

# 繰返し応力下における花崗岩の変形特性に及ぼす 構造的異方性の影響に関する研究<sup>†</sup>

楠見 晴重\* 峰 之久\*\* 西田 一彦\*

## Effect of Structural Anisotropy on Deformation Properties of Granite under Cyclic Loading

by

Harushige KUSUMI\*, Yukihiisa MINE\*\* and Kazuhiko NISHIDA\*

The effects of structural anisotropy on the deformation properties of granite under cyclic loading have not been clarified. In this paper, four types of granite specimens are prepared with an angle  $\theta$  of the structural anisotropic plane to the loading axis of  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$  respectively; and cyclic loading tests are performed under uniaxial compression. The stress amplitude levels used in this experiment are 0-30%, 20-50% and 40-70% of the uniaxial compressive strength of this granite. As the results, for the stress amplitude level of 0-30%, the elastic modulus under the cyclic loading is approximately constant. However, it is recognized that the increase of axial strain during the cyclic loading is largest for the specimen with  $\theta$  of  $30^\circ$ , and its value under ten thousands cyclic numbers corresponds to 1.27 times as much as the axial strain given by 20% stress for the uniaxial compressive strength, and that its uniaxial compressive strength after cyclic loading is lowest for the all stress amplitude conditions. Further more, it is clarified that its volumetric strain indicates only a negative value under 50% and 70% stress levels under cyclic loading.

**Key words:** Granite, Structural anisotropy, Cyclic loading, Stress amplitude level, Axial strain, Volumetric strain

### 1 緒 言

近年、大規模な地下構造物の建設が計画されており、これらの地下構造物が岩盤内に建設される際には、岩盤の挙動が問題となる。例えば、圧縮空気貯蔵ガスタービン発電や、超電導エネルギー貯蔵施設などでは、ある大きさの応力が繰返し作用することから、岩盤の疲労特性の検討が必要となる。これらの施設の中でも、超電導エネルギー貯蔵施設は、硬岩内に計画されている。<sup>1)</sup>今回、研究対象とする花崗岩は、硬岩の中では等方性材料として扱われることが多いにもかかわらず、花崗岩の力学試験を行った場合、一般に強度、ひずみ、AE特性、弾性係数など、ほとんどの物理量において異方性が認められる。<sup>2)</sup>

硬岩の繰返し疲労特性に関しては、西松・ヘルセオヨ・鈴木等<sup>3)~5)</sup>、大久保・劉等<sup>6)</sup>、山下・天野等<sup>7)</sup>、工藤・松木等<sup>8)</sup>によって、これまでに数多く研究されており、平均応力の影響よりも応力振幅の影響の方が大きいこと<sup>3)~5)</sup>や、三城目安山岩を用いた実験においては、応力-ひずみ線上に現れるヒステリシスループがよく説明できる非線形モデルなどについても、研究が行われている。<sup>6)</sup>また、繰返し載荷-除荷試験時のカイザー効果特性から、圧縮破壊の進展過程とその過程における破壊機構についての解釈の妥当性が検討され<sup>7)</sup>、間隙水圧の影響が主に疲れ限度、ならびに体積変形挙動に与える影響についても検討されている。<sup>8)</sup>硬岩の疲労特性における周波数依存性

に関する研究については、石塚・神山等<sup>1)</sup>が、稲田花崗岩を用いて同一最大応力比で繰返し載荷する場合には、破壊に至る繰返し回数は周波数に依存するが、繰返し載荷応力速度に対応する圧縮強度を基準として、同一最大応力比で繰返し載荷を行うと、破壊に至る繰返し回数は周波数に依存しないことを示した。しかし、これらの研究においては、花崗岩の異方性に対する考慮は行われていない。

