

# ひずみゲージの圧着を特徴とした 原位置孔底三軸試験装置の室内検証実験

田中 悠一<sup>1\*</sup>・谷 和夫<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東急建設株式会社 土木総本部 土木技術部 (〒150-8340 東京都渋谷区渋谷1-16-14 渋谷地下鉄ビル)

<sup>2</sup>横浜国立大学 大学院 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

\*E-mail: tanaka.yuuichi@tokyu-cnst.co.jp

筆者らは、岩盤の強度・変形特性を評価する手法として「原位置孔底三軸試験装置」の開発を進めている。原位置孔底三軸試験は、岩盤にボーリングを行い、その孔底部に作製した円柱試験体に専用の特殊な鋼製セルを被せ、原位置で三軸試験を行う試験方法である。今回、試験体側面に機械的にひずみゲージを接着し変形計測を行うシステムを組み込んだ原位置孔底三軸試験用の新しいセルを試作した。本稿では、試作したセルと原位置の試験孔・試験体を模擬した円筒装置・モルタル試験体を使用し、一連の原位置孔底三軸試験の工程を実験的に検証した。その結果、セルの性能不足や作業工程等の点で今後改良が必要であるが、超音波速度計測結果と類似したひずみデータを得ることに成功した。

**Key Words :** *in-situ, triaxial test, bore hole, strain gauge*

## 1. はじめに

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、「原位置孔底三軸試験」の開発が行われている。原位置孔底三軸試験の作業工程を図-1に示す。

これまでに数種類の試験装置の試作および検証実験が行われてきたが<sup>1)</sup>、差動トランス変位計や局所変位計を使用した計測システムでは、三軸セル内の限られたスペースで計測点数を確保するのは困難であり、また、試験装置の組立て作業の煩雑化も招いていた。これに加え、試験装置の载荷能力の向上や、試験孔作製時の作業工程の簡素化等、高精度な強度・変形特性の評価や多種多様な岩盤への適用に向けた課題がいくつか残されていた。

そこで著者らは、これらの課題を解決すべく、安価で実績の多いひずみゲージを計測システムに導入し、直接ひずみゲージを接着して試験体の変形を計測する新しい原位置孔底三軸試験装置の提案および設計を行った<sup>2)</sup>。現在までに、設計に基づき、写真-1に示すような新しい原位置孔底三軸試験装置の三軸セルを試作し、室内検証実験により性能の照査および改良を行っている。

本稿では、新しい原位置孔底三軸試験装置の室内検証実験の結果について報告する。

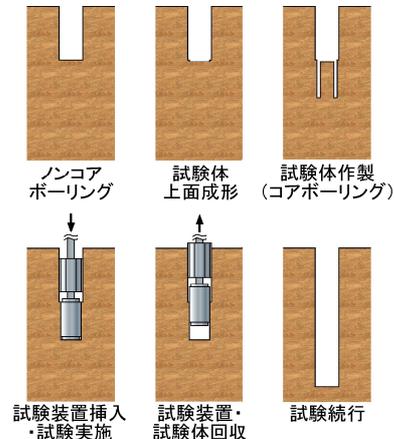


図-1 原位置孔底三軸試験の作業工程



写真-1 新しい三軸セルの外観

## 2. 新しい原位置孔底三軸セルの仕様

### a) 対象とする試験体

ボーリング孔の底部に作製した直径100mm、高さ230mmの円柱試験体を対象とする。

### b) 構成部品

図-2に示すように、主に円筒セル、セル上盤、メンブレン、メンブレン固定部（上下2箇所）、载荷キャップ、ロードセルの6つの部品から成る。

### c) ひずみの計測システム

ひずみの計測は、試験体側面に直接ひずみゲージを接着して行う。ひずみゲージは図-2に示す三軸セル内部のメンブレンに取り付けられており、ひずみゲージの圧着は拘束圧を負荷して行う。使用するひずみゲージの種類によって、高温環境下でも計測可能である。

### d) 最大軸圧縮力 $F_{a,max}$ ・最大拘束圧 $\sigma_{c,max}$

軟岩～中硬岩クラスの岩盤に対して载荷可能な仕様（ $F_{a,max}=300kN$ 、 $\sigma_{c,max}=5MPa$ ）とした。拘束圧は水圧により制御する。

