

# 泥水中でひずみゲージを岩盤に接着する方法の検討

田中 悠一<sup>1\*</sup>・谷 和夫<sup>2</sup>

<sup>1</sup>横浜国立大学大学院工学府（〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5 土木工学棟）

<sup>2</sup>横浜国立大学大学院工学研究院（〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5 土木工学棟）

\*E-mail: d08gc113@ynu.ac.jp

岩盤の強度・変形特性を評価する孔底三軸試験の経済性や作業性の向上などを目的とし、「小型孔底三軸試験装置」の開発を進めている。現在、試験体のひずみを計測するシステムとしてひずみゲージを試験体の側面に接着する手法を検討しているが、孔底に試験体を作製した後に側面に付着する泥水の有無に関わらずひずみゲージの接着が可能か否かは不明確であった。

そこで、泥水中でのひずみゲージの接着方法および計測精度について、泥水中でひずみゲージを圧着した供試体に対する一軸繰返し載荷試験により検討した。その結果、泥水中におけるひずみゲージの接着は可能であると推測され、計測精度の向上が期待できることがわかった。

**Key Words :** triaxial test, strain gauge, drilling mud, uniaxial compression test

## 1. 背景・目的

Taberi & Tani (2007)<sup>1)</sup>は岩盤の強度・変形特性を原位置で評価することを目的とし、**図-1**および**写真-1**のようにボーリング孔の底部に試験体を作製し、そこに試験装置を挿入して三軸試験を行う「孔底三軸試験」を開発した。これまでに試験装置の試作および検証実験が行われてきたが、試験体のひずみの計測システムには以下に記す課題が残っており、実用化には至っていない。

**写真-2**に示す従来の孔底三軸試験装置には、試験体のひずみの計測に局所変位計（LDT）などの使用が検討されてきた<sup>2)3)</sup>。これらの変位計測器は繰返しの使用が可能である反面、試験体を覆うメンブレンの側面において変位の計測を行わなくてはならなかった。そのため、ボーリング用泥水が付着する試験体にメンブレンが追従することが確保されない限り計測の信頼性が担保されない。また、計測器を装着するために必要なスペースをセル内部に確保するため、三軸セルを挿入するための溝の幅が広くなり、複数回のボーリングや特殊な形状の掘削ビットを必要としていた。

そこで、試験体のひずみを計測する精度の向上と三軸セルを挿入するための溝の幅を縮減することを目的とし、**図-2**に示すように比較的安価な箔ひずみゲージを試験体のひずみの計測器として利用した新しい孔底三軸試験

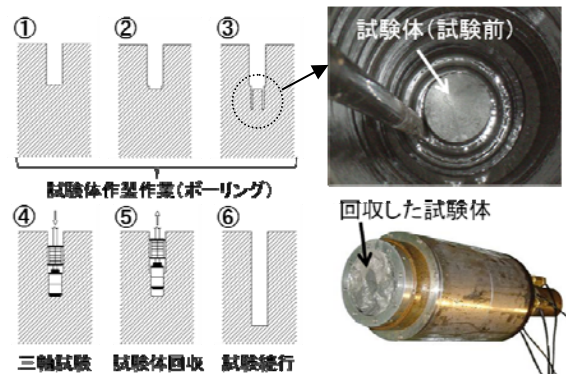


図-1 現場での試験工程<sup>1)</sup> 写真-1 試験前後の試験体<sup>1)</sup>

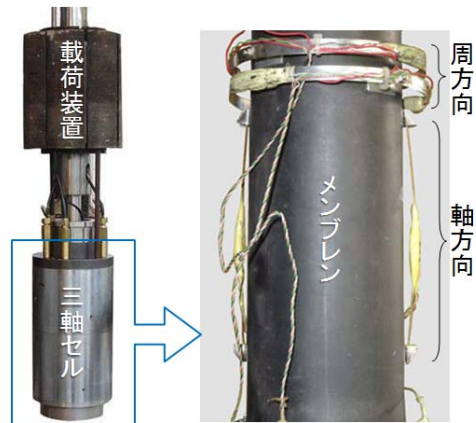


写真-2 従来の孔底三軸試験装置<sup>1)</sup>  
(左：全体、右：三軸セル内部)

