

小型原位置三軸試験装置の 均質な堆積軟岩地盤への適用

池野谷 尚史^{1*}・Abbas Taheri²・金子 進³・谷 和夫⁴

¹東急建設(株) 技術本部 土木エンジニアリング部 (〒150-8340 東京都渋谷区渋谷1-16-14)

²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)

³(株)基礎地盤コンサルタンツ 事業本部 酒井研究室 (〒263-0001 千葉県千葉市稲毛区長沼原町51)

⁴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: ikenoya.takafumi@tokyu-cnst.co.jp

小型原位置三軸試験装置を開発し、実地盤への適用性を検討した。均質な堆積軟岩を対象に、深さ1~3mのボーリング孔底に成形した円柱形状の試験体に対して多段階荷方式の三軸圧縮試験を3ケース行った。大深度での試験を可能にするため、軸荷重の荷重反力にはボーリング孔壁との摩擦を利用した。また、そのために専用の軸力荷重装置を用いた。試験の結果、実地盤においてボーリング孔の深度方向に連続して三軸圧縮試験を効率よく実施することができることを確認した。

Key Words : *in-situ test, triaxial test, test equipment, rock mass, site investigation*

1. はじめに

岩盤物性評価の高度化を目的として、 $\phi 400\text{mm} \times H1000\text{mm}$ の大型で中空円筒形状の試験体を用いた原位置岩盤三軸試験(大型原位置三軸試験)が開発され、実用化が進められている¹⁾。しかしながら、試験体の寸法や形状、計測システムに係る種々の制約から、その試験費用が高いために、適用範囲は大規模プロジェクトに限られている。また、試験の実施は露頭(地表面や調査坑の底面)の近傍に限定され、ボーリング孔底のような地下深部における適用は実現していない。

そこで、筆者らは小型の円柱試験体と簡便な計測システムを利用した小型原位置三軸試験装置を開発した²⁾。本装置の計測の妥当性に関しては、人工軟岩試験体を用いた室内における実証試験によって、既に確認されている³⁾。本稿では、実地盤への適用性を検討するため、均質な堆積軟岩を対象に実施した実証試験について報告する。

2. 小型原位置三軸試験装置の概要

本装置は、ロータリー・ドリリングによってボーリング孔底に掘削・成形した $\phi 90\text{mm} \times H295\text{mm}$ の小型で円柱

形状の試験体に対して、ゴム膜を介して拘束圧を作用させると共に、軸方向に荷重したときの試験体の軸方向および側方向の変位を計測できる。図-1に変位計測システムの概要を示す。室内における実証試験では軸方向変位の計測に差動トランス型の変位計を利用していたが、本試験ではLDTに変更した。LDTを用いることにより、耐水性、耐圧性および計測精度の向上が期待される。側方

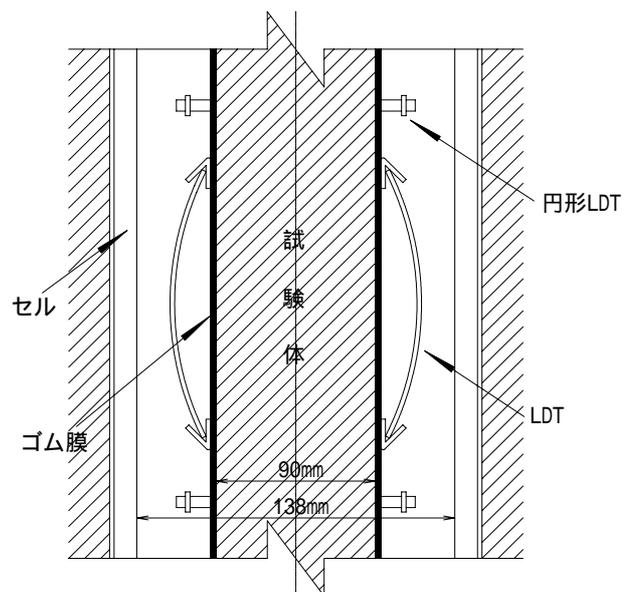


図-1 小型原位置三軸試験装置の変位計測システム

向変位については、室内における実証試験³⁾と同様に円形状のLDTを用いて計測している。また、試験経過のモニタリングのため、上述のセンサーの他に軸荷ロッドの上部に外部変位計を設置して軸方向変位を計測している。

