

熱収縮チューブ(HST)を利用した岩石のひずみ計測方法の検討

長田昌彦¹・山辺 正²・吉中龍之進³・浜野久美⁴

¹正会員 工博 埼玉大学工学部建設工学科 助手 (〒338-8570 浦和市下大久保 255)

²正会員 工博 埼玉大学工学部建設工学科 助教授 (〒338-8570 浦和市下大久保 255)

³正会員 工博 埼玉大学工学部建設工学科 教授 (〒338-8570 浦和市下大久保 255)

⁴埼玉大学大学院理工学研究科 (〒338-8570 浦和市下大久保 255)

湿潤供試体や不均質な岩石などを対象として、三軸圧縮試験において供試体の縦横ひずみを計測できるような局所ひずみの計測方法として、熱収縮チューブ(HST)を利用した方法を提案した。またその検証実験を実施し、合わせて三軸圧縮試験例を示した。さらに本手法と LDT(Local Deformation Transducer)を用いたひずみ計測を比較すると、破壊時まで両者はほぼ一致した出力を示した。本手法は簡便なひずみ計測方法として、十分使用できるものと考えられる。提案した手法は、三軸セルからのゲージ取り出し口さえ準備すれば、現有のセルをそのまま利用できる利点がある。

Key Words : Heat Shrinkable Tubing(HST), strain measurements, rock sample

1.はじめに

軟岩・硬岩を問わず、微小変形領域を含めた岩石の正確な変形特性を得るために、ベディングエラー等の影響を含まない局所的な変形を計測することが標準となりつつある。またその一方で、岩石の変形特性を決定するためには、軸方向ひずみと周方向ひずみを同時に同精度で計測する必要がある。これらの要求に応えるために、この 30 年間さまざまな局所ひずみ計測装置が開発されてきた。個々の文献において対象とする地盤材料は土から硬岩まで多岐に渡っているが、共通する計測方法も多い。

ひずみを求めるための計測方法には、大きく分けて供試体のひずみを直接計測する場合と変位を計測する場合の 2 つがある。岩石のひずみ計測に多く用いられているように、供試体表面に直接ひずみゲージを貼付する方法¹⁾は縦横ひずみを計測可能で取り付け作業も簡便な反面、乾燥を嫌う湿潤供試体や不均質な材料には適用しがたく、使用においていくつかの制限を受ける。また周方向ひずみを求める方法として、Atteigner and Koppel²⁾は供試体に巻き付けたワイヤーの抵抗値の変化を利用する方法を提案し、Skopek and Cyre³⁾によって小型化が検討されている。

軸ひずみを求めるために軸方向変位を計測する方法

は、供試体の 2 点間変位を計測するのが主流である。

例えば、非接触型変位計の利用^{4),5)}、hall effect を利用した計測方法^{6),7)}、LDT (local deformation transducer) の利用^{8),9),10)}、LVDT の利用^{11),12)}、さらに傾斜計の利用^{13),14),15)}などがある。また横ひずみを求めるための変位計測方法の多くは、半径方向変位を計測するものが主流であり、非接触型変位計の利用⁴⁾、LVDT の利用^{16),17)}などがある。矩形供試体に対しては LDT の利用⁹⁾も検討されている。また岩石試料に対しては、バンドまたはチェーンを直接供試体に巻き付けて、その接合部における周方向変位を計測する方法^{18),19)}も提案されている。原理的には半径方向の変位を計測するよりも周方向の変位を計測した方が精度よく計測できるが、土などの軟らかい材料では計測装置の供試体に与える影響のため、半径方向変位を計測する方法が主流になっていると考えられる。これらの研究に関するレビューは Scholey et al.²⁰⁾に詳しい。

これらの計測方法では軸ひずみと周方向ひずみまたは半径方向ひずみを同時に求めるためには、装置が大掛かりになり、現有の載荷装置や三軸セルをそのまま利用することが困難な場合が多い。また市販の計測装置では高価なものが多く、汎用的ではない。現有の三軸セルを利用して、簡便に縦横ひずみを計測できる方法がないことが現状である。一方実務においては、ボーリングコアから室内実験用の円柱供試体を作成することが能率的

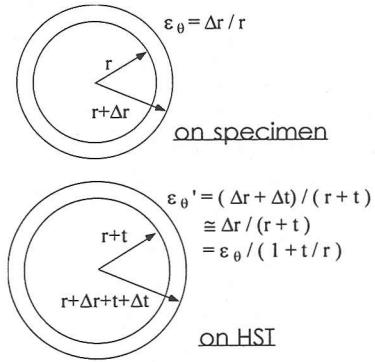


図-1 チューブ上の周方向ひずみの計算

であり、円柱供試体に対するひずみ計測方法が望まれるとともに、多孔質な岩石や不均質岩などの変形特性を決定することも重要であり、その種の岩石に対しても適用できることが望ましい。

そこで本論文では現有の三軸セルを利用して、不均質岩や湿潤供試体の軸方向および周方向ひずみを簡便に計測する方法として、熱収縮チューブによるひずみ計測方法を提案するとともに、その検証実験を実施した。越智らの研究²¹⁾によれば、軟岩の弾性係数を求めるためには 10^{-5} 以下のひずみレベルを用いなければならないが、本報告では 10^{-4} 以下のひずみレベルにおいて縦横ひずみを求めるることを研究の第一目標とする。精度の向上については今後の課題としておく。

