

稲田花崗岩の引張応力下における応力-ひずみ特性

Stress-Strain Characterization of Inada Granite at Tensile Stress

甲村雄一*・下河内隆文**・稲田善紀***・上田貴夫****

Yuichi KOHMURA, Takafumi SHIMOGUCHI, Yoshinori INADA, Takao UEDA

The purpose of this study is to investigate stress-strain characterization of Inada granite at tensile stress. Uni-axial tension test and Brazilian test were carried out in laboratory at room temperatures. Results of the experiment, it was found that Young's modulus and Poisson's ratio depend on stress level. Then, anisotropy of stress-strain characterization is also discussed.

1. 緒言

現在研究段階にある岩盤内LNG貯蔵システムは、花崗岩の地山を想定して各方面で研究が行われている。著者らも花崗岩を対象として岩石の低温下における力学試験や数値シミュレーションを行い、地山岩盤中に設けた空洞にLNGを貯蔵する場合には、空洞周辺岩盤には岩盤の熱収縮に起因する引張応力が発生し、放射状の引張クラックが発生することを報告してきている¹⁾。また、近年では岩盤内に地下ドーム等の大規模構造物を構築する構想も発表されており、このような大スパン構造物の天端部分には引張応力が生じることが予想される。このような構造物の設計にあたっては、安全性や経済性を確保する上で引張応力下における応力-ひずみ特性を評価することが重要となる。Novaら²⁾は片麻岩を用いて定ひずみ制御の一軸引張試験を行い、一軸引張強度および破断面と層理面との関係を求めた。福井ら³⁾は一軸引張応力下での完全応力-ひずみ曲線を求め、一軸引張応力下と一軸圧縮応力下では応力-ひずみ曲線はさほど変わらないことや、引張試験においても残留強度が存在することを報告している。しかしながら圧縮応力下の応力-ひずみ特性に関して得られている知見に比較して、引張応力下でのそれはわずかであると言わざるを得ない。

本研究では、稲田花崗岩を用いて室温下における一軸引張試験を実施し、引張応力下における応力-ひずみ曲線からヤング率およびポアソン比を求め、圧縮応力下のそれと比較を行うとともに石の目に対する異方性について検討した。また、一軸引張試験と圧裂引張試験の結果を比較した結果についても述べる。

2. 試験に用いた供試体

本研究で用いた試料は、茨城県産の通称稲田花崗岩である。試料は採石場の岩盤からブロックの状態で採取し、採石場で経験的に知られている石の目の方向をブロックに記載した。このブロックを室内で弾性波速度を

* 正会員 工修 (株)竹中工務店 技術研究所 研究員

** 正会員 工修 (株)竹中工務店 技術研究所 担当研究員

*** フェロー会員 工博 愛媛大学工学部 環境建設工学科 教授

****正会員 工博 (株)竹中工務店 エネルギーエンジニアリング本部 専門課長

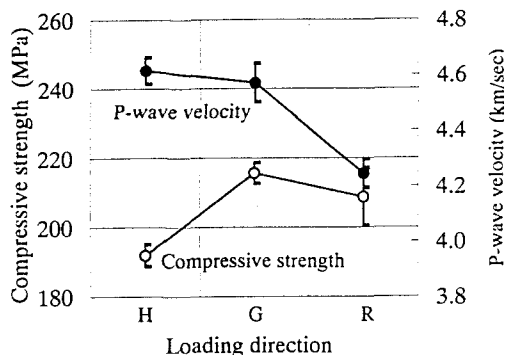


図-1 加圧方向と一軸圧縮強度の関係

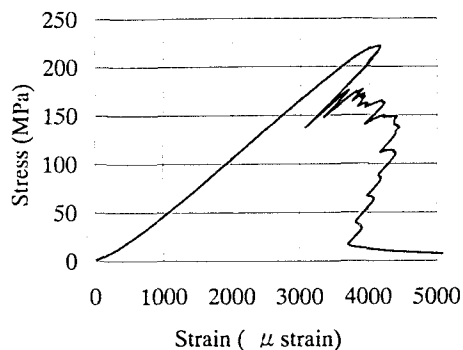


図-2 稲田花崗岩の一軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線の代表例 (R方向)