軸荷重の軸荷反力については、大型原位置三軸試験装置のように、調査坑の天端に反力をとったり、地上に軸荷枠を設置したりすると、試験深度が深くなるほど実施が困難である。そこで、本試験装置では試験深度（孔底）より上部のボーリング孔壁に反力をとることとし、専用の軸荷装置を新たに製作した。図-2に軸荷装置の概要を示す。装置はφ190mm×H200mmの円筒形状で、表面に凸凹を加工したスチールプレート、パッカーおよび油圧ジャッキより構成される。スチールプレートは円周方向に8分割されており、径方向に可動する構造となっている。試験時にはパッカーに水を媒体として圧力を供給し膨張させることによって、ボーリング孔壁における摩擦抵抗を利用して軸荷反力を確保する。また、軸荷重は装置内に組み込まれた最大ストローク80mmの油圧ジャッキによって軸荷する。最大軸荷重は約200kN（試験体に作用する最大軸応力31.4MPa）で、このときのパッカーの最大圧力は6MPaである。

3. 試験の概要

(1) 試験サイト

神奈川県西部に位置する深度50mの立坑および延長35mの横坑からなる実験空洞において試験を実施した。対象とした地盤は、新第三紀鮮新世末期から更新世前期の上総層群の堆積軟岩である。節理をほとんど含まない塊状で均質な泥岩を主体とし、部分的に厚さが数～10cmの凝灰質の砂層が挟在する。層理は数度傾斜しているが、概ね水平に近い。

(2) 試験手順

試験手順を図-3に示す。これらの作業に要する時間は、

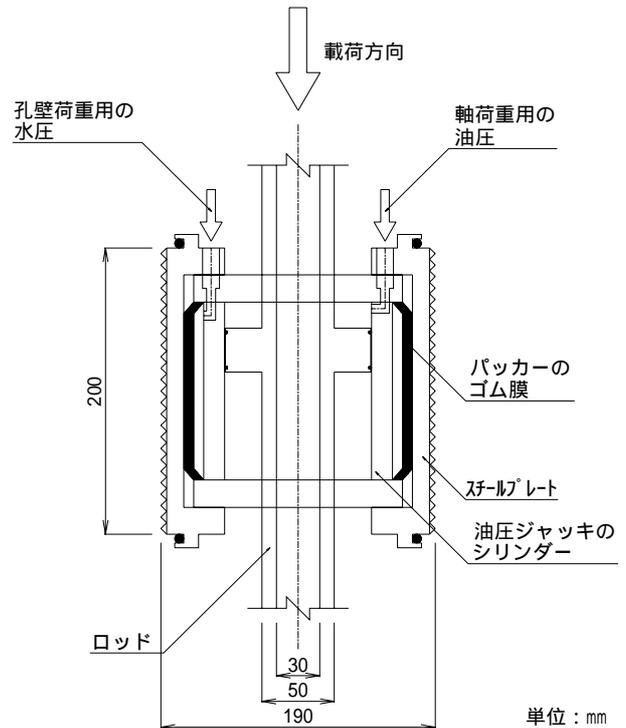


図-2 孔壁に反力をとる軸荷重の軸荷装置

試験体の掘削・成形に2~3時間、三軸試験の実施に2~3時間程度であり、準備作業を含む全工程でも、1回の試験は実質1日で完了した。大型原位置三軸試験では全工程で1週間程度要しており、短い工期は小型の試験体を用いるメリットの一つである。

a) 試験孔の掘削

所定の試験深度よりも5cm程度浅い位置までφ196mmのボーリング孔を掘削（図-3）した後、φ120mmの試験体上端面整形用のディスク型ビットを用いて所定の深度まで掘削（図-3）した。

b) 試験体の掘削・成形

専用のコアビット²⁾を用いて試験体を掘削・成形（図-3）した。このコアビットは先端が階段状になっており、小型原位置三軸試験装置の下部の形状に合わせて孔底が成形できる。コアビット先端の外径φ120mmは上端

