花崗岩の変形と破壊について

京都大学防災研究所 松 島 昭 吾

(昭和 31 年 2 月 20 日受理)

On the Deformation and Fracture of Granites

Shōgo MATSUSHIMA

Disaster Prevention Research Institute Kyoto University

(Received Feb. 20, 1956)

To consider the occurrence of earthquake, it is necessary to know the mechanism of deformation and fracture of silicate rocks. Under the experiments of the short-time simple compression test, granites have the property represented by the Maxwell-Kelvin complex. Retardation time of the Kelvin body is about 7-9 seconds, independent of stress and rock classification. Fluidity of the Maxwell body increases rapidly near the rupture, and the elastic after effect is increasing with stress multiplication.

The strain ratio of longitudinal to lateral direction is largely above the value of 0.5 for granites near the rupture, that is, there is volume expansion in this region. However, this effect does not arise instantaneously with loading, but depends on the plastic flow after stress added; and the longer the duration, the larger becomes the volume inflation. We suppose, it is because of cavity augmentation inner the specimen on the occasion of fracture.

§1. は し が き

岩石の弾性の問題については、今世紀のはじめ頃から非常に数多くの実験的研究がなされて来た。最初に取り扱われた問題は、地震波の伝播の媒体となる岩石の弾性率についてであった。長岡・日下部・Zisman¹⁾らによつて、Young 率・剛性率・Poisson 比が測定された。最近では超音波を用いる方法がさかんに行われている。又体積弾性率については、主として地球内部構造論の要求から、Adams・Birch²⁾によつて、高静水圧装置を用いて精しく測られた。

しかし地質学的に見れば、地殻は完全弾性体には程遠いものであつて、永い年月の間にはかなり大きな永久変形をすることが、地殻の褶曲などによつて観察される。又いろいろな方法で測定した弾性率の値の喰違いを説明するためには、岩石はどうてい完全弾性体と考えるわけにはいかない。高圧実験法の発達にともなつて、Adams・Griggs³⁾らによつてなされた、高圧下での大理石や石灰岩などの変形は、このことを一そう明らかに物語っている。Griggs⁴⁾は常温常圧の下でも炭素質岩石がかなりクリープをすることを示した。

所で、地震学の立場から地震の発生の問題を考えてみよう。地震の原因を何等かの理由で地殻を構成している岩石が破壊するためであると考え、変形に引続いて岩石の破壊の問題を

取上げてみる必要がある。地震の発生する所は少くとも花崗岩や玄武岩などの硅素質岩石から成立っている層及びより深い所であると思われるから、破壊の問題においては特に硅素質岩石についての実験が重要であろう。

Robertson⁹⁾ は最近の論文で破壊の機構に対して効果を及ぼす因子として、応力条件・温度・組成・時間・物理的性質などいくつかの項目をあげている。同じ論文で彼は、炭素質岩石と硅素質岩石の破壊強度に対する応力条件の効果について述べている。Griggs⁹⁾ は応力条件及び時間の効果を大理石と石灰岩について測定した。温度の効果についても最近幾多の実験が報告されている。

しかしながら、依然として岩石の破壊の機構は極めて複雑であり、それに効果を及ぼすいくつかの因子を地震の発生と関連させることは容易ではない。いろいろな方向から一步一步成果を積み重ねて行かねばならないだろう。

ここに報告する実験は、常温常圧の下において、(1) 岩石の粘弾性性質と応力によるそれらの性質の変化 (2) 破壊点附近での変形状態の特異性を、調べるために行つたものである。

§ 2. 試 料

実験には上に述べた理由によつて花崗岩系統の岩石のみを用いた。勿論地表で得られた花崗岩は地殻内部のそれとは物理的・化学的性質共にかなり差違があるだろうが、これらを用いた実験結果は地殻深部の状態を知るのにかなり役立つに相違ない。

試料の大きさは実験の便宜上、長さ 6 cm 直径 3 cm 及び長さ 4 cm 直径 2 cm の円柱形のものとした。また両底面は殆んど平行に且つ光学的平坦に近いまで研磨した。それで外的な原因による応力の不均衡は殆んど除くことが出来た。

試料についての詳しいデータは第 1 表に示す。

Table 1.

