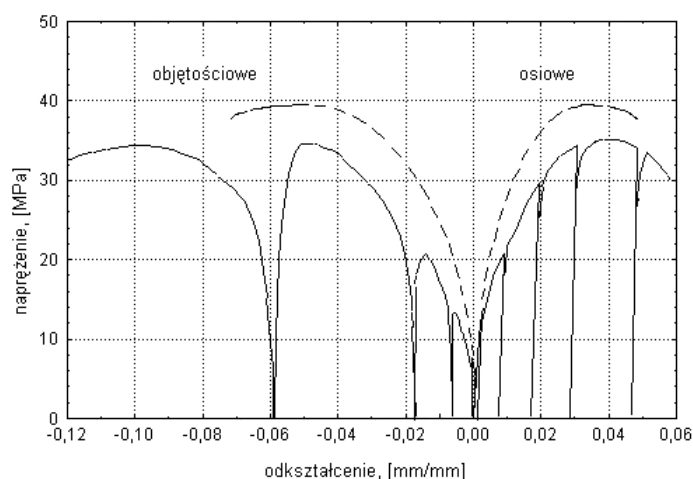


Rys. 2. Wpływ sposobu sterowania próbą trójosiowego ściskania na przebieg charakterystyki

Sterowanie odkształceniem osiowym z prędkością zalecaną przez ISRM dla skał ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) powoduje odciążenie ściskanej próbki przy mniejszych wartościach naprężeń maksymalnych bez jej zniszczenia. Jakkolwiek sterowanie obciążeniem jest najbardziej zbliżone do rzeczywistych warunków w górotworze, to jednak biorąc pod uwagę bezpieczeństwo aparatury, dla wszystkich testów została przyjęta stała prędkość odkształceń osiowych ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), a eksperyment przerywano po ustabilizowaniu się naprężeń pionowych.

### 3. Analiza wyników badań

Własności odkształceniowe skał opisuje się zwykle dwoma parametrami: współczynnikiem odkształcalności podłużnej  $E$  i liczbą Poissona  $\nu$ , które, przy założeniu stosowalności prawa Hooke'a wyznacza się z prostoliniowej części wykresu „naprężenie – odkształcenie”, zgodnie z wytycznymi ISRM, tj. w przedziale naprężeń od 0,2 do 0,8  $R_C$ . Dla badanej soli parametr  $E$  wynosi średnio 0,65 GPa, natomiast współczynnik odkształcalności poprzecznej jest większy od 0,5. Wyznaczone w ten sposób parametry nie odzwierciedlają rzeczywistych własności deformacyjnych soli, przy nieliniowym przebiegu charakterystyk w całym przedziale naprężeń (rys. 3). Próg względnego przyrostu objętości pojawia się przy naprężeniach osiowych wynoszących około 20% wytrzymałości. Jak pokazują próby odciążania, udział odkształceń sprężystych jest niewielki, a procesowi deformacji towarzyszy ciągły przyrost objętości.



Rys. 3. Charakterystyka deformacyjno-naprężeniowa soli kamiennej w próbie jednoosiowego ściskania

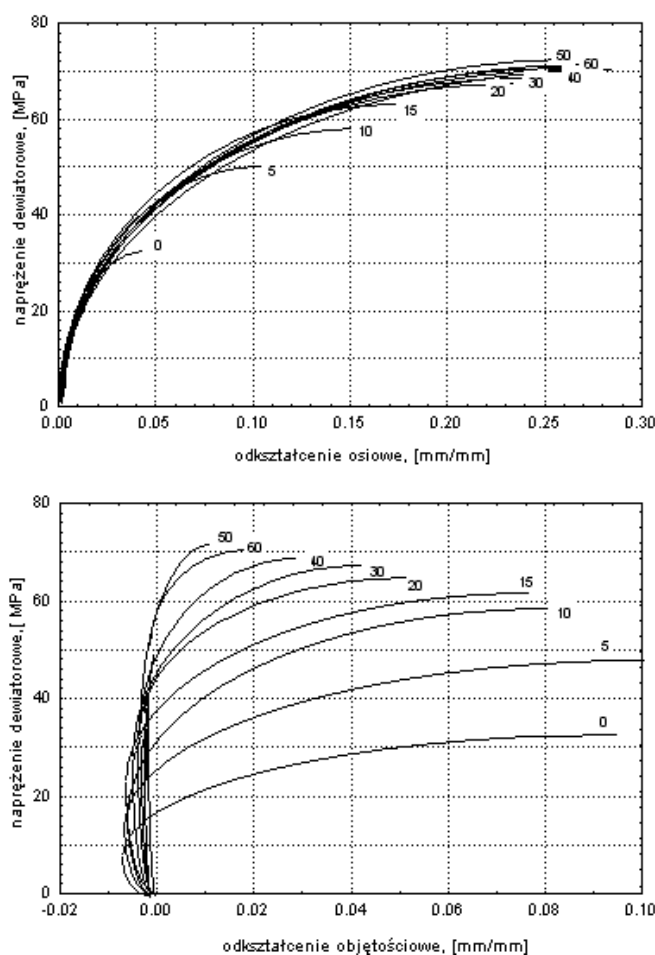
Wyniki prób ściskania jednoosiowego potwierdzają słuszność opisu charakterystyk równaniem

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + k \left( \frac{\sigma}{E} \right)^n$$

w którym pierwszy składnik określa wielkość odkształceń sprężystych, drugi — udział odkształceń nieodwracalnych,  $E$  jest modułem Younga, a współczynniki  $k$  i  $n$  są wyznaczone na drodze aproksymacji danych doświadczalnych. Dla badanych próbek średnie wartości tych parametrów wynoszą:  $E = 7,8$  GPa,  $k = 2275,7$  i  $n = 2,13$ .