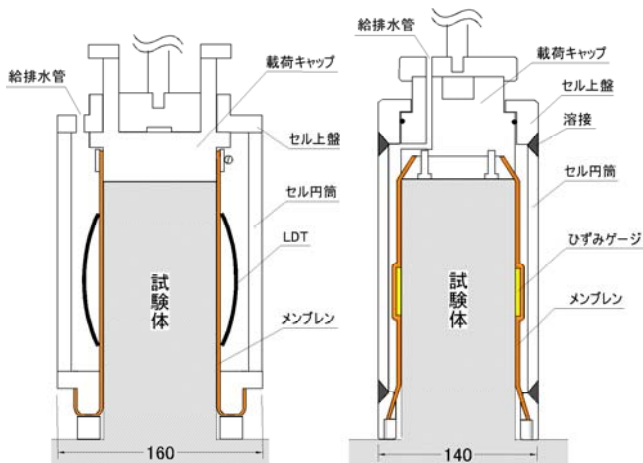


図-2 試験装置の三軸セル構造  
(左：従来型，右：提案する新型，単位:mm)

装置を提案した。しかしながら，原位置では掘削泥水によりボーリング孔底の試験体の側面に泥壁が形成される状況も考えられ，ひずみゲージの接着が困難であることが懸念される。そこで，室内で泥水中の岩石供試体へのひずみゲージの接着方法を検討した。

## 2. 実験内容

実験の概要を図-3に示す。実験では原位置におけるひずみゲージの接着環境を模擬し，ベントナイト泥水中に静置した供試体に対してひずみゲージの圧着を行った。なお，メンブレン拡張器は孔底三軸試験装置における三軸セルを模擬した器具で，装着されたメンブレンの内部に空圧を供給し，メンブレンの側面に取り付けられたひずみゲージを供試体に貼りつける役割がある。また，SPゲージは気中で供試体に手作業で接着したひずみゲージであり，LMゲージは泥水中の供試体にメンブレンを介した空圧で接着したひずみゲージとする。

### (1) 実験材料・器具

#### a) ベントナイト泥水

ベントナイト（クニゲルV1，クニミネ工業株）を水道水に加え，質量濃度10%，比重1.05の標準的な掘削泥水を作製した。

#### b) 供試体

直径 50 mm，高さ 100 mmの砂岩の円柱供試体（インド砂岩，インド産）を用いた。地盤工学会基準の超音波速度計測（JGS2110）により得られた S 波速度  $V_s$  は 951m/s，P 波速度  $V_p$  は 3359m/s，ヤング率  $E$  は 6.15GPa，せん断剛性率  $G$  は 2.11GPa，ポアソン比  $\nu$  は 0.456 である。

#### c) ひずみゲージ

ポリエステル箔ゲージ（株東京測器研究所，PFL-10-

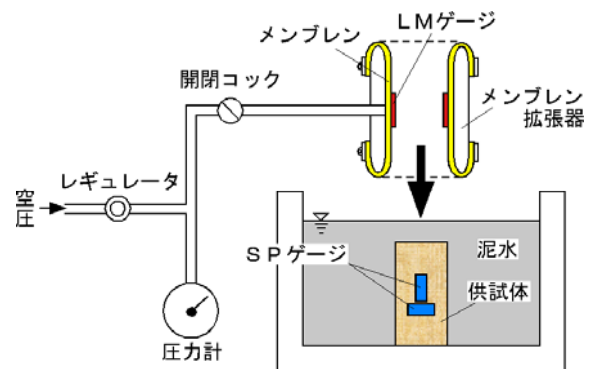


図-3 実験概要（ひずみゲージの圧着作業）

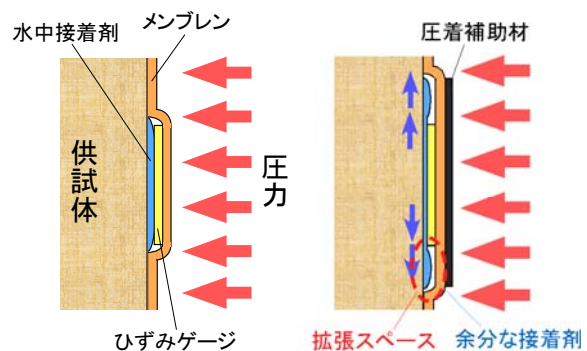


図-4 圧着補助材の機能

(左：圧着補助材なし，右：圧着補助材あり)