### e) 試験体の排水条件

試験体上面は排水状態であり、試験体下部は岩盤と連続しているため、岩盤自体の排水状態に依存する。

## 3. 実験内容

### (1) 検討項目

原位置での作業において生じる不具合の抽出、および新しい原位置孔底三軸セルの性能確認を目的とし、以下の検討項目を設定した。

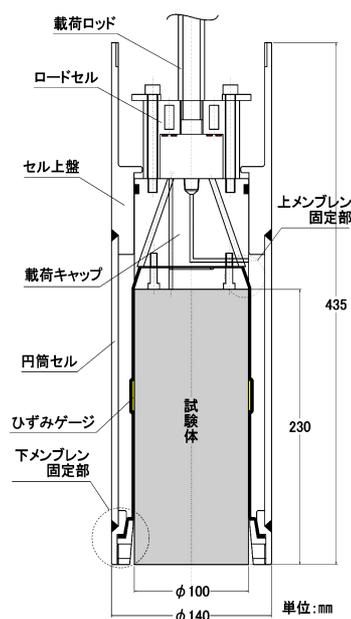


図-2 新しい三軸セルの構造

### a) 試験孔への三軸セルの挿入

挿入時における三軸セルと試験体の接触による破損の有無について確認する。また、試験孔内の掘削泥水の浮力による挿入の障害の有無について確認する。

### b) 試験体へのひずみゲージの圧着

ひずみゲージへの接着剤の塗布、試験体位置への三軸セルの設置、ひずみゲージの圧着開始までの一連の作業工程と作業時間を把握する。

### c) 三軸試験における新型三軸セルの性能

軸力载荷部（载荷キャップ、ロードセル）、拘束圧载荷部（円筒セル、メンブレン、メンブレン固定部）、計測部（ひずみゲージ）の性能を確認する。

## (2) 主な材料・器具

### a) 原位置孔底三軸セル

仕様等は前述の通りである。

### b) 模擬試験孔

写真-2に示す①ステンレス製の底板、②塩化ビニル製の孔底円盤、③下部孔壁円筒、④上部孔壁円筒の計4点の部品で構成される。組立てた際の試験孔上端から孔底面までの高さは約2m、孔径は147.2mm、試験体と試験孔の間の溝幅は23.6mmである。

### c) ベントナイト泥水

ベントナイト（クニミネ工業株/クニゲルV1）を水道水に投入して攪拌し、質量濃度10%、比重1.05の標準的なベントナイト泥水を作製した。

### d) ひずみゲージとゲージ接着剤

ひずみゲージはゲージ長30mm、3本より線式リード線のポリエステル箔ゲージ（株東京測器研究所/PFL-30-11-3LH）を用い、接着には写真-3に示す実験用に特注し



①底板



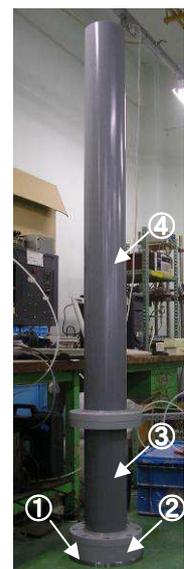
②孔底円盤



③下部孔壁円筒



④上部孔壁円筒



【組立て時】

写真-2 模擬試験孔

た水中接着剤（株ソテック／特注品）を用いた。水中接着剤は、泥水中で水分を吸収して硬化反応を生じ、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。

e) 圧着補助材

ひずみゲージの圧着時に接着剤の押し広げおよび接着面からの泥水の押出しを補助する目的で、PET製シート、アルミ板、ゴム板で圧着補助材を作製した。圧着補助材にひずみゲージを貼付した状態を写真-3に示す。ひずみゲージの表面（抵抗体側）を、圧着補助材のゴム板に防水型両面テープで貼付した。

