岩石の長年クリープ実験[†]

(巨大試片27年間・小試片10年間の結果)

熊谷直一* 伊藤英文** 笹嶋貞雄***

Long-Term Creep of Rocks—Experimental Results with Large Specimens Obtained in 27 Years and Those with Small Specimens in 10 Years

by

Naoiti KUMAGAI*, Hidebumi ITÔ** and Sadao SASAJIMA***

This paper describes two sets of results of long-term creep tests by bending of rock beams, one for large granite beams ($215 \times 12.5 \times 6.8$ cm) loaded since 1957 and the other for small beams of granite ($21 \times 2.5 \times 2.0$ cm) and gabbro ($16 \times 2.0 \times 1.5$ cm) loaded since 1974. The results during last 27 years for the large beams and 10 years for the small beams are summarized as follows.

(1) The creep curve of each specimen showed an undulatory pattern accompanying "turn-backs" in deflection. The most remarkable turn-back gave a reduction of over 10% on the total deflection in the duration of about 650 days.

(2) The initial and the delayed deflections due to elasticity changed depending upon specimens. With the small specimens, the delayed deflection lasted for 200 to 300 days, reaching 10 to 45% of the initial deflection.

(3) Owing to reconstruction of the laboratory buildings, the large specimens were obliged to move twice after 10 years and 24 years since the start of the experiments. The creep curve for the unloaded beam (the maximum bending stress of 12.8 kg/cm^2) showed a discontinuous increase in deflection after the first move and a discontinuous decrease after the second move, surprisingly with no change in the creep rate in the general trend. On the other hand, the creep curve for the center-loaded beam (the maximum bending stress of 24.8 kg/cm^2) was not affected by these two moves.

(4) Taking the general trend as the secondary creep, the viscosity of the tested specimens was calculated by neglecting the yield stress. It was 3×10^{20} to 6×10^{20} poise for granite and 0.9×10^{21} to 6×10^{21} poise for gabbro.

キー・ワード：岩石，クリープ，27年，10年

1 序 言

本誌の昭和53年2月号に，筆者らは「岩石の長年クリープ実験（巨大試片約20年間・小試片約3年間の結果）」という論文を発表した。本論文は前号につづくもので，巨大試片27年間，小試片10年間の結果を報告する。

巨大試片では，長さ215 cm，幅12.3 cm，厚さ6.8 cmの花崗岩試片2本が実験に供され，支点間隔210 cmで支持され，一本は自重のみで，他は中央に荷重されてたわんでいる。前者はunloaded beam，後者はcenter-loaded beamと呼ばれ，最大曲げ応力はそれぞれ，12.8と 24.8 kg/cm^2 とである。巨大試片のクリープ実験は1957年8月7日にスタートしている。一方，小試片では，ビーム状の $21 \times 2.5 \times 2.0$ cmの

花崗岩試片3本と $16 \times 2.0 \times 1.5$ cmのハンレイ岩試片3本の計6本が実験に供され，1974年8月から10月にかけて各試片の実験は順次開始された。花崗岩試片の場合は，試片下面の支持刃稜間隔 $l_2=8$ cm，上面両端に重量 $W=5.3$ kgの錘を刃稜間隔 $l=20$ cmでつるすことにより，上方に凸に変形するように荷重されている。ハンレイ岩の場合は， $l_2=6$ cm， $l=14.9$ cm， $W=3.3$ kgである。最大曲げ応力は前者が 19.5 kg/cm^2 ，後者は 20.5 kg/cm^2 である。

巨大試片の実験は京都大学理学部地質学鉱物学教室の地下実験室において始められたが，満10年を迎えた1967年に同教室の改築工事のため，同年10月14日に大学付属図書館に近接した京都大学内重力第一原点室と呼ばれる地下実験室に移転された。そこで約14年間実

[†] 原稿受理 昭和60年7月30日 Received July 30, 1985

* 正会員 明石短期大学 明石市明南町，Akashi College, Meinan-cho, Akashi

** 正会員 大阪府立大学総合科学部 堺市百舌鳥梅町，College of Integrated Arts and Sciences, University of Osaka Prefecture, Mozu-umemachi, Sakai

*** 花園大学 京都市中京区西ノ京壺ノ内町，Hanazono College, Tsubonouchi-cho, Nishinokyo, Nakagyo-ku, Kyoto

験を続けたのであるが、図書館の改築にともない、実験装置は再び移転せざるを得なくなった。今度の新実験室は、理学部正門横の元理学部事務室の地下室に定められ、1981年12月25日に移転したのである。現在はこれを第三実験室として実験は継続されている。

