



# スマート三軸試験装置を用いた三軸圧縮せん断試験

河津, 次郎  
安原, 昇平  
河井, 克之  
飯塚, 敦

---

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 15:41-50

(Issue Date)

2011-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81011339>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011339>



# スマート三軸試験装置を用いた三軸圧縮せん断試験

## The triaxial compression tests with the smart triaxial apparatus

河津 次郎<sup>1)</sup>

Jiro Kawazu

安原 昇平<sup>2)</sup>

Syohei Yasuhara

河井 克之<sup>3)</sup>

Katsuyuki Kawai

飯塚 敦<sup>4)</sup>

Atsushi Iizuka

**概要:** 地盤工学分野において、現在最も普及しているせん断試験の1つに三軸試験があるが、現在使われている三軸試験装置は供試体サイズに比して大きすぎる点や、構成が複雑である点などが難点として挙げられる。そこで、小林らは従来の三軸試験装置の持つ難点を克服したシンプルな三軸試験装置を開発した。それが本研究で用いるスマート三軸試験装置である。しかしながら、スマート三軸試験装置はその性能を証明するような成果が十分に挙げられておらず、広く普及していくには性能の照査が必要であるといえる。そのため、本研究ではスマート三軸試験装置を用いて、各種三軸圧縮せん断試験を行い、従来の三軸試験装置で得られるような結果が得られるのか検討した。さらに連成有限要素解析プログラム(DACSAR-MP)を用いて、三軸試験を再現し、実測値と比較することから、モデルとの整合性についての検討を行った。

キーワード: 三軸試験装置, 三軸圧縮せん断, 有限要素解析

### 1. はじめに

地盤工学分野において、現在最も普及しているせん断試験の1つに三軸試験がある。三軸試験とは、「ゴム膜などの不透水膜で覆った円柱状の供試体を三軸室（圧力室）と呼ばれる圧力円筒中に置き、等方的な流体圧と軸圧を作用させて、供試体を軸方向に圧縮または伸張させることによりせん断破壊させる試験」である<sup>1)</sup>。三軸試験は一面せん断試験と比べて供試体の主応力が明確で、供試体内に比較的一様な応力、ひずみを与えること、排水条件の制御と間隙水圧の測定が比較的容易であることなどの特長を有する<sup>1)</sup>。

また、三軸試験を行うための装置である三軸試験機は、地盤材料のせん断試験において最も普及している圧縮（伸張）試験機の一つである。しかしながら、現在普及している三軸試験機（図・1）には以下のような難点がある。

①全装置を合わせると非常に大きい。

三軸試験を行うには三軸試験装置だけでなく、圧縮空気圧を与えるコンプレッサー等も試験に必要となる。そのため、供試体サイズに比べてあまりにも大きな試験装置である。

②構成が複雑で、操作が難解である。

シンプレックスチューブが入り組み、どのコックがどこに繋がっているのかもわかりづらい。そのため操作が

難解であり、操作にはある程度の熟練を要する装置である。

そこで、三軸セル、側圧載荷機構、背圧載荷機構等の主要構成要素が極めてシンプルな Alan.W.Bishop, D.J.Henkel が使用した三軸試験装置<sup>2)</sup>を参考にして、小林・中山・太田は新しい三軸試験装置（スマート三軸試験装置）を開発した。小林らは、スマート三軸試験装置にデジタル制御による高精度・高分解能リニアアクチュエータを用いるなど、高度な周辺技術を導入することで、Bishop らの三軸試験装置をより高性能な次世代型装置へと発展させた。

この装置の合計重量は、電源ユニットやコントローラ等の付帯装置をあわせても約 40kg である。また、外部入力としてはコンセントからの電源のみで試験を行うことができる。そのため、従来の三軸試験装置に比べて非常にコンパクトな装置であり、数人で運搬して渡航先にて試験を行うことも可能である。また、試験プロセスの設定や制御は全て PC 及び PLC(Programmable Logic Controller)により行われるため、試験装置操作の経験や熟練を要しない装置である。

このように、スマート三軸試験装置は従来の三軸試験装置の持つ難点を克服した装置であるといえる。しかしながら、スマート三軸試験装置は開発されて間もない装置であり、その性能を証明するような成果が十分に挙げられていないことも事実である。今後、スマート三軸試験装置が従来の三軸試験装置に取って代わるような優れた装置として普及していくためには、使用実績を重ね、試験装置としての信頼性を確立していくことが必要不可欠である。

本研究では、スマート三軸試験装置を用いて基礎的な圧密試験及び各種圧縮せん断試験を行う。また、従来の試験装置では困難な制御による非排水圧縮せん断試験も試みる。さらに、有限要素解析により三軸圧縮試験の再現を行い、実験値と理論値との整合性について検討する。それらの結果をもとに、小林らの開発したスマート三軸試験装置の性能を照査し、信頼できる試験装置であることを実証することを本研究の目的とする。

