稲田花崗岩の引張応力下における異方性に関する考察†

甲村雄一*

A Study on Anisotropy under Tensile Stress of Inada Granite

by

Yuichi KOHMURA*

There is little research on the mechanical characteristics of rock under tensile stress compared with the research on compressive stress. In this study, firstly, direction, length and number of micro cracks were investigated using Inada granite. Secondly, the uniaxial tension test is carried out with the specimen produced in a different direction, an anisotropy of uniaxial tensile strength, Young's modulus and Poisson's ratio are investigated. In addition, to focus on the effective sectional area of the specimen, considered results on anisotropy of Young's modulus and uniaxial tensile strength were described.

Key words: Granite, Anisotropy, Tensile stress, Micro crack, Young's modulus, Poisson's ratio

1 緒言

花崗岩はマイクロクラックを含んでおり、その配向性に起因するいわゆる石の目が存在する。これらは割れやすい順に Rift plane, Grain plane および Hardway plane と呼ばれている。¹⁾ 花崗岩を対象とした研究は数多く行われており、長田ら²⁾ および加藤ら³⁾ はマイクロクラックの分布そのものに着目した研究を行っている。また、圧縮応力下における力学特性に関しては、一軸圧縮強度や変形特性の異方性に着目した研究^{4)~6)}、ダイレイタンスの異方性に着目した研究⁷⁾、繰返し応力下における変形特性の異方性に着目した研究⁸⁾、完全応力-ひずみ曲線の post-failure 領域での異方性に着目した研究⁹⁾ などが行われ、多くの知見が蓄積されている。

一方、引張応力下における力学特性に関しては、圧裂引張強度の異方性に着目した研究^{4), 10)}、一軸引張試験による強度や変形特性に着目した研究^{11)~13)}、一軸引張試験時の割れ目の異方性に着目した研究¹⁴⁾、一軸引張試験による完全応力-ひずみ曲線に関する研究^{15)~17)} などが行われ、応力-ひずみ曲線が非線形的特性を呈すること、引張応力下におけるヤング率が圧縮応力下におけるヤング率に比べて小さいことなどが知られている。しかし、引張応力下における研究は、圧縮応力下における研究に比べると数が少なく、いまだ研究の余地が残されている。

本研究では、まず、弾性波速度およびマイクロクラックの観察により、マイクロクラックの配向性を確認する。次に、2種類の方向に供試体を作製して一軸引張試験を実施し、一軸引張強度、ヤング率およびポアソン比の異方性を確認する。さらに、マイクロクラックを考慮した供試体の有効断面積に着目し、ヤング率および一軸引張強度の異方性が有効断面積を考慮することで説明可能であることを考察した結果について述べる。

2 マイクロクラックの配向性

2.1 試験に用いた供試体

試験には茨城県笠間市産の通称稲田花崗岩を用いた。サンプリングは 250mm 角の立方体ブロックで行い、この際、ブロックの各面が現地で経験的に知られている Rift plane, Grain plane および Hardway plane に一致するようにした。後述する一軸引張試験用の供試体は直径 35 mm、高さ 100mm とし、Rift plane に垂直な方向（以下 R 方向と呼ぶ）および Hardway plane に垂直な方向（以下 H 方向と呼ぶ）に作製した。端面の平行度および平坦度は 1/100mm 以内とした。供試体作製後、3 か月間室内で乾燥した後に試験に用いた。

マイクロクラック観察用の顕微鏡薄片は、Grain plane で作製し、観察結果の再現性を確認するため 2 枚の薄片を使用した。

2.2 弾性波速度試験

一軸引張試験に先立ち、各供試体で超音波パルス法により弾性波速度（P 波）を計測した。計測結果を Table 1 に示す。R 方向の平均値は 4.57km/s、H 方向の平均値は 4.97km/s であり R 方向の方が弾性波速度が小さかった。このことからマイクロクラックは Hardway plane に比べて Rift plane に多く存在することが推察される。