Name No.	Locality	Density	Strength kg/cm ²	Note
Biotite granite 5-4	Ajimura Kagawa-ken	2.67	2700	Fine grain
Biotite granite 24-1	Kitashirakawa Kyoto-fu	2.63	1580	Rough grain
Quartz monzonite 18-1	Awokiko Nagano-ken	2.63	2000	
Gneissose granite 21-1	Shichikucho Hyogo-ken	2.67	1770	Parallel to schistosity
Two mica granite 20-3	Kitakanaki Kyoto-fu	2.62	2130	Rather fine
Pegmatite 25-1	Nahegicho Gifu-ken	2.56	1420	
Biotite granite 2-4	Okazakishi Aichi-ken	—	1550	Rather rough

§ 3. 装置及び測定器

材料の機械的性質の試験方法はいろいろ行われている．すなわち圧縮・引張・撓み・捩り・静水圧縮等である．試験の方法によつてその強度や変形の様子などはひどく異なる場合が多い．例えば岩石では、引張り試験の場合には引張り強度が極めて低いために破壊は全く引裂き破壊であつて、迂りがないために非常に brittle な性質を示す．Griggs⁷⁾ は引張り強度の低い原因を試験方法による応力の不均衡に依るといつているが、それよりもやはり張力に対する抵抗力の低さに原因があるように思われる．撓み試験などでも同様なことがいわれるだろう．

他方圧縮試験では、弾性論的には張力成分が作用しないため破壊強度はずつと増大し、破壊の前にはかなり塑性的な性質を示して来る．したがつて材料の機械的性質を詳しく知るためには、いろいろな応力条件の下での試験を行わねばならない．

しかしながら岩石は一般に brittle な性質が強いために、引張り試験や捩り試験は極めて困難である．これは試料を保持する方法がむづかしく応力集中が起るためである．高压下での引張り試験ではこの難点は除かれる．

以上のような理由からこの実験では圧縮試験の方法を用いた．第 1 図にこの実験に用いた試験機の概略を図示する．この試験機では最大 $20,000 \text{ kg/cm}^2$ までの応力を与えることが出来る．

試料 S は上端では force-equalizer F を挟んでピストン P_1 とまた下端では直接ピストン P_2 と接している．それで試料の両端と P_2 及び F との間の摩擦が変形に対して影響を与えることが予期される．そのために試料は樽形に膨れ出すであろう．しかしながら後で述べるように弾性限界内ではこの現象はそれほど顕著ではなく、破壊点附近で試料がかなり flow しはじめてからこの効果はつきりあらわれて来た．

Fig. 1. Schematic diagram of compression apparatus used for this experiments.

また前述の摩擦を緩和させるために錫箔を間に挟んだ．Bridgman⁸⁾ は鉛箔を用いるのがよいと述べている．いずれにしても剪断抵抗の低い金属箔を使えば摩擦はかなり減少させることが出来るようである．

歪の測定には、可変抵抗型歪計を用いた．この歪計は試料に細い金属抵抗線を貼付し、歪に応じて金属線が伸縮して抵抗値を変化するのを利用したものであつて、この変化を増巾拡大して記録し、或は読取るようになっている．

この歪計の利点は感度がよいこと、取扱いが簡単であること小さな試料に対しても使用出来

ることである。しかし精度はあまりよくなくて最大 5% 位までの誤差がある。しかし偏倚の方向は常に一定でまた誤差の割合もほぼ一定であるから、相対的な変化を知るには大変便利である。絶対値を知るには他の機械的な方法によつて補正を充分行つておけばよい。も一つの短所は大きな歪に対しては直線性が悪くなることである。しかしこの実験では岩石があまり大きな歪を示さないうちに破壊してしまうので何等障害は感じなかつた。歪計の測定範囲は $\pm 1 \sim 30,000 \times 10^{-6}$ また測定誤差は $\pm 0.5 \sim 3 \times 10^{-6}$ で 150 c/s の振動歪まで測定可能である。但し併用した電流計の固有週期は 15 c/s である。

§ 4. 花崗岩の粘弾性性質

岩石に一定の時間をおいてだんだんと応力を加えてゆくと試料は応力の加えられた方向に変形していつて遂に破壊する。しかしそれは応力が加えられたとき瞬間的にすつかり変形してしまわないで、粘性のためにその後も次第に変形が進行してゆく。これは一般にクリープと呼ばれているものである。クリープには荷重後比較的短い時間で減衰する遷移クリープと、ほぼ一定の割合で変化が続いてゆく定常クリープ 2 の種類がある。しかしながら厳密にしらべて見るとその機構はもつと複雑であると思われる。また物質によつても相違があるだろう。

