花コウ岩大型ビームの長期たわみ実験の13年間の 実験結果および湿度変化に対する修正*

熊谷直一** 伊藤英文***

The Experimental Study of Secular Bending of Big Granite Beams for a Period of 13 Years with Correction for Change in Humidity

by

Naoiti KUMAGAI

(Faculty of Literature, Otani University, Kyoto)

and Hidebumi ITÔ

(Faculty of Home Economics, Kyoto Women's University, Kyoto)

This paper is the third report following up the first and the second, the first having been published in "Jour. Soc. Materi. Sci. Japan," Vol. 14, p. 507, and the second in the same journal, Vol. 17, p. 925.

Our experiments were started on Aug. 7, 1957 in a basement laboratory of the Geological and Mineralogical Institute, Kyoto University. Owing to the reconstruction of the Institute buildings, the test-pieces had to be removed (very carefully) on Oct. 14, 1967 to a distantly located laboratory in the Kyoto University compounds, where the experiments have been carried on likewise for nearly 3 years up to date (Aug., 1970).

The deflection curve of the test-piece is represented by $y = T(t) \cdot X(x)$, where $T(t)$ is a function of time t that has a reciprocal dimension of Young's modulus E and $T(0) = 1/E$. From $T(t)$ we can derive $S(t)$ which is the sag of the central point. Plotting the values of $T(t)$ against t , it is found that the moving of the test-pieces produces no abrupt change in the general trends of $T(t)$ for both the center-loaded and unloaded beams (the two test-pieces). In the general trend the values of $T(t)$ of both the beams increase very slowly with the time for the whole period of 13 years. This impels us to postulate that granite undergoes viscous flow or plastic flow that has a very small yield stress.

It has been already mentioned in our second report that the mean curves of $T(t)$ show clear dependence on humidity for the first 5 to 10 years. The range of annual changes in the humidity in the old laboratory was 35% to 85%, but less range of 75% to 95% has been shown in the new laboratory. Accordingly $T(t)$ obtained there does not show so clear dependence on humidity as $T(t)$ did in the old laboratory. In the later part of this paper is given the report of the examination of the correlations between $T(t)$ (and $S(t)$) and humidity for the first 5 to 10 years. It is found that the correlation coefficients in $S(t)$ for both the beams are nearly equal. In Fig. 6 are shown the graphs of $T(t)$ corrected for humidity. The general trend of the $T(t)$ is almost the same when correction has been made regarding humidity as that before correction, indicating that the correction for change in humidity does not sensibly affect the values of viscosity.

In the previous reports it is reported that, from the beginning, minute folds have been formed on the upper surfaces of both the test-pieces. It is confirmed in this paper that the mean amplitude of the fold has been very slowly increasing, as shown by the variation of ϵ (Fig. 4), for each test-piece during the whole period of 13 years.

(Received Oct. 1, 1970)

1 序 言

本論文は先の二つの論文, 「花コウ岩大型ビームの

長期たわみを見い出す実験方法と最初の7年間の実験結果」(以下第1報という)と「花コウ岩大型ビームの長期たわみ実験の最初の10年間の実験結果とその解析」(以下第2報という)に次ぐ第3報である。

この実験の目的は花コウ岩の流動(クリープ)を曲

* 原稿受理 昭和45年10月1日

** 正会員 大谷大学文学部 京都市北区小山上総町

*** 正会員 京都女子大学家政学部 京都市東山区東山七条

げ試験によって調べることにある。長さ 215 cm, 厚さ 6.8 cm, 幅 12.3 cm の真直はり状の試片 2 本が実験に供されている (Fig. 1)。これらを間隔 210 cm の刃稜 (材料は試料と同質の花コウ岩) の上に水平に載せ, 一方は自重だけで, 他方は中央に 22.06 kg の定荷重をつるして, たわませてある。試片のうち前者を unloaded beam, 後者を center-loaded beam と呼ぶ。最大曲げ応力を弾性論的に計算すると, unloaded beam に対して 12.8 kg/cm^2 , center-loaded beam に対して 24.8 kg/cm^2 となる。