2. 热収縮チューブを利用したひずみ計測方法

(1) HST 法の概念

ここで提案する方法は、熱収縮チューブ(Heat Shrinkable Tubing: 図表では HST と略記する)と呼ばれるテフロン樹脂を利用している。熱収縮チューブは、一般的には管の継ぎ手として、また岩石室内実験では硬岩の三軸圧縮試験や透水試験においてジャケット材料として用いられている²²⁾ものである。このチューブは名前の通りヒートガン等を用いて 70°C 以上に加熱することにより収縮し、供試体全体をほぼ均一に被覆することができる。提案するひずみ計測方法は、この熱収縮チューブが岩石の変形に伴い、均質に変形することを仮定し、チューブ上の軸ひずみと周方向ひずみを二軸のひずみゲージを用いて直接計測しようとするものである。このような計測方法をとることにより、ひずみゲージを直接貼付することが困難な湿潤供試体や不均質な岩石、例えば大きな空隙を含む多孔質な岩石などにおいて応力-ひずみ関係を局所的な縦横ひずみについて求めることができる。

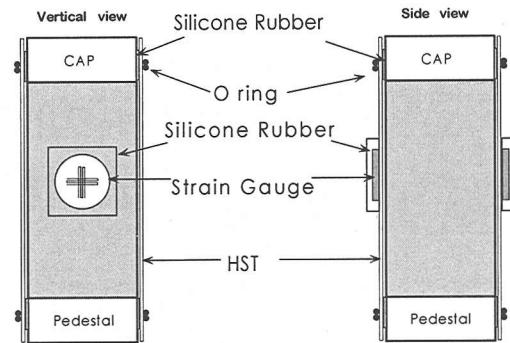


図-2 チューブのセットアップ概念図

表-1 热収縮チューブの物性値

単位体積重量 (g/cm³)	0.64
引張時弹性係数 (GPa)	1.6
ボアソン比	0.5

チューブには厚みがあるために、チューブ上で計測した周方向ひずみは供試体上の周方向ひずみに換算する必要がある。図-1を参考にして供試体上およびチューブ上の周方向ひずみを計算すると、変形に伴うチューブの厚さ変化が無視できるほど小さい場合、供試体上の周方向ひずみ ϵ_θ はチューブ上の周方向ひずみを ϵ'_θ として、

$$\epsilon_\theta = \epsilon'_\theta \left(1 + \frac{t}{r}\right) \quad (1)$$

と表わせられる。ここに、 t はチューブの厚さ、 r はチューブの内径である。以降の実験において、熱収縮チューブ上で計測した周方向ひずみを供試体上で計測した周方向ひずみと比較する場合には、この式を用いて換算するものとする。

熱収縮チューブには様々な種類があるが、本研究で用いた熱収縮チューブは FURON 社製 FEP である。チューブの物性値を表-1に示す。表には後章で述べる実験によって計測した値も合わせて表示している。チューブの厚さは熱収縮後の実測平均値で 0.50mm である。

(2) チューブのセットアップ方法

提案するひずみ計測方法は熱収縮チューブ上のひずみを計測するほかは、岩石のひずみ計測に多く用いられているように、供試体表面に直接ひずみゲージを貼付する方法と全く同じであり、非常に簡便である。チューブおよびひずみゲージのセットアップの概念図を図-2に、またセットアップ時の作業の流れを図-3に示す。

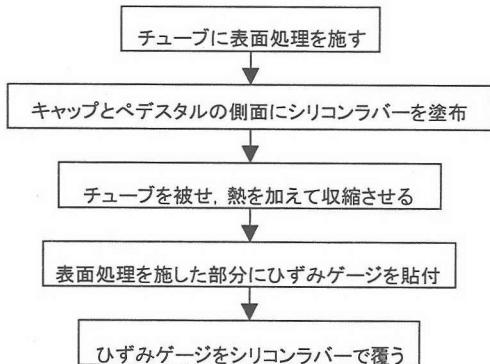


図-3 セットアップ時における作業の流れ

表-2 ダミー供試体の弾性定数

弾性係数 E(GPa)	ポアソン比 ν	体積弾性係数 K(GPa)
0.11	0.49*	19.6

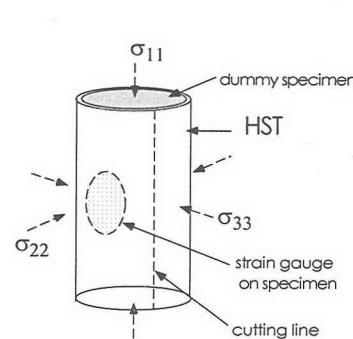
* ポアソン比は E および K から算出。

セットアップ方法は、まずテフロン樹脂であるチューブには直接接着剤を使用することができないため、ひずみゲージを貼り付ける位置をあらかじめ表面処理材で処理して、接着できるようにしておく。ここでは表面処理材として潤工社製テトラエッチを用いた。次に、キャップ・ペデスタルとチューブ間を止水するために、キャップとペデスタルに均一にシリコンラバー(信越シリコーン：KE45W)を塗布した後、この上から図-2 のように供試体全体を熱収縮チューブで覆い、70°C以上の熱を加えて均一に収縮させる。供試体の温度が室温程度に低下したことを確認したのちに、表面処理を施したチューブ上に二軸ひずみゲージを貼付する。最後にひずみゲージを外気から遮断し、また三軸試験にも適用できるように、ひずみゲージをシリコンラバーで被覆する。

(3) チューブの熱収縮による初期拘束効果

熱収縮チューブを巻きつけることにより、供試体には拘束圧力が作用することになる。この初期拘束圧力の大きさを調べるために、ウレタン樹脂からなるダミー供試体を用いて次のような試験を実施した。はじめに、ダミー供試体の弾性定数を通常の一軸圧縮試験と拘束圧を上昇させたときの変形から実験的に求める。次に図-4(a)のように、この供試体に直接ひずみゲージを貼付したあと熱収縮チューブを巻きつける。ひずみゲージからの出力が十分安定したことを確認したのち、チューブを図中の切り取り線に沿って取り外し、供試体の弾性回復量を計測する。