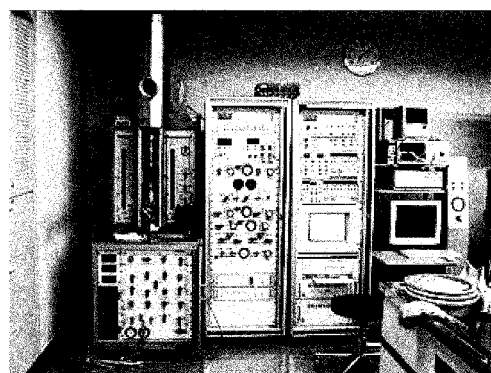


図-1 従来の三軸試験装置の一例<sup>2)</sup>

## 2. 試験装置

本研究で使用した三軸試験装置（スマート三軸試験装置）は、デジタル制御による高精度・高分解能リニアアクチュエータを用い、Alan.W.Bishop, D.J.Henkel が使用した装置<sup>2)</sup>を参考にして、小林・中山・太田により開発された、三軸セル、側圧載荷機構、背圧載荷機構等の主要構成要素が極めてシンプルな三軸試験装置である。

この試験装置は、要求される精度、安定性を確保するために信頼性の高い荷重計・圧力計・変位計が使用され、軸圧  $\sigma_a$ 、側圧  $\sigma_r$ 、間隙水圧  $u$  を自由に制御できる。また、本研究では使用していないが、間隙空気圧載荷機構を組み込むことで、間隙空気圧を制御することもできるため、不飽和土を対象とした三軸試験も可能な装置である。 $\sigma_a$ 、 $\sigma_r$ 、 $u$  の制御はリニアアクチュエータ応用機器により行い、試験プロセスの設定や制御は PC 及び PLC(Programmable Logic Controller)により行うことで、試験装置操作の経験や熟練を必要としない装置となっている。スマート三軸試験装置の概略図を図-3 に示す。

また、スマート三軸試験装置一式の写真を図-4~6 に示し、各装置について以下に説明する。

### (1) 三軸載荷装置（図-4 参照）

#### ・三軸載荷ユニット

1224 万パルス／回転のモータをリード 5mm の精密ボールネジによりベデスタルを駆動させることで、理論分解能 4.08e-4 $\mu$ m のジャッキを構成している。 $\sigma_a$  や  $(\sigma_a - \sigma_r)$  の制御を高精度に行うことができる。

#### ・三軸セル

アクリル製の圧力円筒を有し、耐圧は 1MPa である。

#### ・ポンプユニット

80 万パルス／回転のモータとリード 2mm の精密ボールネジにより  $\phi 30$ mm のピストンを駆動させることで、

理論分解能  $1.76 \times 10^{-6} \text{cc}$  のポンプを構成している。  $\sigma_r$  制御、  $u$  制御を高精度に行うことができる。ポンプの容量はそれぞれ 100cc である。

また、側圧・間隙水圧・間隙空気圧をそれぞれ独立に制御するために、3本のポンプユニットを設置することができるが、本研究では飽和土を対象とした試験のみを行うため、間隙空気圧ポンプユニットは設置していない。

#### ・変位計測システム

要素の変位は、圧縮装置昇降量から求められる。外部変位計はなく、圧縮荷重に対する機械変位を補正しており、機械的変位の補正值は、自動計測し制御装置にアップロード可能である。試験装置は、機械的な緩みや遊びが少なく、高い剛性を持っている。

### (2) 電源ユニット及びデガッサ (図-5 参照)

#### ・電源ユニット

電圧は AC:85~264V の幅で電源を確保できるため、海外に持ち込んで実験を行うことも可能となっている。

#### ・デガッサ

デガッサは脱気装置の一種であり、真空ポンプ等比べてコンパクトであることや、操作が容易であること等がその特長として挙げられる。供試体には高度に脱気された水を供給する必要があるため、スマート三軸試験装置ではデガッサを通した脱気水は間隙水圧ポンプに供給されるか、供試体に直接供給される構成となっている。

### (3) コントローラ (図-6 参照)

コントローラには、モータ制御用ドライバと制御計測用シーケンサが収容されており、これらを PC と LAN 接続することで、試験条件の設定を PC 操作によって一括に管理することができる。