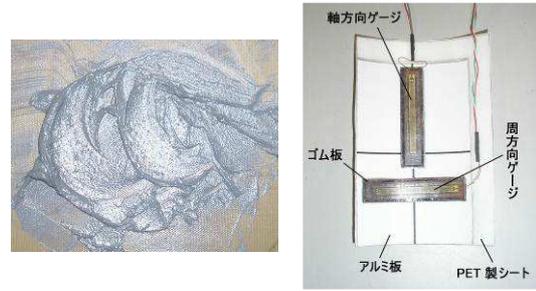


写真-3 水中接着剤（左）と圧着補助材（右）

(3) 試験体

早強ポルトランドセメント（株住友大阪セメント）：珪砂7号=1：2.5、W/C=70%で配合したモルタルで、直径100mm、高さ300mmの円柱試験体を作製した。材齢は64日で、同配合・同材齢の試験体で事前に行った荷重試験の結果、一軸圧縮強さ $q_u$ は約30MPaであった。作製した試験体に対して実施した超音波速度計測（JGS2110-1998）の結果を表-1に示す。

(4) 実験の手順

検証実験の手順を図-3に示す。なお、多段階荷重三軸試験の詳細は(5)に記す。

a) 模擬試験孔への試験体の設置

- ① モルタルによる試験体の底板への固定
- ② ベントナイト泥水の投入
- b) 三軸セルの吊り上げ・ゲージ接着剤の塗布
  - ① 滑車による原位置孔底三軸セルの吊り上げ
  - ② セル内メンブレンの拡張（セル圧：-100kPa）
  - ③ ひずみゲージに水中接着剤を塗布

c) 試験孔への三軸セルの挿入とひずみゲージの圧着

- ① 三軸セルの吊り降ろし⇒試験孔底に設置
- ② ひずみゲージの圧着（セル圧：+200kPa）
- ③ 圧着状態で1日間養生

d) 多段階荷重三軸試験の実施

- ① ひずみゲージの圧着終了（セル圧：大気圧）
- ② 上部孔壁円筒の取り外し
- ③ 模擬試験孔の下部ごと三軸セルを荷重枠に設置
- ④ 多段階荷重三軸試験の実施

(5) 多段階荷重三軸試験

従来の原位置孔底三軸試験で採用されていた多段階荷重三軸試験を、新しい三軸セルを使用して実施した。なお、試験方法は「岩石の非圧密非排水（UU）三軸圧縮試験（JGS 2531-2000）」に概ね準拠して実施した。試験概要を図-4に示す。

拘束圧 $\alpha=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0\text{MPa}$ の5段階（順に

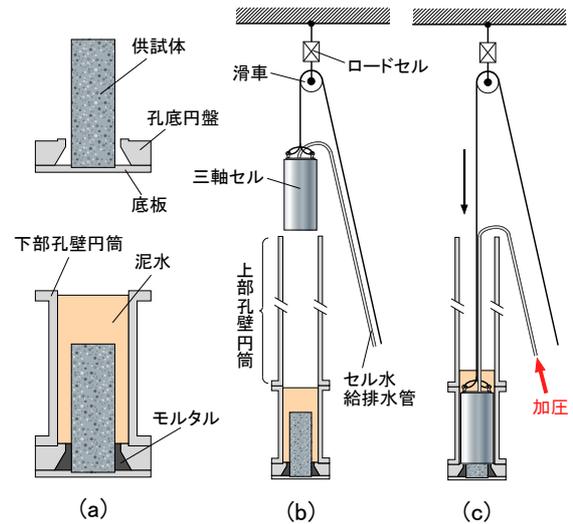


図-3 実験手順

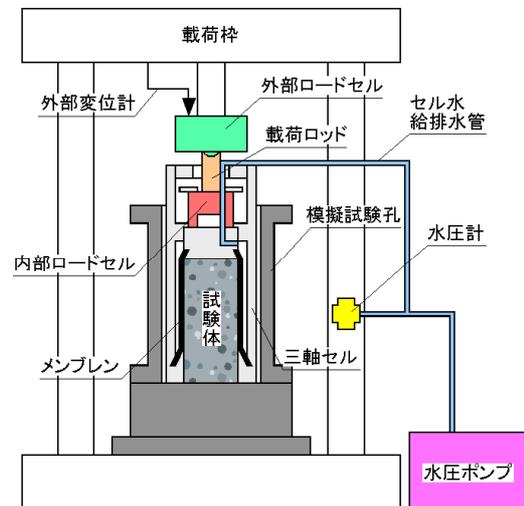


図-4 多段階荷重三軸試験の概要

表-1 超音波速度計測の結果

$t_p$ (ms)	$t_s$ (ms)	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	$\nu_d$	$E_d$ (MPa)	$G_d$ (GPa)
70.80	179.60	4244	1673	0.4080	16396	11.54