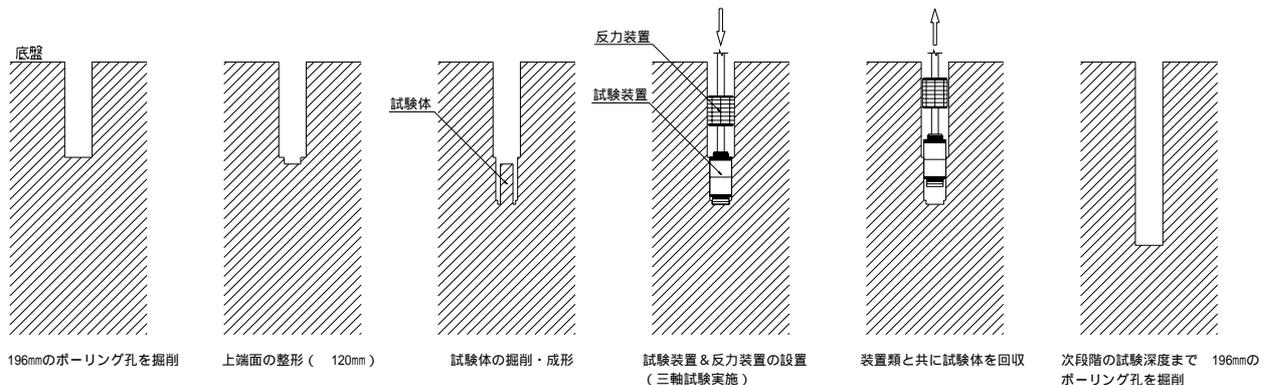


図-3 試験手順

面整形用ビットによる掘削孔の外径と同一とし、試験体掘削時のガイド効果により孔の中心軸と試験体の中心軸が一致する。

c) 試験および試験体の回収

試験装置を反力装置と共に孔内に降ろし、試験体に被せるようにして設置する。パッカーを加圧して荷重反力を確保した後、三軸試験を実施した(図-3)。試験後の試験体は、試験装置と共に回収(図-3)し、性状等を確認した。次段階の試験を予定している場合、φ196mmで掘削(図-3)した後、手順に戻る。

(3) 三軸試験方法

試験は、1本の試験体から強度定数を得ることのできる多段階荷重方式の三軸圧縮試験を、深度方向に3ケース実施した。試験深度 z および拘束圧 α_c を表-1に示す。軸差応力 q がピークに達する(破壊する)まで軸圧縮した後、等方応力状態 $q=0$ まで除荷してから、次段階の拘束圧を荷重した。なお、ケース1に関しては、各センサーのレスポンスを確認するために、荷重段階1までは試験体が破壊するまで圧縮せずに予め決めておいた最大軸差応力 q_{max} に達した時点で等方応力状態まで除荷し、次段階の拘束圧を荷重した。荷重段階2以降は他のケースと同様に軸差応力のピーク判定の後、次段階の拘束圧を荷重した。軸ひずみ速度は作業性を考慮して0.05%/minとした。また、排水条件は、試験体下部が地盤に連続していることと、泥岩の透水性が低いことを考慮すると、部分排水であると考えられる。地下水位以深であり、試験体は飽和している。

表-1 試験ケース

ケース	試験深度 z (m)	拘束圧 σ_c (最大軸差応力 q_{max})(MPa)				
1	0.950 ~ 1.245	0.2(1.5)	0.4(3.0)	0.6(4.5)	0.8	
		1.1	1.4	1.7	2.0	
2	1.800 ~ 2.095	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
3	2.300 ~ 2.595	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0

(注) 丸囲み数字は荷重段階を示す

4. 試験結果

(1) 応力～ひずみ関係

ケース1の荷重段階1～3、ケース2の荷重段階1における軸差応力 q と軸ひずみ ϵ_a および側方ひずみ ϵ_s の関係を図-4～図-6に示す。

ケース1の結果を見ると、LDTによる軸ひずみ ϵ_{aLDT} は外部変位計による軸ひずみ ϵ_{aEXT} よりも小さな値を示している。LDTは試験体の側面で計測しているため、 ϵ_{aLDT} は試験体の平均的な軸ひずみを代表している。しかし、外

