岩石の変形と破壊 (その四)

2,000 kg/cm² までの高圧下における花崗岩の変形と破壊

京都大学理学部地球物理学教室 松 島 昭 吾

(昭和 34 年 3 月 7 日受理)

On Deformation and Fracture of Rock (Part IV)

Deformation and Fracture of Granite under High
Confining Pressure up to 2,000 kg/cm²

Syogo MATSUSHIMA

Geophysical Institute, Faculty of Science, Kyoto University

(Received March 7, 1959)

In previous experiments, we observed that granite increases in volume near and in the fracture range in simple compression. This volume increase diminishes as the confining pressure is increases. Under 1800 atm. confining pressure, the rock becomes nearly elastic and breaks down showing high brittleness. The bulk expansion is very much reduced. These phenomena are considered to be in a close connection with the porosity of rocks. An extraordinary increase in rupture strength with confining pressure was observed. The observed value of rupture strength is in a good agreement with Robertson's formula $\sigma_D = 6P_H$ for silicate rocks.

§ 1. は し が き

岩石の破壊の問題について 2, 3 報告して来た¹⁾が, 測定はすべて常温常圧下において行なつたものであつた. しかし, 地震の発生の問題について考えるとき, 是非とも高温高圧下での実験を行なうのが望ましい. 浅発地震の発生する地殻内部では, 圧力は 5,000~30,000 気圧位であり, 温度もまた 500~1,000°C 位に達していると推定されている.

このような高温高圧の条件下での岩石の性質を調べるために, 阿武山地震観測所に高温高圧実験装置が設置された²⁾. 現在の装置で発生し得る圧力は, 静水圧のみならば 50,000 気圧位まで発生可能であり, 他の附加的応力を加えるときの束縛圧は 10,000 気圧が発生可能である. またこのとき加える軸圧には 300 ton プレスが用いられる. 一般に破壊現象を起すためには束縛圧下において他の附加的応力を加えてやらねばならない. 附加的応力には圧縮, 引張り, 撓み, 振り応力等があるが, これ等は軸圧を適当に変換してやることによつて得られる.

ここに報告する実験では附加的応力として圧縮応力を用いた. これは常圧での実験を継続するためであり, また技術的にも比較的発生が容易である.

束縛圧が増すと, 珪素質岩石では破壊を起こすために必要な応力は急激に増大することが,

Robertson によつて報告されている³⁾が、この実験においてもこのような効果が認められた。従つて、ここで報告する結果は束縛圧 2,000 気圧までの実験のものである。これ以上の高圧においては試料の大きさを変え、またピストンの材質も取変えねばならない。

この実験で用いた試料は北白川黒雲母花崗岩であり、長さ 60 m/m、直径 30 m/m の円柱形のものを選んだ。

§ 2. 装 置

岩石試料を封入する耐圧容器は原理的に Bridgman, Griggs, Handin⁴⁾ 等が用いたものと同じである (Fig. 1)。

試料は上下 2 つのピストンの間に挟入され、下部のラムによつて軸圧が加えられる。軸圧力はラムと試料との面積の比から計算される。これはパッキングの摩擦による影響を受けるが、摩擦による圧力の低下は、ピストンが試料に接触するときの圧力と、計算から得られる圧力との差から求められる。従つて、補正は容易であり、この量は束縛圧の 10% 程度である。なお

Fig. 1. Triaxial testing cylinder containing a rock specimen.

Fig. 2. Schematic diagram of triaxial testing equipment.

摩擦の影響を除く方法は Newhall によつて報告されているが⁵⁾、装置の煩雑を避けるためにこの装置では採用しなかつた。

束縛圧はパイプによつて、圧力ポンプ或いは増圧器から耐圧容器へ導入される。従つて、束縛の限界は増圧器の容量及びパイプの耐圧性によつて、大きく制限を受け、高圧の発生は静水圧ほど容易ではない。液体を用いる場合最高 15,000 気圧位まで発生可能であるが⁶⁾、常用の限界は 10,000 気圧前後である。気体を用いる場合はもつと低い圧力でないと、増圧器の容量が不足し、また危険も大きい。Fig. 2 は装置全体の見取り図である。