両試片は1957年8月7日午後2時に刃稜の上に掛けられ, ここに実験がスタートした。この実験は, 京都大学理学部地質学鉱物学教室の地下地震計室において, 長期計画のもとに始められたのであったが, 満10年を迎えた1967年になって重大な事件がもち上った。それは当教室の改築工事が施行されることになり, 地震計室は取りこわされることに決定したのである。そのため, 1967年10月14日, 実験開始以来10年2ヶ月め, 当教室取りこわし寸前, 新実験室に移転したのである。新実験室には京都大学内重力第一原点室 (旧京大天文台地下室で, 現在の京大付属図書館北西隅空堀に面する地下室) を選んだ。現在はこの新実験室にて測定が続けられている。

この種の実験では, 装置を永久に固定しておくことが生命であるにもかかわらず, 上記の通り移転が行なわれた次第である。後述のごとく, 幸いに移転は試片の流動に変化を与えていないようであるが, 移転は実験条件の大きな変化であるので, 本論文の前半で移転の様態を詳述する。しかる後, 実験開始後13年間 (移転後を含む) の実験結果を報告する。第2報においては実験結果のうち $T(t)$ の時間変化の中に実験室の湿度との相関が, 特に最初から5年経過後に, 明らかにうかがえることを述べた。 $T(t)$ の定義については後述する。論文の後半では湿度補正を行なった結果を示す。

2 移 転 記 事

Fig. 1 は旧実験室での様子を示す。Fig. 2 は新実験室で現在継続中の center-loaded beam の様子である (Unloaded beam は写真の手前左方にある)。Fig. 1 の試片の応力の状態を変えないように移転することが肝要である。そのために, 形鋼の試片支持フレームと木製台 (Fig. 2 参照) が二組作られた。試片支持フレームの端部の刃稜のある部分のスケッチが Fig. 3 に示されている。刃稜は試片と同質の花コウ岩 (広島県赤坂産) で作られ, 試片がねじれた状態で支持されることがないよう調節可能にしてある。また, 刃稜間隔も調節可能である。

移転数日前に試片支持フレームと木製台が Fig. 1 の各試片のすぐ横に試片と平行におかれ, 数回にわたっ

① Center-loaded beam ② Unloaded beam
③ Center-load ④ 4' Blunt knife-edges of granite
⑤ Straight steel beam ⑥ Dial gauge ⑦ Level
⑧ Vacant stand formerly prepared for installation of seismograph

Fig. 1. Test-pieces under experiments in the old laboratory.

⑨ Steel frame ⑩ Wood stand

Fig. 2. Center-loaded beam under experiments in the new laboratory.

Fig. 3. Sketch of an end part with knife-edge of the steel frame.

て, 試片支持フレームの新刃稜間隔が Fig. 1 の旧刃稜間隔に等しくなるよう調節された。刃稜間隔が 210 cm という長間隔であることと, 刃稜の先端が鈍くしてあることにより, この調節は困難であった。そのうえ, 試片を載せた場合の状態は載せないで調節した状態か

ら変形するため、試片と刃稜の接触の様子が新旧同じであるとはいえないことを告白しておく。

移転当日、熟練した石工二人によって、試片は両端の旧刃稜接触部の極く近くを持って旧刃稜から新刃稜へ注意深くすみやかに移され（Center-loaded beamの場合には中央の荷重をつるしたまま）、ねじれない様に刃稜の調節がなされた。試片を載せた支持フレームは木製台からはずされ、できるだけ水平を保って、旧地下実験室から地上に持ち出し、新実験室までの650 mはリヤカーに乗せられて運ばれ、さらに、地下の新実験室へは水平を保って運び込まれ、あらかじめ置かれた木製台の上にセットされた。このようにして、unloaded beamは午後3時5分から4時5分の間に、center-loaded beamは4時40分から5時20分の間に移転が行なわれた。移転時の天候は曇りで試片が直射日光にさらされるようなことはなかった。移転作業は既述の石工2人の他、京都大学技官（教養部地学教室）池田 隆、京都大学大学院学生（理学部地質学鉱物学教室）西田潤一の4名の援助によって行なわれた。移転作業は注意深く行なったとはいえ、center-loaded beamの場合、試片に相当のショックを与えたことはいなめない。