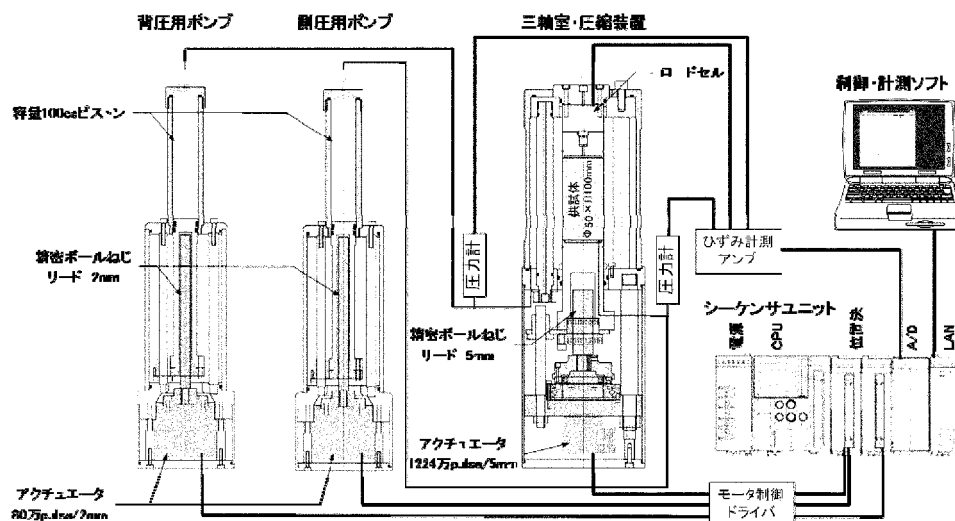


図-3 スマート三軸試験装置の概略図

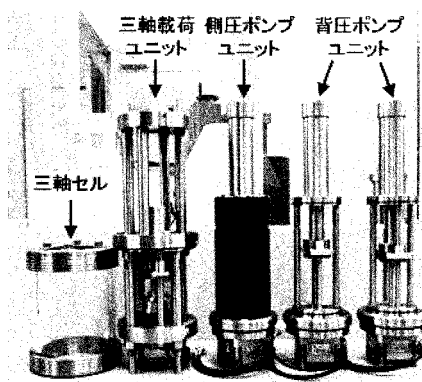


図-4 三軸荷重装置

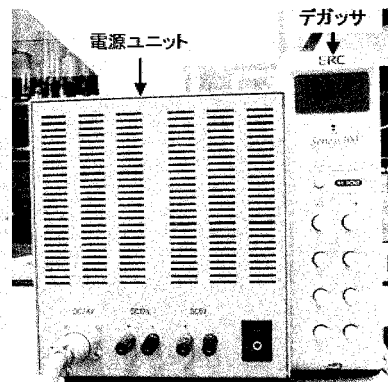


図-5 電源及びデガッサ

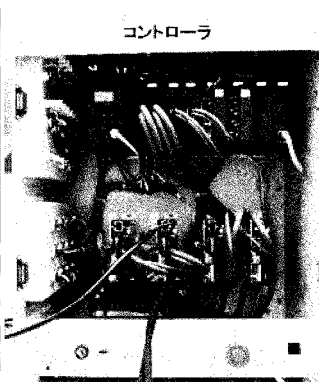


図-6 コントローラ

### 3. 三軸圧縮試験概要

#### 3.1 試料

本研究の各種三軸圧縮試験には、全てカオリンクレーから作製された供試体を使用する。試料の基礎的物性を把握するため、密度試験、液性・塑性限界試験、粒度試験を行った。その結果、カオリンクレーの土粒子密度は  $\rho_s = 2.71(g/cm^3)$ 、液性限界、塑性限界、塑性指数はそれぞれ  $w_p = 44.2\%$ 、 $w_L = 26.9\%$ 、 $I_p = 17.3$  と求められ、粒径加積曲線は図-7 のように求められた。図から、試料は細粒分を多く含み、分級された試料であるといえる。

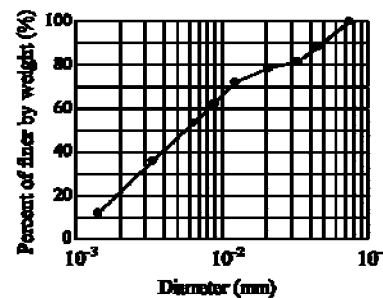


図-7 粒径加積曲線

#### 3.2 供試体の作製

以下にカオリンクレーから供試体を作製する手順を示す。

##### ①液性限界の2倍の含水比 ( $w = 88.4\%$ ) のスラリーをつくる。

デシケーター（アクリル製）に 4kg の蒸留水を入れ、その中に所定の分量のカオリンクレーを投入する。このとき、団粒化を防止するために、ふるいを通してカオリンクレーをデシケーターに投入する。さらに全体が一様になるように、十分に攪拌する。

##### ②スラリーを真空脱気する。

デシケーターの O リングに真空グリースを均等に塗布し、真空ポンプを用いて 24 時間脱気する。このとき、デシケーター内のスラリーが膨張し吸気孔に達すると、真空ポンプ内にスラリーが侵入してしまうため膨張が落ち着くまでは、様子を見てデシケーターの排気コックを用いて適度に空気を抜く。

##### ③スラリーを圧密容器に移し、さらに真空脱気する。

圧密容器の底面にはポーラスプレートが収められており、その上にろ紙を設置し、脱気されたスラリーを空気が入らないように慎重に圧密容器に移す。スラリーを投入した圧密容器をデシケーターに入れ、さらに 24 時間真空脱気する。