小試片の実験は、京都府宇治市の関西電力喜撰山地下発電所内の横坑内に設けられた京都大学理学部地質学鉱物学教室の岩石クリープ実験室にて行われている。巨大試片が、温度はほぼ一定であるが、湿度が年変化するままになっている環境下で、実験されているのに対して、当所は年間18℃、湿度はほぼ100%という天然の恒温恒湿室である。

巨大試片の試料は広島県赤坂産、小試片の試料は香川県庵治産の細粒花崗岩とスウェーデン産の細粒ハンレイ岩とである。巨大試片と小試片の実験は、試料と寸法、さらに測定方法も異なるのであるが、両者の実験結果は後述するように大変よく似ているのである。

2 巨大試片の27年間の実験結果

たわみ曲線は、実験開始時 ($t=0$) には、弾性論的に、 E をヤング率として

$$y = \frac{1}{E} X(x) \quad (1)$$

で表すことができる。たわみ曲線は時間とともに変化するので、

$$y = T(t) X(x) \quad (2)$$

と仮定する。 $T(t)$ はヤング率の逆数のジメンションを持ち、 $T(0)=1/E$ である。実験時における $T(t)$ 値は、たわみの測定値 (x_i, y_i) より最小自乗法により見出される。 y_i と $T(t)$ の平均自乗誤差を ε と ε_T で

表す。また、はりの中央点のたわみを $S(t)$ で表す。

Fig. 1 に27年間にわたる $T(t)$, $S(t)$, ε_T および ε の時間変化が示される。なお最下段に実験室の温度と湿度の変化が付記されている。Center-loaded beam に対する $T(t)$ の変化が、二回目の移転まで直線で近似され、破線で描かれている。Unloaded beam に対する $T(t)$ の変化は一回目の移転後に不連続に増大するが、一回目移転までの近似直線と一回目と二回目移転間の近似直線とは、ほぼ等しい傾きを持っている。二回目の移転後の近似直線は、期間がまだ3年余なので描いていないが、center-loaded beam の場合は、ほぼ先の近似直線の延長上に来ると予想される。Unloaded beam の場合は、二回目移転後の測点 ($t, T(t)$) の分布はその移転前の分布よりも有意に低位にある。このことは、 $T(t)$ 値は二回目移転後不連続に減少したことを示し、一回目移転後に $T(t)$ が不連続に増大したことに対照的である。

前報において、unloaded beam の一回目移転による $T(t)$ の不連続な増大は、実験室の湿度の違いと支持刃後間隔の変化を考慮しても説明できないことを示した。そして移動時に中心荷重の振動による余分のショックが加わる center-loaded beam の方が影響を受けず、ショックを受けにくい unloaded beam の方が影響を受けているような結果は、不思議であった。いまや、一回目移転後のたわみの増大はショックにより試片内にマイクロクラックが生じたためであるとは考えにくい。岩石試片なるものは、荷重の仕方によって異なった弾性変形を示すものであると考えたい。試片内の応力の大きい center-loaded beam でも移転後に

Fig. 1. Experimental results of the large granite beams.

不連続が起っているのであろうが、それが小さく、応力の小さい unloaded beam でそれが大きいのであろう。本来、長年クリープ実験は移転することなく遂行されることが望まれるが、二度の移転は幸いにも新たな発見をわれわれにさせてくれた。すなわち、unloaded beam が示すごとく、移転は $T(t)$ に弾性的な不連続を生じたが、粘性（クリープ）を示す $T(t)$ の傾斜には何ら変化を生じていないという発見である。なお、変形は弾性と粘性との単純な和であることも示唆している。