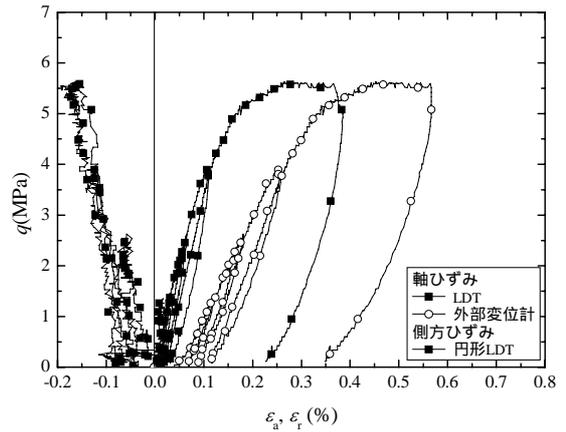


図-4 軸差応力～軸ひずみ、側方ひずみ関係 (ケース1, $\alpha_c=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ MPa)

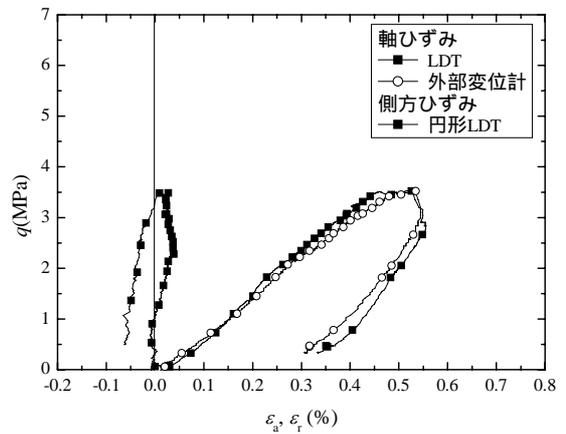


図-5 軸差応力～軸ひずみ、側方ひずみ関係 (ケース2, $\alpha_c=0.4$ MPa)

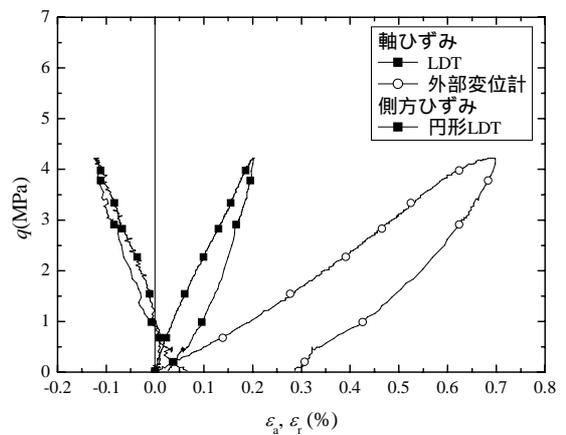


図-6 軸差応力～軸ひずみ、側方ひずみ関係 (ケース3, $\alpha_c=0.4$ MPa)

部変位計は载荷ロッドの上部で計測しているので、 $\epsilon_{a,EXT}$ は試験体上面のベディングエラーと試験体以深の地盤などの圧縮に起因する誤差も含んでおり、この誤差が相当に大きいことが分かる。

ケース はケース や に比べて、载荷初期の応力～ひずみ関係の傾きが小さく、剛性が低く評価される結果となった。試験後に回収し試験体を観察したところ、中央高さに厚さ1cm程度の未固結な砂層を挟在していた。この挟在砂層が弱面となり、試験体が大変形して破壊したものと考えられる。

