

Józef Straś
Stanisław Chwała

ZAGADNIENIE PODOBIENSTWA REOLOGICZNEGO
W MODELOWYCH BADANIACH SKAŁ GÓROTWORU

Streszczenie. W pracy przedstawiono funkcje pełzania dla trzech rodzajów materiałów ekwiwalentnych odpowiadające następującym skałom karbońskim: łupkowi ilastemu, łupkowi piaszczystemu i piaskowcowi oraz porównano przebieg krzywych pełzania skał karbońskich i materiałów skałopodobnych.

1. Wstęp

Większość zjawisk zachodzących w górotworze naruszonym, ze względu na specyficzne warunki, nie da się śledzić bezpośrednio w kopalniach. Niemożliwe jest obserwowanie zmian zachodzących w górotworze spowodowanych eksploatacją górniczą, np.:

- załamywanie się warstw górotworu nad wyrobiskiem górniczym i wpływ tego zjawiska na warunki techniczne wyrobiska,
- przebieg deformacji skał górotworu wzdłuż profilu pionowego w strefie podsadzki, zawału, czy też nad eksploatowaną calizną,
- wpływ naturalnych czynników na rozkład i wielkość naprężeń itd.

Poza tym prowadzenie pomiarów deformacji górotworu w warunkach kopalnianych jest ograniczone do bliskiego sąsiedztwa wyrobiska, bywa ponadto bardzo uciążliwe i pracochłonne. Wielkość zatem badań eksperymentalnych i prognostycznych niemożliwa jest do wykonania w kopalniach bądź ze względów technicznych, bądź ekonomicznych.

Do badania zjawisk zachodzących w górotworze stosuje się więc oprócz pomiarów kopalnianych i badań teoretycznych danego zjawiska badania modelowe. W najbardziej popularnej metodzie modelowania górotworu, przy użyciu materiałów skałopodobnych, stosuje się dwa podstawowe rodzaje materiałów ekwiwalentnych, są nimi:

- a) materiały gipsowe - jako mieszaniny piasku, gipsu, kredy, boraksu i wody,
- b) materiały parafinowe - jako mieszaniny piasku, parafiny oraz mielonej miki.

Gips i parafina w materiałach tych spełniają rolę spoiwa, piasek wypełniacza, pozostałe natomiast materiały rolę składników umożliwiających dobór własności fizycznych.

W modelowanych badaniach górotworu należy szczególną uwagę zwracać na fizyko-mechaniczne własności materiałów ekwiwalentnych, takie jak: wytrzymałość na ściskanie R_c , wytrzymałość na zginanie R_g , wytrzymałość na rozciąganie R_r , moduł odkształcalności E i G , współczynnik Poissona ν , ciężar objętościowy γ oraz inne wskaźniki, które powinny zostać możliwie dokładnie ustalone tak, aby odpowiadały wartościom obliczonym z praw podobieństwa modelowego.

Modelowanie przy pomocy materiałów ekwiwalentnych nastrocza wiele trudności, ponieważ osiągnięcie zgodności wszystkich własności modelu z górotworem jest praktycznie niemożliwe ze względu na niedoskonałość materiałów ekwiwalentnych. W niniejszej pracy ograniczono się do odwzorowania niektórych wskaźników mechanicznych odgrywających decydującą rolę podczas badań zjawisk zachodzących w modelu zmiennych w czasie.

Aby jednak w stworzonych sztucznie warunkach skutecznie korzystać z wyników badań modelowych, konieczne jest wprowadzenie pewnych dodatkowych założeń modelowania dotyczących głównie receptur materiałów ekwiwalentnych, jak również właściwa interpretacja otrzymanych wyników.

2. Analiza kryteriów podobieństwa modelowego skał

Zagadnienie podobieństwa w modelowaniu zjawisk zachodzących w górotworze polega na wykonaniu modelu o takich własnościach aby wszystkie jego parametry zarówno geometryczne, kinematyczne jak i dynamiczne odwzorowywały odpowiednie wielkości skał występujących w naturze w ustalonej skali modelowania. W celu zachowania podobieństwa - model powinien spełniać następujące związki [14]:

- a) podobieństwo geometryczne,
- b) podobieństwo kinematyczne,
- c) podobieństwo dynamiczne,
- d) warunek czasowego podobieństwa modelu osiąga się, gdy prędkość deformacji w naturze i modelu da się wyrazić stałym stosunkiem:

$$\alpha_{\dot{\epsilon}} = \frac{\dot{\epsilon}_N}{\dot{\epsilon}_M}$$

Stosunek sił przyłożonych do układu natury P_N i modelu P_M winien się różnić stałym mnożnikiem

$$\alpha_P = \frac{P_N}{P_M} = \frac{m_N \cdot a_N}{m_M \cdot a_M},$$

gdzie

a_N - przespieszenie układu w naturze pod wpływem siły P_N na masę m_N ,

a_M - przyspieszenie układu w modelu pod wpływem siły P_M na masę m_M .

Skala kohezji winna być ujęta następującym warunkiem:

$$\alpha_C = \frac{C_N}{C_M},$$

gdzie

C_N - kohezja układu natury,

C_M - kohezja układu modelu.