測定することにより石の目を確認し、速度の速い面からHardway-plane (H面), Grain-plane (G面) および Rift-plane (R面) と決定した。供試体は、同一ブロックから各面に対して垂直な方向に円柱形のコアを抜き取り作製した (以下、H面に垂直な方向をH方向、G面に垂直な方向をG方向およびR面に垂直な方向をR方向と呼ぶこととする)。端面の平行度および平坦度は特に留意して成形し、高低差を $\pm 1/100\text{mm}$ 以内に抑えた。作製後の供試体は室内で1週間自然乾燥させた後、デシケータ内でさらに3ヶ月間乾燥させた後実験に供した。

一軸引張試験に先立ち、各方向について一軸圧縮試験を実施した。供試体の寸法は直径35mm、高さ70mm

とし、試験は応力とひずみをフィードバック信号として用いる方式¹⁾により制御速度 $c = 5 \times 10^{-6}$ として行った。軸ひずみは上下加圧板間の変位を測定し、供試体全体の平均的な軸ひずみを求めた。各方向に加圧した場合の一軸圧縮強度を供試体の弾性波伝播速度とあわせて図-1に示す。図には各方向で5本ずつ試験を行って得られた平均値と標準偏差を示した。加圧方向によって一軸圧縮強度には違いが見られ、本試料は力学的な異方性を示すことがわかる。得られた応力-ひずみ曲線の代表例を図-2に、また、ピーク強度までの応力範囲内で応力レベルごとに接線ヤング率を求めた結果例を図-3に示す。破壊応力の20%以下の領域では接線ヤング率が大きく増加していく傾向にあるが、これは供試体内に潜在するマイクロクラックの閉塞によるものと考えられる。また、破壊応力の90%を越えると接線ヤング率は急激に減少し、破壊へと至ることがわかる。

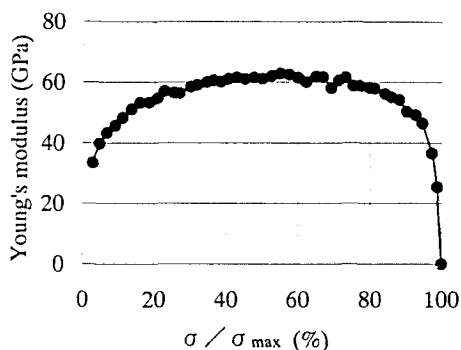
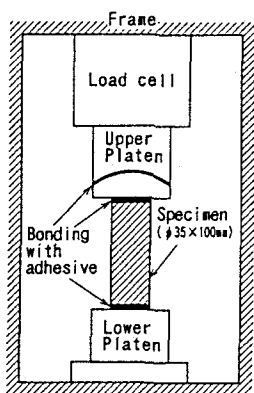


図-3 稲田花崗岩の各応力レベルにおけるヤング率の代表例 (R方向)

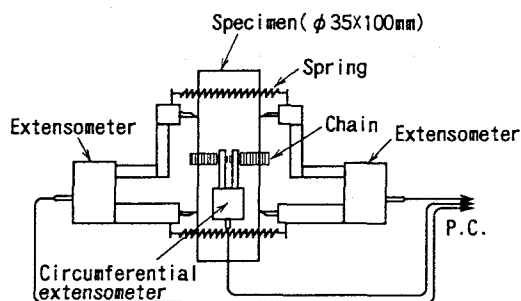
3. 試験方法

3.1 試験装置

試験はMTS社製の油圧サーボ試験機により行った。試験装置の概念図を図-4に示す。供試体の上下端面および上部加圧板の球座部は0.5kNの荷重を作用させた状態でエポキシ樹脂系の接着剤により加圧板に接着した。軸ひずみの測定は、供試体に2点を点接触させるひずみ計 (MTS社製, model 632.90 extensometer) を供試体の中央部に対角上に2個取り付けることにより行い、その平均値を軸ひずみとした。なお、供試体に接触している2点間の距離は50mmである。また、周ひずみの測定は供試体中央部の側面にチェーンを巻き付け、チェーンの両端部の変位を測定し (MTS社製, model 632.21 circumferential extensometer) , この変位



