

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06551

研究課題名(和文) 岩石供試体を対象とする極低温三軸圧縮試験装置の開発

研究課題名(英文) Development of a Vessel for Triaxial Compression Test of Rock under Ultra-low Temperatures

研究代表者

鴨志田 直人 (Kamoshida, Naoto)

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号：00400177

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、低温で使用可能な岩石用三軸圧縮装置を開発した。本装置は、凝固温度が非常に低い高圧実験用の圧力媒体をセル圧流体として使用する点に特徴がある。また、この圧力媒体は非常に高価であるため、その使用量を減らすために、一般的なセル圧発生装置を使用せず、プレス機を用いてピストンを押すことでセル圧を負荷する機構を三軸圧縮室に組み込んだ。開発した装置を用いて-190℃で砂岩の三軸圧縮試験を行ったところ、当初予定していた20MPaまでセル圧を負荷することができなかった。今後も三軸圧力室とセル圧発生装置の改良を続けていく予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

液化天然ガスや液化水素などの極低温液化燃料の岩盤内貯蔵方式の設計・施工では、空洞周辺岩盤の安定解析を行う。この解析では、岩石の破壊包絡線または強度定数(粘着力・内部摩擦角)を把握する必要があるが、極低温(-196℃程度)状態での強度定数を報告した例は国内外を問わずない。本研究課題で取り組んだ岩石用極低温三軸圧縮室を用いることによって、安定解析で必須となる岩石の強度定数を実際に測定することが可能となる。また、飽和含水岩石の強度定数の温度依存性に関するメカニズムの解明が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a triaxial compression apparatus for rocks that can be used at very low temperatures. The apparatus is distinct in that pressure media for high-pressure experiments with very low solidification temperature are used as the cell pressure fluid. Furthermore, since the pressure medium is very expensive, to reduce its application, a mechanism was installed in the vessel to load cell pressure by pushing a piston using a press machine instead of using a general cell pressure generator. The cell pressure could not be loaded to the originally planned 20 MPa during the verification test on triaxial compression tests of sandstone at -190℃ using the developed apparatus. The triaxial pressure vessel and cell pressure generator will be improved further.

研究分野：岩盤工学

キーワード：凍結岩石 三軸圧縮試験 極低温下 破壊包絡線 強度定数 液化天然ガス(LNG) 岩盤内貯蔵

1. 研究開始当初の背景

液化天然ガスや液化水素などの極低温液化燃料の岩盤内貯蔵方式の設計・施工では、空洞周辺岩盤の熱応力解析を行う。この熱応力解析による安全性評価(安全性照査)では、極低温環境下における飽和含水岩石の線膨張係数、変形係数(ヤング率・ポアソン比)、岩石強度(圧縮強さ・引張強さ・せん断強さ)のほかに、破壊包絡線または強度定数(粘着力・内部摩擦角)を把握する必要がある。

極低温環境下における岩石強度の温度依存性に関しては、一軸圧縮試験や圧裂引張試験を用いた変形係数・強度特性について、多くの研究がなされてきた(例えば、鴨志田ら、*Journal of MMIJ*, 2011)。しかし、低温下(-40℃程度)における岩石の強度定数に関する研究は、極端に少なく、さらに極低温下(-196℃程度)までの温度範囲における破壊包絡線・強度定数を報告した例は、研究代表者が調べた範囲において見当たらない。その理由として、一般に岩石の強度定数の測定に用いられる三軸圧縮試験は、セル圧荷荷に流体圧を用いるため、供試体を冷却保持するのが極めて難しいことが挙げられる。

研究代表者(鴨志田ら、*Journal of MMIJ*, 2015)は、室温から-170℃までの岩石の破壊包絡線(強度定数)の変化挙動を検討するため、砂岩(間隙率 24%)を供試岩石とし、回転ダイス型一面せん断試験器を用いて直接一面せん断試験を行った。その結果、砂岩の破断時の垂直応力とせん断応力の関係は、供試体温度・含水状態に関係なく概ね比例関係にあり、クーロンの破壊基準を用いて破壊包絡線を表すことができることを明らかにした(図 1a,b の実線①を参照)。さらに、岩石の一軸圧縮強さと圧裂引張強さから強度定数を推定することの可否について、一面せん断試験より得られたクーロンの破壊基準と比較する方法で検討した。その結果、室温から-170℃までの乾燥砂岩と-100℃までの飽和含水砂岩では、モール・クーロンの式とクーロンの破壊規準とが概ね一致した(図 1a)。しかし、極低温環境下(-170℃)における飽和含水砂岩では、モール・クーロンの式とクーロンの破壊規準が一致せず(図 1b)、その原因については今後の検討課題となった。