Stosunek współczynników lepkości warstw w naturze η_N do współczynników lepkości warstw w modelu η_M winien być stały. Wskaźniki wytrzymałościowe występujących skał w naturze również powinny być zachowane w odpowiedniej skali w porównaniu do wskaźników w modelu [14].

Zależność zmiany odkształceń czasowych w czasie przy stałych naprężeniach dla elementu lepkosprężystego Kelvina ujmuje równanie

$$\xi(t) = \frac{\sigma}{E} (1 - e^{-\frac{E}{\eta} \cdot t}),$$

gdzie

$\xi(t)$ - wielkość odkształceń czasowych,

σ - naprężenia,

E - moduł sprężystości,

η - współczynnik lepkości,

t - czas.

3. Cel i zakres pracy

Jak wynika z przytoczonych kryteriów podobieństwa modelowego brak w nich związków określających wpływ czasu na przebieg zjawisk w górotworze i modelu, jak również kształtowanie się współczynnika lepkości materiałów ekwiwalentnych.

Celem niniejszej pracy jest przebadanie przebiegu pełzania modeli skał wykonanych z materiałów ekwiwalentnych w jednoosiowym stanie naprężenia oraz określenie reologicznych analogii pomiędzy skałami górotworu a odpowiadającymi im materiałami ekwiwalentnymi parafinowymi i gipsowymi.

Laboratoryjne doświadczenia peźzania przeprowadzono dla trzech rodzajów materiałów ekwiwalentnych, które stanowiły modelowe odpowiedniki trzech wybranych rodzajów skał karbońskich: łupków ilastych, łupków piaszczystych i piaskowców. Modele skał wykonano uwzględniając mechaniczne podobieństwo modelowe. W badaniach dążono do uzyskania krzywych peźzania dla materiałów skało-podobnych, a następnie porównanie ich z krzywymi peźzania dla skał, jak również ustalenie wpływu czasu na przebieg odkształceń. Każdy rodzaj materiału ekwiwalentnego badano pięciokrotnie przy trzech wartościach naprężeń odpowiadającym 20, 40 i 60 procentom doraźnej wytrzymałości na ściskanie.

4. Metodyka prac badawczych

4.1. Przygotowanie modeli skał z zachowaniem zasad podobieństwa

W celu przygotowania właściwych modeli skał do badań reologicznych, wykonano wstępnie kilkanaście rodzajów próbek parafinowych i gipsowych o różnym składzie procentowym poszczególnych składników. Do badań przyjęto skalę modelowania 1 : 75.

Próbki wykonane w kształcie walca suszono 7 dni w temperaturze 18-20°C, a następnie poddano badaniom w celu określenia wskaźników fizykomechanicznych otrzymanych materiałów ekwiwalentnych.

Mając na uwadze zasady podobieństwa oraz skalę modelowania - ustalono właściwą recepturę materiałów ekwiwalentnych modeli skał metodą kolejnych badań prób (tablica 2).

Przy modelowaniu skał karbońskich (tablica 1) wzięto pod uwagę głównie takie parametry jak: wytrzymałość na ściskanie R_c , moduł sprężystości E oraz ciężar objętościowy γ .

Do badań wytrzymałościowych modeli skał (łupek ilasty, łupek piaszczysty i piaskowiec) wykorzystano prasę hydrauliczną (rys. 1). Z otrzymanych wyników wyznaczono zależności $\xi(\sigma)$, a graficzne ujęcie wyników przedstawia rys. 2. Wielkości skróceń modeli skał, przy różnych wartościach naprężenia, mierzono dwoma czujnikami zegarowymi o dokładności pomiaru 0,01 mm rozmieszczonymi po przeciwnych stronach próbki. Za prawdziwą wielkość skrócenia modelu przyjęto średnią arytmetyczną wskazań czujników zegarowych. Na podstawie otrzymanych wyników badań obliczono moduł E dla poszczególnych modeli skał, korzystając z zależności

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\xi},$$

gdzie

$\Delta\sigma$ - przyrost naprężeń,

$\Delta\xi$ - przyrost odkształceń.

Tablica 1

Parametry wytrzymałościowe przyjętych skał i materiałów ekwiwalentnych

$$\frac{\sigma}{\sigma_N} = 0,65$$
 skala 1 : 75, $\frac{\sigma}{\sigma_N}$

Ip.	Rodzaj skały	R_o N/cm ²	R_g N/cm ²	R_r N/cm ²	E przy ściśnieniu N/cm ²	σ N/m ³	ν
1	Łupek ilasty	3 500 ^x	450 ^x	350 ^{xx}	1 000 000	25 000 ^x	0,2±0,25
2	Łupek piasz- czysty	4 500 ^x	650 ^x	500 ^{xx}	800 000	26 000 ^x	0,2±0,25
3	Piaskowiec	6 000 ^x	800 ^x	600 ^{xx}	1 000 000	24 000 ^x	0,2±0,25
Właściwości materiałów ekwiwalentnych							
1	Łupek ilasty	32	-	-	9 600	16 100	-
2	Łupek piasz- czysty	40	-	-	8 800	17 000	-
3	Piaskowiec	54	-	-	11 600	15 800	-