さて、この実験を通して、岩石は降伏応力を持たず、粘性流動することを筆者らは再三にわたって述べてきた。この結論に従えば、 $T(t)$ の傾きは

$$\dot{T}(t) = 1/3\eta \quad (3)$$

で与えられる。ここで η は粘性係数である。この値を $T(t)$ の近似直線 (Fig. 2) から求めると、

center-loaded beam $5.7 \cdot 10^{20}$ poise

unloaded beam $3.2 \cdot 10^{20}$ poise

となる。ゆえに花崗岩の粘性係数は、 $(3 \sim 6) \cdot 10^{20}$ poise とみなされる。

3 小試片の10年間の実験結果

試片は「序言」で述べたように上方に凸になるように荷重され、試片の上面は最高の精度をもって研磨されている。その面上に直径 13 cm のオプティカル・フラットを重ね合わせ、上方から Na-D 光 (波長 $\lambda = 0.5893 \mu\text{m}$) を照射して反射光を見るとき、フラットと試片の間の空気の薄層で光の干渉がおこり、明暗の干渉じまが見える。一つのしまと隣のしまとは、フラット面からの距離が $\lambda/2$ だけ異なり、この干渉じまの解析から試片上面の正確な形状を見出すことができる。Fig. 2 は花崗岩試片 No. 11 の $t=1883$ 日の測定であり、図中に上記のようにして求めた試片上面の形状が描かれている。すなわち、荷重前の試片面の形状 (初期状態) と $t=1883$ 日の形状とが、干渉じまの暗線の位置をプロットすることによって示してある。もちろん、これらの点を通る平均曲線が面の形状とみなされる。これらの形状は、 $x = \pm 5.25 \text{ cm}$ にて、 $y=0$ となるように描いてあるが、ちょうどそれぞれ両位置の研磨面上

Fig. 2. An example showing determination of a deflection of the small test-piece.

に標線が刻んであって、干渉じまを読み取る時の位置の基準となっている。Y 軸は両位置の垂直二等分線で、光波長 λ を単位として目盛ってある (以上の詳細は既報参照)。試片のたわみは、時間 t における試片面の形状と初期状態との差であり、図中に x の 5 mm 間隔に対するたわみ量 y が丸でプロットしてある。

Fig. 3. Experimental result of the granite test-piece No. 10.

Notice mainly a time-dependent change of larger hollow circles connected with a polygonal line. See text as for smaller hollow circles.

Fig. 4. Experimental result of the granite test-piece No. 11.

Fig. 5. Experimental result of the granite test-piece No. 14.
Refer to the caption of Fig. 3.

Fig. 6. Experimental result of the gabbro test-piece No. 6.

Fig. 7. Experimental result of the gabbro test-piece No. 15.

Fig. 8. Experimental result of the gabbro test-piece No. 16.

式(2)を実験式 $(X(x))$ の式は他の文献参照)として, Fig.2 の白丸の組 (x_i, y_i) に対する $T(t)$ の最確値と測定の誤差 ε を求めると,

$$T(t) = 3.7718 \cdot 10^{-12} \\ \pm 0.0063 \cdot 10^{-12} (\text{m. e.}) \\ \text{cm}^2/\text{dyn} \\ \varepsilon = \pm 0.096\lambda$$

となる。これに対するたわみ曲線が Fig.2 に実線で描かれている。

各試片の $T(t)$ と ε の時間変化が Fig.3~8 に示される。 ε の単位は波長 λ である。縦軸のスケール長が花崗岩試片とハンレイ岩試片とで異なり、後者は前者の 2.5 倍にしてある。最初に ε の時間変化に注目しよう。花崗岩試片 No. 11 (Fig.4), ハンレイ岩試片 3 本 (Fig.7~9) とは、10 年間を通して $\varepsilon = 0.1\lambda$ すなわち 10 分の 1 波長の精度で測定されているとみてよいであろう。以上の 4 試片では、 $T(t)$ の平均自乗誤差はあまりにも小さくて、それをグラフの中にエラー・バーで表現できないくらいである。

花崗岩試片 No.14 (Fig.5) では、 ε は 0~400 日間はほぼ一定、400~700 日間で増大、700~2000 日間でほぼ一定、2000~2250 日間で増大、以後はほぼ一定と段階的に変化する。これは、たわみの測点 (x_i, y_i) が $t=400$ 日以後、式(2)の平均曲線に対して、系統的にずれ始め、そのずれが段階的に変化することに起因する。測点は $-4.5 < x < 1 \text{ cm}$ の範囲でずれる(文献にその様子が図示してある)。多分 $-1.5 < x < 1.5 \text{ cm}$ で試片は変形しやすく、 $-4.5 < x < -1.5 \text{ cm}$ で変形しにくいことによるのであろう。そして、試片の支点に当る $x = \pm 4 \text{ cm}$ (Fig.2 参照) の両測点は水平位置から明らかにずれるのである。ゆえに両測点がいくぶん水平になるよう座標変換してやれば、多少改善されるかもし

れないという期待があった。そのためには式(2)に代つて,

$$y = T(t)X(x) + \theta x + \delta \quad (4)$$

を実験式としてやればよい (T , θ , δ は未知数). こうして求めた $T(t)$ と ε が, Fig. 5 の中に小さい丸で示してあるが, それらの変化の傾向は, 前のものと大差ないことがわかる. したがって, このような操作はあまり意味がないようである. 花崗岩試片 No. 10 (Fig. 3) では, ε は 0~1700 日間はほぼ一定, 1700~2000 日間に増大, 2000~2900 日間はほぼ一定, 2900~3300 日間に増大, 以後ほぼ一定の傾向とみてよからう. これは, たわみの測点の平均たわみ曲線からの系統的ずれが 1700 日から始まることに起因する. 図示を省略するが, 試片は $0 < x < 2$ cm で変形しにくく, $-1.5 < x < 0$ cm で変形しやすいようである. 式(4)による近似も参考のために Fig. 3 に示しておいた. 以上 2 個の試片の ε の時間変化について, ε 一定の時期が ε 増加の時期に比べて明らかに長いことが注目される. このことは重要な特性であるかもしれないが, 本論では指摘するにとどめておく.