ダミー供試体は弾性的に挙動し、表-2 のような弾性定数が得られた。試験条件を弾性体の構成則、



(a)

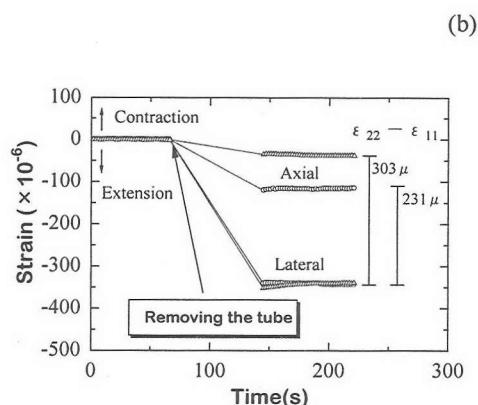


図-4 チューブ切り離し実験

(a) 実験の説明図、(b) 供試体の弾性回復量

$$\sigma_{ij} = \frac{Ev}{(1-2\nu)(1+\nu)} \delta_{ij} \epsilon_{kk} + \frac{E}{1+\nu} \epsilon_{ij} \quad (2)$$

に代入すると、チューブを巻き付けた状態における供試体の主応力状態は、図-4(a)を参照して、

$$\sigma_{11} = \frac{Ev}{(1-2\nu)(1+\nu)} \epsilon_{kk} + \frac{E}{1+\nu} \epsilon_{11} = 0 \quad (3)$$

$$\sigma_{22} = \sigma_{33} = \frac{E}{1+\nu} (\epsilon_{22} - \epsilon_{11}) \quad (4)$$

と記述できる。ここに E はヤング率、 ν はポアソン比である。熱収縮チューブを切り離すことで生じた弾性回復量を上式に代入すると、開放された応力が求まる。この開放された応力は熱収縮チューブによる拘束圧力に相当すると考えられる。

実験結果を図-4(b)に示す。チューブの切り離しに伴い、軸方向ひずみおよび周方向ひずみとも伸張している。軸ひずみが伸長しているのはチューブと供試体間の摩擦の影響と考えられる。何回かの実験によって求めた弾

表-3 田下石の物性値

比重	乾燥密度 g/cm ³	間隙率 %	一軸圧縮強度(乾燥) MPa
2.48	1.93	22.0	14

性回復量 ($\varepsilon_{22} - \varepsilon_{11}$) は 231~472 μ の範囲にあった。ここではこれらの値を式(4)に当てはめて、拘束圧力の範囲を求めてみると、17~34kPa に相当する。したがって熱収縮チューブを巻き付けた段階で、この程度の初期拘束圧力が発生していることになる。またせん断に伴う供試体の体積変化によっても、チューブによる拘束圧力が変動すると考えられるが、この問題は第4章「せん断時におけるチューブによる拘束効果」において検討することとして、次章に述べる方法を用いて、熱収縮チューブと供試体に貼り付けたひずみゲージの出力を実験的に比較することとした。

3. 検証実験

(1) 実験方法

熱収縮チューブ上のひずみを計測するうえで特に問題となるのは、チューブと供試体間のすべりの発生と軸ひずみの計測方法、またどの程度までのひずみレベルを計測できるかである。載荷に伴い周方向ひずみは伸張することが予想されるので計測しやすいと考えられるが、軸ひずみは収縮側であるために、チューブが座屈する変形モードとなる場合には計測することができない。本手法によりチューブ上のひずみを計測できるかどうかを検討するために、次のような一軸圧縮条件下において載荷・除荷実験を実施することとした。

試験に用いた岩石は新第三紀凝灰岩、通称田下石であり、直径 5cm、高さ 10cm の乾燥供試体とした。田下石の物性値を表-3 に示す。載荷・除荷実験におけるひずみゲージの貼り付け方は図-5 に示したように、まず円柱供試体の中央よりやや上方に直接ひずみゲージを貼付したあと、供試体全体に熱収縮チューブを巻き付ける。次にチューブ上にひずみゲージを貼付し、さらにその上をシリコンラバーで覆う。2 つのひずみゲージを貼り付ける位置は、円柱軸に平行な片側面上に、上下対称とする。検証実験は載荷・除荷過程におけるこの 2 つのひずみゲージからの出力を比較するものである。

(2) 0.05%までのひずみレベルにおける実験結果

まずチューブと供試体間のすべりの影響を見るために、図-5 中に「Glue」と表示した部分においてチューブと供試体間をエポキシ樹脂を用いて接着した場合と、接着しない場合を比較することとした。載荷方法は、図

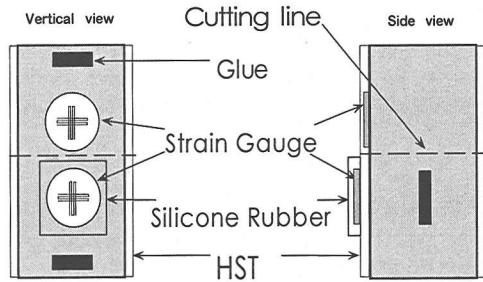


図-5 検証実験におけるひずみゲージの貼り付け位置

-6(a)のように、直接貼付したひずみゲージの出力が 500 μ 以下のひずみレベルにおいて、外部変位速度を一定として載荷除荷を 2 度繰り返した。

仮に供試体が均質であり、理想的に変形する場合、供試体とチューブ間にすべりが生じなければ、両方のひずみゲージからの出力は一致し、図-6(b)中の傾き 45° の破線線上にプロットされる。図-6(b)に示したチューブと供試体間を接着しない場合の実験例を見ると、軸ひずみ・周方向ひずみとも一回目の載荷において破線からずれを生じており、その後の除荷、再載荷・除荷過程ではほぼ同一の直線上にのっていることがわかる。上述したように、周方向ひずみは原理的に計測しやすいので、直線部分の周方向ひずみの傾きは 45° に近い。