Oznaczenia:

x - wg J. Kuhla,

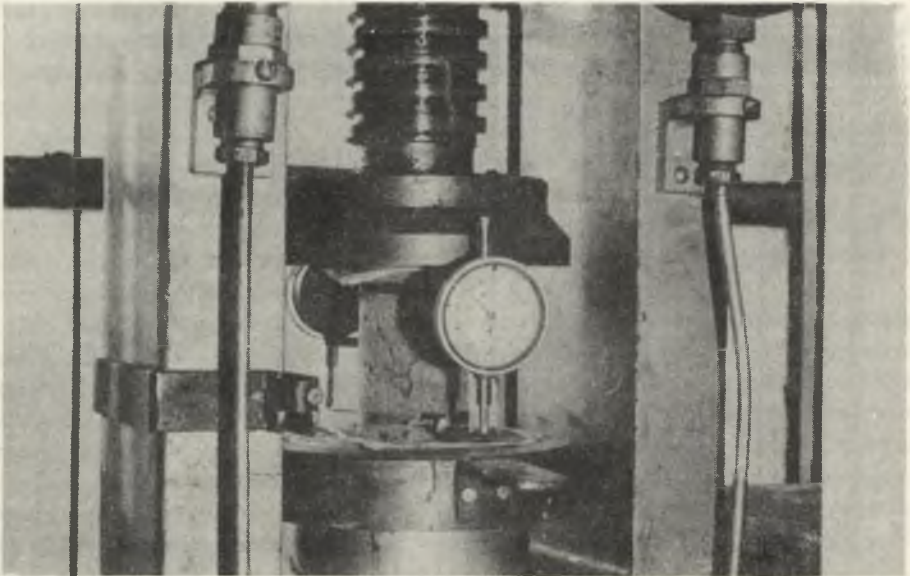
xx - wg Lowensa,

 R_o - wytrzymałość na ściskanie, N/cm², R_g - wytrzymałość na zginanie, N/cm², R_r - wytrzymałość na rozrywanie, N/cm²,E - moduł sprężystości, N/cm², σ - ciężar objętościowy, N/m³, ν - współczynnik Poissona.

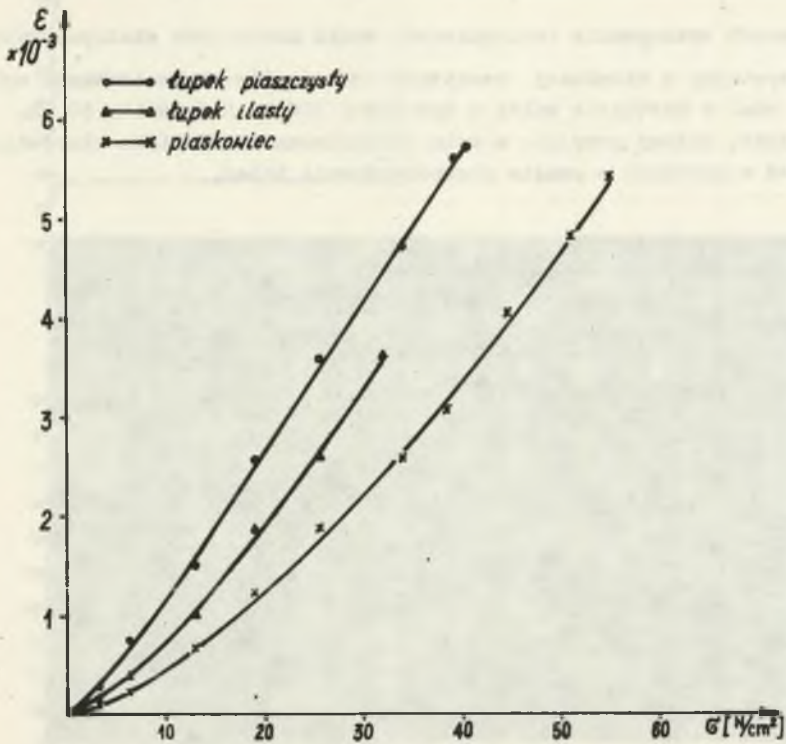
Tablica 2

Własności materiałów ekwiwalentnych

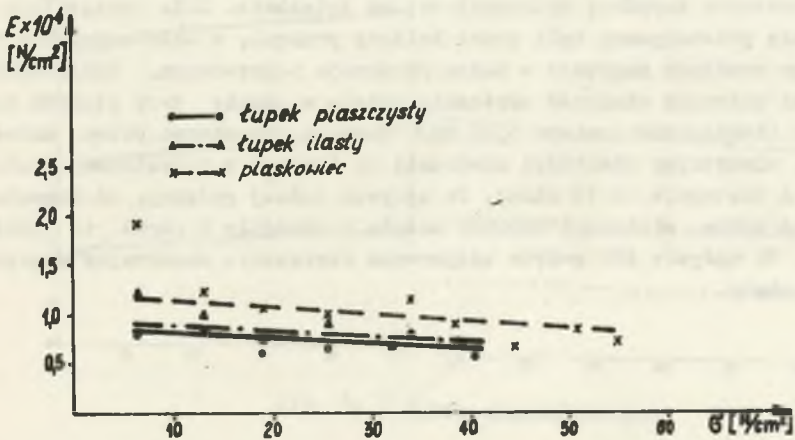
Lp.	Rodzaj skały	Zawartość spoiwa, [%]		Wypełniacze [%]		Ciężar próbki [N]	Objętość próbki [cm ³] d = 6 cm h = 10 cm
		gips	parafina	piasek	kreda		
1	Łupek ilasty	6	-	89	5	4,55	283
2	Łupek piaszczysty	4,5	-	95,5	-	4,81	283
3	Piaskowiec	-	5	95	-	4,47	283