2.3 マイクロクラックの観察

作製した顕微鏡薄片の拡大写真を Fig.1 に示す。本研究でいうマイクロクラックとは、Fig.1 に示すように鉱物粒子内に存在するき裂である。マイクロクラックの配向性およびその数を確認するため、Grain plane で作製した顕微鏡薄片の観察を行った。Fig.2 に示すように Grain plane で作製した薄片中心から Rift plane に平行な方向（以下 Rift 方向と呼ぶ）および Hardway plane に平行な方向（以下 Hardway 方向と呼ぶ）に一致するように長さ 40mm の 2 本の直線を引き、この直線に交わるマイクロ

† 原稿受理 平成25年10月23日 Received Oct. 23, 2013 ©2014 The Society of Materials Science, Japan

* 正会員 (株)竹中工務店技術研究所 〒270-1395 印西市大塚, Takenaka R&D Inst, Ohtsuka, Inzai 270-1395

Table1 P-wave velocity of specimens.

Specimen number	P-wave velocity (km/s)	
	R-direction	H-direction
1	4.60	4.90
2	4.58	4.92
3	4.59	5.01
4	4.56	4.97
5	4.51	5.04
Mean	4.57	4.97

Fig.1 Photograph of Inada granite.

Fig.2 Schematic diagram of micro crack observation.

Table2 Result of micro crack observation.

		Specimen number		
		1	2	Mean
Number of micro cracks	Rift-direction $\pm 45^\circ$	25	37	31
	Hardway-direction $\pm 45^\circ$	8	12	10
Mean micro crack length (mm)	Rift-direction $\pm 45^\circ$	0.60	0.70	0.66
	Hardway-direction $\pm 45^\circ$	0.89	0.41	0.60
Total micro crack length (mm)		22.00	30.65	26.33

クラックの方向、長さおよび数を調べた。結果を Table2 に示す。2枚の薄片で観察を行ったが、いずれの薄片においても Rift 方向 $\pm 45^\circ$ の方向のマイクロクラックの数は、Hardway 方向 $\pm 45^\circ$ の方向の数の約3倍という結果が得られた。マイクロクラックの平均長さは、2つの薄片で Rift 方向 $\pm 45^\circ$ の方向と Hardway 方向 $\pm 45^\circ$ の方向で差が見られたが、2枚の薄片の平均値をとると Rift 方向 $\pm 45^\circ$ で 0.66mm、Hardway 方向 $\pm 45^\circ$ で 0.60mm と 10%程度の差であり、大きな差は見られなかった。

(a) Load frame

(b) Extensometer

Fig.3 Schematic diagram of the test.

3 一軸引張試験

3.1 試験方法

試験装置の概念図を Fig.3(a),(b)に示す。試験は R 方向 (Rift plane に垂直な方向) および H 方向 (Hardway plane に垂直な方向) の直径 35mm、高さ 100mm の供試体を用い、0.5kN の圧縮荷重をかけた状態で供試体の上下端面および供試体上部に設けた球座をエポキシ樹脂製の接着材で接着し、4時間放置して接着剤が硬化後試験を行った。試験は応力速度一定 (0.1MPa/s) の条件で行った。

供試体の応力は、供試体上部に設けたロードセルで測定した荷重を供試体の初期断面積で除すことにより求めた。ひずみの測定は測定間隔 50mm の 2 点を点接触させる軸ひずみ計を対面上に 2 個設置し、その平均値を軸ひずみとした。周ひずみは供試体にチェーンを巻きつけ、チェーン端部の変位を測定し、これを周ひずみに換算して求めた。軸ひずみおよび周ひずみともに測定時の分解能は約 3×10^{-6} であった。

Fig.4 Stress-strain curves of uniaxial tension tests.

Fig.5 Relation between secant Young's modulus and strain.