一方、チューブと供試体の間を接着した場合の実験例を図-7 に示した。この場合には 1 回目の載荷から両方のひずみゲージからの出力はよく一致し、直線的である。図-6, 7 を比較すると、チューブと供試体の間を接着しない場合の一回目の載荷において、ずれを生じている原因是、チューブと供試体間の密着性が悪く、すべりを生じたためと考えられる。したがってチューブ上のひずみを計測する上ではこの密着性を十分によくしておく必要がある。ただし拘束圧を負荷した三軸圧縮実験では供試体とチューブ間の密着性が向上し、それに伴い境界に作用する摩擦力が大きくなるために、供試体とチューブを接着する必要はなくなるものと予想される。三軸圧縮試験において供試体とチューブ間を接着する必要があるかどうかについては今後の課題としたい。本稿では熱収縮チューブを用いたひずみ計測方法として、特に一軸圧縮試験の場合には、接着剤などを用いて供試体とチューブ間は接着する必要があるとしておく。

今回試験に用いた田下石の特徴として、0.05%以下のひずみレベルにおける載荷・除荷過程によっても繰り返しの影響が大きく、その結果として図-7(c)の応力-ひずみ関係にも若干現れているように残留ひずみを生じることがあげられる。ここでは改めて図を示さないが、このような試料についても本手法を用いて残留ひずみ