$t_p, t_s$ : P波・S波到達時間  $V_p, V_s$ : P波・S波速度  
 $\nu_d$ : 動ポアソン比  $E_d$ : 動弾性係数  $G_d$ : 動せん断弾性係数

Step.1~5 とする) に設定し、各段階において等方応力状態 ( $\alpha_a = \alpha_c$ ,  $\alpha_a$ : 軸応力) からの载荷・除荷を行った。载荷段階間の移行時は等方応力状態を維持した。

三軸セルの耐荷性等に配慮し、ピーク荷重までの軸力载荷は行わず、軸応力  $\alpha_a \leq 4.5\text{MPa}$  の弾性領域内で载荷を行う方針とした。

試験体のひずみの計測は、試験体側面の直交位置の軸方向および周方向に4枚ずつ圧着したひずみゲージと外部変位計の計9箇所(軸ひずみ: 5箇所, 周ひずみ: 4箇所)で行った。ひずみゲージの接着位置を図-5に示す。

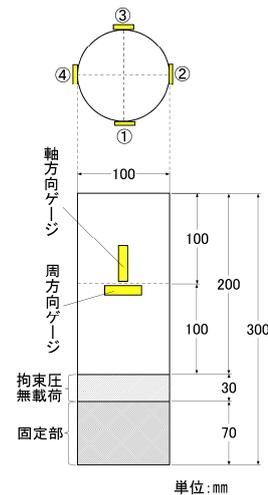


図-5 ゲージ接着位置

## 4. 実験結果と考察

### (1) 試験孔への三軸セルの挿入

三軸セルの挿入中に、セルを吊り下げるロープの張力  $T$  を計測した。引張を正とし、 $T$  の経時変化を図-6に示す。図中の①~③の計測状況について以下に記す。

#### ① 泥水がない場合の吊り降ろし作業

上部孔壁円筒内は泥水のない気中であり、特に問題なく三軸セルを降ろすことができた。 $T$  をほぼ一定値(≒ 200N)に保ってセルを降ろせたことが分かる。

#### ② 泥水がある場合の吊り降ろし作業

泥水中に三軸セルを降ろす際、泥水による浮力の影響を受けて  $T$  が減少したが、三軸セルの浮き上がりは見られなかった。载荷キャップには空気抜き用の小孔を設けていたため、これが有効に機能したのではないかとと思われる。