Rys. 1. Badania wytrzymałościowe modeli skał z równoczesnym pomiarem wielkości skrócenia



Rys. 2. Zależność odkształceń od naprężeń dla rozpatrywanych materiałów ekwiwalentnych

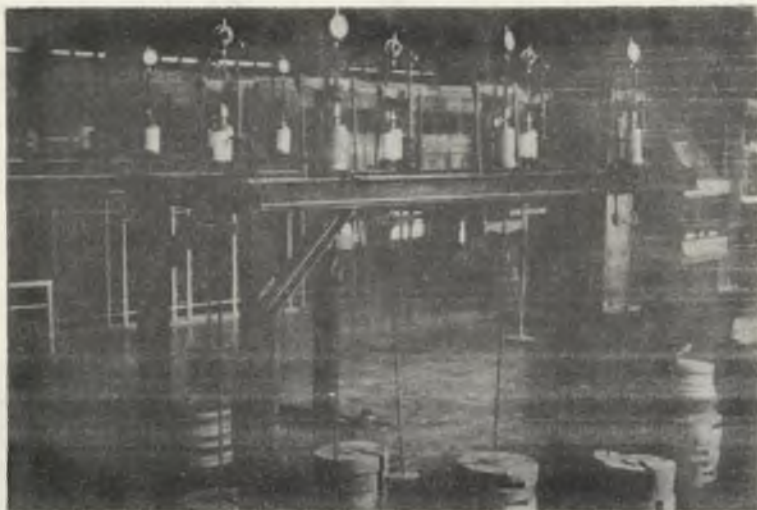


Rys. 3. Zmiana modułu E ze wzrostem naprężeń dla materiałów ekwiwalentnych