##### ④圧密容器を載荷装置にセットし、段階載荷による圧密を行う。

デシケーターから圧密容器を取り出し、圧密容器の上端面にろ紙、載荷キャップを順に設置する。圧密容器を載荷装置にセットし、表-1 に示す圧密圧力で段階載荷による圧密を行う。圧密時間は各圧力でそれぞれ 24 時間とする。

##### ⑤供試体を取り出し、パラフィンコートして保存する。

圧密容器から予圧密供試体を取り出し、ワイヤーソーを用いて 4 等分する。4 等分されたピースをそれぞれラップで包み、その上からハケを用いてパラフィンコートする。

##### ⑥供試体の成形

成形前の供試体のパラフィンコートを剥がし、トリマー、マイターボックス、ワイヤーソーを用いて直径 50mm、高さ 100mm に成形する。

表-1 段階載荷の圧密圧力

段階	1	2	3	4	5
圧密圧力 $\sigma'_v$ (kPa)	9.8	19.6	39.2	78.5	157

#### 3.3 三軸試験における圧密時間について

スマート三軸試験装置による等方圧密を行う圧密時間は、3t 法に基づき、確実に 1 次圧密が終了している時間を決定した（土田(1983)）<sup>3)</sup>。以下に 3t 法による圧密時間の決定手順を記述する。

①横軸に圧密時間  $t$  の対数  $\log t$ 、縦軸に圧縮量を取り、グラフを描画する。

②グラフの最急勾配線（maximum grade line）と横軸の交点を  $t_r$  とする。

③  $3t_r$  から最急勾配線の平行線を引き、グラフとの交点における圧密時間  $t_E$  を、確実に 1 次圧密が終了している圧密時間とする。

#### 4. 三軸圧縮試験結果

本研究では、非排水せん断及び排水せん断を行う。スマート三軸試験装置では、3種類の非排水せん断が可能となっており、それらの相違点について以下に示すとともに表-2に簡約にまとめる。

##### ①非排水 1-1

拘束圧一定の下でせん断を行う制御の1つである。供試体から間隙水圧ポンプに繋がるコックは開かれており、過剰間隙水圧の発生に伴う管路の膨張及び収縮のキャリブレーションが考慮されている。

##### ②非排水 1-2

非排水 1-1 と同様に、拘束圧一定の下でせん断を行う制御である。供試体から間隙水圧ポンプに繋がるコックは閉じられており、過剰間隙水圧の発生に伴う管路の膨張及び収縮のキャリブレーションは考慮されていない。この制御が従来の三軸試験装置で行われる非排水試験に最も近い制御である。

##### ③非排水 2

間隙水圧一定の下で、せん断を行う制御である。せん断に伴い、セル圧を制御することで体積一定条件つまり非排水条件が満足されている。この制御では過剰間隙水圧が発生しないため、管路の膨張及び収縮は関係しない。

表-2 3種類の非排水せん断

	拘束圧	間隙水圧	管路の膨張・収縮
非排水 1-1	一定	変化	考慮する
非排水 1-2	一定	変化	考慮しない
非排水 2	変化	一定	-

#### 4.1 試験手順

スマート三軸試験装置を用いて、以下の手順で試験を行った。

##### (1) 試験前準備

端面ろ紙、側面ろ紙、ポーラスストーンを浸水脱気しておく。

間隙水圧ポンプ及び側圧ポンプをマニュアル運転により昇降させることで、シリンダー内および各ポンプと三軸試験装置をつなぐシンフレックスチューブ内を全て脱気水で満たし、間隙水圧および側圧の原点を設定する。

##### (2) 供試体の設置

下から、ポーラスストーン→ナイロンメッシュ→供試体→ナイロンメッシュ→ポーラスストーンの順に積み上げ、側面ろ紙を巻き、メンブレンをかぶせる。慎重に供試体をペDESTAL上を設置し、供試体設置過程(PC操作)により、キャップを供試体に設置させる。供試体の上部及び下部のメンブレンをOリングにより、キャップ及びペDESTALに固定する。

##### (3) 耐圧セルの設置

耐圧セルの上盤及び下盤のOリングに粘土などが付着していないことを確認した後、耐圧セルをゆっくりとかぶせ、ネジで固定する。セル上部の空気孔を閉じた後、三軸セル給排水ポンプを用いてセル水を入れ、セル内を完全に水で満たす。

##### (4) 予圧密

載荷初期における供試体の安定性を高め、かつ気泡の混入による間隙水圧測定の誤差を小さくするため、試験の開始前に小さい圧力で予圧密を行う。

##### (5) 供試体の飽和

###### ①背圧変位制御

背圧ポンプが上昇し、供試体下端から上端へ通水が行われる。2cc/minの通水速度で10cc以上通水する。

###### ②背圧減圧制御

供試体に二重負圧を与えながら通水することで、供試体の飽和度を高める。ここで、二重負圧とは、供試体に負圧を与えると同時に有効応力が一定となるようにセル内も負圧にする制御である。間隙水圧・40kPa、有効応力 10kPaの制御を行いながら、デガッサを経由して脱気された脱気水を供試体下部から供給し、供試体上部に排水する。通水速度の調節は供試体下部に通じる経路に設置されたバルブで行い、通水量は背圧ポンプの体積変化から求められる。このときバルブを開きすぎると、供試体の間隙水圧及び有効応力が所定の値を保持す