ケース では外部変位計による $\epsilon_{a,EXT}$ がLDTによる $\epsilon_{a,LDT}$ に比べて非常に大きな値を示している。試験後に回収した試験体を観察したところ、試験体の下部の拘束圧が作用しない箇所（ゴム膜の下端を固定するための高さ15mmの区間）で圧壊しており、ロッド上部で計測した値はこの部分の圧縮変位量も含めて計測したためと考えられる。一方、LDTで計測した値は、この試験体下部の圧壊による変位を含んでおらず、試験体の平均的な軸ひずみが計測できている。しかし、LDTによる除荷後の塑性ひずみ（残留ひずみ）がゼロに近いことより、拘束圧が载荷された部分ではせん断破壊していない可能性がある。载荷段階（ $\sigma_c=1.2\text{MPa}$ ）以降ではある程度の大きさの塑性ひずみが確認され、試験が適切に実施されたと考えられる。

最初にピーク軸差応力まで圧縮した载荷段階の圧縮強さはそれぞれ5.6MPa（ $\sigma_c=0.8\text{MPa}$ ）と、3.5MPaおよび4.2MPa（ $\sigma_c=0.4\text{MPa}$ ）で、挟在砂層の影響を受けたケース とせん断破壊していない可能性があるケース を除けば、室内三軸圧縮試験⁴⁾から得られている同程度の拘束圧に対する平均圧縮強さ $q_{max}=5.6\text{MPa}$ （地表面からの深度45m～55m）と調和的である。

(2) 強度特性

ケース ～ の破壊時の応力のモール円を図-7～図-9に示す。

ケース については、内部摩擦角 ϕ が約5.5°と非常に小さい。図-4に示すように、1段階目の载荷時のピークの判定が遅れ、ピーク強さを超えて過度に圧縮されたため、試験体が大きく損傷を受けた虞がある。その結果、2段階目以降のせん断強さが小さく評価されてしまい、内部摩擦角は過小評価（逆に粘着力は過大評価）されている可能性がある。ケース において、ピークの判定は、軸応力の値が減少し始めた点とした。しかし、試験に用いたロードセルの分解能が低く（約0.08MPa）ノイズが大きい（約0.08MPa）ことから、判定が遅れてしまった。そこで、ケース と では、軸応力の増加がなく、軸変位の増加量が所定の値（0.01mm）に達した点をピーク強さと判定することとした。