4.2. Sposób wykonywania reologicznych badań materiałów skałopodobnych

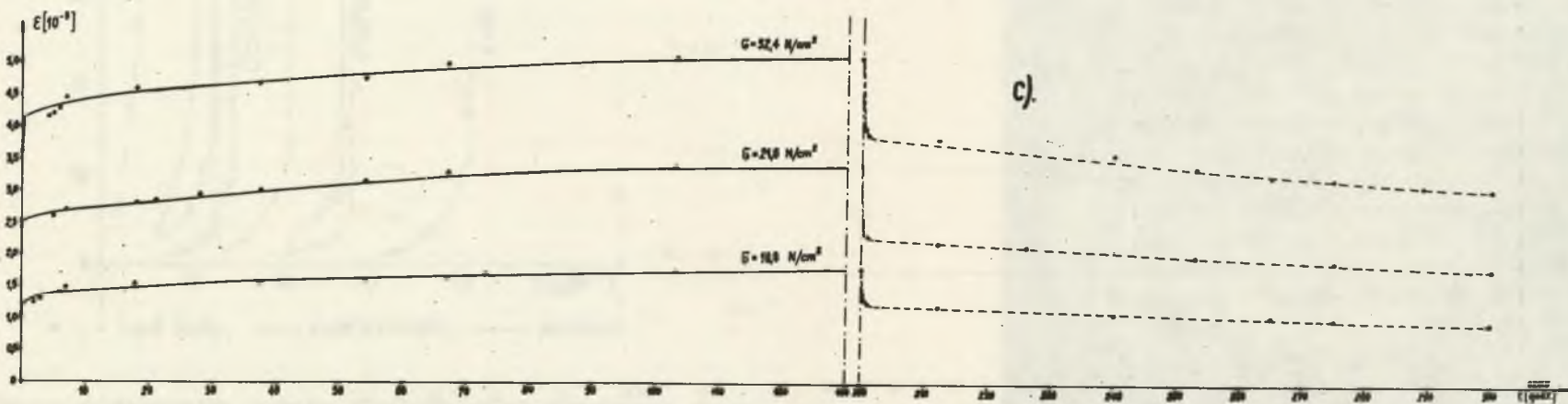
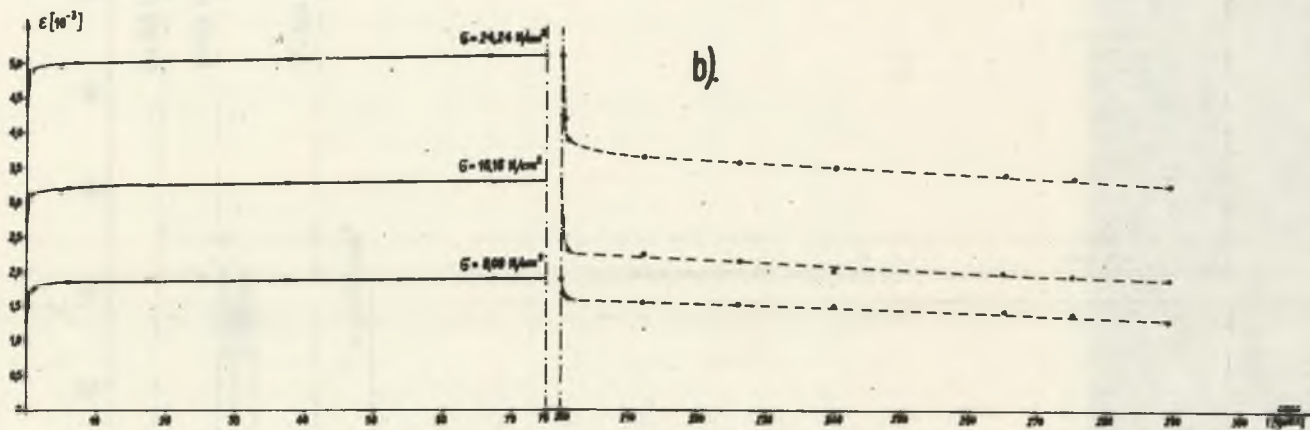
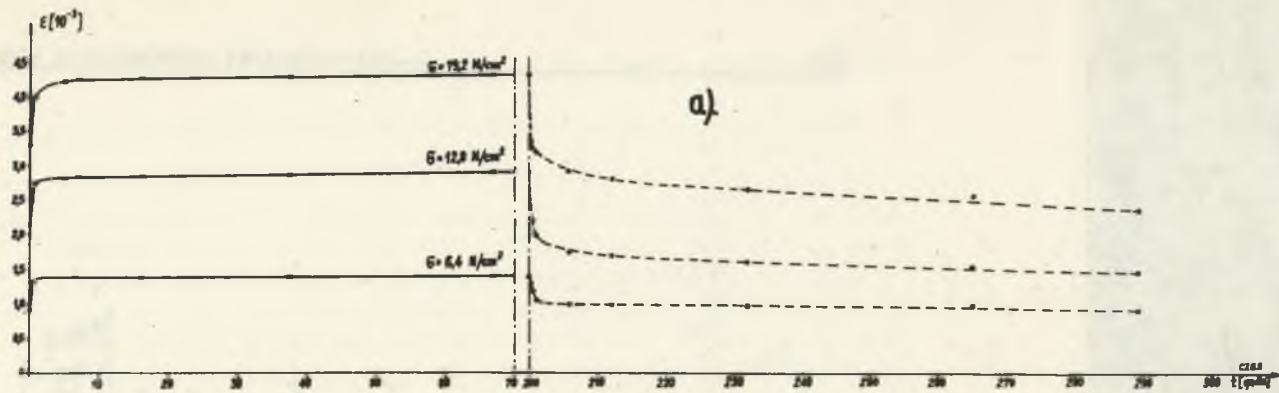
Korzystając z ustalonej receptury materiałów ekwiwalentnych wykonano modele skał w kształcie walca o wysokości 100 mm i średnicy 60 mm.