11) を使用した。寸法はベースが縦17mm，横5mm，ゲージ長が10mmである。

#### d) ひずみゲージの接着剤

ひずみゲージの接着剤は気中用と水中用を用意した。気中用はシアノアクリレート系瞬間接着剤（株東京測器研究所，CN-E），水中用はエポキシ系2液混合型接着剤（株ソテック，特注品，以降「水中接着剤」）である。

特注した水中接着剤は泥水中で水分を吸収しながら硬化反応を生じるとともに，多少の泥水は接着剤の一部として取り込む性質を有する接着剤である。主剤はビスフェノールAエポキシとウレタン変性エポキシをベースに，水中接着性向上のための添加剤と流動性を調整するためのシリカ系無機質粉，着色のための酸化チタン粉を混合したものである。また，硬化剤は疎水性の変性ポリアミンに硬化速度を早くするための硬化促進剤，流動性を調整するためのシリカ系無機質粉を添加したものである。なお，主剤と硬化剤を混ぜ合わせると味噌のような硬さで，硬化後の硬さをバーコル硬度計（Barber Colman Company，GYZI 935）で測定した結果，硬質の塩化ビニルと同程度であった。

#### e) メンブレンとメンブレン拡張器

メンブレンは円筒型のラテックスゴム（外径50mm，高さ180mm，厚さ0.25mm）を用いた。メンブレン拡張器は内

表-1 実験ケース

Case	圧着圧力 $p$ (kPa)	圧着 補助材	塗布厚さ $t_p$ (mm)
1	50	なし	0.50
2			1.00
3			1.50
4			2.00
5			0.20
6	100	あり	1.50
7			0.20

径62mm, 高さ105mm, 厚さ6mmの円筒型で, アクリルで作製した。

#### f) 圧着補助材

泥水中の試験体にひずみゲージを接着する際には, 試験体周辺の泥水・泥膜をゲージ接着面の外へと押し出し, 十分な分子間力が得られるように接着剤を接着面に極微小な距離まで接近させなくてはならない。このためにはある程度の厚みをもたせて水中接着剤を塗布し, 圧力による接着剤の拡がりを利用して接着面に付着した泥水の大部分を接着面外へと押し出す必要がある。

圧着補助材は図-4のように, 加圧時にメンブレンの変形が水中接着剤の拡がる範囲(拡張スペース)を狭めてしまわないように, 剛性の高い材料により拘束する目的で使用。清涼飲料水などに使われる厚さ0.19mmのスチール缶を用い, ひずみゲージに塗布した水中接着剤が加圧時に0.1mm程度の厚さまで拡がる計算で, 縦50mm, 横40mmの長方形型に加工したものである。なお, 横方向はメンブレン拡張器の内径62mmに合わせて湾曲させた。

## (2) 実験方法

実験は以下の①～⑤の手順で行い, 泥水中の供試体へのひずみゲージの接着方法, 接着したひずみゲージの計測精度および接着状態を検討した。

### ① SPゲージの接着

供試体の軸・周方向に2枚ずつひずみゲージ(SPゲージ)を接着し, シリコンゴムで防水コーティングする。接着剤はCN-Eを使用する。

### ② 供試体の飽和および泥水中への静置

水道水を入れた容器の中に約1日間供試体を入れる。その後, ベントナイト泥水中で1日間静置する。

### ③ LMゲージの圧着(図-4参照)

メンブレン拡張器にメンブレンを装着しその側面に耐水性両面テープを使ってひずみゲージ(LMゲージ)を貼り付け, ゲージベースに水中接着剤を厚さ $t_p$ で塗布する。その後, メンブレン拡張器を泥水中の供試体に被せて上部に錘(質量は空圧の大きさにより変える)を乗せ, 空圧 $p$ (=50, 100kPa)をかけてLMゲージを供試体に圧

