圧縮载荷手法による岩石用真三軸試験の分類について

高橋 学*・成田 孝**・富島康夫**・荒井ルリ子**

1. はじめに

地下の応力状態を室内実験で再現する場合, せん断力の作用しない主応力空間を用いた理想化した状態で表示することが多い。通常の岩石試験では封圧下の三軸試験が行われることが多いが, この試験ではあくまでも3つの主応力のうち, 常に2つの主応力が同じという制約された条件のもとでしか载荷できない。すなわち, 中間主応力と最小主応力が常に等しいという制約がある。このような制約を打ち破り, 岩石の強度や変形特性に及ぼす中間主応力と最小主応力との違いを明瞭にするため, 真三軸試験が考案された。このような試みは1960年代から行われた。これらの目的は地震発生域における応力変動メカニズムの解明のためであったり, 地下空間における岩盤の安定性の解明等であった。真三軸試験では, 中間主応力もしくは最小主応力をどのような媒質で载荷するかが重要な問題であり, 60/70年代は主に剛体ピストンと剛性の高い金属エンドピースとの組み合わせが主流であった。最大主応力方向は常にピストンとエンドピースとの組み合わせでなければならないが, 中間主応力方向を端面拘束の少ない手法で载荷するための工夫が行われるようになった。小さな金属ブロックの集合体やPVC(polyvinyl chloride, ポリ塩化ビニル)でできたバッグで载荷する方法が考案されるようになった。

また, 最近では円柱供試体の円周方向に内圧を変えた金属製のチューブを配管し, 内圧差から中間・最小主応力を負荷する手法も考案されている¹⁾。本文では, 岩石における真三軸試験手法に関して, 圧縮応力を用いた载荷手法に着目して整理してみる。なお, 中空円筒供試体を用いて内圧・外圧に軸応力を作用させる手法や更に軸方向の捻りを

作用させた手法, あるいは封圧下での圧裂・引張り試験などによる真三軸試験方法については, ここではとくに触れない。あくまでも圧縮応力による载荷手法について整理する。なお, 1960年代から80年代前半については高橋・ほか²⁾にまとめられている。

2. 三方向ピストンによる载荷

立方体形状の岩石供試体を3組みの剛体ピストンと载荷盤で载荷する方法であり, 多くの研究者によって主に岩石の強度特性に及ぼす組み合わせ応力の影響や破壊条件式の検討が行われた。多軸圧縮試験(poly-axial or multi-axial compression test)と称されることが多かった。図-1はこの手法の代表として古住・杉本³⁾の装置の概念図を示す。基本的には最大主応力となる鉛直方向の载荷方法と同じ構造が, 中間・最小主応力方向の水平方向の载荷構造である。油圧増圧器(ラム)と荷重検出のためのロードセル(受圧器), そして供試体を直接载荷するエンドピース(固定圧盤やアンビル)から構成されている。彼らの装置では,

図-1 古住・杉本(1986)による装置概念図

* 産業技術総合研究所深部地質環境研究センター Research Center for Deep Geological Environments, AIST(会員)
 E-mail: takahashi-gonsuke@aist.go.jp

** 産業技術総合研究所深部地質環境研究センター Research Center for Deep Geological Environments, AIST

3基の油圧ラムで構成されているタイプであり、操作が簡便で製作費も安価となるなどのメリット等が考えられる。このような手法では一般的には以下のような欠点が考えられる。

- 1) エンドピース間の接触を回避するため側方もしくは主軸方向の載荷面積を小さくしている。
- 2) とくに、最小主応力方向は端面拘束の影響が顕著となり、破壊後の変形特性に大きな影響を及ぼす。
- 3) 破壊挙動に最も敏感な最小主応力方向が固体圧なので、物性測定精度が流体圧の時に比べ劣る。

しかしながら、同手法における端面拘束や境界条件の問題は ATKINSON and KO⁽⁴⁾ による multiaxial cell と flexible cushions の採用によってほぼ完全に解決されている。なお、境界条件の違いによる強度・変形特性への影響については HEGEMIER and READ⁽⁵⁾ に詳しくレビューされている。ANDENAES *et al.*⁽⁶⁾ は図-2 に示すようなセルおよび各種減摩材(供試体側から皮製、ポリウレタン製)、メンブレン、変位計用保護材、変位計(proximator と称するギャップセンサー)、そして反力枠として作用する main wall から構成される立方体型のセルを考案した。同様に図-3 は供試体と fluid cushion および供試体と圧盤(steel plate)との相対的な位置関係を示している。供試体の稜角部はどのような手法を用いても完全に載荷することは不可能であるが、供試体寸法を大きく(彼らの場合には4インチ)することによって影響を小さくすることが可能となっている。なお、彼らの供試体はモルタルおよびコンクリートである。