つまり、現在、試片は移転装置に載ったまま、実験が継続されているのである。木製台は近くの床面のショックの緩衝体の役も果している。10月14日の移転後、試片がほぼ水平になるように、試片支持フレームと木製台の調整が毎日行なわれた。試片とフレームと木製台の三者が具合よく安定したとみなされるようになったのはunloaded beamの場合10月16日以降であったが、center-loaded beamの場合は10月27日以降であった。移転記事を終わるにあたり、池田・西田の両氏に、また、移転準備にいろいろご協力くださった京都大学理学部地質学鉱物学教室の桂 京造氏に厚く礼を述べたい。

3 実験結果

第2報では試片のたわみ曲線が

$$y = T(t) \left\{ \frac{1000wg}{24I} \left(\frac{3}{2} l^2 x^2 - x^4 \right) + \frac{1000Wg}{48I} (6lx^2 - 4|x|^3) \right\} \quad (1)$$

で与えられることを示した。 $T(t)$ は時間 t の未知関数で、ヤング率 $E(\text{dyn/cm}^2)$ の逆数と同じ次元をもち、 $T(0)=1/E$ である。 x, y はそれぞれ水平・鉛直座標であり、原点を中立軸の中点にとってある。 $I(\text{cm}^4)$ は断面の主軸に関する断面二次モーメント、 $w(\text{kg/cm})$ は試片の単位長さの質量、 $W(\text{kg})$ はcenter-loaded beamの中央につるされた荷重の質量（Unloaded beamに対しては $W=0$ ）、 $g(\text{cm/sec}^2)$ は重力の加速度、 $l(\text{cm})$ は両刃稜間の長さである。 x

$=l/2$ における y の値を $S(t)$ で表わせば、 $S(t)$ は時間 t における中央点のたわみ量sagである。

測定時 t において、試片の上表面の形の測定から、たわみ曲線(1)の (x_i, y_i) の組が求められると、最小自乗法によって最確値 $T(t)$ が見い出される。その $T(t)$ によって決められたたわみ曲線と (x_i, y_i) の近似の尺度を示す単一測定の前平均自乗誤差を ϵ 、最確値 $T(t)$ の平均自乗誤差を ϵ_T とする。これらの詳細は第1報に述べてある。

Fig. 4に13年間の実験で得られた $T(t)$, $S(t)$, ϵ_T および ϵ の時間変化が示されている。なお、最下段には実験室の温度と湿度の変化が付記されてある。

(1) 図をみる限りでは、 $T(t)$ の平均曲線（破線で示してある）も ϵ_T のそれも移転の前後では急な変化を伴わないで連続しているので、移転が実験結果に及ぼした影響は少なかったようである。第1報において、実験結果と有感地震（震度Ⅳ以下）との間に相関がないことを述べた。かくして、地震や移転の様に短時間に作用する外力に対しては、試片は弾性的に挙動して、流動の様に長年月にわたって作用する外力の下で起こる現象には影響を及ぼさないらしい。われわれはこの推定を重要視したい。

(2) 旧実験室の湿度の年変化範囲は35%~85%であるのに比べて、新実験室のそれは75%~95%、すなわちここでは高湿で年変化が小である。そのためと思われるが、 $T(t)$ の変化の中に湿度との相関がうかがえなかった。

今回は移転後3年しかたっていないので結果の解析は行なわず、Fig. 4から両試片に共通な結論をだすと次の(3), (4)のとおりである。

(3) $T(t)$ は今日もなお増加の傾向をたどっている。すなわち、試片の変形は増大する傾向にある。したがって、第2報の結論「花こう岩は粘性流動、または、きわめて小さい降伏応力をもつ塑性流動をする」は今日もなりたっている。