これまでに行われた花崗岩における異方性に関する研究については、Dale,<sup>9)</sup> P. M. Douglass and B. Voght,<sup>10)</sup> 小杉,<sup>11)</sup> 佐野・工藤等,<sup>2), 12)~17)</sup> 柳谷・寺田等<sup>18)</sup>によって研究されている。そこでは、通常花崗岩は等方性として扱われる場合が多いが、その異方性はかなり大きいこと<sup>10)</sup>、大島花崗岩はある面のみが著しく異方性を示しており、他の面の異方性については特に著しくないこと<sup>2)</sup>、3次元的な縦波伝ば速度や、圧裂強度はそれぞれの軸を主軸とする直交異方性であることなどが、明らかにされてきた。また、花崗岩が一般的に有する異方性の主軸に関して、載荷方向を系統的に変化させた場合の変形・破壊挙動に及ぼす影響を理論的に説明し、実験で認められたダイレイタンスの異方性や、花崗岩の強度の方向依存性とよく調和していることも明らかにされている。<sup>15)</sup>しかし、上述したように繰返し載荷条件下における従来の研究では、そのほとんどが花崗岩を等方性材料として扱ってきており、異方性材料として花崗岩を扱った研究はほ

<sup>†</sup> 原稿受理 平成8年7月9日 Received July 9, 1996

\* 正会員 関西大学工学部土木工学科 〒564-80 吹田市山手町, Dept. of Civil Eng., Kansai Univ., Yamate-cho, Suita, 564-80

\*\* 東海旅客鉄道 450 名古屋市中村区名駅南, Central Railway Co. Ltd., Nakamura-ku, Nagoya, 450

Table I. Physical properties of Ohshima granites.

Dry density (gf/cm <sup>3</sup> )	Specific gravity	Water absorption (%)	Porosity (%)
2.64	2.50	0.34	0.86

Table II. Elastic velocities of axial direction with each specimen.

	V <sub>P</sub> (m/s)	V <sub>S</sub> (m/s)
G0	3810	1900
G30	3640	1720
G60	3200	1450
G90	3010	1430

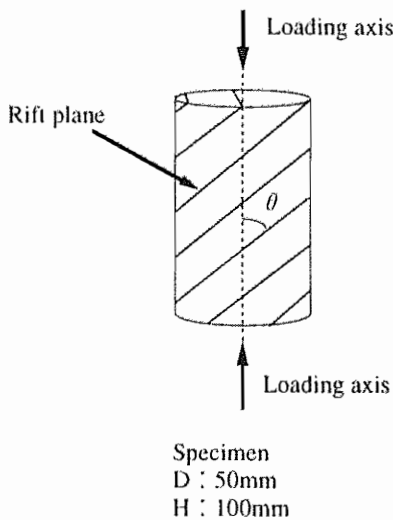


Fig. 1. Relationship between rift plane and loading axis for Ohshima granite specimen.  $\theta$  is the angle between the rift plane and the loading axis.

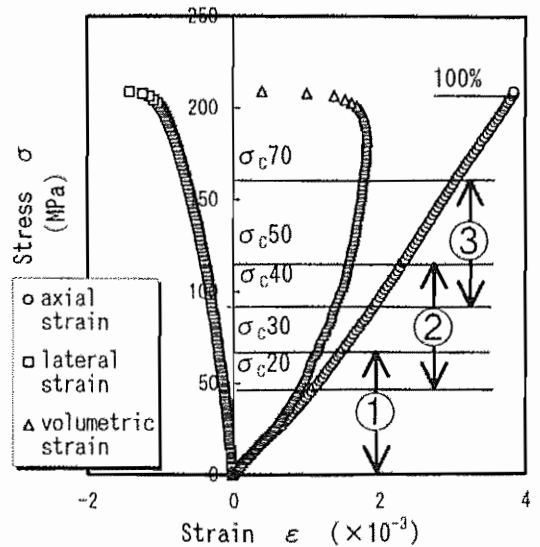


Fig. 2. Stress-strain curve and stress amplitude levels applied to cyclic loading tests for G60 specimen.