図-2 Andenaes *et al.*(1977)によるセルおよび減摩材の概要

図-3 Andenaes *et al.*(1977)による圧力容器周囲の様子

SAYERS *et al.*⁽⁷⁾ は箱型の反力枠に3組みのジャッキを備えた装置を用いて、砂岩の3方向の弾性波速度を測定した。弾性波のセンサーは各方向のエンドピース内に埋め込まれている。このタイプでは、供試体中心を変形のいかなる段階においても一定に保っている点がほかの手法と大きく異なっている。また、各載荷軸には両端に球座が配してあり、載荷に伴う偏心を抑え、均一な載荷を可能としている。3方向とも最大30t(294kN)の載荷容量しかないので、供試体の種類や載荷レベルに限定的とならざるを得ない。

KING *et al.*⁽⁸⁾ は図-4 に示すような載荷装置を用いて、変形中の砂岩の弾性波速度と透水係数との変化を測定した。中間・最小軸は最大115MPa、最大軸は750MPaまで載荷可能である。また、間隙水圧は5MPaまで負荷可能である。この装置で特徴的なのは加圧板と供試体との間の減摩材として厚さ5mmのマグネシウムを用いている点である。通常、このタイプの試験装置で透水試験を実施する場合、供試体稜角部におけるシール機構が技術的に困難と思われる。

図-1と図-4に示した装置の違いは前者が3個の油圧ラムで載荷し、供試体の反力を利用して各主応力の応力値を得ているのに対し、後者は3組みのペアの油圧ラムで各主応力を得ている点である。前者の載荷方法では供試体の中

図-4 King *et al.*(1995)による装置概念図

心と载荷軸の中心を一致させながら载荷することが困難となり、変形や応力の増加とともに両者の軸中心のずれが大きくなる。この影響が強度や変形にどの程度影響するのかを定量的に議論した事例はない。

3. 2方向ピストンと流体圧による载荷

このタイプの真三軸試験は MOGI⁹⁾に代表される。図-5は压力容器の概念図である。直方体の供試体を用い、压力容器の中でピストンによる二軸圧縮試験を行うものである。彼の1960年代からの一連の岩石試験を通して、供試体の破壊に最も敏感な最小主応力を端面拘束のない理想的な载荷とするため、流体圧での载荷を実現したことによってこのタイプの真三軸試験が完成された。彼は岩石の変形特性、とくに延性状態から中間主応力の増加に伴う脆性化の過程における3主応力方向のひずみを測定し、体積ひずみおよびダイラタンシーひずみを評価した。また、ロードセルを压力容器内部に設置し、より正確な応力値を計測することができた。高橋・ほか¹⁰⁾・TAKAHASHI *et al.*¹¹⁾は供試体を最大5×10×10cmと大型化した試験が可能な装置を用い、とくに堆積岩の強度・変形特性を調べた。また、高橋・ほか¹²⁾は変形特性と同時に3主応力方向のP波速度や最小主応力方向のS波速度2成分を測定し、ウェスター花崗岩の応力によって生じるマイクロクラックの分布やアスペクト比などを中間主応力の関数として評価した。高橋¹³⁾は σ_3 方向の合計9とおりのパスのP波速度を測定し、一次元流れにおける水のフロントの移動をモニターすると同時に、振幅比の変化も計測し、速度よりも振幅比の方がフロント移動に敏感であることを報告している。あるいは、高橋・ほか¹⁴⁾・TAKAHASHI *et al.*¹⁵⁾は真三軸応力下における最大主応力方向の透水係数の変化も測定している。以上のように、このタイプの真三軸試験の最大のメリットである最小主応力方向の物性測定ができるという点を活かし