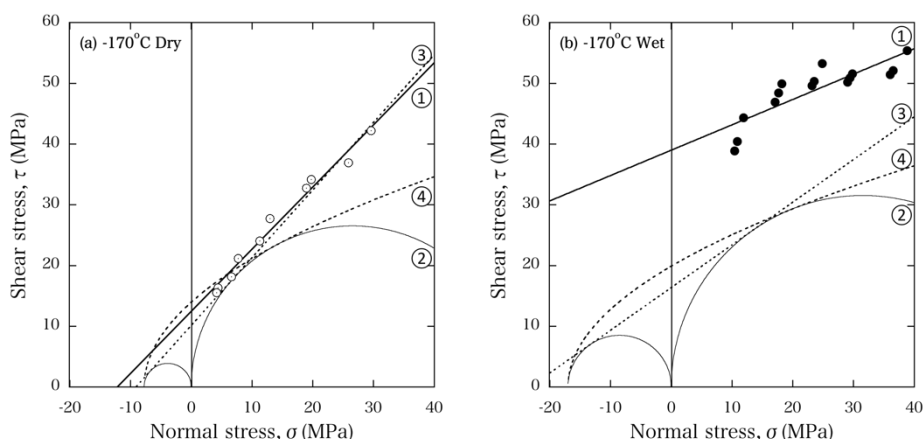


図 1 クーロンの破壊規準とモールの破壊包絡線 (一例)

①クーロンの破壊規準、②モールの応力円、③モール・クーロンの式、④モールの式

2. 研究の目的

極低温環境下における飽和含水岩石の破壊包絡線または強度定数(粘着力・内部摩擦角)を一面せん断試験のみで判断することは難しく、極低温領域においても三軸圧縮試験を実施する必要がある。そこで、本研究では極低温下における飽和含水岩石の強度定数を明らかにすることを目的に、極低温下で実験可能な岩石用三軸圧縮試験装置の開発を行った。具体的には、三軸圧縮試験装置を構成する三軸圧力室、セル圧供給装置、圧縮装置及び荷重・変位測定装置のうち、本研究では三軸圧力室とセル圧供給装置の開発を行った。

3. 研究の方法

(1) 極低温用三軸圧縮試験装置の開発

本研究では、最大セル圧 20MPa、最低試験温度-190℃を目標として三軸圧力室の開発を行った。一般に岩石用三軸圧縮試験装置ではセル圧媒体に機械作動油を使うことが多いが、本研究では低温下でも固化しにくい超高压力媒体油をセル圧媒体として使用した。本油は 30ml で約 10 万円と非常に高価なため、三軸圧縮室の設計では油の使用量を極力減らす工夫を行った。

三軸圧力室を冷却保持するための装置は、作製した三軸圧縮室を内蔵できるだけの構内寸法

を持つガス噴射式恒温槽を手配することができなかつたので、本研究では三軸圧縮室をステンレス平板5枚で囲う簡易的な恒温槽を作製し、用いた。冷却方法は、液体窒素を寒剤として直接恒温槽に注水し、極低温環境を作る方法を採用した。なお、三軸圧縮試験時には恒温槽の周りを断熱材で覆った。

(2) 極低温用三軸試験装置の実証試験

開発した三軸圧縮室の実証試験では、供試岩石に島根県松江市宍道町産の来待砂岩を用いた。来待砂岩の物性値を表1に示す。供試体は直径30mm、長さ60mmの円柱形を用いた。供試体作製にあたっては、岩石の異方性による測定結果のばらつきを避けるために、同一岩石ブロックから層面に直交するようにコアリングを行い、供試体の層面方向が同一になるように考慮した。整形した供試体は真空容器中で48時間以上水中脱気養生し、本研究における飽和含水状態（飽和度約100%）とした。供試体は、セル圧媒体の浸透を防ぐため、極低温下にも対応した熱収縮チューブで被覆したのち、試験に供した。

表1 来待砂岩の物性値

| | | |
|-------------------------|----------------------|-------|
| Bulk density | (g/cm ³) | 2.03 |
| Velocity of P-wave | (km/s) | 2.49 |
| Velocity of S-wave | (km/s) | 1.59 |
| Dynamic Poisson's ratio | (-) | 0.15 |
| Dynamic shear modulus | (GPa) | 5.12 |
| Dynamic Young's modulus | (GPa) | 11.80 |