3・2 試験結果

R方向およびH方向で各5本の供試体で得られた応力-ひずみ曲線を Fig.4(a),(b)に示す. 本研究では応力およびひずみのいずれも引張側を正として示す. R方向とH方向を比較すると, 一軸引張強度はR方向で明らかに小さく, 異方性を示すことが確認された. これはH方向に比べてR方向には载荷軸に垂直なマイクロクラックが多く含まれているためと考えられる. なお, 破断面は軸ひずみの測定区間である 50mmの内部と外部に生じたものが混在する結果となった. 両者で応力-ひずみ曲線に大きな差は認められなかった. 試験を応力速度一定の条件で実施したため, 応力が増加して引張破壊が始まると, ごく短時間のうちに破壊が終了する. 今回はデータのサンプリングを1秒間隔で行った. このため, 引張破壊の開始から終了までのごく短時間の軸ひずみおよび周ひずみの変化は計測できていない. 今回計測された軸ひずみおよび周ひずみは, 破壊が始まる直近のひずみと考えられる.

ひずみレベルごとに割線ヤング率を求めた結果を Fig.5に示す. R方向とH方向とでは明らかに割線ヤング率の値に差が見られ, 異方性が確認できる. なお, R方向およびH方向ともにひずみレベルの増加に伴い割線ヤング率は低下している. このことから, ひずみレベルが小さい領域からマイクロクラックの進展が生じていることが推察される. なお, ヤング率は弾性領域内において定義する弾性係数である. 今回の場合, ひずみレベルが

Table3 Poisson's ratio at uniaxial failure.

Specimen number	R-direction	H-direction
1	0.027	0.036
2	0.027	0.082
3	0.020	0.027
4	0.045	0.069
5	0.043	0.075
Mean	0.032	0.058

Fig.6 Relation between uniaxial tensile strength and strain.

小さい領域においてもクラックの進展が推察され, 非弾性的な挙動を示す可能性があり, 割線ヤング率を求めることには問題がある可能性もあるが, ここでは応力-ひずみ曲線の傾きを評価する目的で割線ヤング率を求めたことを記しておく. 引張破壊時におけるポアソン比を求めた結果を Table3 に示す. ヤング率と同様にポアソン比は弾性領域内で定義される値であり, 引張破壊時のポアソン比を求めることには問題がある可能性もあることを断っておく. 今回計測された周ひずみは最大で 24×10^{-6} 程度であり, ひずみの測定時の分解能が約 3×10^{-6} であることを考えると小さな値であった. ポアソン比の値はばらつきが大きいものの, R方向とH方向とでは値に差が見られ, R方向で値が小さいという結果となった. H方向に比べてR方向には载荷軸に垂直な方向のマイクロクラックが多く含まれており, マイクロクラックの

Table4 Result of micro crack observation.

	Rift-direction $\pm 45^\circ$	Hardway-direction $\pm 45^\circ$
Number of micro cracks	62	20
Total microcrack length (mm)	40.65	12.00
Mean micro crack length (mm)	0.66	0.60
Maximum micro crack length (mm)	2.25	1.88
Minimum micro crack length (mm)	0.13	0.13
Standard deviation of micro crack length (mm)	0.39	0.45

Fig. 7 Schematic diagram of the crack.

進展が顕著であると考えられる。このため、R方向ではH方向に比べて弾性変形に比較して塑性変形の割合が多く、弾性変形によって収縮側に生じる周ひずみが小さいことによるものと考えられる。

一軸引張強度と破壊時のひずみとの関係を Fig. 6 に示す。一軸引張強度はH方向とR方向で明らかな異方性がみられるのに対し、破壊時のひずみには大きな差が見られない。