(a) 供試体設置図



(b) 測定機器配置図

図-4 試験装置の概念図

から周ひずみを計算により求めた。

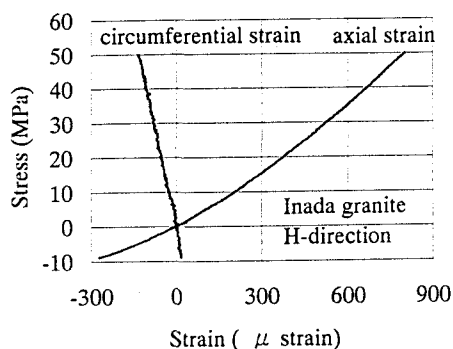
3. 2 試験の方法

本研究では、供試体に一定の圧縮応力を作用させた状態を試験開始点とし、一定の応力速度にて除荷していき応力が0になった後、さらに同じ応力速度で引張応力を作用させることにより、圧縮応力下と引張応力下の応力-ひずみ曲線を連続して求めることとした。試験開始時に作用させる圧縮応力は、値が大きいほど広い応力範囲での評価が行うことができるが、値が大きすぎると供試体内の潜在クラックの進展や新たなクラックの発生により供試体の状態が初期状態に比較して変化することが予想される。本研究では試験開始時の応力は、破壊応力の25%程度の応力に相当する50MPaとすることとした。なお、50MPaの応力状態まで载荷する際には応力速度一定(0.1MPa/sec)の条件で加圧し、その後の一軸引張試験も同様の応力速度で試験を行った。供試体の寸法は直径35mm、高さ100mmとした。

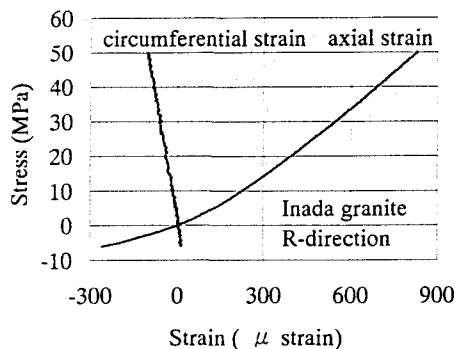
4. 試験結果および考察

H方向とR方向について各5本の試験を行って得られた応力-ひずみ曲線の代表例を図-5(a)、(b)に示す。破壊面はほとんどの供試体で軸ひずみを測定している供試体中央部50mmの外側に発生した。図-5に示した曲線は破壊面を含まない応力-ひずみ曲線であり、応力は圧縮が正、ひずみは応力が0MPaにおける値を0として、収縮ひずみを正として示してある。図よりわかるように、軸ひずみに関してはH方向、R方向ともに応力が引張側になるほど応力-ひずみ曲線の勾配が緩やかになることがわかる。また、圧縮応力が大きい領域ではH方向とR方向で応力-ひずみ曲線の勾配はさほど変わらないのに対して、圧縮応力が小さくなるに従って両供試体の勾配は差を生じるようになる。図-6に各応力レベルにおけるヤング率を求めた結果を示す。図には圧縮応力下においては10MPa間隔、引張応力下においては破壊強度までを2等分したそれぞれの区間での弦線ヤング率を示した。図より圧縮応力が大きな領域においてはH方向とR方向でヤング率には大きな差がないが、圧縮応力が小さくなり引張側へ行くに従って差を生じ、R方向の方が値が小さくなることがわかる。これは供試体内に含まれる潜在クラックの影響を強く受けていることに起因しているものと考えられる。すなわち、先に示した供試体の弾性波伝播速度の値からH面に比較してR面には潜在クラックが卓越しているものと考えられる。圧縮応力下においては潜在クラックが閉塞することにより、圧縮荷重を潜在クラック部も支持し得るが、引張応力下においてはクラックの部分は引張荷重を支持し得ない。よって荷重を支持できる有効断面は圧縮応力下に比べて引張応力下では小さくなる。このため圧縮応力下と引張応力下では、供試体の全断面を有効断面として求めたヤング率に差が生じるものと考えられる。この傾向はR方向で顕著であるが、これはH面に比較してR面の方が潜在クラックが卓越しているためと考えられる。