着する。圧着時の加圧養生時間は20時間とする。

### ④ 一軸繰返し載荷試験

供試体を泥水中から取り出し, メンブレン拡張器を取り外して一軸繰返し載荷試験を行う。供試体のヤング率より最大軸ひずみ100 $\mu$ を想定した弾性範囲内で最大軸応力 $\sigma_{\max}$ を0.20, 0.40, 0.60MPaとし, 変位制御で軸ひずみ速度を毎分0.05%とした。

### ⑤ 接着状態の確認

LMゲージにおける硬化した水中接着剤の厚さ $t_h$ を計測する。 $t_h$ は, 供試体から剥がした接着剤の中心軸(軸方向ゲージは縦中心軸, 周方向ゲージは横中心軸)上の厚みをノギスで測定した。

## (3) 実験ケース

LMゲージの計測値の信頼性に影響を与える因子として, 圧着圧力 $p$ の大きさ, 圧着補助材の有無, LMゲージに塗布する水中接着剤の厚さ $t_p$ , 水中接着剤の性能が挙げられる。今回は水中接着剤の性能は変えず, その他の影響因子について表-1のCase1～7により検討を行う。

### a) 水中接着剤の塗布厚さの影響

Case1～4では水中接着剤の塗布厚さ $t_p$ 以外は同条件とし,  $t_p$ が計測結果に及ぼす影響を調べた。一般的にひずみゲージを接着する際には接着剤の層が薄ければ薄いほど計測精度は向上する。一方で,  $t_p$ が小さいと接着面外へ泥水を押し出す機能が十分に働かなくなるおそれがある。よってどのくらいの量の水中接着剤をひずみゲージに塗布すれば最適な接着および計測ができるかを検討した。

### b) 圧着補助材の有無による影響

Case3とCase6により圧着補助材の有無が計測結果に及ぼす影響を調べた。圧着補助材を装着した場合, 図-4に示すように水中接着剤の拡がり改善されると予想されるが, どの程度の改善が期待できるかは不明であった。またCase5により,  $t_p$ がごく小さい場合においても圧着補助材の効果によりひずみゲージの接着が可能になるか否かを検討した。

### c) 圧着圧力の大きさによる影響

Case5とCase7では圧着圧力 $p$ の大きさが計測結果に及ぼす影響を調べた。圧着圧力 $p$ が大きくなるとより強くひずみゲージに塗布した水中接着剤が押し出されるため, 硬化後の水中接着剤の厚さ $t_h$ は小さくなりかつ計測値の信頼性も向上すると思われる。その効果を確認する目的で実施した。