た研究が行われている。

一方、WAWERSIK *et al.*¹⁶⁾は図-6に示すような封圧三軸压力容器内にて、中間主応力を压力容器内壁面の反力を利用したピストンにより载荷する全く新しい手法を考案した。茂木式では压力容器に中間主応力軸とピストンのための加工が必要になり、したがって压力容器の設計・製作も複雑となっていたが、この手法によって従来の封圧三軸試験用压力容器を用いた真三軸試験が可能となった。また、茂木式では中間主応力軸の载荷のための载荷枠が必要となり空間的にも大きな面積を占めていた。WAWERSIKらの载荷手法により、封圧三軸試験压力容器内の中間主応力方向の载荷部を増設するだけで真三軸試験が可能となり、真三軸試験がより身近な試験手法となった点は大きな成果といえる。同じような発想の元に HAIMSON and CHANG¹⁷⁾およびCHANG and HAIMSON¹⁸⁾は図-7に示すような压力容器と2軸载荷装置を考案している。彼らの装置では比較的小さな供試体(19×19×38mm)を用いて、高

図-6 Wawersick *et al.*(1997)による压力容器概念図

図-5 Mogi(1971)による压力容器概念図

図-7 Heimson and Chang(2000)による装置概念図

い圧力 ($\sigma_3=400\text{MPa}$, $\sigma_1=\sigma_2=1,600\text{MPa}$) を実現し強度特性に及ぼす中間主応力効果のデータを取得している。また、特徴的なのは最小主応力方向の変位計測手法である。従来とは異なる発想で、供試体の最小主応力面に pin を立て、供試体全面以上の面積を有するベリリウム銅の板に接触させ、銅板上に貼付されたひずみゲージにて最小主応力方向の変位を検出している点である。この手法では、最小主応力方向の変位計測のため種々の変位計が開発されているが、一番の問題点はスペースの観点から変位計の出力感度を向上させることであった。曲率をもったあるいは円弧状の変位計では最大出力感度は数千マイクロストレイン/mm が限界であるが、平らな板を変形させてその初期の変形を利用した変位計であれば、出力感度は数倍増加させることが可能である。この点において彼らの変位計測は精度の高いデータを得ることが可能となっている。

この手法では最大・中間主応力が剛体ピストンによる载荷であり、最小主応力が流体圧で载荷される。ところが、中間主応力を流体圧で、最小主応力を剛体ピストンで载荷した事例がある。SPETZLER *et al.*¹⁹⁾ に示すような装置を用いて、中間主応力を流体圧で载荷し、しかも压力容器に設けられた覗き窓から変形の様子や亀裂進展の様子をホログラフィーを用いて直接観察した。31.6mm の立方形の pyrophyllite を供試体を用いて、最大・中間主応力方向の弾性波を測定した。最小主応力を剛体ピストンとするためには、供試体の変形過程にピストンを後退させ、応力を中間主応力よりも常に小さくする工夫が必要となる。すなわち、変形の増加とともに、ピストンを引き抜く操作をすることになる。彼らの手法では図-8 から推察すると中間主応力の片方は変位固定状態とし、もう一方はシール機構を活かしながら、後退するフリーな機構とした。このような载荷手法は結果として、中間主応力方向の変形の不均一を生じさせ、最終的な破断面は供試体の中央からずれている。

図-8 Spetzler *et al.* (1981) の装置の概念図

さて、茂木式压力容器の大きな欠点は供試体の容器内への設置後、上蓋を回転させながら本体にねじ込む点である。エンドピースを組み込んだ供試体のアセンブリを軸の中心や回転を気にしながら慎重にセットしなければならない点にある。このような実験手順を簡略化し、より精度の高い実験を行う工夫がされているのが図-9, 10 に示す高橋・ほか²⁰⁾によって採用された压力容器である。茂木式と大きく異なるのは、压力容器本体と底蓋を固定し封圧の反力を維持する部分に工夫がある。それはほぼ 60 度おきに容器本体および底蓋に形成された台形ねじ部とねじ部が存在しない領域である。この 60 度おきのねじの存在により、本体と底蓋とは 60 度回転させるだけで压力容器の組み立てが

図-9 高橋・ほか(2000)による压力容器概念図

図-10 高橋・ほか(2000)による压力容器寸法概念図

完了し、封圧の反力に耐えることができる。わずか 60 度本体を回転させるだけで供試体の圧力容器内への設置が完了し、従来までの煩雑な設置方法から開放された意義は大きい。また、供試体の設置や変形計測のための変位計、透水試験のための間隙水圧ラインなど神経を集中させていた作業が立ったまま、目線の位置で作業でき、より効率的になった点も利点として挙げられる。なお、変位計や同軸ケーブル類もワンタッチ操作により接続可能となり、正確なデータ取得が可能となっている。