Podczas trójosiowego ściskania w fazie obciążeń hydrostatycznych obserwuje się niewielki ubytek objętości próbek (ok. 0,15%), przy czym wzrost ciśnienia powyżej 30 MPa praktycznie nie wpływa na zmianę objętości. Wynik tej obserwacji świadczy o małej porowatości badanej soli, a faza zaciskania pierwotnych mikropęknięć odbywa się pod wpływem stosunkowo niewielkich ciśnień otaczających, co oznacza, że na głębokościach, na których przeważnie lokalizuje się kawerny magazynowe, sól w stanie pierwotnym jest w zasadzie ośrodkiem ciągłym [4].

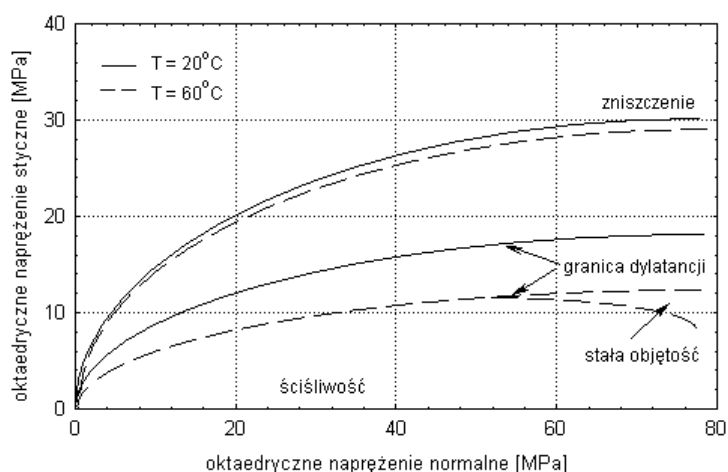
W fazie obciążeń dewiatorowych następuje dalsze niewielkie zmniejszenie objętości próbek, przy czym wartość naprężeń, przy których odnotowuje się najmniejszą objętość, wyraźnie zależy od ciśnienia radialnego (rys. 4).



Rys. 4. Charakterystyka deformacyjno-naprężeniowa w fazie obciążeń dewiatorowych w temperaturze 20°C

Charakterystyki deformacyjno-naprężeniowe otrzymane przy różnych ciśnieniach otaczających, podobnie jak w próbach jednoosiowych, wskazują na nieliniowy związek między naprężeniami i odkształceniami w całym przedziale obciążeń osiowych. W miarę wzrostu naprężeń radialnych zwiększa się wartość naprężeń niszczących, przy czym przyrost ten jest największy w przedziale ciśnień do 10 MPa. Przy ciśnieniach powyżej 30 MPa maksymalne naprężenie dewiatorowe jest praktycznie stałe. Efekt ten jest widoczny w badaniach dla wszystkich stosowanych temperatur.

Względny przyrost objętości występuje w całym zakresie naprężeń radialnych. W miarę wzrostu ciśnienia otaczającego pojawia się przy coraz wyższych wartościach naprężeń osiowych (ok. 55% naprężeń niszczących przy ciśnieniu 60 MPa). Wynika stąd praktyczny wniosek, że w zakresie ciśnień towarzyszących podziemnym magazynom, przy pewnych wartościach naprężeń dewiatorowych, należy spodziewać się dylatacyjnego przyrostu objętości soli [8]. Spostrzeżenie to jest szczególnie istotne, ponieważ wraz z wzrostem temperatury zwiększa się odkształcalność soli, a względny przyrost objętości występuje przy mniejszych naprężeniach [1]. Równocześnie pojawia się, przy ciśnieniach powyżej 40 MPa, przedział naprężeń osiowych, w którym sól odkształca się ze stałą objętością (rys. 5).



**Rys. 5.** Krzywe zniszczenia i względnego przyrostu objętości w układzie naprężeń oktaedrycznych

Analiza powyższych zależności pozwala wyznaczyć trzy przedziały naprężeń radialnych:

- Przedział od 0 do ok. 10 MPa, w którym wzrostowi ciśnienia otaczającego towarzyszy prawie liniowy przyrost wytrzymałości i około trzykrotny przyrost odkształceń przy zniszczeniu. Efekty dylatacyjne są wyraźne w każdej temperaturze i próbki ulegają kruchemu zniszczeniu. Wzrost temperatury nie wpływa na wytrzymałość, natomiast powoduje zwiększenie odkształceń.