#### ③ 試験孔底への三軸セル設置

約 380秒の時点から張力は0Nで一定状態となっており、三軸セルが試験孔底に到達したためと推測される。

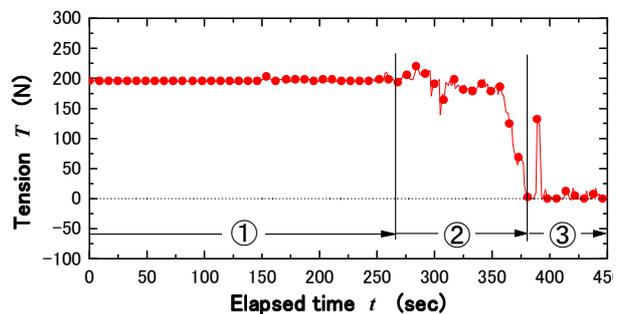


図-6 ロープの張力  $T$  の経時変化

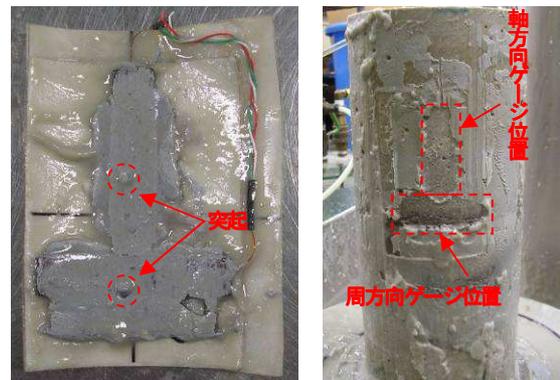


写真-4 ひずみゲージの接着状況

以上より、孔径147.2mm、溝幅23.6mmの模擬試験孔への三軸セルの挿入は、浮力によるセルの浮き上がりを招くことなくスムーズに行うことができた。また、多段階载荷三軸試験後に試験体を目視確認したところ、目立った外傷が見られなかったため、セルと試験体との衝突による欠損は生じなかったと考えられる。

### (2) 試験体へのひずみゲージの圧着

ひずみゲージへの水中接着剤の塗布工程、所定の圧着圧力へ昇圧工程、および圧着後のひずみゲージの接着状況について以下に考察を記す。

#### a) ひずみゲージへの水中接着剤の塗布

三軸セルを吊り上げた状態で、下から覗き込みながら塗布を行った。見上げながらへらで接着剤を塗布する作

業は非常に煩雑で、計8枚のひずみゲージへの塗布を完了するまでに25分程度要した。原位置において最も適したひずみゲージへの接着剤の塗布方法を、水中接着剤の可使用時間の改良も含めて考える必要がある。

#### b) 所定の圧着圧力へ昇圧

今回は特に問題は生じなかった。しかし、载荷キャップと試験体の間に隙間があると、昇圧時にメンブレンが隙間に入り込んで破損し、ひずみゲージが接着できなくなる可能性がある。三軸セルが着底しているか否かを十分に確認する必要がある。

#### c) ひずみゲージの接着状況

写真-4は、多段階载荷三軸試験後に試験体から取り外したひずみゲージと、ひずみゲージを取り外した後の試

験体側面である。写真から、圧着時に、余分な水中接着剤がひずみゲージの接着面外に拡がって硬化し、接着面には接着剤の薄い層が形成されている。また、試験体側面のひずみゲージの接着位置には、泥水がほとんど付着していない。接着面に厚い接着剤の層や泥水が残留していると、ひずみゲージの計測値が真値よりも小さくなったり、ひずみゲージが剥がれたりする懸念がある。今回の実験ではそのような現象は見られず、良好な接着状況であったと考えられる。

また、硬化した水中接着剤の表面の突起と試験体側面の気泡によるあばたの位置および形状が一致している。ゆえに、水中接着剤が試験体側面の欠損部分を充填して硬化したことがわかる。

以上より、水中接着剤の塗布の煩雑さを除けば、ひずみゲージの圧着は問題なく実施できたと考えられる。

### (3) 三軸試験における新型三軸セルの性能

多段階荷重三軸試験時の軸力荷荷部、拘束圧荷荷部、計測部の性能について以下に考察を記す。なお、以降の考察では、圧縮を正とする。

#### a) 軸力荷荷部

三軸セル内のロードセルおよび外部ロードセルの計測値  $F_{in}$ ,  $F_{out}$  の経時変化を図-7に示す。図より、内部ロードセルと外部ロードセルの計測値は概ね一致しており、内部ロードセルは正常に機能したと言える。

#### b) 拘束圧荷荷部

図-8に示すように、Step.4時に拘束圧  $\sigma_c$  が漏洩により低下したため、Step.5は省略した。セルの設計最大拘束圧自体は5.0MPaであるため、今後、メンブレン固定部の改良等で気密性の改善が必要である。

#### c) 計測部

図-9にひずみゲージで計測したひずみ  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_r$  と主応力差  $q$  の経時変化を示す。図中の凡例のG1~G4と図-5の①~④の接着位置は対応している。図-9より、軸方向ゲージは1枚、周方向ゲージは4枚全てが断線し (G4: 試験中に断線, その他: 断線した時点は不明), 計測値が得られなかった。一方、断線しなかった軸方向ゲージ3枚の挙動を見ると、主応力差  $q$  の変化に追従していることが分かる。