ある物質の機械的な性質を詳しく知るためには、このようなクリープの行動をつまびらかに調べる必要がある。

岩石のクリープについては Griggs⁹⁾ が大理石や石灰岩等について研究しているが、この実験では花崗岩の試料に圧縮応力を加えて後約 100 秒前後の間に示される flow の状態を測定して、近似的に粘弾性構造を求め、それが破壊するときどのように変化するかをしらべた。この実験では 1 秒以内での変化は求めることが出来なかつたが、これは波の伝播に大きな影響をもつものと思われるので時間的にもつと精密な測定が望まれる。

第 2 図は約 100 秒余りの間をおいて約 $50 \sim 100 \text{ kg/cm}^2$ の応力を加えて行つたとき、歪が時間と共に増して行くことを示したものである。今このようにして得た歪と時間との関係から実験式を導くために、片対数グラフに時間軸に対数をとつて書きうつして見る。第 3 図はその一例である。このような図が 1 つの試料について、いろいろな応力に対応していくつか得られる。

これらの図から実験式としては

$$S = A + Be^{-\alpha t} + Ct \quad (1)$$

を用いるのがもつとも都合よいと考えられる。第 3 図に plot したデータから常数 $A \cdot B \cdot C \cdot \alpha$ を求め、これを (1) 式に代入して得た曲線を同じく第 3 図に描いた。曲線と実測値はかなりよく一致している。但し (1) 式において、 s は歪 t は時間 (秒) である。

Fig. 2. Strain-time curve under successive loading for granite.
Kitashirakawa granite 24-1

Fig. 3. Strain-time relation under constant stress (in this case 946 kg/cm²)
plotted on semi-logarithmic paper. Kitashirakawa granite 24-1

この実験式の常数が何を表わしているかを調べるために、

$$\left. \begin{aligned} A &= \Delta p / \varepsilon_H + \Delta p / \varepsilon_K \\ B &= -\Delta p / \varepsilon_K \\ C &= p / \lambda_N \\ \alpha &= \varepsilon_K / \lambda_K \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

とおくと (1) 式は

$$S = \frac{4p}{\varepsilon_H} + \frac{4p}{\varepsilon_K} (1 - e^{-\varepsilon_K / \lambda_K t}) + \frac{p}{\lambda_N} t \quad (3)$$

となる．この式は p_0 なる応力下にあつた物質が更に Δp なる応力を受けたとき生ずる歪の時間的变化を示すものであつて (但し $p = p_0 + \Delta p$)，この物質の構造式が $H-N-K=M-K$ であることを意味する．

したがつて花崗岩は 100 秒前後の短時間試験に対しては Maxwell-Kelvin 体の構造をもつことが結論される．

第 4 図・第 5 図は夫々北白川花崗岩・庵治村花崗岩について求めた，いろいろな応力下での $\varepsilon_K \cdot \lambda_N \cdot \alpha$ の値である．但し図において $\phi_N = 1/3 \cdot 1/\lambda_N$ であつて，これは Maxwell 体の流動度を表わすものである．また $1/\alpha = \varepsilon_K / \lambda_K = \tau_K'$ とおくと，これは Kelvin 体の遅延時間に相当するものといえよう．

Fig. 4. The values of $\phi_N, \varepsilon_K, \alpha$ for various stresses. Kitashirakawa granite 24-1

Fig. 5. The values of $\phi_N, \varepsilon_K, \alpha$ for various stresses. Ajimura granite 5-4

§ 5. 破壊点附近での特異な変形状態

円柱形の試料に軸方向に圧縮応力を加えて行くと，試料は縦方向に縮むと同時に横方向（半径方向）に膨れてくる．完全弾性体であれば縦へ縮む割合と横へ膨れる割合との比（すなわち

Poisson 比) は大体一定であつて、通常その値は 0.25 位である。そして塑性領域に入るとそこでは通常体積変化はないとみなされるから、その値はほぼ 0.5 位となるだろう。岩石に関しては静的な測定によると縦と横との歪の比は一定値ではなくて、最初 0.1~0.2 位から応力の増加にともなつて次第に増し、やがて 0.25~0.3 位の値に到達することが報告されている¹⁰⁾。所で岩石が塑性領域をもつているとすると、そこでは上記の比がどのように変化するかを知ることは、破壊機構をしらべる上に必要なことがらであろう。

Bridgman¹¹⁾ は体積膨張計を用いて、Soapstone・大理石・輝緑岩その他の試料について単純圧縮による体積変化を測定した。その結果 Soapstone・大理石は破壊点附近で急激に体積が増加することを示した。このことはその領域で縦と横の歪の比が 0.5 を越えることを示すものである。