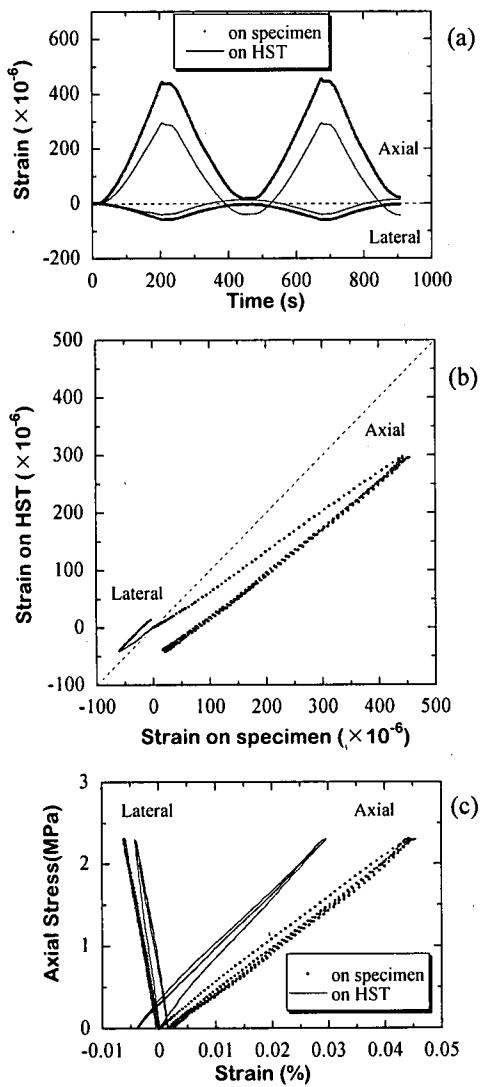


図-6 供試体とチューブ間を接着しない場合の典型的な実験結果

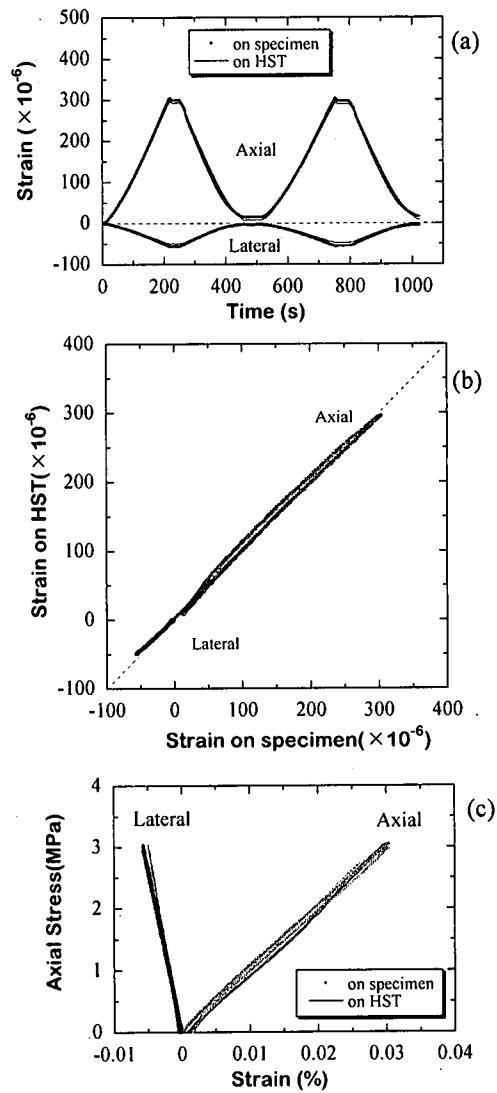


図-7 供試体とチューブ間を接着した場合の典型的な実験結果

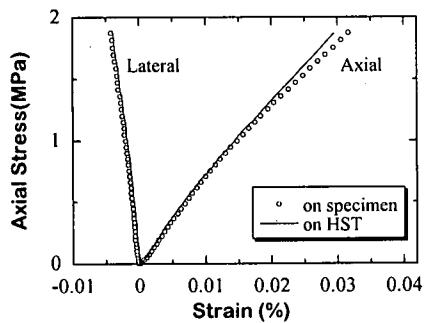


図-8 直接ひずみゲージを貼付した側のチューブを半分切り離した場合の応力-ひずみ関係

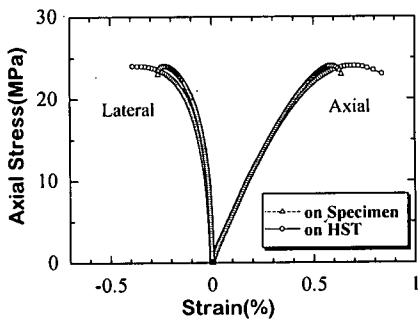
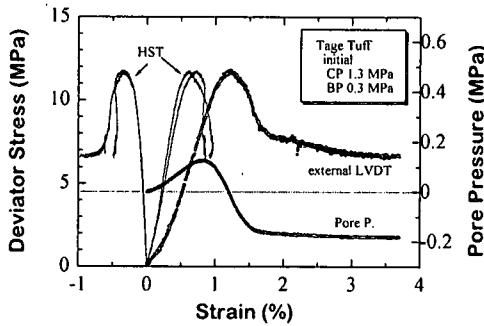


図-9 破壊時までの応力-ひずみ関係



図—10 田下石の圧密非排水試験結果

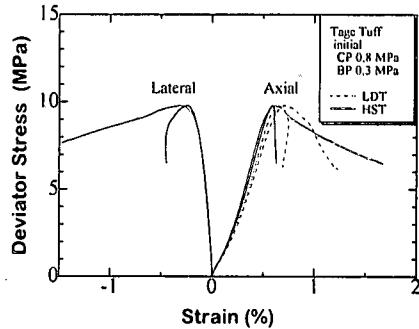
を計測することが可能である。

各供試体について、本手法で求めた弾性係数とP波S波速度測定から求めた弾性定数との比較は行っていないが、いくつかの供試体において8GPa程度の動弾性係数が得られている。この値は図—6,7において 10^4 までのひずみレベルにおいて求めた弾性係数値($E_d=6\sim10$ GPa)に近い。

ところで上述の方法では、供試体全体にチューブによる初期拘束圧力が作用している状況における比較となっている。ここでは 10^4 以下の初期拘束圧を受けた岩石の変形特性に与える影響を調べるために、図—5に破線で示した位置から上半分のチューブを切り離し、一軸圧縮試験を実施した。その結果を図—8に示す。チューブの有無に関わらず、0.015%までの応力—ひずみ関係はほぼ同様であり、田下石程度の軟岩においてはこの程度のひずみレベルにおける変形特性へのチューブによる初期拘束圧力の影響は小さいと考えられる。これ以上のひずみレベルにおいて、チューブ上のひずみが小さく評価されているのは、先に述べたチューブと供試体間のすべりによるものと考えられる。

(3) 破壊までのひずみレベルにおける実験結果

破壊時までのひずみを本手法で計測できるかどうか確認するために、前節で使用した供試体を破壊まで載荷することとした。試験に用いた供試体は図—5に「Glue」と示した位置を接着して固定してあるものである。試験結果を図—9に示す。破壊直前までは軸ひずみ・周方向ひずみとも、直接供試体上のひずみとチューブ上のひずみは非常によく一致していることがわかる。破壊付近では両者に若干の差違が見られるが、これは供試体の破壊が局所的に発生したためか、あるいは破壊付近では供試体とチューブ間で局所的なすべりが発生するために、チューブ上で計測されるひずみはゲージを貼り付けた付近のひずみの平均的な値を計測しているためであると考えられる。いずれにしても、チューブ上で計測された



図—11 LDT を用いたひずみ計測結果との比較

0.7%前後の破壊時のひずみは乾燥した田下石の破壊ひずみとしては平均的な値である。

以上の結果より、田下石程度の弾性定数と破壊ひずみを有する岩石に対しては、本手法を用いて 10^4 のひずみレベルから破壊時までの応力—縦横ひずみ関係を求めることができると考えられる。

(4) 三軸圧縮試験への適用例

本手法の三軸圧縮試験への適用例として、田下石の圧密非排水試験を実施した。ここでは図—2に示した本手法のチューブセットアップ方法に従い、チューブの前面と背面の2箇所にひずみゲージを設置している。初期拘束圧1.3MPa、背圧0.3MPaを負荷し、初期有効拘束圧を1.0MPaとした。

試験結果を図—10に示す。図には外部変位計(LVDT)を用いて計測した変位から算出したひずみ値も合わせて表示している。チューブ上で計測した軸ひずみ・周方向ひずみとも、一軸圧縮試験同様、破壊時まで計測できており、特に周方向ひずみについては2枚のひずみゲージの出力が非常によく一致している。供試体内部で計測した軸ひずみは外部変位計から求めた軸ひずみの半分程度である。

しかし破壊後のひずみは軸ひずみ・周方向ひずみともゲージからの出力は得られているが、信頼性のあるデータとして計測できとはいえない。これは破断面を生じるような変形の局所化が発生することにより、チューブの変形が均質でなくなったためと考えられる。このことはチューブが均質に変形することを仮定している本手法の限界を示しており、破壊後の挙動はほとんど計測できないものと考えられる。