## 2 実験方法および供試体

本実験に用いた供試体は、愛媛県大島産の花崗岩（通称大島花崗岩）である。Table I に本研究に用いた供試体の諸物性値を示す。大島花崗岩は、均一な供試体を数多く採取でき、同一ブロックからボーリングして作成した供試体間の力学特性の差異は、非常に小さいことが予備試験によって明らかにされている。供試体については、高さ 10cm、直径 5cm の円柱形に整形した。花崗岩採石場では、採石の際に割れやすい面が利用されており、この面はクラックの選択的配向性によって特徴づけられ、岩石の異方性をもたらす。ここでは、Dale<sup>9)</sup>に従い、最も割れやすい面を rift 面、ほぼ直交する二番目に割れやすい面を grain 面、これら二つの面に垂直な面を hardway 面とし、各面の法線を R 軸、G 軸、H 軸とした。Fig. 1 は、供試体の岩石ブロックを示す。これまでの花崗岩の異方性を考慮した研究では、荷重軸荷軸が異方性軸と一致する場合が多く、主軸と斜交する場合に関する研究は少ない。このため本研究では、岩石供試体を荷重軸荷軸を基準として、rift 面とのなす角  $\theta$  が、 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  の各供試体を作成し、それぞれ G0、G30、G60、G90 供試体とした。

繰返し載荷試験に先立ち、各供試体について弾性波伝ば速度を測定した後、一軸圧縮試験を行った。この一軸圧縮試験結果を基にして、各供試体別に Fig. 2 に示すように一軸圧縮強度の 0-30% (①)、20-50% (②)、40-70% (③) の三段階の応力振幅レベルを設定し、この範囲で繰返し載荷試験を行い、応力・ひずみの測定を同時に行った。なお、応力振幅はすべて 30% とした。繰返し回数は、最大 1 万回、周波数は 0.1Hz、載荷波形は正弦波とし、応力制御による片振りの繰返し載荷試験を行った。これらの試験条件は、試験機の性能より繰返し回数を決め、また繰返し回数を最大 10 000 回と多く取れないことから、各供試体の繰返し時の変形特性の差異が明確に

とんど見られない。静的条件下において花崗岩の力学的特性を論じる場合、構造的異方性の影響を無視することはできないのなら、当然、動的もしくは繰返し荷重下においても、その影響は無視することはできないと考えられる。本研究では、主に花崗岩の構造的異方性が繰返し変形挙動に及ぼす影響について検討するため、繰返し載荷の試験条件については、繰返し載荷回数、周波数、応力振幅は一定にした。すなわち、これらに関連した研究は前述したように多くの研究によって検討されている。したがって、本研究では応力振幅レベルについては、同一応力振幅で振幅レベルが異なる 3 段階に設定した。このように試験条件を単純化することによって、繰返し載荷軸と構造的異方面との関係と、繰返し変形挙動および繰返し疲労強度との関連性について明らかにすることを目的とした。すなわち、繰返し応力下における花崗岩の構造的異方性の発達方向と、弾性係数、ひずみの変化との関連性について検討を行うとともに、繰返し載荷後の一軸圧縮強度との関連性についても検討を行った。

Table III. Uniaxial compressive strength before and after cyclic loading for each specimen.

Specimen	Uniaxial compressive strength before cyclic loading. (MPa)	Uniaxial compressive strength after cyclic loading.(Mpa)		
		Stress amplitude level		
		0-30%	20-50%	40-70%
G0	185.7	220.2	187.1	218.8
G30	204.6	159.2	136.6	—*
G60	215.6	236.7	166.1	—*
G90	227.0	226.7	216.7	—*

\* : breakage during cyclic loading

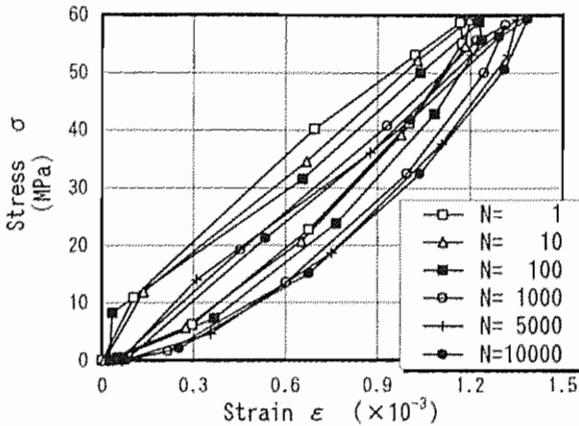


Fig. 3. Hysteresis loop of each cyclic number for G60 specimen.