## 3. 結果と考察

(2)の実験手順④において得られた軸応力 $\sigma_a$ —平均ひ

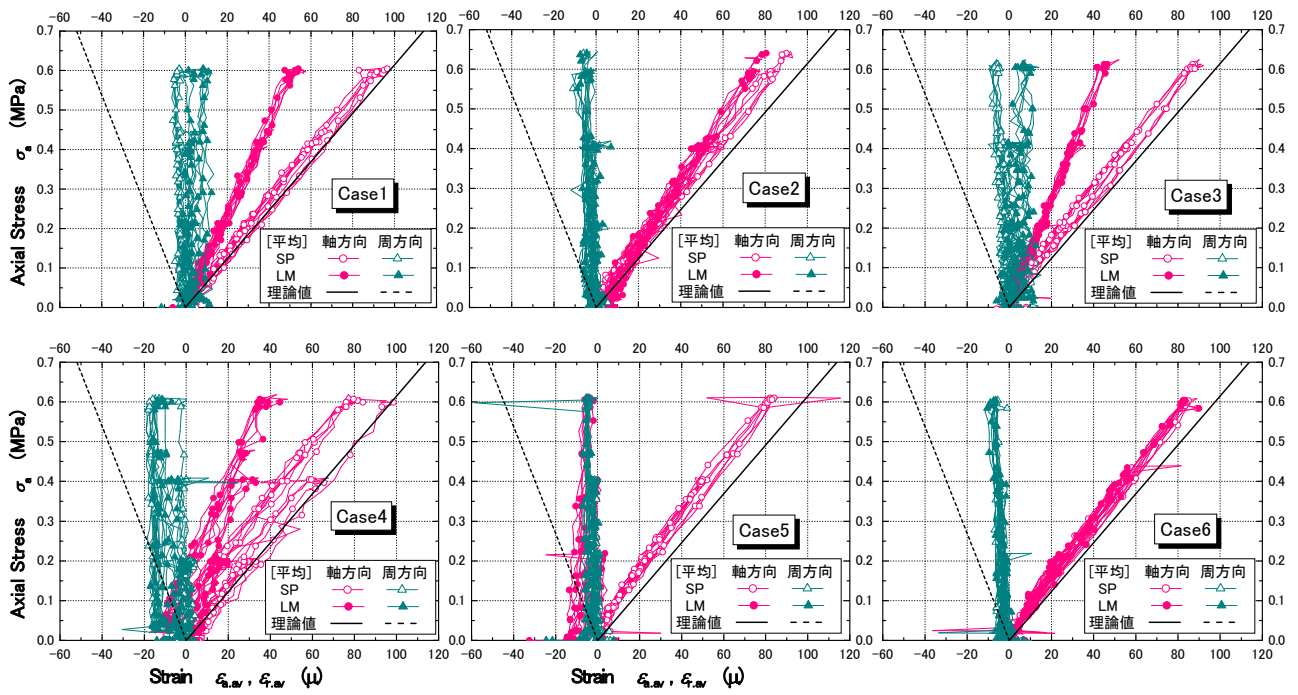


図-5 軸応力 $\sigma_a$ -平均ひずみ $\epsilon_{av}$ 曲線

SP…気中で供試体に手作業で接着したひずみゲージ  
 LM…泥水中の供試体にメンブレンを介した空圧で接着したひずみゲージ  
 理論値…供試体の弾性波速度  $V_s$ ,  $V_p$  から算出

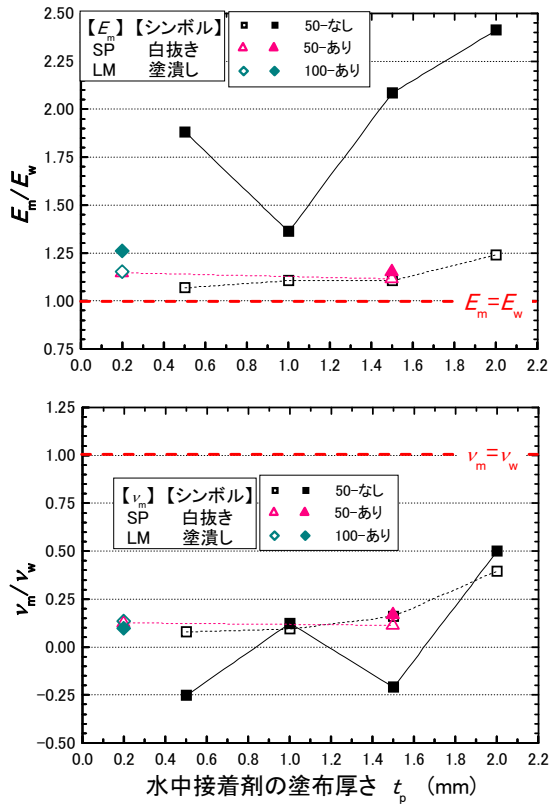
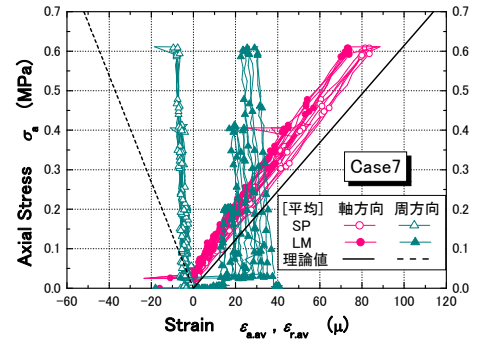


図-6 実測値から得た  $E$  と  $\nu$  の理論値に対する倍率と  $t_p$  の関係  
 (凡例右: 「圧着圧力  $p$  (kPa)」 - 「圧着補助材の有無」)