軸方向荷重の載荷装置として万能材料試験機を用いた。圧縮破壊時の最大鉛直荷重は材料試験機内蔵の荷重計を用いて測定し、その値を電子式動力計の支持盤より直接読み取った。セル圧媒体の温度は三軸圧縮室に取り付けたT型熱電対で計測し、データロガー介してPCに記録した。

鉛直荷重の載荷速度は30kN/minとし、試験温度は-190℃、冷却速度は1.4℃/minとした。三軸圧縮釜内に設置している3つの熱電対が-190℃を安定に示すようになった後、供試体の内部温度が一様になるのを待つため1時間温度を保持した。その後、圧縮試験を行った。

4. 研究成果

(1) 極低温用三軸圧縮試験装置の開発

本研究で開発した低温用三軸圧力室を図2に示す。本圧力室は高価なセル圧媒体の使用量を減らすため、岩石供試体寸法（直径30mm、高さ60mm）に対して圧力室内寸法を直径44mm、高さ157mmと可能な限り狭く設計した。また、三軸圧縮室にセル圧加圧用ピストンを取り付け、このピストンをプレス機（反力フレーム、単動型シリンダ、手動油圧ポンプ）を用いて圧入することでセル圧を載荷する方式を採用したことにより（図3）、油圧ポンプのタンク容量と接続ホース分のセル圧媒体使用量を0mLとすることができた。これら設計上の工夫を加えることで、三軸圧縮試験に必要なセル圧媒体の使用量を150mLに押さえることができた。また、セル圧加圧用ピストンはロックナットのネジを用いてピストンの戻りを防ぐ（クランプする）ことで、セル圧を保持した状態でプレス機を取り外すことができ、三軸圧力室のみを恒温槽内に設置することが可能となった。

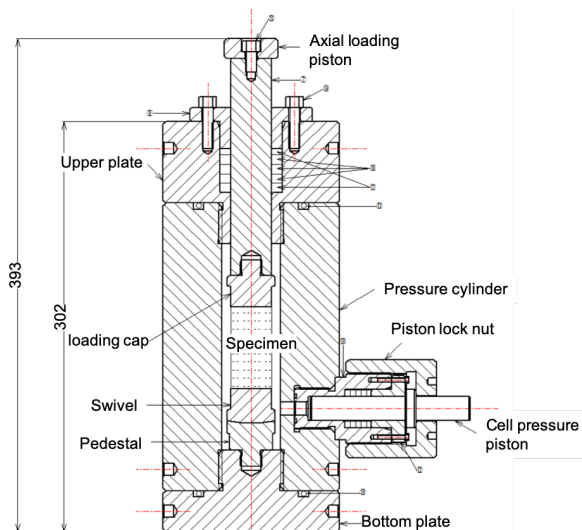


図2 岩石用極低温三軸圧力室の模式図

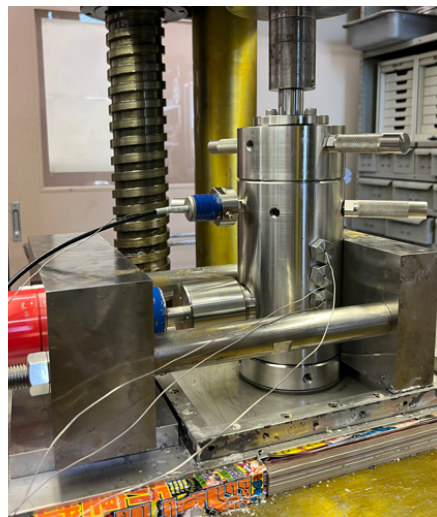


図3 セル圧載荷の様子

その他に、開発した三軸圧縮室にはセル圧媒体の温度を計測するためのT型熱電対を3本、三軸圧縮室の側面、岩石供試体の上端部、中央部、下端部と同じ位置にそれぞれ取り付けました。

(2) 極低温用三軸試験装置の実証試験

実験計画ではセル圧 20MPa で実験を行う予定であったが、セル圧を加える過程でセル圧加圧用ピストン部から油漏れが生じたことで5.8MPa までしかセル圧を上げることができなかった。原因としてピストン部に使用していたパッキンがセル圧に耐えきれなかったことが考えられる。