4. ピストンと 2 方向流体圧による載荷

図-11 は MICHELIS²¹⁾の装置の概念図である。茂木式とは異なり通常の封圧三軸試験用の圧力容器内に PVC バッグ(最大圧 200MPa)を介して中間主応力と最小主応力を負荷する仕組みとなっている。この PVC バッグは厚さが 2~3 mm, 内圧は最大 250MPa までの載荷が可能である。供試体と PVC バッグとの間には steel prism と呼ばれる小さな断面積をもつ載荷盤の組み合わせが配置され、茂木式にあるような中間主応力断面全体を剛体載荷盤で加圧する手法と異なっている。この組み合わせにより載荷盤の端面拘束を減少させ、供試体の変形を均一化することは間違いない。変形は steel prism 面の背後に直接変位計測のためのロッドを配し、直接供試体変位を測定している。最小主応力も同じ構造で載荷していることから、とくに脆性領域における最小主応力変形特性に茂木式の流体圧による載荷手法との違いが鮮明となっている。同様な載荷手法は HOJEM and COOK²²⁾によっても行われている。彼らは中間・最小主応力を銅製のフラットジャッキで載荷する手法を考案した。ただし、フラットジャッキの耐圧が小さく最大でも 42MPa の中間主応力しか負荷することができなかった。

今まで述べてきた載荷手法はすべて角柱もしくは立方体形状の供試体を使用する場合であるが、以下に述べる手法では円柱型供試体を用いて真三軸試験を実施した極めて珍しい事例である。図-12 は圧力容器の断面図と供試体周り

図-11 Michelis et al.(1985)による装置概念図

図-12 Smart(1995)による装置の概念図

の高圧チューブの配置を示す図である²³⁾。PVC チューブと供試体の間にはゴムのライナーが設置されており、これを介して応力が供試体に負荷される。この圧力を加えられた PVC チューブは周囲に反力を取れない場合、7MPa で破裂する。したがって、中間主応力と最小主応力の差は最大 7MPa を超えることができない。また、彼らは数値解析から供試体内の応力分布の均一性を主張しているものの、供試体に作用している最終的な中間・最小主応力の値はあくまでも実測値ではない。なお、この装置を用いて、2 種類の砂岩の強度・変形、そして最大主応力方向の弾性波速度が CRAWFORD *et al.*¹⁾によって報告されている。

5. お わ り に

圧縮応力によって真三軸応力場を再現する種々の手法を大きく 3 つの種類に分類し、1980 年代以降実施されている試験手法を以下のように整理してみた。

- 1) 3 方向剛体ピストンによる方法
- 2) 2 方向剛体ピストンと流体圧による方法
- 3) 1 方向剛体ピストンと 2 方向流体圧による方法

各手法について概略説明し、試験上のメリット・デメリットについて比較検討した。近年の一般的な傾向として、強度・変形特性以外の物性測定として弾性波速度測定や透水試験手法との組み合わせが採用されている。このような観点から上記 3 つの手法を比較した場合、種々の制約を比較的に受けないのは 2) の 2 方向剛体ピストンと流体圧による方法と思われる。