ることができなくなるので注意する。

また、背圧減圧制御を行うと背圧ポンプ内に空気が入るため、通水終了後にマニュアル運転により背圧ポンプ内の空気を外部に排出する。

### ③背圧載荷

供試体に背圧を与え、供試体内の気泡を潰して供試体の飽和度を高める。有効応力  $10\text{kPa}$  の制御を行いながら、背圧  $100\text{kPa}$  を載荷する。

### (6) B 値計測

側圧を  $10\text{kPa}$  載荷し、1 分後に除荷する。載荷した際の  $10\text{kPa}$  の側圧の変動に対して、間隙水圧がどれだけ変動したかをコンピュータ内で計算され、B 値が算出される。

### (7) 等方圧密

等方圧密は表-3 に示す圧密圧力で段階載荷を行うが、5 段階目終了後にせん断過程に入るケース、6 段階目終了後にせん断過程に入るケース、7 段階目終了後にせん断過程に入るケースの 3 ケースを行う。つまり、拘束圧  $157\text{kPa}$ 、 $314\text{kPa}$ 、 $628\text{kPa}$  の 3 ケースでせん断を行う。

### (8) 圧縮せん断

圧密終了時の圧密圧力を拘束圧として、軸ひずみ速度  $0.05\%/min$  として最大軸ひずみ  $15\%$  までせん断を行う。軸ひずみが  $15\%$  に達すると、制御により自動的にせん断が終了する。

表-3 段階載荷時の圧密圧力  $p'$

段階	1	2	3	4	5	6	7
$p'(kPa)$	9.8	19.6	39.2	78.5	157	314	628

## 4.2 試験結果

非排水 1-1 の試験結果として、 $p'-q$  関係、 $\varepsilon_s-q$  関係、 $\varepsilon_s-u$  関係をそれぞれ図-8.1~8.3 に示す。ここで、軸ひずみが  $15\%$  に達した時の  $q/p'$  を各拘束圧について算出し、その平均値を限界状態係数  $M$  としている。

非排水 1-2 の試験結果として、 $p'-q$  関係、 $\varepsilon_s-q$  関係、 $\varepsilon_s-u$  関係をそれぞれ図-9.1~9.3 に示す。

非排水 2 の試験結果として、 $p'-q$  関係、 $\varepsilon_s-q$  関係、 $\varepsilon_s-u$  関係、 $\varepsilon_s-\Delta\sigma'_r$  関係をそれぞれ図-10.1~10.3 に示す。ここで、 $\Delta\sigma'_r$  はセル圧の変化量を表す。非排水 2 のせん断過程における過剰間隙水圧については、せん断初期において最大  $2\text{kPa}$  程度の過剰間隙水圧が発生しているが、その後は非常に精密に間隙水圧一定制御が行われていることを確認した。

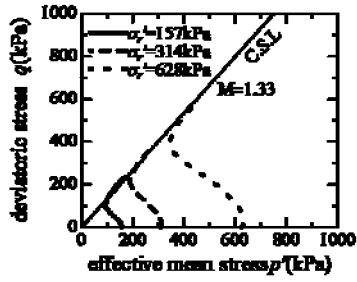
排水せん断の試験結果として、 $p'-q$  関係、 $\varepsilon_s-q$  関係、 $\varepsilon_s-\varepsilon_v$  関係をそれぞれ図-11.1~11.3 に示す。 $p'-q$  図の  $\sigma'_r=628\text{kPa}$  のグラフでは、軸ひずみ  $15\%$  の時点でも限界状態に達していないと考えられるため、限界状態係数  $M$  の算出時には考慮していない。

非排水せん断試験については、拘束圧の相違にかかわらず従来の三軸試験で見られるような非排水経路を描いていることがわかる。また、平均有効主応力  $p'$  はせん断に伴い減少していき、最小値に達した後に増加していく傾向がみられる。 $\varepsilon_s-q$  図と併せて見ると、 $p'$  が最小値に達した後にせん断に伴う軸差応力の増加が緩やかになることがわかる。また、拘束圧の増加に伴い、せん断強度及び間隙水圧が増加している。 $\varepsilon_s-\Delta\sigma'_r$  図においても、 $\varepsilon_s-u$  図と同様の傾向がみられる。

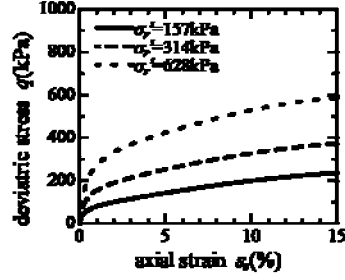
排水せん断については、拘束圧の相違にかかわらず従来の三軸試験で見られるような排水経路を描いていることがわかり、非排水せん断試験と同様に、拘束圧の増加に伴い、せん断強度が増加していることがわかる。また、 $\varepsilon_s-\varepsilon_v$  図では、拘束圧と体積ひずみ  $\varepsilon_v$  の間に規則性は見られなかった。