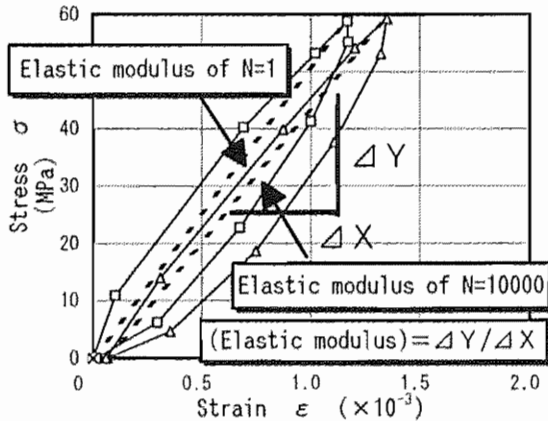


Fig. 4. Schematic diagram of elastic modulus for each cyclic number.

現れるように、応力振幅は大きくした。また 10000 回の繰返し載荷試験終了後破壊しなかった供試体については、応力を解放した後、引き続き一軸圧縮試験を行った。実験には、電気油圧サーボ方式の高圧三軸圧縮試験機を用いた。

### 3 実験結果

Table II は、各供試体の弾性波伝ば速度を示す。このときの弾性波の伝ば方向は載荷軸と同一である。弾性波伝ば速度  $V_p$  は、載荷軸と rift 面とのなす角  $\theta$  が  $0^\circ$  の供試体で 3810m/s、 $90^\circ$  の供試体では 3010m/s となり、 $\theta$  が  $0^\circ$  から  $90^\circ$  になるほど弾性波速度は遅く、その差は約

800m/s となり、大きな弾性波速度異方性が確認された。また、 $V_s$  についても同様な傾向を示した。したがって上述したように rift 面に注目し、rift 面と載荷軸が異なった 4 種類の供試体を作成した。

Table III は、繰返し載荷試験前と載荷試験後の一軸圧縮試験結果を示す。この表より、応力振幅レベルが 0-30% では、G30 供試体を除いて明確な強度の低下は見られなかったが、応力振幅レベルが 20-50% の場合には、G30 供試体で約 35%、G60 供試体で約 23% の強度低下が見られた。また応力振幅レベルが 40-70% では、G0 供試体を除き繰返し回数 10000 回以前に破壊した。以下では、これらの原因について考察する。

Fig. 3 は、G60 供試体の応力振幅レベル 0-30% の時の各繰返し回数別の応力-ひずみ曲線を示す。この図から、繰返し回数の増加とともにひずみは増加し、ヒステリシスループもひずみの増加方向へと、ほぼ平行に移動することが認められた。この応力-ひずみ関係から各繰返し回数における弾性係数は、Fig. 4 に示すように各ヒステリシスループの最大、最小値とを結ぶ直線の傾きとして定義した。

Fig. 5~7 は、応力振幅レベルが 0-30%、20-50%、40-70% の条件下における繰返し回数  $N$  と弾性係数  $E$  との関係を示している。応力振幅レベルが低い場合、繰返し回数の増加に伴う弾性係数の変化は少なく、ほぼ一定の値を示している。また全体的に弾性係数は、すべての繰返し回数下において G0 供試体が最も大きな値を示し、この応力振幅レベルでは G0 供試体から G90 供試体と  $\theta$  の値が大きくなるにつれて、弾性係数の値は小さくなっている。これは、荷重の載荷方向と rift 面とのなす角が  $90^\circ$  に近いほど、rift 面自身の変形が大きくなることに起因しているためと考えられる。すなわち、このような低い応力振幅レベルでは、ぜい性破壊の初期段階の特性とほぼ同様な傾向を示すものと考えられる。応力振幅レベルが 20-50% では、G0 および G90 供試体に関しては、繰返し回数による大きな変化は見られないものの、G30 および G60 供試体に関しては、繰返し回数が多くなるにしたがって若干の低下が見られる。またこの応力振幅レベルでは、弾性係数の大きさと  $\theta$  の値との顕著な関係は見られない。応力振幅レベル 40-70% では、繰返し回数の増加に伴い、G30、G60 供試体に大きな低下傾向が見られ、破壊に至っている。