この実験は破壊点附近で縦及び横の歪がどのように変るか、またその時間的变化がどうなるかを測る目的で行つたものである。第 6 図に示すように試料に縦方向・横方向中央・横方向上端に抵抗線ゲージを貼りつけて歪の変化を直接測定した。

横方向の中央と上端にゲージを貼付したのは、ピストンとの摩擦によつて試料が樽形に膨れるためである。

今試料が完全な円柱形で且つすべての方向に一様に変形するものとする。変形前の半径を r 、ゲージの長さを l 、ゲージの両端の間の円周角を θ とし、変形後半径が $r + \Delta r$ 、ゲージの長さが $l + \Delta l$ になつたとする。一様変形であるから θ は不変である。したがつて

$$l = r\theta$$

$$l + \Delta l = (r + \Delta r)\theta$$

$$\therefore \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta r \theta}{r\theta} = \frac{\Delta r}{r}$$

それ故円周方向に貼つたゲージは、その点での半径方向への歪を指示するものと考えてよいであろう。

実験方法は前節の実験と同じように約 100 秒余りの間をおいて一定の応力をだんだん加えていつた。歪計の読取りは加重後 100 秒たつてから行つた。上記の方法で測定した結果を第 7 図~第 9 図に示す。使用した岩石は片麻状花崗岩(兵庫県志筑)石英モンゾン岩(長野県青木湖)両雲母花崗岩(京都府北金岐)である。但し両雲母花崗岩では横方向上端の測定は行わなかつた。

Fig. 6. Schematic diagram of strain measurements. (1) longitudinal (2) lateral (middle) (3) lateral (upper)

石英モンズン岩. 第 7 図において見られるように横方向では歪の小さいうちは, 上端も中央と殆んど同じように膨れている. 歪が大きくなり且つその増加のしかたが大きくなつてくると, 当初予期されたようにピストンとの摩擦の効果が表われて来て, 中央部の膨れが両端部のそれをはるかに凌駕して樽形に変形してくる. そして縦と横との歪の比は破壊に近づくにつれて中央両端共に 0.5 を越えてしまうが, 中央部ではそれが特に著しい. このことから試料は破壊点附近で急激な体積膨張をしていることが推察される.

Fig. 7. Stress-strain curve of longitudinal and lateral, and its ratio. quartz monzonite 18-1

Fig. 8. Similar to Fig. 7. gneissose granite 21-1

片麻状花崗岩. 石英モンズン岩と同じように樽形の変形と体積膨張が観察されるが, あまり顕著ではなくて破壊点のごく近傍でその効果があらわれて来る. すなわち塑性領域が比較的少ないと見てよいだろう. このことは動力変成作用の結果加工硬化を受けたためと思われる.

両雲母花崗岩. この試料では横方向上端の歪は測定しなかつたけれども, 恐らく前述の岩石と同様に破壊点附近でかなりの体積膨張があると結論してよい.

偁て, 第 4 節の実験において, 岩石が破壊点附近で塑性的性質を増すために応力を一定に保つておいても縦方向の歪が時間と共に増してゆくことを観察した. 同様にして横方向の歪もまた時間と共に増してゆくことが考えられるし, したがって体積変化の状態も時間との関係において求められるだろう.

そのような現象をしらべるために、ペグマタイト(岐阜県苗木)の試料を使つて定応力下で 3 のつの歪の成分の時間変化を連続的に記録した。第 10 図に示す写真はその記録の一部である。この図で判るように破壊点附近では横方向(上端・中央共)の flow の量は縦方向のそれ

Fig. 9. Similar to Fig. 7. two mica granite 20-3

Fig. 10. Photographic record of longitudinal and lateral strain varying with time.

に比べてはるかに大きく、数倍以上にも達している。他方、加重直後の変形(弾性的な変形)の比は 0.5 以下である。従つて第 7 図～第 9 図に示した縦と横の歪の比に関する曲線が破壊点附近で 0.5 以上に達しているのは、全く flow の影響によるものであると結論される。

また体積の膨張量は応力が与えられている時間に密接な関係があつて、その時間が永いほど膨張の量も大きい。同様に応力が大きいほど体積増加の時間的割合も大きいことがわかる。

体積増加の実際的な数値に関しては、試料が樽形に変形するために詳しく知ることが出来なかつた。これは体積膨張計を用いるか、或は横方向に多数のゲージを貼付することによつて測定出来るだろう。

§ 6. 岩石の破壊の機構について

Griggs¹²⁾は破壊の機構として引裂破壊と亡り破壊の 2 種をあげている。また通常の破壊ではこの 2 種が混つて起り、岩石の圧縮破壊の場合にも張力破壊の成分があることを報告している。