4 考察

4.1 ヤング率の異方性に関する考察

ここではヤング率の異方性について、マイクロクラックを考慮した有効断面積に着目した考察を行う。一軸引張試験は供試体に引張荷重を作用させるが、その際にマイクロクラックの部分はクラックが開く方向に変形する。このため、マイクロクラックを除いた有効断面積で荷重に抵抗するものと考ええる。第2章では Grain plane で作製した顕微鏡薄片を用いてマイクロクラックの観察を行った。Table2 に示したデータをマイクロクラックの方向別に整理した結果を Table4 に示す。前述したとおり今回の計測では2枚の薄片で Rift 方向および Hardway 方向に一致する40mmの2本の直線の合計値である80mmの直線に交差するマイクロクラックを観察した。その結果、Rift 方向 $\pm 45^\circ$ の方向には62個、Hardway 方向 $\pm 45^\circ$ の方向には20個のマイクロクラックが観察された。Rift 方向および Hardway 方向に一致するように引いた直線には、それぞれ Rift plane および Hardway plane に平行なマイクロクラックが交差する確率は低い。よって、Rift 方向 $\pm 45^\circ$ の方向には40mmあ

たり $62/2=31$ 個、すなわち $40/31 \approx 1.29\text{mm}$ に1個のクラックが存在すると考える。一方、Hardway 方向 $\pm 45^\circ$ の方向には40mmあたり $20/2=10$ 個、すなわち $40/10=4\text{mm}$ に1個のクラックが存在すると考える。

Table4 に示したようにマイクロクラックの数は Rift 方向 $\pm 45^\circ$ の方向と Hardway 方向 $\pm 45^\circ$ の方向で約3倍の差という明らかな差が見られたのに対し、マイクロクラックの最大長さ、最小長さ、平均値および標準偏差には大きな差は見られなかった。このため、マイクロクラックの長さの分布に関しては Rift 方向 $\pm 45^\circ$ の方向と Hardway 方向 $\pm 45^\circ$ の方向で大きな差が見られないものと判断した。なお、計測したマイクロクラックの長さは顕微鏡薄片上における観測長さであり、3次的に岩石内に存在するマイクロクラックの長さとは異なる。今回の計測は Rift 方向および Hardway 方向に一致するそれぞれ40mmの直線の合計値である80mmの直線に交わるマイクロクラックの長さを計測しており、これは2次的な計測である。マイクロクラックの平均長さは、本来は3次的にマイクロクラックを計測して評価すべきものと考えられるが、本研究では2次的な計測にとどまっている。ここではその結果から最も単純な仮定としてマイクロクラックの平均長さは Table4 の 0.66mm と 0.60mm の平均の 0.63mm と設定した。一軸引張試験時の R 方向および H 方向の载荷軸に垂直な平面のマイクロクラックの分布の模式図を Fig. 7(a),(b) に示す。マイクロクラックは直径 0.63mm の円でモデル化した。

顕微鏡薄片によるマイクロクラックの観察については長田らの研究²⁾で詳しく報告されている。長田らは総観察面積が 16cm^2 、クラックの総本数が数百のオーダーでマイクロクラックの観察を行っているが、これでも平均的なクラック分布を計測するにはやや狭いと報告している。本研究では薄片に合計で80mmの直線を引き、これに交差する数十のオーダーのマイクロクラックを観察しており、平均的なマイクロクラックの長さを厳密に議論するには問題がある可能性がある。また、今回の計測では2次的な計測を行っているが、これを3次的なデータに補正するなど高度なデータ処理は施していない。しかし、Table4 に示した各種の値から、Rift 方向と Hardway 方向ではマイクロクラックの数には明らかな差が認められるが、長さの分布は大きな差は見られないため、マイクロクラックを除いた有効断面積を近似的に求める目的で Fig. 7 のような単純なモデル化を行うこととした。厳密なモデル化については今後の課題とした。

Fig. 7(b) から、まず、一軸引張試験時の H 方向について、断面積に対してマイクロクラックを除いた有効断面積の比 A_H を求めると (1) 式ようになる。

$$A_H = (4 \times 4 - (0.63/2)^2 \times \pi) / (4 \times 4) \approx 0.98 \quad (1)$$