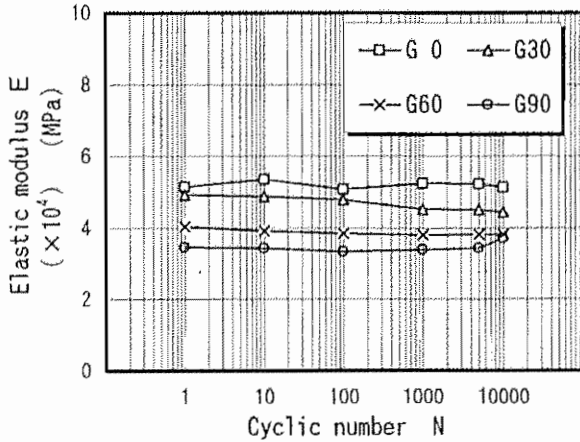


Fig. 5. Relationship between elastic modulus and cyclic number under 0-30% of stress amplitude level.

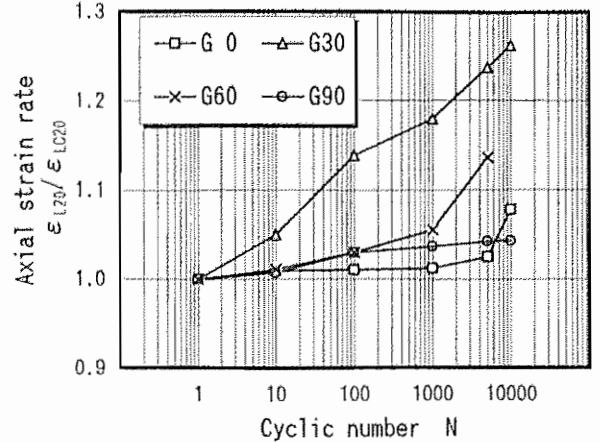


Fig. 8. Relationship between axial strain rate and cyclic number under 20-50% of stress amplitude level.

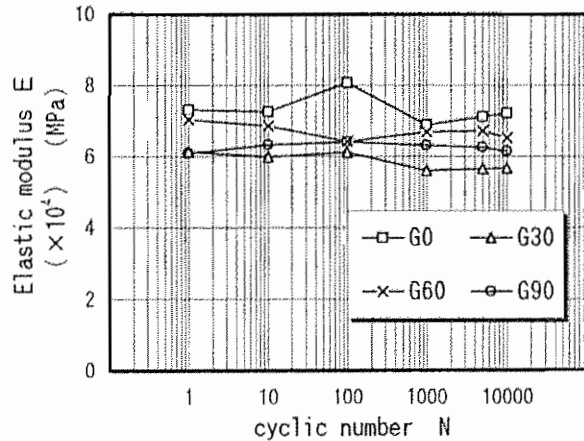


Fig. 6. Relationship between elastic modulus and cyclic number under 20-50% of stress amplitude level.

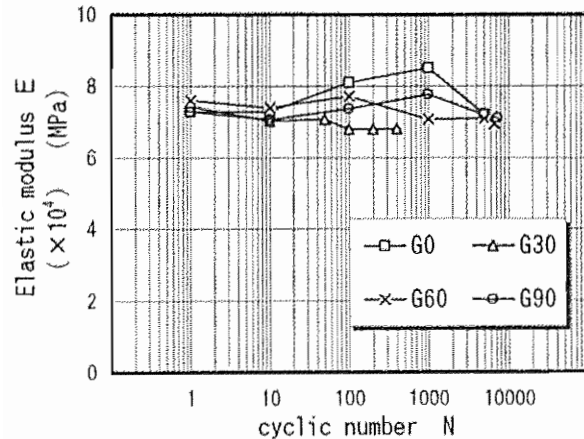


Fig. 7. Relationship between elastic modulus and cyclic number under 40-70% of stress amplitude level.