また、非排水 1-1 と非排水 1-2 の試験結果の比較を行ったところ、間隙水圧の上昇に伴って、管路の膨張・収縮のキャリブレーションの影響が大きくでていることから、キャリブレーションが正常に機能していると推測された。

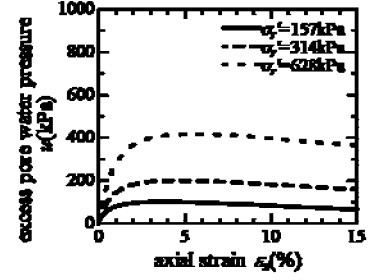
従来の拘束圧一定の非排水せん断と新たな制御である間隙水圧一定の非排水せん断を比較すると、拘束圧一定の方が高いせん断強度を示す傾向がみられた。どちらの制御が正確であるかという議論は本研究の範囲だけでは困難であるが、間隙水圧一定という新たな制御方法を提案することができた。



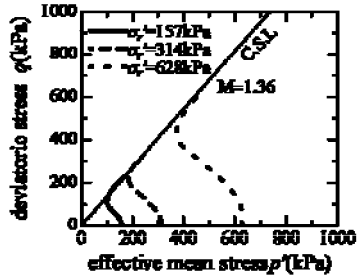
図・8.1  $p'-q$  関係



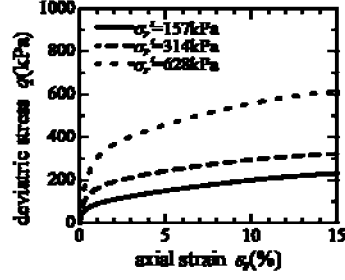
図・8.2  $\epsilon_s - q$  関係



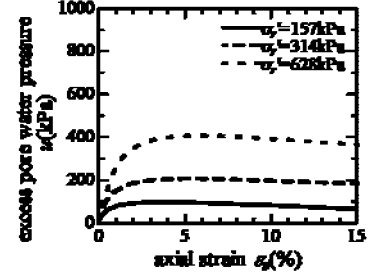
図・8.3  $\epsilon_s - u$  関係



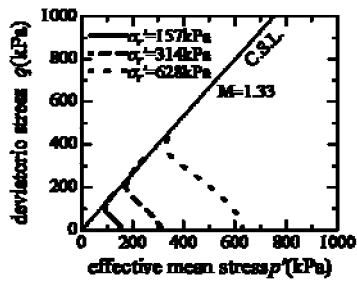
図・9.1  $p'-q$  関係



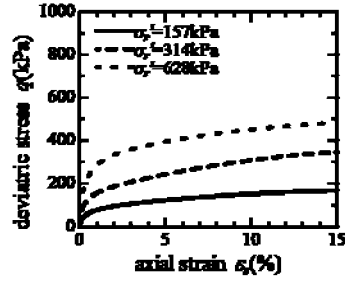
図・9.2  $\epsilon_s - q$  関係



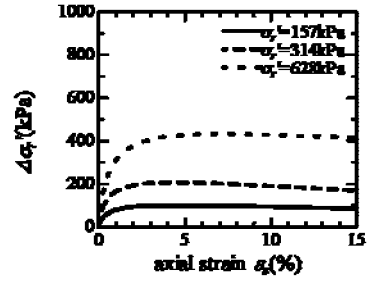
図・9.3  $\epsilon_s - u$  関係



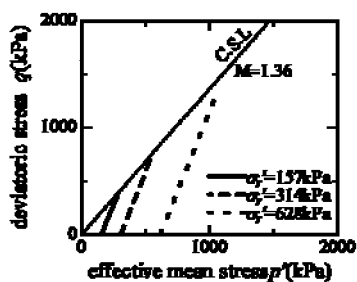
図・10.1  $p'-q$  関係



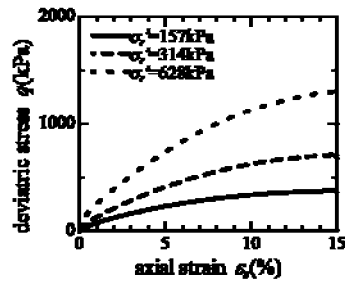
図・10.2  $\epsilon_s - q$  関係



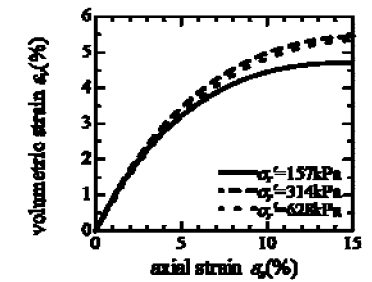
図・10.3  $\epsilon_s - \Delta\sigma'_v$  関係