- Przedział od 10 do ok. 30 MPa, w którym zarówno przyrosty wytrzymałości i odkształceń przy zniszczeniu nie są tak intensywne. W przedziale tym zaobserwowano dwie formy niszczenia próbek: kruche pękanie oraz utratę nośności przy zachowanej spójności. W miarę wzrostu temperatury odkształcenia osiowe przy zniszczeniu przyjmują większe wartości, odkształcenia objętościowe wyraźnie maleją.
- Przedział powyżej 30 MPa, w którym wartość maksymalnych naprężeń dewiatorowych i odkształceń przy zniszczeniu zmienia się w niewielkim stopniu. Dalsze zadawanie odkształceń nie powoduje przyrostu naprężeń osiowych, a o zniszczeniu próbek świadczy zmiana ich zabarwienia. Wzrost temperatury powoduje znaczne zwiększenie odkształceń osiowych, przy bardzo małych odkształceniach objętościowych. Efektowi temu towarzyszy pojawienie się przedziału naprężeń, w którym proces deformacji zachodzi ze stałą objętością, jednakże dalszy wzrost naprężeń powoduje względny przyrost odkształceń objętościowych.

#### 4. Podsumowanie

Specyficzne własności soli kamiennej w zasadniczy sposób odróżniają ją od innych ośrodków skalnych. Zachowanie się soli, zaobserwowane podczas badań laboratoryjnych i w wyrobiskach górniczych, skłoniło do podjęcia ukierunkowanych badań. Stwierdzono, że pewnym wartościom naprężeń towarzyszą deformacje o charakterze dylatacyjnym, co ma istotne znaczenie dla użytkowania podziemnych magazynów. Granicę pojawienia się tych deformacji można określić w laboratoryjnych testach konwencjonalnego trójosiowego ściskania i opisać niezmiennikami stanu naprężenia.

Opierając się na stwierdzeniu, że temperatury panujące w górotworze, w obszarze działalności eksploatacyjnej, nie wpływają na wytrzymałość soli, do projektowania magazynów wykorzystywano dotychczas wyniki badań prowadzonych w temperaturze pokojowej. Rezultatem opisanych badań jest wniosek, że nawet niewielkie zmiany temperatury, zwłaszcza towarzyszące dużym naprężeniom, uaktywniają procesy deformacyjne, co ma szczególne znaczenie dla odkształceń reologicznych.

Poczynione obserwacje i analiza wyników stanowią istotny aspekt poznawczy, zarówno od strony własności soli kamiennej, jak też doskonalenia metodyki badań laboratoryjnych, której zasadniczym celem jest „uchwycenie” elementów mających, z punktu widzenia geomechaniki, największe znaczenie dla spełnienia kryterium długotrwałej funkcjonalności podziemnych magazynów.

#### LITERATURA

- [1] Badania procesów geomechanicznych zachodzących w górotworze solnym w otoczeniu podziemnych magazynów i składowisk. Badania własne nr 10.10.100.117 (kier. D. Flisiak)
- [2] *Berest P., Bergues J., Brouard B., Durup J.G., Guerber B.*: A salt cavern abandonment test. *Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* No.38, Elsevier Ltd. 2001

- [3] *Cristescu N.D., Hunsche U.*: Time effects in rock mechanics. Chichester — Toronto, Wiley & Sons 1998
- [4] *Flisiak D., Tajduś A.*: Weryfikacja niektórych hipotez wytrzymałościowych dla soli kamiennej w świetle laboratoryjnych badań wytrzymałościowych. Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki, Politechnika Wrocławska 1994
- [5] *Flisiak D.*: Kryterium bezdylatancyjnej deformacji górotworu solnego. Geotechnika i Budownictwo Specjalne. Wyd. KGBiG AGH 2000
- [6] *Flisiak D.*: Własności odkształceniowe soli kamiennej w próbach reologicznych. Geotechnika i Budownictwo Specjalne. Wyd. KGBiG AGH 2002
- [7] *Hou Z.*: A new permeability model for rock salt. Report of the Proferssorship for Disposal Technology and Geomechanics of TU Clausthal, Clausthal – Zellerfeld 2002
- [8] *Hou Z.*: Mechanical and hydraulic behavior of rock salt in the excavatin disturbed zone around underground facilities. Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40, Elsevier Ltd. 2003
- [9] *Kleczek Z., Flisiak D.*: Geomechanical Research of the Rock Salt in Aspect of Its Utilisations for Building Underground Storage. Rozprawy Monografie, 19, Wyd. AGH 1994
- [10] *Kleczek Z., Flisiak D.*: Geomechanical model of rock salt for stress and stability analysis of underground disposal caverns. IV International Symposium on Mine Planning & Equipment Selectin, Rotterdam, Balkema 1995
- [11] *Matei A., Cristescu N.D.*: The effect of volumetric strain on elastic parameters for rock salt. Mechanics of cohesive-frictional materials, 5, Wiley & Sons 2001