Fig. 8 は、応力振幅レベルが 20%-50% の、軸ひずみ変化率  $\epsilon_{L20}/\epsilon_{LC20}$  と繰返し回数  $N$  との関係を示したものである。ここで軸ひずみ変化率とは、Fig. 2 に示すように繰返し載荷によって生じた応力レベル 20% における累積軸ひずみ  $\epsilon_{L20}$  と、各供試体の一軸圧縮強度の 20% の応力における軸ひずみ  $\epsilon_{LC20}$  との比として表したものである。この図より、G30、G60、G90 供試体の  $\epsilon_{L20}/\epsilon_{LC20}$  は、繰返し回数  $N$  が大きくなるに従って増加しているが、その程度は供試体によって大きく異なっている。最も大きな増加傾向を示すのは G30 供試体であり、 $N = 10,000$  回における  $\epsilon_{L20}/\epsilon_{LC20}$  は 1.27 となり、一軸圧縮試験時の軸ひずみと比較して 27.2% の累積された軸ひずみが認められた。これは、G30 供試体の一軸圧縮強度の約 27.2% の応力における軸ひずみに相当するものである。

G60 供試体における  $\epsilon_{L20}/\epsilon_{LC20}$  は、 $N = 1,000$  回付近から急激に増加し、 $N = 10,000$  において  $\epsilon_{L20}/\epsilon_{LC20}$  は 1.15 となり、このときの  $\epsilon_{L20}$  の値は、G60 供試体の一軸圧縮強度の約 24.9% の応力における軸ひずみに相当する。

G0、G90 供試体の  $\epsilon_{L20}/\epsilon_{LC20}$  は、繰返し回数  $N$  の増加に対して、徐々に増加しているが、その程度は非常に小さいものである。 $N = 10,000$  回時点においては、それぞれの  $\epsilon_{L20}/\epsilon_{LC20}$  は、1.08、1.04 となり、累積された軸ひずみは、G30、G60 供試体のそれに比較して小さいものである。

Fig. 9 は 20-50% の応力振幅レベル下での、応力レベルが 50% のときの体積ひずみ変化率  $\epsilon_{V50}/\epsilon_{VC50}$  と、繰返し回数  $N$  との関係を示したものである。ここで体積ひずみ変化率とは、先の軸ひずみ変化率と同様で、繰返し載荷によって生じた応力振幅レベルが 50% における累積体積ひずみ  $\epsilon_{V50}$  と、各供試体の一軸圧縮強度の 50% の応力における体積ひずみ  $\epsilon_{VC50}$  との比として表したものである。この図より、G90 供試体をのぞいた各供試体の  $\epsilon_{V50}/\epsilon_{VC50}$  は、繰返し回数の増加に伴って  $N = 100$  回付

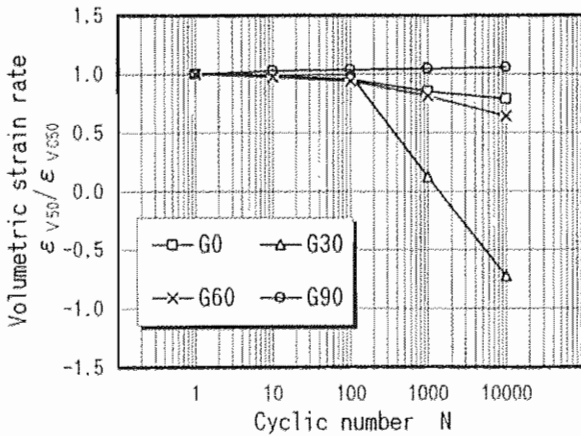


Fig. 9. Relationship between volumetric strain rate and cyclic number under 20-50% of stress amplitude level.