実証試験はセル圧 0MPa を2回、5.8MPa を1回実施した。セル圧 0MPa はセル圧媒体を使用する場合と使用しない場合とで1回ずつ実験を行なった。-190℃で行った三軸圧縮試験の結果を図4に示す。同図より、セル圧 0MPa の2つの圧縮強さ(図4①, ②)には、セル圧媒体の有無で約100MPaの差が生じた。破断後の供試体の様子を観察したところ、セル圧媒体の有無で破壊形式が異なった。具体的には、媒体有ではせん断破壊、媒体無では縦割れ破壊であった。セル圧媒体に用いた超高压力媒体油は、大気圧下において-100℃まで冷却すると固化すること、固化した後も格段に柔らかい性質を有することが知られているが、-190℃ではセル圧媒体が固体圧として作用したものと考えられる。

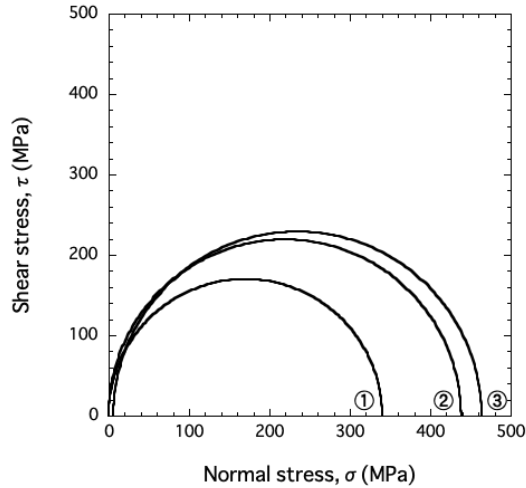


図4 三軸圧縮試験の結果

(3) 低温用三軸圧縮試験装置の改良

実証試験の段階では、セル圧の測定をセル圧加圧時のみ測定し、セル圧発生装置を取り外したあとの極低温状態でのセル圧は計測していなかった。しかしながら、三軸圧縮室の冷却過程において、三軸圧縮室およびセル圧媒体の収縮にともなうセル圧の変動が考えられた。そこで、三軸圧縮室の側面に小型圧力センサーを取り付け、冷却中ならびに軸載荷試験中のセル圧を測定できるように改良した。また、セル圧加圧用ピストン部から油漏れを改善するため、ピストン部に用いるパッキンの選定を行った。

冷却時におけるセル圧の変化について測定を行った。図5に示すようにセル圧媒体を室温から-4℃まで冷却ししたところ、23℃から15℃まで冷却する間にセル圧が10MPa から0.04MPaまで急減する現象を確認した。また、その原因はセル圧媒体の体積収縮率に起因することを明らかにした。セル圧発生装置を切り離す本三軸圧縮室では、軸圧載荷用ピストンを挿入することでセル圧を再載荷することは可能であるが、破壊強度点でのセル圧を制御することは難しい。今後はセル圧発生装置の改良を実施し、引き続き極低温下における飽和含水岩石の強度定数を明らかにすることを計画中である。

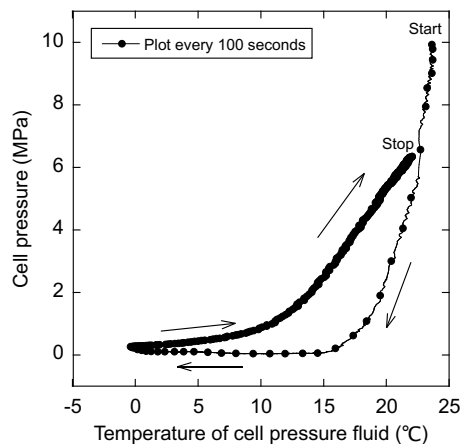


図5 三軸圧縮試験の結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

| |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名 桔梗貴史, 鴨志田直人, 齊藤剛 |
| 2. 発表標題 岩石用極低温三軸圧縮試験装置の実証試験 |
| 3. 学会等名 日本材料学会第70期学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 鴨志田直人, 大河原正文, 齊藤剛 |
| 2. 発表標題 湿潤岩石の極低温下における強度定数の測定 |
| 3. 学会等名 日本材料学会第68期学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 鴨志田直人 |
| 2. 発表標題 低温下における飽和含水岩石の力学的・熱力学的性質 |
| 3. 学会等名 岩手大学理工学部第8回銀河セミナー（招待講演） |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|