ここで、 A_H は H 方向の断面積に対する有効断面積の比である。次に、一軸引張試験時の R 方向について求めると (2) 式ようになる。

$$A_R = (1.29 \times 1.29 - (0.63/2)^2 \times \pi) / (1.29 \times 1.29) \approx 0.81 \quad (2)$$

ここで A_R はR方向の断面積に対する有効断面積の比である。よって、R方向とH方向の有効断面積の比は、 $A_R : A_H = 0.81 : 0.98 \approx 0.83 : 1$ となる。

一方、R方向およびH方向に荷重Pが作用した場合のみかけの応力 σ_R および σ_H とひずみ ϵ の関係は、(3)式および(4)式で表すことができると考える。

$$\sigma_R = P / (A/A_R) = E_R \epsilon \quad (3)$$

$$\sigma_H = P / (A/A_H) = E_H \epsilon \quad (4)$$

ここでAは供試体の断面積、 A_R および A_H は一軸引張試験時のR方向およびH方向の断面積Aに対する有効断面積の比、 E_R および E_H は見かけのヤング率である。

(3)式および(4)式からP、Aおよび ϵ を消去し整理すると(5)式が得られる。

$$E_R/E_H = A_R/A_H \quad (5)$$

よって、一軸引張試験時のR方向の見かけのヤング率は、H方向に比べて (A_R/A_H) 倍の値になる。

(1)式および(2)式で求めた (A_R/A_H) は0.83であった。一方、Fig.4に示したひずみレベルが小さい 50×10^{-6} ひずみにおける割線ヤング率の比は、 $26.8\text{GPa}/34.3\text{GPa} \approx 0.78$ であり、0.83とほぼ同じ値となる。よって、引張応力下におけるR方向とH方向のヤング率の比は、マイクロクラックを除いた有効断面積を考慮することで説明できるものと考えられる。

4・2 一軸引張強度の異方性に関する考察

Fig.5に示したように一軸引張試験時にはR方向およびH方向ともにひずみレベルの増加に伴って割線ヤング率の値は低下していく。これは、マイクロクラックが進展していき有効断面積が減少していくためと考えられる。Fig.5に示したように、R方向およびH方向ともに一軸引張破壊時のひずみは 300×10^{-6} 程度であった。この時の割線ヤング率の比をFig.4から求めると、 $20.2\text{GPa}/29.2\text{GPa} \approx 0.69$ となる。よって、(3)式および

(4)式から求められる一軸引張破壊時の σ_R/σ_H は $E_R/E_H = A_R/A_H = 0.69$ となる。Fig.5に示したR方向およびH方向の一軸引張強度の平均値はそれぞれ6.1MPaおよび8.8MPaであり、その比は0.69となり(3)式および(4)式の値と一致する。すなわち、一軸引張強度の異方性は有効断面積を考慮すると説明可能であること、また、有効断面積を考慮するとR方向およびH方向は同じ応力レベルで破壊していることが推察される。

5 結言

本研究では稲田花崗岩を用いてR方向およびH方向に一軸引張試験を行い、異方性を確認した。また、有効断面積に着目してヤング率および一軸引張強度の移行性を考察した。本研究で得られた成果は以下のとおりである。

1) 弾性波速度試験および顕微鏡薄片の観察によりマイクロクラックの分布について検討した。その結果、Rift方向 $\pm 45^\circ$ の方向に存在するマイクロクラックは

Hardway方向 $\pm 45^\circ$ の方向に存在するマイクロクラックよりも数が多いことが確認できた。

2) 一軸引張試験の結果、一軸引張強度、ヤング率およびポアソン比は異方性を示すことがわかった。なお、一軸引張破壊時のひずみには明確な異方性は見られないことがわかった。