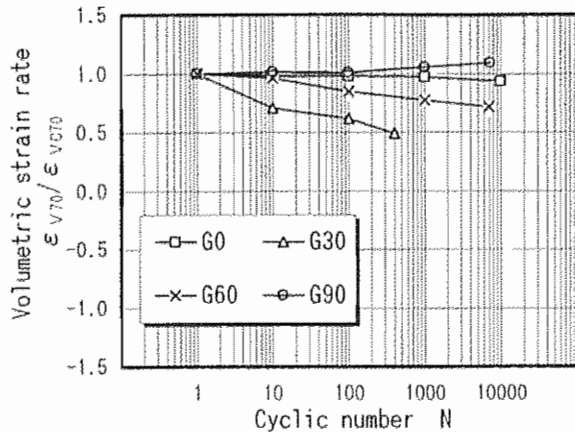


Fig. 10. Relationship between volumetric strain rate and cyclic number under 40-70% of stress amplitude level.

近までほぼ同じような減少を示している。これは、供試体の体積が膨張側に徐々に進行していることを示している。その後、G30 供試体の  $\epsilon_{v50}/\epsilon_{vc50}$  は、急激な減少を示し、 $N$  が約 1 500 回以降  $\epsilon_{v50}/\epsilon_{vc50}$  の値は、負を示している。これは、G30 供試体の体積が  $N = 1 500$  回以降、もとの体積に比較して膨張していることを示している。すなわち、応力振幅レベルが 20-50% の荷重を載荷することによって、横ひずみの増加割合が縦ひずみのそれより著しいために、このような現象となったものと考えられ、繰返し載荷の影響が G30 供試体に大きく現れたものと考えられる。体積ひずみが負の値を示すことは、供試体内部に供試体を破壊に導くクラックが発達していることが十分推測でき、それは rift 面の方向性が、大きく影響しているためと考えられる。また、G0、G60 供試体の  $\epsilon_{v50}/\epsilon_{vc50}$  の値は、 $N = 100$  以降、それぞれの供試体の減少傾向は異なり、 $N$  が 10 000 回では、G0、G60 供試体の  $\epsilon_{v50}/\epsilon_{vc50}$  の値は、0.78、0.64 と差異が見られた。G90 供試体の  $\epsilon_{v50}/\epsilon_{vc50}$  の値は、 $N$  に対する変化はほとんど見られず、ほぼ 1.0 の値を示している。

これは、この方向に rift 面が発達している場合には、繰返し載荷によるひずみの進行は、生じないためと考えられる。

Fig. 10 は、Fig. 9 と同様、応力振幅レベルが 70% における、各供試体の  $\epsilon_{v70}/\epsilon_{vc70}$  と  $N$  との関係を示したものである。この図で G30 供試体は、 $N$  が約 500 回の時破壊したため、 $\epsilon_{v70}/\epsilon_{vc70}$  は途中までしか示されていない。しかし、この繰返し回数までは、Fig. 9 と同様 G30 供試体の  $\epsilon_{v70}/\epsilon_{vc70}$  の減少は著しいことが明らかである。他の供試体の  $\epsilon_{v70}/\epsilon_{vc70}$  の値については、G90 供試体では Fig. 9 と同様、繰返し回数  $N$  に対してほとんど変化していないことが認められる。G0、G60 供試体の  $\epsilon_{v70}/\epsilon_{vc70}$  は、 $N$  に対して Fig. 9 と同様徐々に減少しているが、 $N = 10 000$  回における  $\epsilon_{v70}/\epsilon_{vc70}$  の値は、Fig. 9 に比べて両供試体とも若干小さい値となっている。また、G0、G60 供試体の  $\epsilon_{v70}/\epsilon_{vc70}$  は、応力振幅レベルが 20-50% より 40-70% の応力条件下で小さい値となった。これは、 $\epsilon_{vc70}$  の値がすでに圧縮側から膨張側に進んでいることから、このような結果になったものと考えられる。

以上より、載荷軸に対する rift 面の方向によってその繰返し強度が異なる原因は、ひずみの変化が繰返し回数の増加によってそれぞれ大きく異なり、特に  $\theta$  が 30° の供試体のひずみの変化は、繰返し荷重を与えると低い応力レベル下においても大きくなる。さらに、体積ひずみが負の値を示すように、供試体内部の破壊が進んでいるため、繰返し後の強度が異なるものと考えられる。