図-7に応力レベルごとのポアソン比を示す。図に示したポアソン比は、ヤング率と同様の間隔で分割した



(a) H方向



(b) R方向

図-5 一軸引張試験における応力-ひずみ曲線の代表例

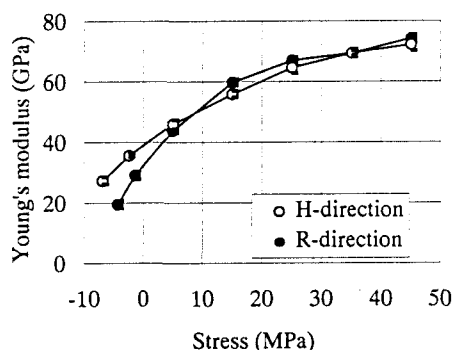


図-6 各応力レベルにおけるヤング率

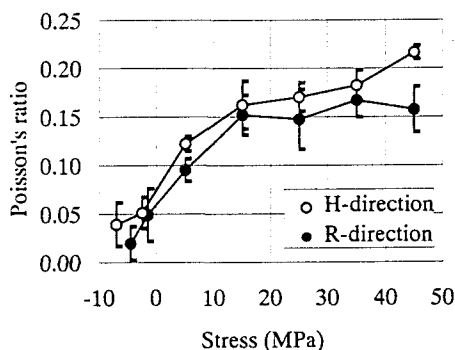


図-7 各応力レベルにおけるポアソン比

各区間ごとのひずみを用いて計算した。図より応力が引張側へいくほどポアソン比は小さくなることがわかる。これは圧縮応力下において閉塞していた潜在クラックが除荷にともない開口すること、また、引張応力が作用することにより加圧軸に垂直な方向の潜在クラックが進展することに起因しているものと考えられる。

一軸引張試験の結果と比較を行う目的で圧裂引張試験を実施した。供試体はG方向に直径35mm、高さ35mmで作製し、圧裂破壊面がH面およびR面に等しくなるように各7本の供試体で試験を行った。試験は破壊面における応力速度が一定(0.1MPa/sec)の条件で制御し、供試体の両端面中央部にゲージ長5mmのひずみゲージを貼り付け、加圧軸方向と加圧軸に垂直な方向のひずみを測定した。

圧裂引張試験の結果を一軸引張試験の結果とあわせて表-2に示す。いずれの試験においてもH方向とR方向の引張強度には差が見られ、一軸圧縮試験の結果と同様に力学的な異質性が確認された。また、一軸引張強度は圧裂引張強度に比べて小さいが、これは圧裂引張試験は線荷重を加えるという仮定のもとに試験を行なっているが、実際には荷重の増加に伴い供試体が変形することで線荷重という仮定が満足されていないことや、圧裂引張試験の場合は破壊面を人為的に設定して試験を行うのに対して、一軸引張試験の場合は破壊面になり得る面は無数に存在し最弱面で破壊を生じるためと考えられる。一方、一軸引張試験時の最大ひずみ(破壊面を含まないひずみ)はH方向とR方向で大きな差は見られないことがわかった。図-8に圧裂引張試験時に測定した応力-ひずみ曲線の代表例を、また、図-9にすべての供試体で50μひずみごとに計算した加圧軸(破壊面)に垂直な方向の応力-ひずみ曲線の勾配の平均値を示す。加圧軸に垂直な方向のひずみは約500μひずみを境に勾配が大きく変化することがわかる。これは破壊応力に近づくにつれて圧裂破壊面がひずみゲージの貼り付け部分に生じ、局所的な破壊が開始するためと考えられる。また、応力-ひずみ曲線の勾配が大きく変化するひずみはH方向とR方向で大きな差は見られないことがわかった。藤井ら⁵⁾は引張ひずみが限界引張ひ