図・11.1  $p'-q$  関係



図・11.2  $\epsilon_s - q$  関係



図・11.3  $\epsilon_s - \epsilon_v$  関係

## 5. 有限要素解析による三軸試験の再現

有限要素解析コード DACSAR-MP<sup>4)</sup>を用いて、スマート三軸試験装置による各種三軸試験の再現を試みる。本章では、その再現方法、解析条件、解析結果等について述べる。



## 5.1 解析条件

図-12に示すように、軸対象条件で三軸試験に用いる円柱供試体を再現する。また、図-13に示すように、幅 25mm、高さ 100mm の解析領域を  $5 \times 10$  の 50 要素に分割する。1つの要素は9つの節点からなっており、全節点数は 231 である。変位境界については、上端及び下端の右端節点の水平方向の変位を固定することで、実際の三軸試験における供試体がキャップとペデスタルに固定された状況を再現している。

図-14に示す経過時間と解析領域に与える平均有効主応力  $p$  (kPa) のグラフに沿って、段階载荷による等方圧密過程及び圧縮せん断過程を再現した解析の流れを以下に述べる。

- ①初期に 9.8kPa の応力を全要素に与える。また、背圧 100kPa に相当する水頭を与える。
- ②1 分間かけて、9.8kPa の等方応力を与える。
- ③圧密時間として、60 分間放置する。
- ④与える等方応力を 2 倍にして、②～③の手順を繰り返す。(段階载荷の再現)
- ⑤所定の等方応力(拘束圧)での圧密が終了したら、軸ひずみ速度 0.05%/min、最大 軸ひずみ 15%に相当する変位を解析領域の上端節点に一樣に与える。

また、表-4 に入力パラメータをまとめる。本解析は全て飽和土を対象としているため、不飽和土の剛性を表すパラメータ等は省力する。

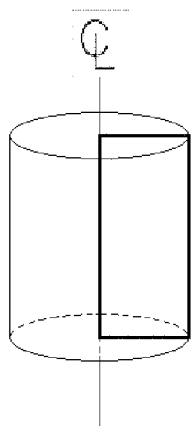


図-12 解析領域の模式図

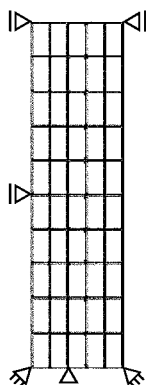


図-13 メッシュ図

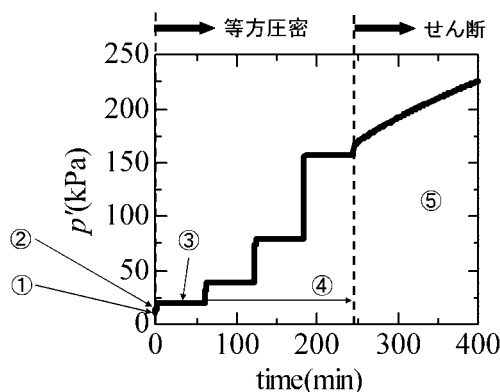


図-14 解析中の経過時間と平均有効主応力の関係

表-6.1 入力パラメータ

$\lambda$	$\kappa$	M	$\nu$
0.15	0.018	1.33	0.34
$k(m/day)$	$e_i$	$\gamma_i(t/m^3)$	$n_E$
0.0019	1.18	1.76	1.3

## 5.2 解析結果

非排水せん断試験を再現した解析の結果と実測値の  $p'-q$  関係、 $\varepsilon_s-q$  関係、 $\varepsilon_s-u$  関係を図-15.1~15.3に示す。ここで、実測値は非排水 1・2 の試験結果をプロットで表しており、解析値は実線で表している。これらの図から、実測値を概ね再現できていることがわかる。しかし拘束圧の高いグラフでは、解析値は実測値に比べて早い段階で限界状態線 (Critical State Line) に達し、その後  $q$  は漸増傾向に、 $u$  は漸減傾向に移行しており、実測値とは少し異なる挙動を示していることがわかる。

排水せん断試験を再現した解析の結果と実測値の  $p'-q$  関係、 $\varepsilon_s-q$  関係、 $\varepsilon_s-u$  関係を図-16.1~16.3に示す。これらの図から、非排水せん断と同様に実測値を概ね再現できていることがわかる。しかし、 $\varepsilon_s-\varepsilon_v$  のグラフにおいて実測値では拘束圧の大きさと体積ひずみの間に規則性は見られないが、解析では拘束圧が大きいほど体積ひずみも大きくなっていることがわかる。解析値の軸ひずみ 15%における各拘束圧間での体積ひずみの差は 1%