Przekrój kołowy przyjęto w celu wyeliminowania zjawiska skupiania się naprężeń w narożach w czasie przeprowadzania badań.

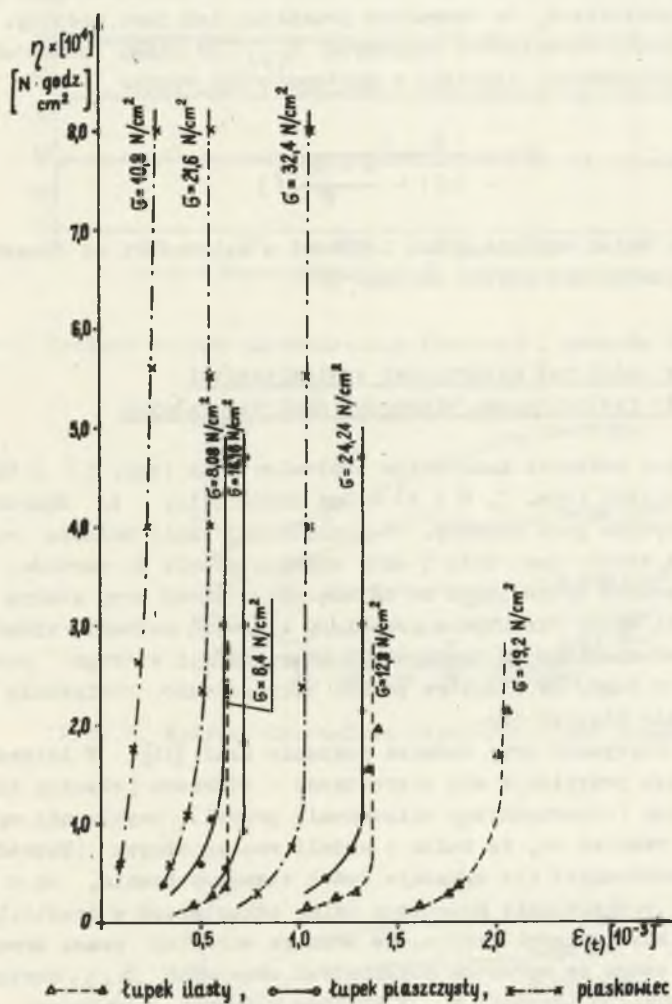


Rys. 4. Widok pełzarek przed założeniem ciężarów na zawiesia

Następnie modele skał umieszczono w pełzarkach (rys. 4) i każdemu rodzajowi materiału skałopodobnemu nadano naprężenia odpowiadające 20, 40 i 60 procentom doraźnej wytrzymałości na ściskanie. Siła obciążająca model skały przekazywana była przez kulisty przegub, w celu uzyskania równomiernego rozkładu naprężeń w całym przekroju poprzecznym. Czujnikami zegarowymi mierzono wielkość skrócenia modelu w czasie przy stałych naprężeniach (dokładność pomiaru 0,01 mm). Badania prowadzono przez okres 200 godzin, odczytując wielkości skrócenia co 5 minut w początkowej fazie badania, a następnie co 15 minut. Po upływie jednej godziny, od momentu obciążenia próby, wielkości skróceń modelu zachodziły w coraz to dłuższym czasie. Po upływie 200 godzin zdejmowano obciążenie obserwując odprężenie modelu skały.



Rys. 5. Średnie krzywe odkształcenia (—○—) i wyczynku (---○---) dla materiałów ekwiwalentnych
 a) materiał ekwiwalentny odpowiadający łupkowi ilastemu,
 b) materiał ekwiwalentny odpowiadający łupkowi piaszczystemu,
 c) materiał ekwiwalentny odpowiadający piaskowcowi



Rys. 6. Zmiana współczynnika lepkości w zależności od odkształceń czasowych

5. Wyniki reologicznych badań pełzania materiałów ekwiwalentnych

Na podstawie otrzymanych wyników badań obliczono wielkości odkształceń właściwych i wykreślił na rys. 5 przedstawiono zależności odkształceń ϵ od czasu t przy stałych naprężeniach dla trzech rodzajów materiałów ekwiwalentnych. Z porównania krzywych pełzania materiałów ekwiwalentnych i ciała Kelvina można stwierdzić, że charakter przebiegu ich jest podobny. Korzystając z zależności odkształceń czasowych $\epsilon(t)$ od czasu można obliczyć wielkości współczynnika lepkości z następującego wzoru:

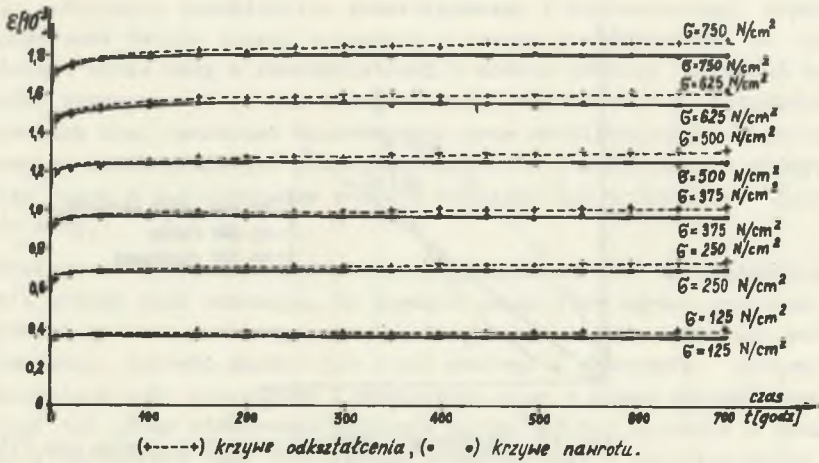
$$\eta = \frac{E \cdot t}{- \ln\left(1 - \frac{E \cdot \epsilon(t)}{\sigma}\right)}$$

Graficzny obraz zmian współczynnika lepkości w zależności od odkształceń czasowych przedstawiony został na rys. 6.

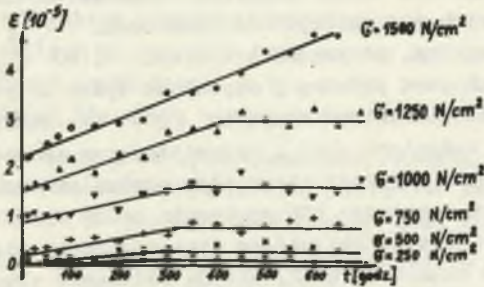
6. Analiza wyników badań nad materiałami ekwiwalentnymi w odniesieniu do reologicznych własności skał naturalnych

Reasumując krzywe pełzania materiałów ekwiwalentnych (rys. 5) z krzywymi odkształcenia skał (rys. 7, 8 i 9) można stwierdzić, że charakter przebiegu tych krzywych jest podobny. W początkowej fazie badania wielkość odkształceń w czasie jest duża i dąży asymptotycznie do wartości stałej. Głównym parametrem wpływającym na zmianę odkształceń przy stałym obciążeniu jest tutaj czas. Poza tym w przebiegu krzywych pełzania widać, że przy badaniu próbek mieliśmy do czynienia z pierwotnym i wtórnym pełzaniem. Wynikało to z tego, że niektóre próbki były poddane obciążeniu powyżej 50% obciążenia niszczonego.