歪の測定には、常圧の時と同様に抵抗線型歪計を用いた。今まで行なわれている高圧下での

歪の測定は、専らピストンの変位によつて行なつてゐる⁷⁾。これは軸圧方向の歪しか測定できないし、ピストンの変形量の補正をしなければならない。従つて、精度感度共に悪い欠点があり、brittle な物質の歪測定にはあまり適した方法ではない。これに反して、抵抗線型の歪計は試料の変形を直接測定することが可能であり、軸圧方向のみでなく、任意の方向の歪の測定が可能であつて、感度もまた非常によいこと等多くの利点がある。

液体を用いて圧力を加える場合、試料に被覆をするかしないかは結果に非常な差違をもたらす。この影響は岩石においては特に重要であつて、Griggs は石灰岩では強度が約 20% 低下することを報告している⁸⁾。従つて、この実験に用いた試料には、唯一つの例を除いてすべて被覆をした。ただし、今まで用いられているような金属の被覆は電気の良導体であるからこの場合には都合が悪く、ゴムチューブも取扱い上困難があるため、合成ゴム接着剤を塗布することによつて、充分液体の侵入を防ぐことができた。

耐圧容器には電極を多数取付けた。これはあらゆる測定を電氣的に行なうためである。ただ

Fig. 3. Stress-strain curves for Kitashirakawa biotite granite in compression at (a) 1 atm., (b) 540 kg/cm², (c) 1020 kg/cm², (d) 1420 kg/cm², (e) 1820 kg/cm² confining pressure. The hatched regions represent the flow strain during the testing interval about 2 minutes, and the dotted line is assumed strain curve.

し電極数をあまり増すことは、圧力のリークと耐圧の低下を来すためできなかった。Bridgmanらの用いている電極⁹⁾はその点に関して有利であるが、現在ここでは製作できる段階に至っていない。

§ 3. 実験結果

Fig. 3 は夫々常圧, 540 kg/cm², 1020 kg/cm², 1420 kg/cm², 1820 kg/cm² の束縛圧下にお

ける北白川黒雲母花崗岩の応力—縦、横歪関係を示したものである。

ところで、常圧下の実験において、花崗岩を軸圧下において破壊させると、軸圧方向の歪は応力にはほぼ比例して破壊点まで直線的に増して行くことが測定された。しかし軸圧と直角方向の横の歪の変化を見ると、これは応力の増加と共に増加の割合が加速度的にふえていき、破壊強度の $2/3$ 位の応力の所から歪の増加は急激に増大しはじめて、一見極めて塑性的な変形及び破壊現象を示した。また横方向と縦方向の歪の比（擬似ポアソン比）をとつて見ると、これは前記の $2/3$ 位の点から体積不変の値 0.5 （塑性変形値）をはるかに越えて増加する。すなわち、単純圧縮による体積増加現象が測定された。

しかしながら、高圧下ではこのような効果は、側面からの圧力によつて次第に減少することは当然予想される所である。Fig. 3 の結果は束縛圧が増すと共に横歪が急激に増加する現象は次第に衰えていくことを示している。しかし更に結果を判り易くするために、常圧のときと同じように横歪と縦歪との比をとつて見た。今破壊強度を 100% として、途中の応力を百分率で

Fig. 4. Pseudo-Poisson's ratio versus percentage stress under various confining pressure in compression test. The curves are flattened according as the confining pressure is increased.

表わすと、応力—擬似ポアソン比曲線が描かれる。Fig. 4 の曲線群は夫々いろいろな束縛圧に対応する百分率応力擬似ポアソン比曲線を示したものである。この図によつて高圧になる程、体積増加現象は急激に減少していくことが一そうはつきり判る。

岩石は一般にかなりな空隙を持つていることが知られている。このような空隙の成因が、岩石を構成する結晶粒の粒界の凝集機構の不完全性に

起因すると考えると、変形破壊の機構は次のように推定することができる。すなわち、応力の小さい間は空隙は閉鎖する傾向をたどるが、応力が増すと、構成結晶粒の相互の変形量の違いによつて、粒界の凝集力が失われ、結晶粒は分離して次第に横方向へふくれ出し、その結果巨視的な破壊が生ずる。花崗岩自体の強度は、構成する長石、石英、雲母等の強度よりずっと低く、また破壊現象はよりむしろ引き裂きの状態で起っている。試料に束縛圧を加えてやる