図-10に主応力差  $q$  - ひずみ  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_r$  曲線を示す。ここで、軸方向ゲージ1~3の挙動を見ると、軸方向ゲージ1・2は多少の計測誤差は含まれているが概ね線形弾性的な挙動を示しており、軸方向ゲージ3は除荷時にひずみが残る傾向が見られるが、Step.3以降は線形弾性的な挙動を示している。

以上より、軸方向ゲージ1~3は試験体に概ね接着でき

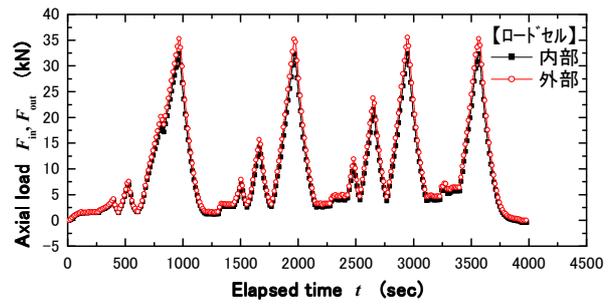


図-7  $F_{in}/F_{out}-F_{out}$  曲線

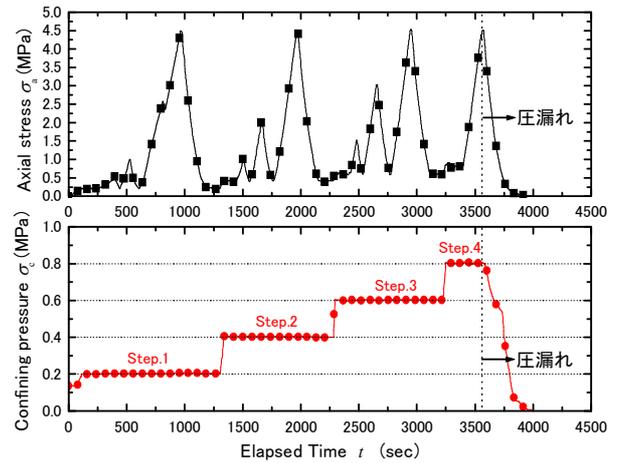


図-8 軸応力  $\sigma_a$  と拘束圧  $\sigma_c$  の経時変化

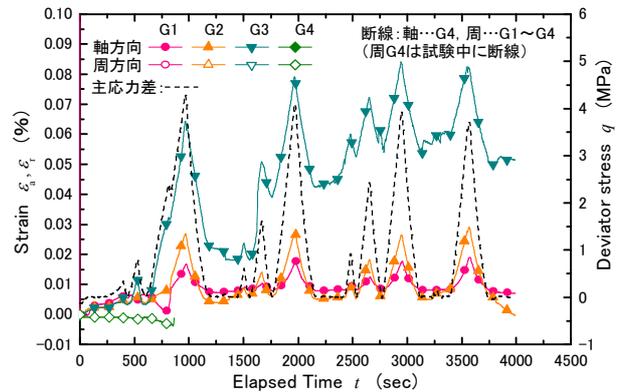


図-9 ひずみ  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_r$  と主応力差  $q$  の経時変化

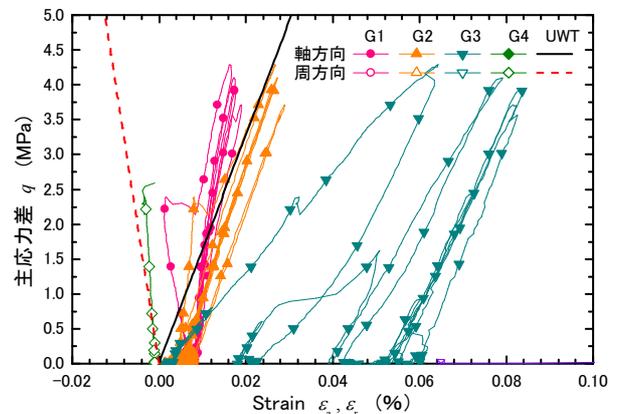


図-10 主応力差  $q$  - ひずみ  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_r$  曲線