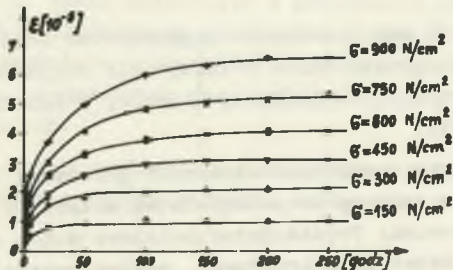
Podobne wyniki otrzymano przy badaniu pełzania skał [11]. W literaturze szczególną uwagę przypisuje się pierwotnemu i wtórnemu pełzaniu skał, ponieważ trzeci etap (odpowiadający zniszczeniu próbki) zwykle nie występuje. Ważnym jest również to, że żaden z modeli reologicznych (Maxwella, Kelvina lub ich kombinacje) nie wykazuje dwóch etapów pełzania, co z kolei utrudnia analityczne ujęcie przebiegu zmian odkształceń w czasie. Z obliczeń współczynników lepkości wynika, że wraz ze wzrostem czasu trwania obciążenia, a tym samym ze wzrostem odkształceń czasowych $\epsilon(t)$, następuje wzrost współczynników lepkości η . Z analizy krzywych ujmujących zależność zmiany współczynnika lepkości od odkształceń czasowych (rys. 6) wynika, że wraz ze wzrostem naprężeń maleje wartość współczynnika lepkości. Daje się również zauważyć, że zmiany odkształceń materiału ekwiwalentnego następują w mniejszych przedziałach czasu, aniżeli zmiany odkształceń w skałach.



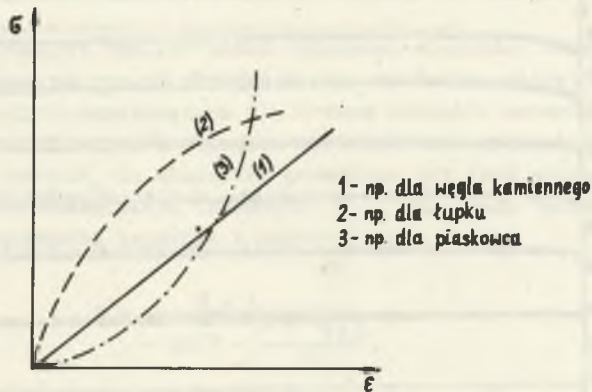
Rys. 7. Średnie krzywe odkształcenia (+---+) i nawrotu (•—•) węgla [6]



Rys. 8. Wykres odkształceń nieodwracalnych piaskowca [6]



Rys. 9. Wykres odwracalnych odkształceń opóźnionych mułowca [6]



Rys. 10. Zależność $\varepsilon(\sigma)$ dla skał karbońskich [1]

Z przedstawionego rys. 10 wynika, że w zależności od rodzaju skały dla tej samej wartości naprężenia otrzymujemy różne wartości odkształceń. Łatwo zauważyć, że dla łupku przyrost odkształceń dla danego przedziału naprężeń jest większy, aniżeli dla piaskowca.

Z rys. 2 wynika, że przebieg krzywych $\varepsilon(\sigma)$ dla badanych materiałów ekwiwalentnych jest podobny i odpowiada tylko krzywej piaskowca (rys.10).

Niezgodność charakteru krzywych $\varepsilon(\sigma)$ dla łupku ilastego i łupku piaszczystego w badaniach skał i odpowiadającym im modelach nakazuje dalsze badania odnośnie receptur materiałów ekwiwalentnych. Przy wykonywaniu modeli górotworu i podczas kontynuowania badań zwykle zasadę podobieństwa czasowego pomija się. Dotychczas przeprowadzono niewiele badań odnośnie reologicznych własności skał, ale na podstawie obecnej literatury na ten temat oraz przeprowadzonych badań należy stwierdzić, że czas wpływa na zmianę wielu parametrów.

7. Wnioski końcowe

Podczas studiów nad rozważanym zagadnieniem oraz na podstawie badań laboratoryjnych przeprowadzonych w Instytucie Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej w Gliwicach nasuwają się niżej podane wnioski:

1. Modelowe badania w zakresie mechaniki górotworu (oraz w innych naukach) wymagają zachowania podobieństwa własności modeli oraz przebiegu modelowych zjawisk. Podobieństwo modelowe można uzyskać na podstawie zasad podobieństwa geometrycznego, mechanicznego oraz reologicznego.