今後も新しい技術と工夫によりさまざまな実験的アプローチが出現し、より質の高い室内岩石実験が可能となることを望みます。

引用文献

- 1) CRAWFORD, B. R., SMART, B. G. D., MAIN, I. G., LIAKOPOULOU-MORRIS, F. (1995): Strength Characteristics and Shear Acoustic Anisotropy of Rock Core Subjected to True Triaxial Compression, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.32, No.3, pp.189-200.
- 2) 高橋 学・小出 仁・星野一男(1988): 岩石における真三軸試験法について, 地質ニュース 401 号, pp.38-50.
- 3) 古住光正・杉本文男(1986): 多軸応力下における岩石の破壊条件と中間主応力の影響, 応用地質, Vol.27, No.1, pp.13-20.
- 4) ATKINSON, R. H. and KO, HON-YIM. (1973): A Fluid Cushion, Multiaxial Cell For Testing Cubical Rock Specimens, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.10, pp.351-361.
- 5) HEGEMIER, G. A. and READ, H. E. (1985): On Deformation and Failure of Brittle Solids: Some Outstanding Issues, *Mechanics of Materials* 4, pp.215-259.
- 6) ANDENAES, E., GERSTLE, K., ASCE, F., KO, HONYIM, ASCE, M. (1977): Response of Mortar and Concrete to Biaxial Compression, *Journal of The Engineering Mechanics Division*, Vol.103, No.EM4, pp.515-526.
- 7) SAYERS, C. M., VAN MUNSTER, J., KING, M. S. (1990): Stress-induced Ultrasonic Anisotropy in Berea Sandstone, *Int. J. Rock mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.27, No.5, pp.429-436.
- 8) KING, M. S., CHAUDHRY, N. A., SHAKEEL, A. (1995): Experimental Ultrasonic Velocities and Permeability for Sandstones with Aligned Cracks, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.32, No.2, pp.155-163.
- 9) Mogi, K. (1971): Fracture and Flow of Rocks under High Triaxial Compression, *Journal of Geophysical Research*, Vol.76, No.5, pp.1255-1269.
- 10) 高橋学・小出仁(1989): 地下 1000m 程度における砂岩・頁岩の強度・変形特性に及ぼす中間主応力効果, 地質調査所月報, Vol.40, (4), pp.207-222.
- 11) TAKAHASHI, M. and KOIDE, H. (1989): Effect of the intermediate principal stress on strength and deformation behavior of sedimentary rocks at the depth shallower than 2000m, Rock at Great Depth, pp.19-26.
- 12) 高橋学・木下重教・西澤修・小出仁・千葉洋 (1984): 真三軸圧縮下でのウェスラー花崗岩の弾性波速度異方性について, 地震, Vol.37, pp.67-79.
- 13) 高橋学(1991): P 波速度および振幅比により観察される岩石内の水の浸潤について, 応用地質, Vol.32, No.5, pp.24-31.
- 14) 高橋学・杉田裕・薛自求・大西康智・石島洋二 (1993): 白浜砂岩の透水特性に及ぼす各主応力の影響について—ダイラタンシー以前の応力状態の場合—, 資源と素材, Vol.109, pp.802-808.
- 15) TAKAHASHI, M. and KOIDE, H. (1995): Three principal stress effects on permeability of Shirahama sandstone, *International congress on rock mechanics*, pp.729-732.
- 16) WAWERSIK, W. R., CARLSON, L. W., HOLCOMB, D. J., WILLIAMS, R. J. (1997): New Method For True Triaxial Rock Testing, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* Vol.34, 3-4, paper No.330.
- 17) HAIMSON, B. and CHANG, C. (2000): A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of Westerly granite, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* Vol. 37, pp.285-296.
- 18) CHANG, C. and HAIMSON, B. (2000): Rock strength determination using a new true triaxial loading apparatus, and the inadequacy of Mohr-type failure criteria, *Pacific Rocks* 2000, pp.1321-1327.
- 19) SPETZLER, H. A., SOBOLEV, G. A., SONDERGELD, C.H., SALOV, B. G., GETTING, I. C., KOLTISOV, A. (1981): Surface Deformation, Crack Formation, and Acoustic Velocity Changes in Pyrophyllite Under Polyaxial Loading, *Journal of Geophysical Research*, Vol.86, No.B2, pp.1070-1080.
- 20) 高橋学・林為人・張銘(2000): 新しい真三軸試験用圧力容器について, 資源・素材 2000(秋季大会) A3-15.
- 21) MICHELIS, P. (1985): A True Triaxial Cell for Low and High Pressure Experiments, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.22, No.3, pp.183-188.
- 22) HOJEM, J. P. M. and COOK, N. G. W. (1968): The design and construction of a triaxial and polyaxial cell for testing rock materials. *S. Afr. Mech. Engr.*, Vol.18, pp.57-61.
- 23) SMART, B. G. D. (1995): A True Triaxial Cell for Testing Cylindrical Rock Specimens, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.32, No.3, pp.269-275.

(2001年4月17日受付, 2001年5月23日受理)

Various Loading Systems for Rock True Triaxial Compression Test

Manabu TAKAHASHI, Takashi NARITA, Yasuo TOMISHIMA and Ruriko ARAI