(5) LDTによるひずみ計測結果との比較

検証実験の最後として、内部計測方法として代表的なLDTとの同時計測を実施した。試験は圧密非排水条件であり、初期有効拘束圧を0.5MPaとした。この条件は

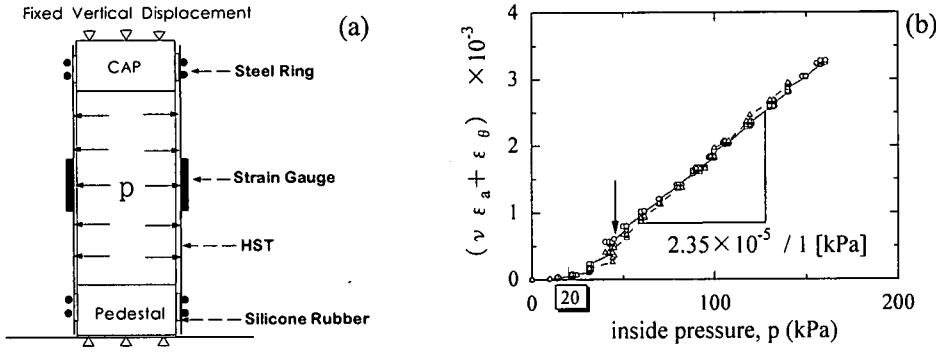


図-12 周方向ひずみと内圧の関係

「岩の一軸および三軸試験に関する全国一斉試験」²³⁾における試験条件とほぼ同一の試験条件であり、直接比較が可能である。

試験結果を図-11に示す。図より、応力-ひずみ関係の概略は両手法ともよく一致していることがわかる。破壊強度は 9.8MPa、破壊ひずみの平均値は HST 法で 0.60%、LDT で 0.67% である。また 0.1% レベルまでのひずみにおいて算出した弾性係数は HST 法で 1.35GPa、LDT で 1.27GPa である。 E_{50} は HST 法で 2.10GPa、LDT で 1.85GPa である。応力-一軸ひずみ曲線の立ち上がり部分が下に凸となっているのは、堆積面に垂直に載荷した場合における田下石の材料物性であり、このため E_{50} の方が立ち上がり部分の弾性係数よりも大きくなっている。HST 法からはポアソン比も求まり、ひずみレベルによって非常に非線形ではあるが、0.1% レベルまでのひずみにおいて算出した値は 0.08 程度である。図-11 の場合、どちらも若干 HST 法のほうが大きい弾性係数となっているが、他の試験結果では逆の場合もあり、ばらつきによるものと解釈している。これらの値は、「岩の一軸および三軸試験に関する全国一斉試験」²³⁾結果における平均的な物性値となっている。

4.せん断時におけるチューブによる拘束効果

圧縮試験後に熱収縮チューブを供試体から切り離した場合、チューブ上のひずみゲージからの出力はほぼ 0 付近まで回復するため、熱収縮チューブはほぼ弾性的に挙動していると考えられる。このため、せん断に伴う体積変化により供試体に作用するチューブの拘束圧力も軸差応力に伴って変化すると考えられる。そこでその効果を調べることとした。

Kuerbis and Vaid²⁴⁾に従えば、チューブを弾性円筒殻と仮定し、チューブ内の軸ひずみ、周方向ひずみ、半径方

向ひずみをそれぞれ $\varepsilon_a^T, \varepsilon_\theta^T, \varepsilon_r^T$ とし、これに対応する応力を $\sigma_a^T, \sigma_\theta^T, \sigma_r^T$ とすれば、チューブ内の構成関係は、

$$\varepsilon_a^T = (\sigma_a^T - \nu_T \sigma_\theta^T - \nu_T \sigma_r^T) / E_T \quad (5)$$

$$\varepsilon_\theta^T = (-\nu_T \sigma_a^T + \sigma_\theta^T - \nu_T \sigma_r^T) / E_T \quad (6)$$

$$\varepsilon_r^T = (-\nu_T \sigma_a^T - \nu_T \sigma_\theta^T + \sigma_r^T) / E_T \quad (7)$$

となる。ここで E_T と ν_T はそれぞれチューブの弾性係数とポアソン比を示す。両端が自由な円筒殻に均一な内圧 p が作用している場合、チューブに作用する周方向応力 σ_θ^T は、

$$\sigma_\theta^T = \frac{r}{h} p \quad (8)$$

と表わせる。ここに、 r はチューブ中立面の半径、 h はチューブの厚さである。実験に用いたように、供試体へチューブをセットしたことを想定すると、 $r=2.5\text{cm}$ 、 $h=0.05\text{cm}$ であるから、 $r \gg h$ と考えることができる。このときチューブ内側境界での力の釣り合いと式(8)より、 $p \approx \sigma_r^T \ll \sigma_\theta^T$ である。 $\sigma_r^T = 0$ と仮定すると、式(5), (6) より

$$\sigma_a^T = (\varepsilon_a^T + \nu_T \varepsilon_\theta^T) E_T / (1 - \nu_T^2) \quad (9)$$

$$\sigma_\theta^T = (\nu_T \varepsilon_a^T + \varepsilon_\theta^T) E_T / (1 - \nu_T^2) \quad (10)$$

となる。よって式(10)を式(8)に代入すると、チューブのひずみと内圧の関係は

$$p = \left(\frac{h}{r} \right) \frac{E_T}{1 - \nu_T^2} (\nu_T \varepsilon_a^T + \varepsilon_\theta^T) \quad (11)$$