#### 4 結 論

本研究は、花崗岩供試体を用いて、繰返し応力下における花崗岩の構造的異方性が花崗岩供試体の繰返し強度に及ぼす影響について実験的に検討したものである。本研究において得られた成果は以下のものである。

(1) 花崗岩供試体は、載荷軸と rift 面とのなす角度  $\theta$  を 0°、30°、60°、90° としたときの、それぞれの供試体の一軸圧縮強度は異なり、 $\theta = 30^\circ$  の供試体の一軸圧縮強度が最も低かった。また、繰返し載荷中に破壊しなかった供試体の繰返し載荷後の一軸圧縮強度は、 $\theta = 30^\circ$ 、60° で顕著な低下が見られた。

(2) 繰返し載荷時の弾性係数は、各ヒステリシスループの最大、最小値とを結ぶ直線の傾きとして定義したが、各供試体の弾性係数は、どの応力振幅レベル条件下においてもあまり変化せず、また各供試体間の顕著な相違は認められなかった。

(3) 各供試体の軸ひずみの変化は、 $\theta = 30^\circ$  の供試体が各応力振幅レベル条件下で大きな増加を示し、特に応力振幅レベルが 20% の条件下においては、累積された軸ひずみは、一軸圧縮強度の 20% の応力における軸ひずみの約 1.27 倍となり、これは G30 供試体の一軸圧縮強度の約 27.2% のひずみに相当することが認められた。

(4) 各供試体の体積ひずみの変化は、 $\theta = 30^\circ$  の供試体が大きな減少傾向を示し、特に 20-50% の応力振幅レ

ベル下での応力レベルが 50% の条件下においては、累積された体積ひずみは負の値を示し、供試体は膨張していることから、供試体の rift 面もしくは、それにほぼ平行なクラックが発達していることが推測された。

#### 参 考 文 献

- 1) 石塚与志雄, 阿部 透, 神山 博, 河村精一, 土木学会論文集, **469**, 15 (1993).
- 2) 工藤洋三, 橋本堅一, 佐野 修, 中川浩二, 土木学会論文集, **370**, 189 (1986).
- 3) 西松裕一, ヘルセオヨ, 鈴木 光, 材料, **20**, 68 (1970).
- 4) ヘルセオヨ, 西松裕一, 鈴木 光, 日本鉱業会誌, **87**, 515 (1971).
- 5) ヘルセオヨ, 西松裕一, 鈴木 光, 日本鉱業会誌, **89**, 588 (1973).
- 6) 大久保誠介, 劉 文, 山口 勉, 西松裕一, 日本鉱業会誌, **99**, 893 (1973).
- 7) 山下 秀, 天野勲三, 大塚一雄, 筒井 寧, 日本鉱業会誌, **101**, 753 (1985).
- 8) 工藤裕之, 松本浩二, 日本鉱業会誌, **104**, 157 (1985).
- 9) T. N. Dale, Bull. U. S. Geol. Surv., **738**, 22 (1923).
- 10) P. M. Douglass and B. Voght, Geotechnique, **19**, 376 (1969).
- 11) 小杉昌幸, 日本鉱業会誌, **102**, 469 (1986).
- 12) 工藤洋三, 橋本堅一, 佐野 修, 中川浩二, 土と基礎, **34**, 45 (1986).
- 13) 佐野 修, 工藤洋三, 水田義明, 中川浩二, 土木学会論文集, **400**, 179 (1988).
- 14) 工藤洋三, 橋本堅一, 佐野 修, 中川浩二, 土木学会論文集, **382**, 45 (1987).
- 15) 佐野 修, 材料, **37**, 46 (1988).
- 16) 佐野 修, 材料, **37**, 53 (1988).
- 17) 佐野 修, 工藤洋三, 河嶋 智, 水田義明, 材料, **37**, 84 (1988).
- 18) 柳谷 俊, 西山 哲, 寺田 孚, 土木学会論文集, **382**, 63 (1987).