前節の実験の結果、横方向への flow が破壊点附近で著しく大きくなつていくことがわかつ

たが、この現象は引裂破壊の効果が極めて大きなものであることを示していると思われる。岩石は一般に剪断応力に対するよりも張力に対する抵抗力がずっと低く、且つ沢山の小さな pore や crack を内蔵している。したがって圧縮応力が加えられてもそれと直角な方向に張力成分

Fig. 11. Ruptured specimen of Okazaki granite 2-4

が生じ、それに対する抵抗が低いために crack は次第に増大して内部に沢山の空隙が生ずる。

このため破壊に近づくにつれて体積がむしろ膨張する現象があらわれるのであろう。この効果は剪断応力と相俟つて破壊を促進する。円柱試料を用いた場合こり角は大体 30° 位であり、またその側面には縦方向に大きな亀裂が認められる。これは円周方向に張力が働いたことを示すものであろう。第 11 図に破壊した試料の写真

を示す。

§ 7. 結 論

1. 岩石は 100 秒前後の短時間試験においては Maxwell-Kelvin 体で近似することが出来る。しかしもつと短い時間及びもつと長期に亘つての観測によつて更により近似に書きかえられるべきだろう。

2. Maxwell 体の流動度 ϕ_N は長期のクリープ試験から得られるものよりもずっと大きな値を得た。これは恐らく緩和時間のずっと大きい Kelvin-type flow の極く初期を観測したためであらう。

3. 強度の低い北白川花崗岩は強度の大きな庵治村花崗岩よりずっと大きな ϕ_N の値を示している。このことは一般的にいえるだろう。

4. ϕ_N の値は応力が増すに従つて幾分か増加の傾向を示し、破壊点附近でこの傾向は顕著である。このことは破壊点附近で僅かながら塑性領域をもつものとみなしてよいことを意味するだろう。

5. α すなわち τ_K' は応力に対して無関係にほぼ一定値を保つ。その値は大体 7~9 秒である。また試料の種類にも依らないらしく思われる。

6. ϵ_K は応力の増加によつて次第に小さくなつてゆく傾向を示す。すなわち弾性余効の効果が次第に大きくなつてゆくことを示す。

7. 花崗岩類は破壊点附近で縦と横の歪の比が 0.5 以上に達する。このことはその領域で体積膨脹があることを意味する。

8. 体積膨張の量は強度の大きい密な岩石或は変成を受けた岩石ほど少ないようである。
9. しかし体積の増加は、荷重した瞬間における弾性的な変形によつては生じないで、その後続いて起る flow によるものである。したがつて応力を一定に保つておいても、時間の経過につれて体積の膨脹量が増して来る。
10. 体積増加の時間的な割合は応力が大きい程大であり、破壊点の極く近くでは縦横の歪の比は数倍以上に達する。

§8. あ と が き

終りにあつて、いろいろと御親切に指導を給つた佐々教授に深く感謝すると共に実験に協力して頂いた北村俊吉氏・森本喜一郎氏・長谷川雅一君の諸氏に厚く御礼を申します。

文 献

- 1) H. Nagaoka, Publ's E. I. C. No. 4 (1900) p. 47.
S. Kusakabe, J. Coll. Sci. Tokyo, 20, Art X (1904-5).
W. A. Zisman, Proc. Nat. Acad. Sci., 19 (1933) p. 653.
- 2) L. H. Adams and E. D. Williamson, J. Frank. Inst., 195 (1923) p. 475.
L. H. Adams and R. E. Gibson, J. Wash. Acad. Sci., 21 (1931) p. 381.
A. F. Birch and R. R. Law, Bull. Geol. Soc. Amer., 46 (1936) p. 1219.
- 3) F. D. Adams and J. T. Nicholson, Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, 195 (1901) p. 363.
D. Griggs, J. Geol. 44 (1936) p. 541.
- 4) D. Griggs, J. Geol. 47 (1939) p. 225.
- 5) E. C. Robertson, Bull. Geol. Soc. Amer. 66 (1955) p. 1275.
- 6) loc. cit.
- 7) A. F. Birch, D. Griggs and others, "Handbook of Physical Constants" (1924).
- 8) P. W. Bridgman, "Large Plastic Flow and Fracture" New York (1952).
- 9) loc. cit.
- 10) loc. cit.
- 11) P. W. Bridgman, J. App. Phys. 20 (1949) p. 1241.
- 12) loc. cit.