と表わされる。

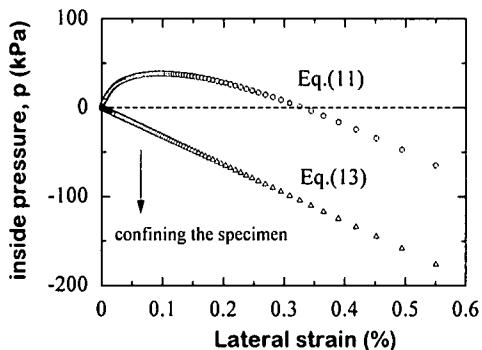


図-13 せん断に伴うチューブによる拘束効果

そこで、図-12(a)のように供試体とチューブをセットし、キャップとペデスタルの上下変位を拘束して内圧を上昇させる実験を行い、この関係を求めてみた。中に入れる供試体にはチューブに圧力が伝えやすいように透水性の高い試料が望ましい。ここでは透水係数が $5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ と大きい Berea 砂岩を用いた。また内圧を高めるために、O リングの代わりに鋼製リングを用いて止水力を高めているが、実験データを見ると、内圧が高くなるに従い、周方向ひずみは伸長し、軸ひずみは収縮しており、供試体両端での軸方向の変形はほとんど拘束されていないと考えられる。実験結果を図-12(b)に示す。式(11)中のひずみは載荷初期には内圧の上昇に関係なくほぼ一定であるが、20kPa を超えるあたりから増加はじめる。図中矢印で示した内圧付近から顕著に増加はじめ、この点以降の内圧の上昇に対してはほぼ直線的に増加する。矢印で示した内圧は、(23)節で述べたチューブを巻き付けた際に供試体に負荷された初期拘束圧力の最大値(34kPa)とほぼ等しく、この圧力まで変形が抑制されているものと解釈できる。

図-12(b)に示す実験結果の直線部分の傾きを求め、式(11)に代入すると、弾性係数 E が次のように求まる。

$$E_T = \left(\frac{r}{h} \right) (1 - \nu_T^2) \frac{p}{\nu_T \varepsilon_a^T + \varepsilon_\theta^T}$$

$$= \frac{2.5}{0.05} \times (1 - 0.5^2) \times \frac{1}{2.35 \times 10^{-5}} \quad (12)$$

$$= 1.6 \times 10^6 [\text{kPa}]$$

ここでチューブのポアソン比は、単軸引張試験から求めた 0.5 を適用している。チューブのポアソン比が単軸引張試験から求めた値と異なる場合、例えば 0 および 0.25 の場合を考えると、これらに対応する弾性係数値はそれぞれ 1.1 GPa , 1.2 GPa となり、ポアソン比の変化による弾性係数の変化は大きくない。また式(12)の値はそれらの中で最大値となっている。

せん断時における拘束圧力の変化は、試験中の軸ひずみと周方向ひずみを式(11)に代入することにより、概略を見積もることができる。例えば、図-9 に示した田下石の一軸圧縮試験における拘束圧力の変化は、図-13 のようになり、式(11)から求めた拘束圧力の変動はダイレイタンシーの開始までは減少し、その後ピークまで増加する。拘束圧力の変動幅は、103kPa 程度であり、岩石供試体を用いた三軸圧縮試験時には実用上ほとんど問題にならないと考えられる。

試験仕様では、供試体とチューブが摩擦によって一体となって挙動すると仮定しているために、チューブ内に軸方向応力が発生し、上記のような結果となる。仮に軸方向応力が発生しない条件を用いて、拘束圧力の変動を計算すると、式(9)の軸方向応力を 0 とおいたものを式(10)に代入すると、

$$p = \left(\frac{h}{r} \right) E_T \varepsilon_\theta^T \quad (13)$$

となる。この式を先の田下石の一軸圧縮試験結果に適用すると、破壊時には図-13 中に△印で示したように、176kPa の内圧が作用していることになる。実際には供試体の変形は上下端面で小さく、中央で大きいので、この値は供試体に作用する破壊時までの内圧の最大値に相当する。

実際にはチューブ内に軸応力が作用していると考えられるので、発生する拘束圧力は図-13 の式(11)に近いと考えられるが、大きくても式(13)を超えることはない。チューブ中に発生する軸応力が無視できない場合には式(9)を用いて軸応力を補正する必要がある。

ISRM 指針²⁹⁾では、岩石の三軸圧縮試験時における拘束圧力の変動幅は設定値の 2% 以内とされている。今回提案した方法では拘束圧が小さい場合にはこの指針には若干抵触するものの、簡便性や縦横ひずみの同時計測など有利な点も多い。拘束圧力の変動を小さくするためには、ひずみゲージの剛性による影響がない範囲で、弾性係数のより小さいチューブを用いることが望まれる。

5.おわりに

湿潤供試体や不均質な岩石などを対象として、三軸圧縮試験において供試体の縦横ひずみを計測できるような局所ひずみの計測方法として、熱収縮チューブを利用した方法を提案した。またその検証実験を実施し、三軸圧縮試験例を示した。本手法は簡便なひずみ計測方法として、破壊時までは十分に追随できると考えられる。また提案した手法は、三軸セルからのゲージ取り出し口さえ準備すれば、現有のセルをそのまま利用できる利点がある。一方、チューブのセットアップのため、側面排水

は困難であること、また残留変形状態ではチューブの変形が複雑になるため、残留応力を適切に評価できないなどのデメリットもある。

今後の課題としては、今回試験に用いた試料の弾性係数はチューブの弾性係数と同じか、大きいものばかりであるので、どの程度の軟岩まで適用できるかを明らかにする必要があることが挙げられる。またせん断時における拘束圧力の変動の評価が適切であるか、破壊基準に与える影響を調べることにより明らかにする必要がある。