程度とかなり小さいことを考慮すると、実際の試験時（特に供試体成形時）の人的誤差が影響していることが要因の1つとして考えられる。

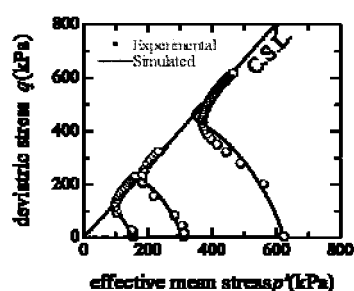


図-15.1  $p'-q$  関係

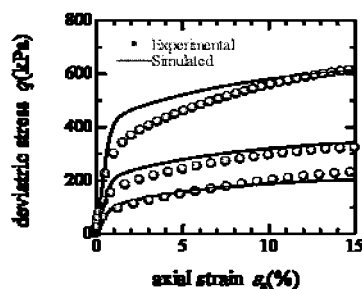


図-15.2  $\varepsilon_s - q$  関係

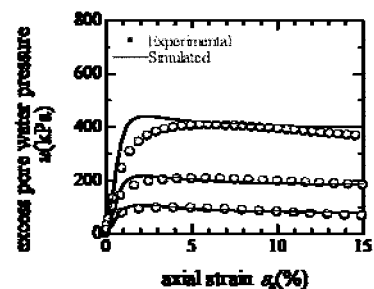


図-15.3  $\varepsilon_s - u$  関係

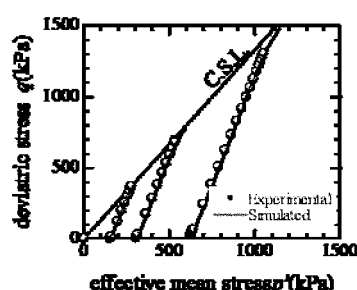


図-16.1  $p'-q$  関係

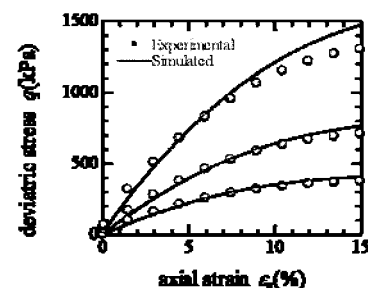


図-16.2  $\varepsilon_s - q$  関係

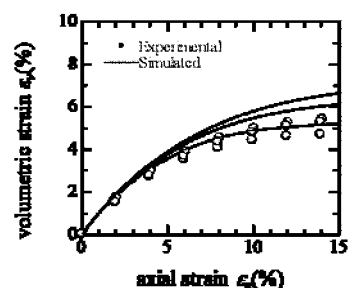


図-16.3  $\varepsilon_s - \varepsilon_v$  関係

## 6. 結論

本研究では、スマート三軸試験装置の性能照査を目的として、カオリンクレーから作製された軟弱な予圧密供試体を対象に、各種圧縮せん断試験をスマート三軸試験装置により行った。さらに、有限要素解析による各種三軸試験の再現を行い、実測値との整合性について検討を行った。各種三軸圧縮せん断試験及び解析の結果から、スマート三軸試験装置では従来の装置と同様の試験を高精度に行われることが示された。また、間隙水圧一定という新たな非排水せん断も可能であることが示された。今後はさらに、不飽和土を対象とする三軸試験等も行い、より汎用性のある試験装置であることを実証していく必要がある。

## 参考文献

- 1) 社団法人地盤工学会：地盤工学用語辞典，PP.175~176
- 2) Alan.W.Bishop and D.J.Henkel：THE MEASUREMENT OF SOIL PROPERTIES IN THE TRIAXIAL TEST, Edward Arnold (PUBLISHERS) LTD, 1957
- 3) 土田孝：乱さない海成粘土の正規圧密状態におけるせん断特性について，港湾技研誌料, No.444, 1983.3.
- 4) 金澤伸一：不飽和土の数理モデルに基づく締固め土構造物の力学挙動評価，平成21年度神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻博士論文，2009

著者：1) 河津次郎，電源開発株式会社；2) 安原昇平，神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻；3) 河井克之，都市安全研究センター，准教授；4) 飯塚敦，都市安全研究センター，教授

# The triaxial compression tests with the smart triaxial apparatus

Jiro Kawazu  
Syohei Yasuhara  
Katsuyuki Kawai  
Atsuki Iizuka

## Abstract

The triaxial test has been widely used in the field of geotechnical engineering. The traditional triaxial apparatus has the following objection: Total apparatus included the compressor to give air pressure etc. are very large and heavy. Constitution of the apparatus is very involved, so the operation of the apparatus is difficult for a beginner.

Then, Kobayashi et al. developed the smart triaxial apparatus. The main component of the apparatus is highly simplified and the total weight of it dropped to about 40kg. In addition, the setup and control of the test process are carried out by PC and PLC (Programmable Logic Controller). Holistically, it is said that the smart triaxial apparatus overcomes the objections the traditional triaxial apparatus has. However, the authority of the smart triaxial apparatus is not established at the present stage, because its actual performances come short.

In this study, isotropic consolidation tests and a series of triaxial compression test were performed with the smart triaxial apparatus to check the performance quality of the apparatus. Next, the applicability of the elasto-plastic constitutive model, in reproducing the mechanical behavior of the test result, was examined.

From the results of this study, it is confirmed that the smart triaxial apparatus performs high-precision control and it is found that the apparatus is user-friendliness.