と、圧縮応力が增大しても、横方向へふくれ出す効果は周囲からの抵抗をうけて阻止され、従って、体積増加の効果は減少するだろう。又当然破壊は起りにくくなる。後で詳述するように束縛圧による破壊強度の急激な増大が見られる。岩石の空隙は一律な圧縮によつて、大体 2,000 気圧位で消滅すると考えられている。それ故 2,000 気圧位の束縛圧によつて、体積増加現象もまたほぼ消滅することが考えられる。実際に Fig. 4 の曲線群は、このような効果が 1,800 気圧でずつと弱まつて来ていることを示している。

体積増大現象がどれ位の束縛圧で完全になつて試料が全く brittle になるかは、今後の実験による所であるが、結論的に束縛圧が大きくなる程、岩石はより一層 brittle な破壊を起すようになってくるといえるだろう。常圧下での実験において、体積増大現象は測定の間は密接な関係があること、すなわち flow の影響を非常に受けていることを述べた。従つて、束縛圧が高くなる程 flow による変形の量もまた次第に少なくなつていき、応力の増加によつて生ずる歪が破壊に対して大きな比重を占めてくることが想像される。高压下においては、岩石の破壊は Creep によるよりも、応力の増加によつて生ずると考えた方が一般的であるように思われる。なぜならば Creep による変形は、次第に起りにくくなるからである。

Fig. 3 を比べて見ると、束縛圧が高くなる程破壊強度が急に大きくなつていくことが明瞭に示されている。Robertson は硅素質岩石の破壊強度と束縛圧との関係として

$$P_D = 6 P_H$$

なる式を得た¹⁰⁾。ここで P_D は軸圧縮応力であり、 P_H は束縛圧である。この実験における破壊強度と、その時の束縛圧で上式を用いて計算した破壊強度とを比較すると下の様な表が得られる。

Confining Pressure kg/cm ²	Observed Strength kg/cm ²	Calculated Strength kg/cm ²
1	1380	—
540	4850	3240
1020	6850	6120
1420	(7780)	8520
1820	9720	10920

すなわち、実験値と計算値とはかなりよく一致している。1800 kg/cm² においても花崗岩の破壊強度は 10,000 kg/cm² に達しており、これはかなり強度の高い鋼材の降伏強度に匹敵する値である。

Fig. 5. Stress-strain and stress-pseudo Poisson's ratio of Ehime-Ohshima biotite granite under confining pressure of 340 kg/cm². The specimen is uncovered. The hatched region means the same as in Fig. 3.

Fig. 5 は被覆をしなかつた場合の応力—歪曲線及び応力—擬似ポアソン比曲線を示したものである。束縛圧は 340 kg/cm^2 の低圧であるが、擬似ポアソン比は破壊に至るまで全く平坦であつて、大体に近い値を示している。また破壊強度も常圧における時とあまり変らない。これは空隙に圧力伝導液が侵入するためであると考えられる。しかしながら被覆の有無についての詳しいことはなお今後に残された問題である。

§ 4. あとがき

この実験にあたつていろいろ御指導を頂いた佐々教授、並びに装置設計に当つて懇切な御教示を給つた故帰山教授に厚く御礼を申し上げる。なおこの研究は文部省機関研究費によるものである。

参 考 文 献

- 1) S. Matsushima, Zisin. Ser II, 8 (1956), 173.
S. Matsushima, Zisin. Ser II, 10 (1957), 113.
S. Matsushima, Zisin. Ser II, 12 (1959).
- 2) R. Kiyama, Rev. Phys. Chem. Jap., 26 (1956), 24.
- 3) E.C. Robertson, Bull. Geol. Soc. Amer., 66 (1955), 1275.
- 4) P.W. Bridgman, "Large Plastic Flow and Fracture" New York (1952), 83.
D.T. Griggs, Bull. Geol. Soc. Amer. 62 (1951), 853.
J. Handin, Houston, Texas, Amer. Soc. Mech. Engrs. Trans., 75 (1953), 315.
- 5) D.H. Newhall, D. Johnson, Amer. Soc. Mech. Engrs. Trans., 75 (1953), 301.
D.H. Newhall, Ind. Eng. Chem., 49 (1957), 1993.
- 6) D.H. Newhall, Ind. Eng. Chem., 49 (1957), 1949.
- 7) loc. cit.
- 8) D.T. Griggs, J. Geol., 44 (1936), 541.
- 9) P.W. Bridgman, "Large Plastic Flow and Fracture" New York (1952), 43.
F. Birch, E.C. Robertson, S.P. Clark, Ind. Eng. Chem., 49 (1957), 1965.
- 10) loc. cit.