試片 No. 14 と No. 10 に現れたたわみの系統的ずれは, 変化しやすさが, 試片の不均質性のために, 場所によって異なるためと考えられる. その変形しやすさは段階的に進行したが, ε 一定の期間内では時間的に変化しなかったとみてよい. したがって, その期間の $T(t)$ 値は互いに比較できることになる. 試片 No. 11, 6, 15, 16 については全期間の $T(t)$ 値が比較できることは言うまでもない. このような観点から, $T(t)$ の時間変化をみると, 岩石のクリープは, かなり長周期の波状の進行を為すことが見出される. すなわち, 岩石クリープは部分的に後もどりをする. 特に No. 10 の 700~1350 日間, No. 14 の 700~1250 日間, No. 15 の 300~550 日間, No. 16 の 300~700 日間の後もどりは顕著であって, $T(t)$ 値は約 1 割も減小する. このような現象を筆者らは, “クリープのあともしど現象”と呼んでいる.

三つのハンレイ岩試片の $T(t)$ 値を比較すると, そ

れらはかなり異なる. $t=0$ における $T(t)$ の違いは, 各試片が異なるヤング率をもって初期の弾性変形を為すことを意味する. そのヤング率がすべての試片について計算されて Table I に示されている. さて, 材料は外力を受けるとき, 通常, 最終の弾性変形を示すためにはある時間がかかる. この遅延弾性後の変形の方が, 初期の弾性変形よりも重要であろう. ゆえに Table I には, 最終の弾性変形に対するヤング率と, 遅延弾性を完了するに要する時間とが示されている. ここでは, $T(t)$ 値の増加がしばらく停止したときをもって, 遅延弾性は終了したとみなした. 初期および最終弾性変形に対するヤング率は両者とも, ハンレイ岩の場合, かなりばらつく. さらに注目したいことは, 遅延弾性は 200~300 日も続くことと, 遅延弾性の変形量は初期弾性変形の 10~45% にも達することとである.

花崗岩試片 No. 11 (Fig. 4) は, 一次クリープを約 200 日で終え, 以後波状の変化を伴いつつ二次クリープの状態に入ったとみてよいであろう. ここでは波状変化を無視した $T(t)$ の全体的傾向を二次クリープとみなす. 二次クリープのこう配 $\dot{T}(t)$ は, 式(3)で与えられる. Fig. 4 中に $\eta=10^{21}$ poise に対する $T(t)$ のこう配を記入しておいた. 粘性係数 η を 200~3750 日間に対して計算で求めると, $6.2 \cdot 10^{20}$ poise となる (Table I). この値は波状変化のために将来いくらか変化するかもしれないが, 花崗岩巨大試片について得られた $(3 \sim 6) \cdot 10^{20}$ poise とよい一致を示している.

ハンレイ岩試片 No. 6, 15, 16 についても上記と同様の取扱いがなされ, Table I の粘性係数が求められた. これらから, ハンレイ岩の粘性係数は $(0.9 \sim 6) \cdot 10^{21}$ poise と決定しておこう.

花崗岩試片 No. 10 と 14 とでは, ε 一定の期間が, 二次クリープの傾向を見出すためには, あまりにも短いためか, 二次クリープを求めることができない. しかしながら, No. 11 の結果が巨大試片ともよく合うことから, ここでは花崗岩の粘性係数は $(3 \sim 6) \cdot 10^{20}$ poise と決定しておこう. Table I にみるように, 花崗岩のヤング率はハンレイ岩のそれよりも小さいから,

Table I. Young's modulus and viscosity of small test-pieces.