2. Do zachowania podobieństwa geometrycznego i mechanicznego zostały opracowane ściśle zasady w oparciu o podane prawo Newtona, że odpowiadające sobie masy w rzeczywistości i modelu powinny doznawać tych samych przyspieszeń od sił o odpowiedniej wielkości. W dotychczasowych pracach brak natomiast miarodajnych praw umożliwiających zachowania czasowego (reologicznego) podobieństwa modelu i modelowanych zjawisk. Czynnikiem czasu w tym przypadku zostaje pomijany lub traktowany jako mało istotny.
3. Praktyczne obserwacje prowadzone w kopalniach oraz laboratoryjne badania próbek skał wskazują, że czynnik czasu jest bardzo istotnym parametrem podczas przebiegu zjawisk fizycznych i jako taki nie może być pomijany. Zarówno skały, jak i ich analogi (materiały ekwiwalentne) zmieniają swój zewnętrzny i wewnętrzny stan w miarę upływu czasu, dlatego też chcąc odwzorować możliwie najdokładniej zjawisko w naturze należy zachowywać obok podobieństw mechanicznych i geometrycznych podobieństwo zmian modelu w czasie.
4. Jak wynika z badań laboratoryjnych próbek skał [6] oraz przeprowadzonych własnych badań nad pełzaniem materiałów ekwiwalentnych, dochodzimy do wniosku, że charakter przebiegu krzywych pełzania w obu przypadkach jest podobny, możliwy do opisanego przy pomocy tych samych funkcji o zmienionych jedynie parametrach E, η , z tym jednak, że skala czasu jest różna np. - godziny dla skał, - minuty dla materiałów ekwiwalentnych.
5. Ponadto zaobserwowano, że krzywe wyczerpania materiału ekwiwalentnego po zdjęciu obciążenia zachowują podobny charakter zmian w czasie, przy czym również i w tym przypadku skala czasowa jest różna.
6. Brak odpowiednich wyników badań skał uniemożliwia w chwili obecnej określenie stosunku czasów odpowiedniej skali modelowania. Niemniej jednak należy sądzić, że aby zachodziło podobieństwo reologiczne modelu, wielkość współczynników lepkości dla skał i modelu pozostawać będą w odpowiedniej skali różnej od skali podobieństwa mechanicznego i geometrycznego.
7. W przeprowadzaniu badań modelowych w górotworze można przyjąć, że skala podobieństwa reologicznego będzie jak stosunek godzin do minut, tzn. o ile jakieś zjawisko w naturze daje się zaobserwować w przeciągu jednej godziny, to po wykonaniu jego modelu - jego przebieg winien być mierzony w minutach.
8. Wydaje się, że przeprowadzenie dalszych badań w tym zakresie jest jak najbardziej celowe z punktu widzenia zachowania podobieństwa zjawisk w modelu.

8. LITERATURA

1. M. Borecki, M. Chudek: Mechanika górotworu. Skrypt Uczelniany nr 208, 1968 r.
2. M. Borecki, A. Biliński, A. Kidybiński: Wpływ prędkości wybierania na zachowanie się górotworu i obudowy. Praca GIG, Komunikat 301, 1962 r.
3. M. Chudek: Zachowanie się skał stropowych nad wyrobiskiem ścianowym w świetle badań modelowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej "Górnictwo" z. 30, 1968 r.
4. M. Chudek: Teoretyczno-graficzne obliczanie odkształcania się warstw skalnych i naprężeń nad wyrobiskiem ścianowym. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, "Górnictwo", 1968 r.
5. H. Filcek: Laboratoryjna próba ściskania i reologiczne własności skał. Przegląd Naukowo-Techniczny AGH. Wydanie 1, 1959 r.
6. A. Kidybiński: Modele reologiczne skał karbońskich. Prace GIG, Komunikat 360, 1964 r.
7. A. Kidybiński: Praktyczne uwagi dotyczące modelowania zjawisk zachodzących w górotworze podczas prowadzenia eksploatacji ścianowej. GIG, materiały konferencyjne na Międzynarodowe Sympozjum Młodych Inżynierów. Górnictwo, Katowice 1960 r.
8. M.W. Kirpiczew: Teorija podobija. Moskwa 1953 r.
9. I. Kisiel: Reologia w budownictwie. Warszawa 1967 r.
10. I. Kisiel, B. Lysik: Zarys reologii gruntów. Warszawa 1966 r.
11. D. Krzywoń: Rozwój eksperymentalnych badań pełzania skał w świetle teorii pełzania. Archiwum Górnictwo, Tom XVI, Zeszyt 4, Warszawa 1971 r.
12. G.N. Kuźniecowa: Deformacji i razruszenija mnogosłoinoi tołszczy porod pri podwiganii oczistnowo zaboja. Moskwa 1954 r.
13. J.T. Pindera: Reologiczne własności materiałów modelowych. W-wa 1962 r.
14. K. Podgórski: Zachowanie się skał stropowych i spągowych pod wpływem eksploatacji pokładów stromych. Zeszyt Naukowy nr 222, Górnictwo, z. 32, 1968 r.
15. Prace Komisji Nauk Technicznych - Międzynarodowe Sympozjum Mechaniki Górotworu. PAN, Górnictwo 2, Kraków 1966 r.
16. M. Reiner: Reologia teoretyczna, Warszawa 1958 r.
17. A. Saustowicz: Zarys mechaniki górotworu. Wydawnictwo Śląsk, 1968 r.

**ВОПРОС РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ
В МОДЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ СКАЛ ГОРНЫХ ПОРОД****Р е з ю м е**

В работе представлено функции ползучести для трех видов эквивалентных материалов, соответствующие породам каменноугольного периода: глинистому сланцу, песчаниковому сланцу и песчанику, а также проведено сравнение прохождения кривых ползучести пород каменноугольного периода и скалоподобных материалов.

**THE PROBLEM OF RHEOLOGICAL SIMILARITY IN MODEL INVESTIGATIONS
OF ROCKS IN EARTH'S CRUST****S u m m a r y**

In the paper some functions of soil creep in the three kinds of equivalent materials, corresponding to the following carboniferous rocks, have been presented: mudstone, arenaceous shale and sand-stone. Further, the course of soil creep curves of carboniferous rocks and of rock-like materials have been compared.