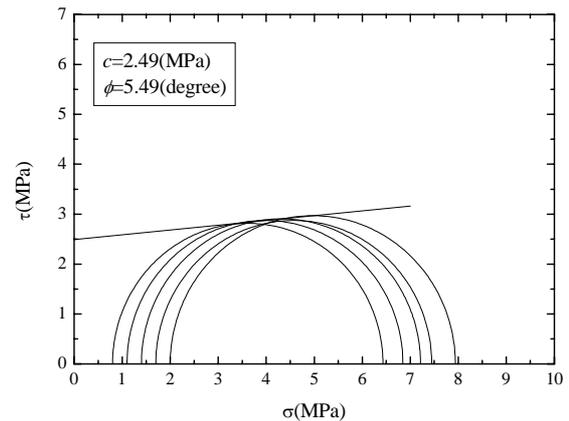


図-7 応力のモール円（ケース ， ～ ）

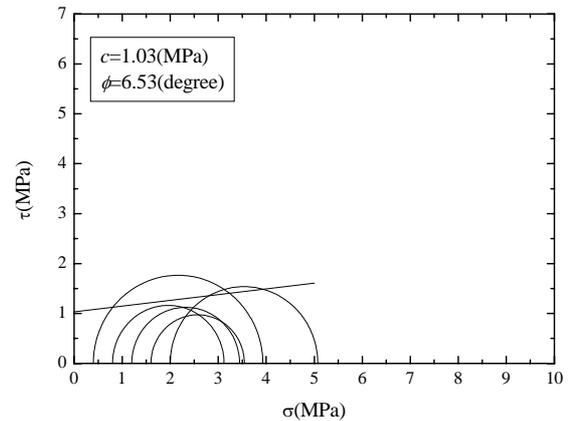


図-8 応力のモール円（ケース ， ～ ）

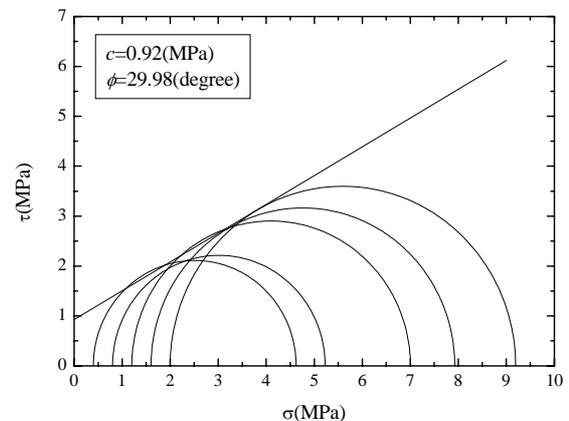


図-9 応力のモール円（ケース ， ～ ）

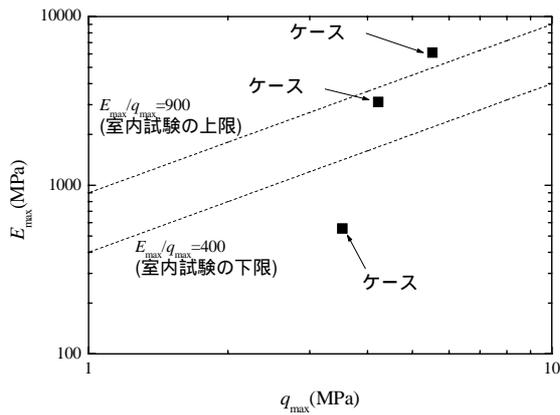


図-10 初期ヤング率～圧縮強さ関係



写真-1 試験後の試験体（ケース）

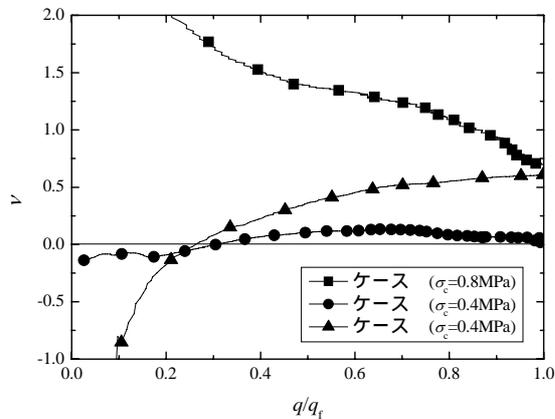


図-11 ポアソン比～せん断レベル関係

次にケース については、ばらつきが大きく、拘束圧

の増加に伴いせん断強さが増加する傾向が見られない。ケース の試験体は弱面となる挟在砂層を有しており、最初の軸圧縮時に当該箇所ではせん断破壊を起こして大きな塑性変形（荷重段階 後の残留軸ひずみは約0.3%）を生じたからと考えられる。したがって、荷重段階 以降では破壊して残留変形状態に至った試験体としての挙動を示しており、図-8のように破壊包絡線から強度定数を求めるには注意が必要である。

ケース については、ばらつきが少なく、強度定数の値は妥当であると考えられるが、荷重段階 と において、残留ひずみがゼロに近く、せん断破壊していない可能性がある。これらの結果を除いて強度定数を求めると、粘着力 c が1.10MPa、内部摩擦角 ϕ が27.86°であった。

(3) 変形特性
a) ヤング率

各ケースの荷重段階 における初期ヤング率 E_{max} と圧縮強さ q_{max} の関係を図-10に示す。ただし、ケース については、荷重段階 では破壊に至っていないため、 q_{max} は図-9に示した c, ϕ から推定したものを用いた。初期ヤング率 E_{max} は、ひずみレベルが 10^{-5} での接線ヤング率 E_{tan} である。ケース については、挟在砂層の影響からかケース と に比べ E_{max} がかなり小さい。室内三軸圧縮試験⁴⁾による E_{max} は2000~4500MPaであり、ケース と は同程度の値が得られている。また、当該地盤の初期ヤング率と圧縮強さの比 E_{max}/q_{max} はほぼ400~900の間にあり、平均的には600であることが分かっている。今回の試験から得られた値は、ケース を除けば、図中に点線で示した範囲内か、あるいは非常に近く、既往の知見と調和的である。