(4) 第1報において、 ϵ が、実験出発後50日を過ぎてから、3ないし4年ぐらゐの間、増大するのは試片の上表面に生じた微しゅう曲が時間とともに成長するためであること、そして、その後 ϵ がほぼ一定値を示すのは微しゅう曲の成長が止まったためであることを述べた。しかし、13年を経過した今日、4年以後の ϵ を見ると、極くわずかではあるが増加の傾向をたどっていることが、 ϵ の年平均をとってみると、いえるのである。換言すれば、微しゅう曲はやはりゆるやかに成長しているようである。 ϵ は微しゅう曲の平均振幅と解釈できる。その平均波長は測定間隔10 cmの2~3倍程度である。

4 湿度補正

Fig. 4. Graphical representations of the results observed for 13 years.

Fig. 5. Correlation between $T(t)$ and humidity for each one year.

期間 $5 < t < 10$ 年内の $T(t)$ に対する湿度補正は次のとおりである。Fig. 5 は 1 年間毎に $T(t)$ と湿度の相関を図示したものである。図中の矢じるしは時間の経過する方向を示す。この図を見ると $T(t)$ は時間とともに増大している傾向がうかがわれる。いま、 $T(t)$ の 1 年間の変化を無視して、平均的な $T(t)$ と湿度の相関を目視で決めると図中の直線のようになり、それらのこう配が 10^{-13} の単位で図中に記してある。こう配の平均をとると、

$$\left. \begin{array}{l} \text{Center-loaded beam に対して} \\ 0.02 \times 10^{-13} \text{cm}^2 \text{dyn}^{-1} / \% \\ \text{Unloaded beam に対して} \\ 0.04 \times 10^{-13} \text{cm}^2 \text{dyn}^{-1} / \% \end{array} \right\} \quad (2)$$

となる。これを試片の中央点のたわみ $S(t)$ と湿度との相関に直すと、

$$\left. \begin{array}{l} \text{Center-loaded beam に対して} \\ 0.06 \times 10^{-3} \text{cm} / \% \\ \text{Unloaded beam に対して} \\ 0.07 \times 10^{-3} \text{cm} / \% \end{array} \right\} \quad (3)$$

となり、両試片に対してほぼ同値となる。両試片とも湿度 1% 当たりのたわみ量の変化がほぼ等しいことがわかる。したがって、 $T(t)$ の時間変化の中に現われた湿度との相関は試片の膨潤によるものと解釈しておきたい。

次に(2)によって湿度補正を行なった $T(t)$ を $T_h(t)$ とし、その時間変化が Fig. 6 に示される。ただし、定湿度を 60% にとってある。第 2 報において、粘性係数 η を求めるにあたり、 $T(t)$ を t の一次式

$$T(t) = 1/E + t/3\eta \quad (4)$$

で近似した。その際、 $T(t)$ に対する湿度変化の影響は 1 年の周期をもっているから、整数で表わされる数年間の観測値から(4)式を求めれば、湿度補正を行なった観測値から得られたものと大差ないであろう、という意味のことを述べた。Fig. 6 の中の時間とともに上昇している直線は生の観測値 $T(t)$ から得られた(4)式を示したものであるが、この予察とおり、この直線は湿度補正を行なった $T_h(t)$ の直線傾向を十分に与えていることがよくわかる。ゆえに、粘性係数もまた第 2 報に同じく、 $5 > t > 10$ 年に対して、

Center-loaded beam に対して、

$$\eta = 6.2 \times 10^{20} \text{poises}$$

Unloaded beam に対して

$$\eta = 1.3 \times 10^{20} \text{poises}$$

となる。

Fig. 6. Graphs of corrected $T(t)$ for humidity for 5 to 10 years.

新実験室の選定およびその使用については当時京都大学理学部地質学鉱物学教室第一講座担任初田甚一郎教授の配慮を煩わした。ここに厚く謝意を表したい。なお、新実験室での測定結果の計算は京都女子大学教務員（自然科学研究室）山下和代さんにお世話になった。

参考文献

- 1) 熊谷直一, 伊藤英文, 材料, **14**, 507 (1965).
- 2) 熊谷直一, 伊藤英文, 材料, **17**, 925 (1968).