

愛媛大学工学部 フェロー会員 稲田 善紀
 愛媛大学工学部 正会員 木下 尚樹
 愛媛大学大学院 学生員 ○伊与田 亮
 芙蓉調査設計事務所 正会員 山田 公雄

1. はじめに

筆者らは LNG,LPG,冷凍食品等の低温物質を地山岩盤内に設けた空洞に直接貯蔵することを提案し検討してきている¹⁾。これまでの研究により、低温物質を貯蔵した場合には、岩盤の熱収縮により空洞周辺には引張破壊により放射状に亀裂が発生することがわかっている²⁾。しかし、これらの解析は圧縮応力下での変形特性を用いた結果であり、低温下で引張応力下の変形特性を求めた例はみあたらない。本研究では、新しい引張試験方法を提案し、低温下で引張応力下の岩石の強度・変形特性を求め考察し、また圧縮応力下で得られた岩石の変形特性とも比較、考察した。

2. 実験方法

本実験では、荷重速度が容易に制御できるように、圧縮試験機を用いて一軸引張試験が行える圧縮式一軸引張試験装置を作成した。その概念図を図1に、写真を図2に示す。試験器は4つの円盤と6本のシャフトからなる。軸方向に引張荷重を十分大きな荷重まで連続的に加えることができ、同時に荷重と変形が正しく測定できるよう考慮し、試験器の上下加圧盤、載荷盤およびシャフトの加工は旋盤加工により5/100mmの精度で仕上げた。また供試体の結合にはエポキシ系接着剤を用いた。本実験に用いた岩石試料は、花崗岩（愛媛県越智郡宮窪町大島産）である。岩石の力学的異方性を考慮して、岩石ブロックのそれぞれ直交する3つの面の弾性波伝播速度を測定し、強度がもっとも小さいと考えられる Rift-Plane で破壊が生じるように一軸引張試験用の供試体には Rift-Plane に垂直となる面からコアを採取し、圧裂引張試験用には Rift-Plane に平行となる面からコアを採取した。得られたコアを一軸引張試験用に $\phi 3 \times 10$ cm, 圧裂試験用に $\phi 3 \times 3$ cmに成形した。また供試体には乾燥状態、湿潤状態の2種類を用意した。岩石の物理的性質を表1に示す。このようにして得られた供試体を低温下の実験では1℃/minで降温し、供試体の中心温度が-160℃であることを確認しながら60分間保温し、その温度を保ち実験を行った。

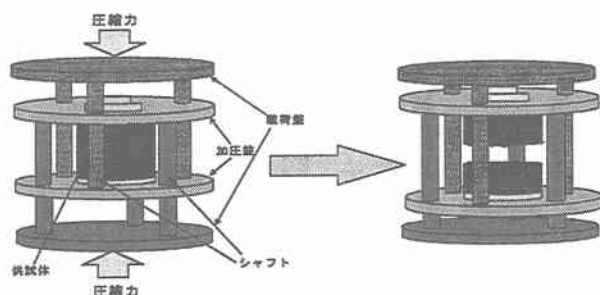


図1 圧縮式一軸引張試験の概念図

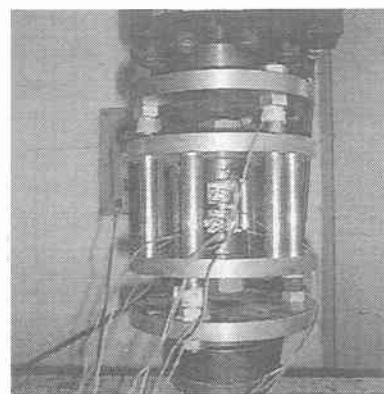


図2 圧縮式一軸引張試験装置

3. 実験結果および考察

一軸引張強度、圧裂引張強度を図3に示す。一軸引張強度、圧裂引張強度は、いずれも常温下よりも低温下の方が Dry および Wet とともに強度は大きい。中でも Wet の増加の割合は大きい傾向を示している。その理由として、低温下においては花崗岩に含まれる鉱物粒子の収縮および硬化による粒子間の結合力の増加が考えられる。また Wet の状態では岩石に含まれる水が氷結することによりさらに結合力が増し、増加の割合を大きくしたものと考えられる。また、一軸引張強度と圧裂引張強度を比較してみるといずれの場合においても圧裂引張強度の方が大きな値を示している。これは、圧裂引張