Test-piece	Young's modulus for initial elastic deformation (dyn/cm ²)	Young's modulus for final elastic deformation (dyn/cm ²)	Time to accomplish delayed elasticity (day)	Viscosity (poise)	Period of calculation for viscosity (day)
Granite No. 10	$3.5 \cdot 10^{11}$	$2.8 \cdot 10^{11}$	250	—	—
No. 11	$4.1 \cdot 10^{11}$	$2.8 \cdot 10^{11}$	200	$6.2 \cdot 10^{20}$	200~3750
No. 14	$4.1 \cdot 10^{11}$	$3.1 \cdot 10^{11}$	200	—	—
Gabbro No. 6	$10.3 \cdot 10^{11}$	$7.1 \cdot 10^{11}$	250	$5.5 \cdot 10^{21}$	750~3700
No. 15	$11.1 \cdot 10^{11}$	$9.5 \cdot 10^{11}$	300	$2.9 \cdot 10^{21}$	550~3750
No. 16	$8.9 \cdot 10^{11}$	$8.2 \cdot 10^{11}$	300	$0.91 \cdot 10^{21}$	700~3750

花崗岩は弾性と粘性の両方においてハンレイ岩よりも変形しやすいといえる。このことは、弾性と粘性の間に相関が存在することを暗示するようである。

4 巨大試片と小試片の両実験のまとめ

巨大試片と小試片の両長年クリープ実験の結果には類似性があり、次のように要約できる。

(1) 岩石のクリープは波状のクリープ曲線を描きつつ進行する。すなわち部分的にクリープのあともどり現象を伴う。最も顕著なあともどりでは、たわみは約650日間減小し続け、その減小量は全たわみの10%を越えた。

(2) 遅延弾性が小試片で観測され、それは200~300日も続き、その変形量は初期弾性変形の10~45%にも達した。巨大試片の center-loaded beam の最初の1年以内の挙動もこれと同様とみてよい (Fig. 1 なお詳細は既報参照)。ただし、unloaded beam では、あともどり現象が最初から現れ、遅延弾性は観測されなかった。

(3) 小試では、初期および最終弾性変形に対するヤング率は、同一試料でも、試片ごとに異なり一定しなかった (Table I)。巨大試片では同様な比較はできないので、近似直線 (Fig. 1 の破線) の縦軸切片と比較すると、center-loaded beam は $38.8 \cdot 10^{-13} \text{cm}^2/\text{dyn}$ 、unloaded beam は $35.4 \cdot 10^{-13} \text{cm}^2/\text{dyn}$ となる (参考までに $T(0)$ 値を記すと、それぞれ、 $(34.1 \pm 1.1) \cdot 10^{-13}$ と $(36.8 \pm 3.4) \cdot 10^{-13}$ である)。このことは巨大試片でも、弾性係数は両試片で異なると解されよう。短時間試験で、弾性係数の値がばらつくことは、広く知られているが、長期試験でもそうであることを強調したい。

(4) 巨大試片では、改築のため、10年目と24年目の2回の移転を余儀なくされた。そのため、unloaded

beam のクリープ曲線に、一回目の移転後には不連続な増大が、二回目には不連続な減小が生じた。これについて、筆者らは弾性的な問題であるとし、岩石試片なるものは、同一荷重であっても、荷重の仕方によって異なった弾性変形を示すという考えを述べた。前記(3)は、同一荷重に対して、同一試料岩石は試片ごとに異なる弾性変形を為すことを意味する。その原因の一つに、荷重の仕方があげられるとすれば、この(4)のように、同一試片が異なる弾性変形を為すことになる。以上の(3)と(4)は材料がヘテロジェニアスであることに関係しているように思われる。

(5) 両実験は試片の寸法と試料の産地が異なるにもかかわらず、二次クリープの粘性係数はほぼよい一致を示す。すなわち、花崗岩は 10^{21} poise よりも幾分小さく、ハンレイ岩は幾分大きい。岩石の常温常圧下の粘性係数はおおよそこんなものと結論されよう。

(昭和59年12月8日 第6回岩の力学国内シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 熊谷直一, 笹嶋貞雄, 伊藤英文, 材料, **27**, 155 (1978).
- 2) 伊藤英文, 笹嶋貞雄, 第5回岩の力学国内シンポジウム講演集, p. 49 (1977).
- 3) H. Itô and S. Sasajima, Tectonophysics, **62**, 219 (1980).
- 4) 熊谷直一, 伊藤英文, 材料, **17**, 925 (1968).
- 5) N. Kumagai and H. Itô, Proc. 5th Int. Cong. Rheology, Vol. 2, 579 (1970).
- 6) 熊谷直一, 大学世界, 1978年10月号, p. 64.
- 7) H. Itô, Proc. 5th Cong. Int. Soc. Rock Mechanics, Vol. 1, p. A117 (1983).
- 8) 伊藤英文, 笹嶋貞雄, 第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p. 85 (1984).
- 9) 熊谷直一, 伊藤英文, 材料, **14**, 507 (1965).