3) マイクロクラックを考慮した有効断面積に着目し、ヤング率および一軸引張強度の異方性を考察した。その結果、有効断面積を考慮することでヤング率および一軸引張強度の異方性を説明できることが分かった。

参考文献

- 1) Y. Kudo, K. Hashimoto, O. Sano and K. Nakagawa, "Anisotropy of granitic rock in the inland sea in western Japan", Journal of the Japan Society of Civil Engineering, No.382, III-7, pp.45-53(1987).
- 2) M. Osada, T. Yamabe and R. Yoshinaka, "Initial distribution of microcracks in Inada granite", Journal of the Japan Society of ENGINEERING GEOLOGY, Vol.39, No.6, pp.500-510(1999).
- 3) M. Kato, K. Koike, T. Yoneda and K. Kaneko, "A method for estimating three-dimensional distribution of microcrack orientations in rock", Shigen-to-Sozai, Vol.114, pp.909-917(1998).
- 4) W. Lin, T. Nakamura and M. Takahashi, "Anisotropy of thermal property, ultrasonic wave velocity, strength property and deformability in inada granite", J Journal of the Japan Society of ENGINEERING GEOLOGY, Vol.44, No.3, pp.175-187(2003).
- 5) K. Kasuya, "Experiment study on the mechanical characteristics of layered unisotropic rocks", Journal of the Japan Society of ENGINEERING GEOLOGY, Vol.20, No.3, pp.89-96(1979).
- 6) O. Snano, Y. Kudo, S. Kawashima and Y. Mizuta, "Experimental determination of elastic constants of granite as an anisotropic body", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.37, No.418, pp.818-824(1988).
- 7) T. Yanagidani, S. Nishiyama and M. Terada, "Anisotropic development of dilatancy in uniaxially compressed granite", Journal of the Japan Society of Civil Engineering, No.382, III-7, pp.63-72(1987).
- 8) H. Kusumi, Y. Mine and K. Nishida, "Effect of structural anisotropy on deformation properties of granite under cyclic loading", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.46, No.9, pp.1029-1034(1997).
- 9) Y. Kohmura, "A fundamental study on stress-strain characterization of inada granit including post-failure region", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.61, No.3, pp.233-238(2012).
- 10) Y. Kudo, K. Hashimoto, O. Sano and K. Nakagawa, "Relation between physical anisotropy and microstructure

- og granite", Journal of the Japan Society of Civil Engineering, No.370, III-5, pp.189-198(1986).
- 11) Z. T. Bieniawski, "Mechanism of brittle fracture of rock part-III,-Fracture in tension and under long-term loading", International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, Vol.4, No.4, pp.425-430(1967).
- 12) S. S. Peng, "A note on the fracture propagation and time-dependent behavior of rocks in uniaxial tension", International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences & Geomechanics Abstract, Vol.12, No.4, pp.125-127(1975).
- 13) W. Lin, M. Takahashi, Y. Fujii, S. Nishiyama and T. Takemura, "Deformability of several granitic rocks and gabbros in uniaxial tension", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.56, No.7, pp.654-659(2007).
- 14) Y. Fujii, T. Takemura, M. Takahashi, W. Lin and S. Akaiwa, "The feature of uniaxial tensile fractures in granite and their relation to rock Anisotropy", Journal of the Japan Society of ENGINEERING GEOLOGY, Vol.46, No.4, pp.227-231(2005).
- 15) S. Okubo and K. Fukui, "Complete stress-strain curves for various rock type in uniaxial tension", International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences & Geomechanics Abstract, Vol.33, No.6, pp.549-556(1996).
- 16) K. Fukui, F. Jin and S. Okubo, "Complete stress-strain curves of rock in uniaxial tension test", Shigen-to-Sozai, Vol.111, pp.25-29(1995).
- 17) K. Fukui, S. Okubo and T. Shimizu, "Failure process of rock in uniaxial tension", Shigen-to-Sozai, Vol.114, pp.925-930(1998).