表-2 割線ヤング率  $E_m$  とポアソン比  $\nu_m$

Case	SP		LM	
	$E_{mSP}$ (GPa)	$\nu_{mSP}$	$E_{mLM}$ (GPa)	$\nu_{mLM}$
1	6.56	0.036	11.56	-0.115
2	6.80	0.043	8.37	0.056
3	6.80	0.073	12.82	-0.096
4	7.62	0.181	14.83	0.228
5	7.05	0.057	-840.80	-4.157
6	6.85	0.052	7.10	0.077
7	7.09	0.062	7.75	0.045

表-3 硬化後の水中接着剤厚さ  $t_h$

Case	塗布厚さ $t_p$ (mm)	硬化後の接着剤厚さ $t_h$ (mm)			
		軸①	軸②	周①	周②
1	0.50	0.20	0.30	0.60	0.35
2	1.00	0.45	0.50	0.25	0.55
3	1.50	0.70	0.70	1.10	1.05
4	2.00	0.70	0.70	1.20	0.95
5	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
6	1.50	0.35	0.50	0.75	0.75
7	0.20	0.15	0.10	0.25	0.15



ずみ $\epsilon_m$ 曲線を図-5に示す。なお、軸方向ひずみ $\epsilon_{ax}$ 、周方向ひずみ $\epsilon_{\theta}$ はSP・LMゲージにおける軸・周の各方向の2枚のひずみゲージの平均値であり、理論値は供試体の弾性波速度 $V_s$ 、 $V_p$ から求めたヤング率 $E_w$  ( $=6.15\text{GPa}$ ) およびポアソン比 $\nu_w$  ( $=0.456$ ) より算出した。

また、図-5の軸応力 $\sigma_a$ -平均ひずみ $\epsilon_m$ 曲線に対する線形回帰曲線から求めた供試体のヤング率 $E_m$  ( $=\Delta\sigma_a/\Delta\epsilon_m$ )、ポアソン比 $\nu_m$  ( $=\Delta\epsilon/\Delta\epsilon_a$ ) を表-2に示した。

さらに、弾性波速度 $V_s$ 、 $V_p$ から求めたヤング率 $E_w$ およびポアソン比 $\nu_w$ を真値とし、SP・LMゲージから求めたヤング率 $E_{mSP}$ ・ $E_{mLM}$ を $E_w$ で、ポアソン比 $\nu_{mSP}$ ・ $\nu_{mLM}$ を $\nu_w$ でそれぞれ除して無次元化した値を縦軸に、水中接着剤の塗布厚さ $t_p$ を横軸にとったグラフを図-6に示す。

前項(2)の実験手順⑤において測定した各実験ケースにおける硬化後の水中接着剤の厚さ $t_h$ は表-3に示す。なお、 $t_h$ の $t_p$ に対する縮小率別に色分けをし、縮小率が0%の場合は黒色、縮小率が50%未満の場合は灰色、縮小率が50%以上の場合は無色とした。

### (1) 水中接着剤の塗布厚さの影響

図-5のCase1~4を見ると、軸方向のLMゲージの計測値では繰返し载荷に伴い線形弾性的な挙動が確認できるため、接着不良はなかったと考えられる。一方、周方向のLMゲージの計測値においてはCase1とCase3で線形弾性的な挙動が確認できず乱れが大きいことから、接着不良の可能性が高い。Case4は軸・周方向ともにLMゲージの計測値は乱れているものの、部分的に線形弾性的な挙動が確認でき、またSPゲージにも同様の乱れが見られる。よってCase4でのLMゲージの計測値には測定器の電気的な誤差が含まれていると推測される。