b) ポアソン比

ケース の荷重段階 , ケース と の荷重段階 におけるポアソン比 ν とせん断レベル q/q_f の関係を図-11に示す。ケース については、 ν が q/q_f の増加に伴って増加しており、収縮 ($\nu < 0.5$) から膨張 ($\nu > 0.5$) に転じた後に破壊していることを示している。これは他の一般的な岩石と同様の性質であり、計測が妥当であったものと考えられる。一方、ケース については、せん断初期から ν が0.5以上（膨張性）を示している。これは、前段の繰返し荷重の影響と考えられ、破壊時の ν については、ケース とほぼ同様の大きさを示している。また、ケース

については、最大で0.1程度と小さい。せん断破壊が生じたのが挟在砂層の部分だけであり、側方変位を計測していた泥岩部分にはほとんど変位が生じなかったことによるものと推測される。

(4) 試験体の回収

拘束圧を1MPa載荷した状態で試験体を引き上げることで、容易に底部を切断して回収できた。大型原位置三軸試験装置のように回収治具などを用いることなく、しかも、試験後に装置と同時に試験体を回収することができる。回収した試験体(ケース)を写真-1に示す。試験体の上半分に約60°に傾斜したせん断破壊面が確認できることから、三軸圧縮試験が適切に実施されたものと考えられる。なお、試験体を横切る(軸に直交する)破断面は、回収時に軸方向に引っ張られて形成された引張破断面と推測される。また、ケースと の試験体についても回収に成功し、同様に性状や破壊状況を観察した。

5. まとめ

均質な堆積軟岩地盤を対象として、小型原位置三軸試験装置を用いて、ボーリング孔底に成形した試験体に対して、多段階載荷方式の三軸圧縮試験を実施した。既往の室内試験の結果と比較することにより、計測値が妥当であることを確認し、小型原位置三軸試験装置の実地盤への適用性を実証した。大型原位置三軸試験装置では困難であった深度方向に連続して試験を実施することが可能になり、また、1日1回の試験が実施できることより作

業性が高いことも示された。

6. 今後の課題

今回の試験は浅い試験深度で行ったため、大きなトラブルは生じなかった。しかし、今後より深い位置で実施するためには課題も多い。一層の効率化と簡便化を図るため、部品数を減らし装置のユニット化を進めるなどの方策が必要であろう。それと共に対象地盤を不均質岩盤や不連続岩盤へとその適用範囲を拡大していきたい。

謝辞：本研究は、横浜国立大学、(財)電力中央研究所、東急建設(株)の三者による共同研究の一部として実施しました。関係各位のご配慮に感謝いたします。

参考文献

- 1) 岡田哲実, 谷和夫, 大津仁史, 小早川博亮, 金谷守, 伊藤洋: 原位置三軸圧縮試験の礫岩地盤への適用性の検討, 第35回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.139-144, 2006.
- 2) 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用い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.
- 3) 池野谷尚史, 鶴俊太郎, 谷和夫: リングコア型LVDTを利用した小型原位置三軸試験装置の開発, 第41回地盤工学研究発表会, pp.163-164, 2006.
- 4) 例えば, 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, No463/ -22, pp.133-142, 1993.3.

APPLICATION OF SMALL IN-SITU TRIAXIAL TEST EQUIPMENT TO HOMOGENEOUS SEDIMENTARY SOFT ROCK

Takafumi IKENOYA, Abbas TAHERI, Susumu KANEKO and Kazuo TANI

In order to examine the applicability of the small in-situ triaxial test equipment to deep ground, a series of proof tests were conducted in homogeneous sedimentary soft rock. Three triaxial tests of multiple-step loading were carried out on the cylindrical specimens prepared at the bottom of drill hole 1~3m deep. A loading jack was developed to apply the axial load whose reaction was provided by the frictional resistance on the borehole wall. The test results demonstrated that the small in-situ triaxial test equipment can be used in the deep ground. It is also proved that the tests can be conducted at very efficient rate of one test per day.