表-2 一軸引張試験と圧裂引張試験の結果の比較

	Uni-axial tension test		Blazilian test
	Tensile strength (MPa)	Strain at peak stress (μ strain)	Tensile strength (MPa)
H-direction	-8.9	-277	-11.1
R-direction	-6.0	-255	-9.0

ずみに達すると岩石が破壊するという引張ひずみ規準を提案している。藤井らは限界引張ひずみは最大強度点における最大引張ひずみとして測定されるべきものとしているが、今回の試験では測定機器のサンプリング間隔の関係上最大強度点での最大引張ひずみは測定できなかった。しかし、今回試験を行った範囲内では破壊時の応力は加圧方向によって明らかな差が見られるのに対して、一軸引張試験時の破壊面を含まない最大ひずみと圧裂引張試験で得られた破壊の開始時と考えられる破壊面を含んだひずみは加圧方向によって大きな差は見られないという結果が得られた。両者のひずみを比較すると圧裂引張試験で得られた破壊の開始時と考えられるひずみの方が値が大きいが、これは圧裂引張試験時には加圧軸方向に生じるひずみのポアソン比に相当するひずみ加えられ

て測定されることや、測定領域が各試験で大きく異なる（一軸引張試験では50mm、圧裂引張試験では5mm）こと等によるものと考えられる。今回の試験範囲内では、潜在クラックの分布状態が異なると考えられる各方向で破壊の開始時を示すと考えられるひずみに大きな差が見られないという結果が得られたことから、ひずみに着目した破壊規準を用いることが有効な手段になり得る可能性があるものと考えられる。今後は他の岩石についても試験を行い、この結果が岩石に一般的な傾向であるかどうかの検討を行う予定である。

5. 結 言

本研究では稲田花崗岩を用いて一軸引張試験を実施し、引張応力下における応力-ひずみ特性について検討した。その結果、ヤング率およびポアソン比ともに引張応力下における値は圧縮応力下における値に比べて小さいことがわかった。また、引張強度および引張応力下におけるヤング率は石の目の方向に対する異方性が大いだが、一軸引張試験で得られた破壊面を含まない最大ひずみおよび圧裂引張試験で得られた破壊の開始時と考えられるひずみは石の目の方向で大きな差が見られないことがわかった。

参考文献

- 1) 稲田善紀・甲村雄一・藤原斉都：土木学会論文集，No. 445/Ⅲ-18，pp. 65-73，1992.
- 2) R. Nova, A. Zaninetti：Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 27, No. 4, pp. 231-242, 1990.
- 3) 福井勝則・金豊年・大久保誠介：資源と素材，Vol. 111, No. 1, pp. 25-29, 1995.
- 4) 大久保誠介・西松裕一：日本鉱業会誌，Vol. 100, No. 1161, pp. 1052-1056, 1984.
- 5) 藤井義明・石島洋二：資源と素材，Vol. 111, No. 9, pp. 601-606, 1995.

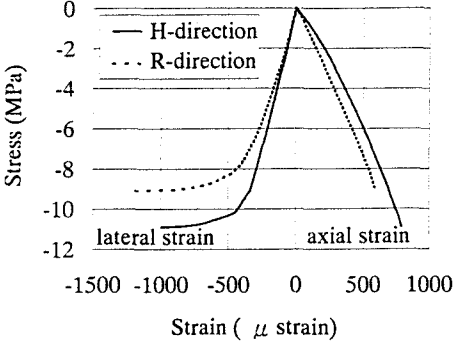


図-8 圧裂引張試験時の応力-ひずみ曲線の代表例

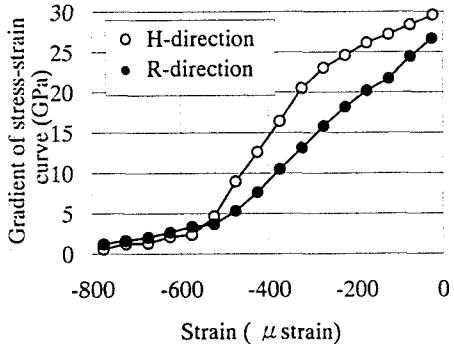


図-9 加圧軸に垂直な方向の応力-ひずみ曲線の勾配