表1 岩石の物理的性質

	空隙率(%)	飽和度(%)	見かけ比重	真比重
花崗岩(dry)	0.8	28.5	2.65	2.70
花崗岩(wet)	0.8	81.3	2.65	2.70

試験は線荷重を加えるという仮定のもとに実験を行っているが、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が限定されるのに対して、一軸引張試験の場合は破壊面になりうる面は無数に存在し最弱面で破壊が生じるためと考えられる。一軸引張試験の際に得られた応力-ひずみ曲線より求めた接線弾性係数を図4に示す。接線弾性係数は常温下ではDryよりWetの方が小さい。これはWetの供試体を作成する際に真空ポンプによる強制脱気や、間隙内に水が浸透することによりマイクロクラックが増加することに関係しているものと考えられる。また、低温下の値がDryおよびWetともに常温下より大きくなっているがこれは低温下では構成鉱物粒子が収縮し硬化したためと考えられる。その差は、DryよりWetの方が顕著に現れているが、これは間隙水の氷結による影響と考えられる。次に、ポアソン比を図5に示す。ポアソン比は常温下に比べ低温下の値が大きくなっている傾向がある。これは一軸引張試験では与えられた応力により供試体のマイクロクラックが広がり、横方向に応力が伝わりにくい、低温下では間隙水が氷結することにより縦方向の応力を横方向に伝えやすくと考えられ、これによりポアソン比が増加したものと思われる。またDryとWetではWetの方が大きくなっているが、これも同じ理由から間隙内の水がマイクロクラックを埋め、縦方向の応力を横方向に伝えやすくしているためと思われる。

4. 圧縮試験結果との比較

図4に示した圧縮応力下、引張応力下での接線弾性係数を比較すると、両応力下においても傾向は似ているが、引張応力下の方が圧縮応力下に比べ値が小さい。これは、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。このため圧縮応力下と引張応力下では、供試体全断面を有効断面として求めた接線弾性係数に差が生じるものと思われる。図5に示したポアソン比においても、値の大きさを比べると、引張応力下の方が小さくなっている。これは、圧縮応力下では潜在クラックを閉じる方向に応力を与えていくので比較的空隙の小さい花崗岩では横方向にも力を伝えやすいが、引張応力下では加圧軸に対して最も大きく、最も危険な方向を向いている潜在クラックの縁に応力集中がおこることにより、そこから破壊が始まるとされている³⁾ので引張応力が作用することで加圧軸に垂直な方向の潜在クラックが進展し、加圧軸方向にはひずみ易いが圧縮応力下に比べて横方向には力が伝わりにくく、横ひずみの増加割合が小さくなっているものと考えられる。

5. おわりに

引張応力下における接線弾性係数およびポアソン比は圧縮応力下におけるそれらと比べて、温度、含水状態における値の変化の傾向は似ているが、引張応力下の方が接線弾性係数、ポアソン比ともに小さくなっていることがわかった。

参考文献

1) 稲田善紀：岩盤工学，173～177 頁，森北出版，1997。 2) 稲田善紀，谷口浩二：液化天然ガスの地下岩盤内空洞貯蔵による空洞周辺の塑性領域，日本鉱業会誌，103 巻，1192 号，365～372 頁，1987。 3) 山口梅太郎，西松裕一：岩石力学入門，95～103 頁，東京大学出版社，1994。

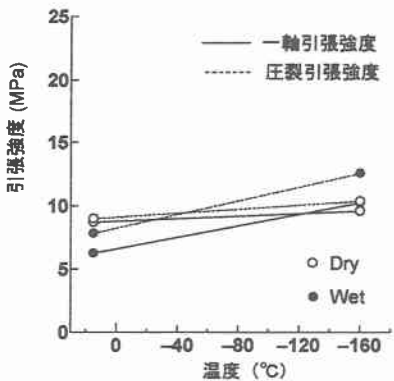


図3 大島花崗岩の引張強度

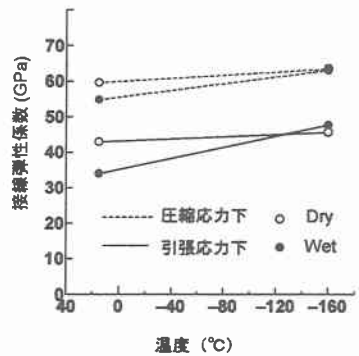


図4 大島花崗岩の接線弾性係

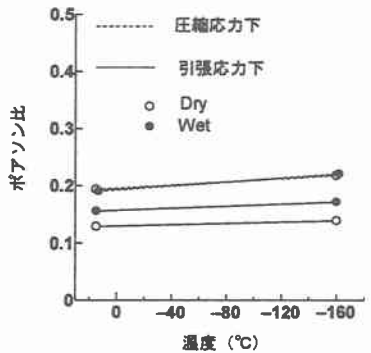


図5 大島花崗岩のポアソン比