図-6において圧着圧力 $p=50\text{kPa}$ 、圧着補助材なしの $E_{mLM}/E_w$ および $\nu_{mLM}/\nu_w$ と水中接着剤の塗布厚さ $t_p$ の関係(図中シンボル: ■)を見ると、水中接着剤の塗布厚さ $t_p$ の変化に伴い $E_{mLM}/E_w$ および $\nu_{mLM}/\nu_w$ が大きく変動している。 $E_{mLM}/E_w$ は1.36以上2.41以下と $E_{mLM}/E_w=1$ よりも大きな値の範囲をとっており、Case1 ( $t_p=0.5\text{mm}$ )~Case4 ( $t_p=2.0\text{mm}$ )のいずれも計測値の信頼性は低いと言える。ここでシンボル■を線分で結ぶと谷状の分布となっており、谷底に位置するCase2 ( $t_p=1.0\text{mm}$ )を境に $t_p$ の増減に伴って $E_{mLM}/E_w$ は増加している。このことから、 $t_p<1.0\text{mm}$ では $t_p$ の減少に伴って軸方向のLMゲージが供試体に部分的にしか接着されず十分な出力が得られないために、また $t_p>1.0\text{mm}$ では $t_p$ の増加に伴ってLMゲージの硬化後の水中接着剤厚さ $t_h$ が増加して接着面の剛性が高くなるために、 $E_{mLM}/E_w$ が増加したと推測される。次に、Case1~4の $\nu_{mLM}/\nu_w$ を見るとCase4の $\nu_{mLM}/\nu_w=0.499$ 以外は $\nu_{mLM}/\nu_w<0.25$ で理論値との乖離は大きい、Case2とCase4の $\nu_{mLM}/\nu_w$ は $\nu_{mSP}/\nu_w$ (図中シンボル: □)に近い値をとっている。周

方向のSPゲージの計測値が信頼できるとすれば、Case2とCase4の周方向のLMゲージの計測値の信頼性は高いと言える。しかし、 $t_p$ の変化に対して $\nu_{mLM}/\nu_w$ の変化には規則性が確認できなかった。

### (2) 圧着補助材の有無の影響

図-5のCase6を見ると、軸・周方向のLMゲージの計測値ともに繰返し载荷に伴い線形弾性的な挙動が確認できるため、接着不良はなかったと考えられる。これに対しCase3は(1)で述べたように周方向のLMゲージの計測値において線形弾性的な挙動が確認できず、接着不良の可能性が高かった。よって、圧着補助材の効果で周方向のLMゲージの接着不良が改善されたと考えられる。またCase5を見ると、Case6とは対照的に軸・周方向ともにLMゲージの計測値には線形弾性的な挙動が確認できず、全てのLMゲージが接着不良である可能性が高い。表-3の $t_h$ の値から、Case5では水中接着剤が加圧時にほとんど拡がらず、接着面からの泥水の除去が不十分であったと推測される。ゆえに、LMゲージへの水中接着剤の塗布厚さ $t_p$ が非常に小さい場合、圧着補助材を使用しただけでは接着不良となるおそれがあると考えられる。

図-6において水中接着剤の塗布厚さ $t_p=1.5\text{mm}$ における圧着圧力 $p=50\text{kPa}$ 、圧着補助材なしのCase3の $E_{mLM}/E_w$ (図中シンボル: ■)と、圧着圧力 $p=50\text{kPa}$ 、圧着補助材ありのCase6の $E_{mLM}/E_w$ (図中シンボル: ▲)を比較すると、差が0.93と非常に大きい。ゆえに、圧着補助材の効果により軸方向のLMゲージの計測値の信頼性が大きく改善されたと考えられる。またCase3とCase6の $\nu_{mLM}/\nu_w$ を見ると、両者とも0.25未満で理論値との乖離は大きい、Case6 ( $\nu_{mLM}/\nu_w=1.15$ )はCase3 ( $\nu_{mLM}/\nu_w=2.09$ )よりも $\nu_{mSP}/\nu_w$ (図中シンボル: □&△)に近い値をとっている。周方向のSPゲージの計測値が信頼できるとすれば、接着不良であった周方向のLMゲージを圧着補助材の働きにより適切に接着でき、かつ信頼性の高い計測も行えたと言える。

### (3) 圧着圧力の大きさの影響

図-5のCase7を見ると、軸方向のLMゲージは繰返し载荷に伴い線形弾性的な挙動が確認できるため、接着不良はなかったと考えられる。周方向のLMゲージの計測値にも繰返し载荷に伴う線形弾性的な挙動は確認できるが、除荷時に計測値が圧縮ひずみの方向に遷移する現象が見られ、他のひずみゲージの計測値にはこのような現象は見られない。このことから、Case7の周方向のLMゲージは測定器の電気的な誤差ではなく接着不良である可能性が考えられるが定かではない。これに対しCase5は(2)で述べたように全てのLMゲージが接着不良である可能性が高かった。ゆえに、圧着圧力 $p$ を50kPaから100kPaに増