表-2 ひずみゲージの計測状況

	$E_s$ (MPa)				判定*
	Step.1	Step.2	Step.3	Step.4	
G1	-11296	57685	59339	34628	×
G2	21975	18057	18869	17543	○
G3	8153	8607	11266	17314	○

※ 凡例：○…良好, △…不良, ×…悪い

ていると考えられる。

次に、断線することなく試験体に接着できた軸方向ゲージ1~3の計測値より割線弾性係数 $E_s$ を算出し、超音波速度計測結果から算出した動弾性係数 $E_d$  (=16396MPa)と比較することで、各接着状況の良否を評価して表-2にまとめた。表において、 $E_s$ と $E_d$ の誤差(全Stepの平均値)が20%以内の時は○、20~40%の時は△、40%以上の時は×とした。なお、 $E_s$ は以下の式(1)で算定した。

$$E_s = \frac{\sigma_{a,max} - \sigma_c}{\varepsilon_{a,max} - \varepsilon_{a,0}} \quad \text{式(1)}$$

ここに、 $\sigma_{a,max}$ ：最大軸応力(MPa),  $\sigma_c$ ：拘束圧(MPa)

$\varepsilon_{a,max}$ ：最大軸ひずみ( $\mu$ )

$\varepsilon_{a,0}$ ：各Stepの等方応力状態時の軸ひずみ( $\mu$ )

表-2より、軸方向ゲージ2は良好な計測値が得られていると考えられ、泥水中の試験体の変形をひずみゲージを導入した原位置孔底三軸セルにより計測することは可能であると考えられる。今後、ひずみゲージの断線や、より最適な圧着方法について検討を重ね、全てのゲージで良好な計測値が得られるよう改良する必要がある。

## 5. まとめ

ひずみゲージ式の計測システムを導入した新しい原位置

置孔底三軸試験の三軸セルを作製し、室内実験によってその性能を検証した。その結果、以下の知見を得た。

- ① 直径147.2mm, 溝幅23.6mmの模擬試験孔への三軸セルの挿入は、試験体の破損や浮力によるセルの浮き上がりを招くことなくスムーズに行うことができた。
- ② ひずみゲージへの水中接着剤の塗布作業に25分程度要するが、ひずみゲージの圧着は問題なく実施でき、接着状況も良好であった。
- ③ 内部ロードセルと外部ロードセルの計測値は概ね一致しており、内部ロードセルは正常に機能したと考えられる。
- ④ 拘束圧を0.8MPaに設定した際に圧漏れが生じた。メンブレン固定部の改良等で、三軸セルの気密性の改善を行う必要がある。
- ⑤ 試験体への接着に成功した3枚の軸方向ゲージの内の1枚において、算出した割線弾性係数と超音波速度計測における動弾性係数がほぼ一致する良好な計測値が得られた。ゆえに、泥水の残留した試験孔内で原位置孔底三軸セルにより試験体の変形を計測する可能性が示唆された。今後、断線防止や圧着方法の最適化について検討が必要である。

## 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.*, 942-943, 2007.
- 2) 田中 悠一, 谷 和夫：泥水中でひずみゲージを岩盤に接着する方法の検討, 第39回岩盤力学に関するシンポジウム, 2010.
- 3) 田中 悠一, 谷 和夫：ひずみゲージによる孔底三軸試験装置の高度化に関する検討, 第6回地盤工学会関東支部発表会, 2010.

## LABORATORY EXPERIMENT WITH THE APPARATUS CHARACTERIZED BY GLUEING STRAIN GAUGES FOR IN-SITU BOREHOLE TRIAXIAL TEST

Yuichi TANAKA, Kazuo TANI

Recently, 'in-situ borehole triaxial test' is being developed to evaluate strength and transformation characteristic of the bedrock. Some experimental triaxial cells for this test has already manufactured. A new type cell measures transformation with strain gauges glueing to specimens. This paper reports about laboratory model experiment to inspect performance of the new triaxial cell. As a result, it became clear that the test needs improvement at the points such as the cell's performance or the test process. However, it was succeeded to get measurement data similar to the result of ultrasonic wave test.