謝辞：埼玉大学工学部建設工学科畠山健技官および同岩盤研究室学生佐々木勝君には実験の手伝いをしていただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Franklin, J. A. and Hoeck, E. : Developments in triaxial testing technique. *Rock Mechanics*, Vol.2, pp.223-228, 1970.
- 2) Atteigner, R. O. and Koppel, J. : A new method to measure lateral strain in uniaxial and triaxial compression tests. *Rock Mechanics Rock Engineering*, Vol.16, pp.73-78, 1983.
- 3) Skopek, P. and Cyre, G. P. : A resistance wire transducer for circumferential strain measurement in triaxial tests. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol.18, No.1, pp.106-111, 1995.
- 4) Hird, C. C. and Yung, P. C. Y. : The use of proximity transducers for local strain measurement in triaxial tests. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol.12, No.4, pp.292-296, 1989.
- 5) Cole, D. M., Durell, G., and Chamberlain, E. : Repeated load triaxial testing of frozen and thawed soils. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol.8, No.4, pp.166-170, 1985.
- 6) Clayton, C. R. I. and Khatruch, S. A. : A new device for measuring local axial strains on triaxial specimens. *Geotechnique*, Vol.36, No.4, pp.593-597, 1986.
- 7) Clayton, C. R. I., Khatruch, S. A., Bica, A. D. V., and Siddique, A. : The use of hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol.12, No.1, pp.69-76, 1989.
- 8) Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.-S. and Sato, T. : A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory. *Soils and Foundations*, Vol.31, No.1, pp.169-180, 1991.
- 9) Hoque, E., Tatsuoka, F., and Sato, T. : Measuring anisotropic elastic properties of sand using a large triaxial specimen. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol.19, No.4, pp.411-420, 1996.
- 10) Hoque, E., Sato, T., and Tatsuoka, F. : Performance evaluation of LDTs for use in triaxial tests. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol.20, No.2, pp.149-167, 1997.
- 11) Costa Filho, L. de. M. : Measurement of axial strains in triaxial tests on London clay. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol.8, No.1, pp.3-13, 1985.
- 12) Brown, S. F., Austin, G., and Overy, R. F. : An instrumented triaxial cell for cyclic loading of clays. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol.3, No.4, pp.145-152, 1980.
- 13) Burland, J. B. and Symes, M. J. : A simple axial displacement gauge for use in the triaxial apparatus. *Geotechnique*, Vol.32, No.1, pp.62-65, 1982.
- 14) Symes, M. J. and Burland, J. B. : Determination of local displacements on soil samples. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol.7, No.2, pp.49-59, 1984.
- 15) Jardine, R. J., Symes, M. J., and Burland, J. B. : The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus. *Geotechnique*, Vol.34, No.3, pp.323-340, 1984.
- 16) Anderson, W. F., Goodwin, A. K., Pyrah, I. C., and Salman, T. H. : Equipment for one-dimensional compression and triaxial testing of unsaturated granular soils at low stress levels. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol.20, No.1, pp.74-89, 1997.
- 17) Khosla, V. K. and Singh, R. D. : Apparatus for cyclic stress path testing. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol.6, No.4, pp.165-172, 1983.
- 18) Ingles, O. G., Lee, I. K., and Neil, R. C. : The influence of stress history on lateral strain. *Rock Mechanics*, Vol.5, pp.203-213, 1973.
- 19) Lasca, N. P., Burns, S. D., and Gajkowski, W. A. : A data acquisition system for testing the mechanical properties of ice. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol.3, No.1, pp.3-7, 1980.
- 20) Scholey, G. K., Frost, J. D., LoPresti, D. C. F., and Jamiolkowski, M. : A review of instrumentation for measuring small strains during triaxial testing of soil specimens. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol.18, No.2, pp.137-156, 1995.

- 21) 越智健三, 金有性, 龍岡文夫: ひずみ依存性と測定誤差を考慮した堆積軟岩の変形特性の検討. 土木学会論文集, No.463/III-22, pp.133-142, 1993.
- 22) 高橋学, 李小春, 張銘: 岩石透水試験のためのジャケット材料について. 応用地質, Vol.39, No.2, pp.217-220, 1998.
- 23) 岩の一軸および三軸試験方法検討委員会: 「岩の一軸および三軸試験に関する全国一斉試験」の実施および試験結果, 土と基礎, Vol.45, No.11, pp.72 - 74, 1997.
- 24) Kuerbis, R. H. and Vaid, Y. P. : Corrections for membrane strength in the triaxial test. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol.13, No.4, pp.361-369, 1990.
- 25) ISRM: Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstract*, Vol.20, No.6, pp.283-290, 1983.

(1999.1.13 受付)

LOCAL STRAIN MEASUREMENT OF ROCK USING HEAT SHRINKABLE TUBING

Masahiko OSADA, Tadashi YAMABE, Ryunoshin YOSHINAKA

and Kumi HAMANO

This paper describes a new technique of local strain measurement using heat shrinkable tubing for wet or highly imhomogeneous rocks. This technique, assuming that a specimen and the tubing are uniformly deformed, is to measure the axial and circumferential strains on tubing under deformation using ordinary strain gauges. The measured strains are converted into the strains on specimen. The validation tests under uniaxial and triaxial compression are carried out with dry and wet Tage tuff. The magnitude of confinement due to wrapping the specimen by tubing is also examined. This technique can be utilized as an easy method to simultaneously determine the elastic modulus and Poisson's ratio of wet or highly imhomogeneous rocks.