大きさせたことにより、接着不良であったLMゲージを適切に接着することができたと考えられる。

図-6において水中接着剤の塗布厚さ $t_p=0.2\text{mm}$ における圧着圧力 $p=100\text{kPa}$ 、圧着補助材ありのCase7の $E_{mLM}/E_w$  (図中シンボル: ◆) を見ると、 $E_{mLM}/E_w=1.26$ で理論値との乖離はややあるものの、他のCaseの $E_{mLM}/E_w$ と比較して良好な値を示している。また、Case7の $v_{mLM}/v_w$ を見ると $v_{mLM}/v_w < 0.25$ で理論値との乖離は大きい、Case6と同様に $v_{mSP}/v_w$  (図中シンボル: ◇) に近い値をとっている。周方向のSPゲージの計測値が信頼できるとすれば、圧着圧力 $p$ の増大の効果で周方向のLMゲージの計測値の信頼性が高まったと言える。

## 4. まとめ

### (1) 結論

泥水中でひずみゲージを岩盤に接着する状況を模擬し、ベントナイト泥水中に静置した供試体に対するひずみゲージの接着方法を検討した。その結果、以下の知見を得た。

- ① 泥水中で泥壁を形成した岩石供試体に対しひずみゲージを接着することは可能である。
- ② ひずみゲージの計測値に水中接着剤の塗布厚さ $t_p$ が及ぼす影響を調べた結果、 $t_p < 1.0\text{mm}$ では接着不良により出力が低下し、 $t_p > 1.0\text{mm}$ では硬化後の水中接着剤厚さ $t_h$ が大きいため計測されるひずみが小さくなる傾向が見られた。
- ③ ひずみゲージの計測値に圧着補助材の有無が及ぼす影響を調べた結果、圧着補助材なしのCaseでは接着不良であった周方向のひずみゲージが圧着補助材を使ったCaseでは接着でき、かつ軸・周方向とも

に計測値の信頼性の向上が見られた。

- ④ ひずみゲージの計測値に圧着圧力 $p$ の大きさが及ぼす影響を調べた結果、 $p=50\text{kPa}$ では接着できなかった $t_p=0.2\text{mm}$ のひずみゲージが、 $p=100\text{kPa}$ のCaseでは接着することができた。また、計測値の信頼性も改善された。

### (2) 今後の課題

圧着方法や水中接着剤の硬さを改良することにより、水中接着剤の硬化後の厚みをより薄くする方法を開発する。また、不均一な岩盤の試験体に対するひずみゲージの接着に関しても今後検討する。

将来的には検討した接着方法をさまざまな岩種で適用可能な試験方法として発展させ、経済性、施工性も含め実用化を検討する。

### 謝辞

株式会社ソテックの松森氏にはひずみゲージ用の水中接着剤を開発していただきました。この場を借りて心より感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) Taheri, A. and Tani, K.: Improvements in down-hole in-situ triaxial testing system, *Proc. of 42<sup>nd</sup> Japan Geotech. Soc. Conf.*, pp.942-943, 2007.
- 2) 岸雅文, 谷和夫: 原位置孔底三軸試験における新しいひずみ計測方法の提案, 第11回岩の力学国内シンポジウム, A11, 2001.
- 3) 池野谷尚史, 鶴俊太郎, 金子進, 立川日出男, 谷和夫: 差動トランス式変位計測装置を利用した新しい原位置三軸試験装置の開発, 第35回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.145-148, 2006.

## STUDY ON THE METHOD TO ATTACH STRAIN GAUGES TO ROCK IN DRILLING MUD

Yuichi TANAKA and Kazuo TANI

It is being studied to improve the down-hole triaxial test method which evaluates mechanical properties of rock masses. As the system which measures the deformation of specimens, the method to attach strain gauges to the side of specimens with drilling mud was supposed. But it was uncertain whether strain gauges can measure the deformation of the specimen appropriately or not. Therefore, uniaxial cyclic load tests were conducted on the sand stone on which strain gauges were attached by air pressure in drilling mud. As a result, it was concluded that attaching strain gauges in drilling mud is possible and can expect improvement of the measurement precision.