砂の低拘束圧領域における超大型三軸圧縮試験

(Large Scale Triaxial Compression Test on Sand)
at Low Confining Pressure

福 島 伸 二ⁱ⁾ (Shinji Fukushima)
望 月 美 登 志ⁱ⁾ (Yoshitoshi Mochizuki)
香 川 和 夫ⁱⁱ⁾ (Kazuo Kagawa)
石 井 武 美ⁱⁱⁱ⁾ (Takemi Ishii)

キーワード：応力-ひずみ曲線／三軸圧縮試験／砂／粗粒土 (IGC: D 6)

1. ま え が き

ロックフィルダム、捨石マウンドなどの粗粒材よりなる構造物の安定性を正確に評価するには、粗粒材の強度変形特性を供試体寸法の大きい大型三軸圧縮試験などにより調べる必要がある。この種の構造物は大規模なものであるが、試験の対象となる拘束圧領域は、想定される破壊時の最小主応力で表すと $\sigma_{3f}=0.5\sim2.0\text{ kgf/cm}^2$ 程度であり、大型試験にとっては任拘束圧の領域に属する。つまりこの位の拘束圧領域における大型三軸圧縮試験では供試体寸法が大きいために供試体の自重、セル水位などが供試体の応力状態に影響を及ぼし、これを著しく非一様なものにしている。したがって大型試験機により粗粒材の強度・変形特性を正確に調べるためにはこのような低拘束圧領域における応力分布の非一様性の影響を考慮した試験法の確立が必要である。

本論文は粗粒材の強度・変形特性を調べるために著者らが使用している超大型三軸圧縮試験機（供試体寸法は直径 $d_s=120\text{ cm}$ 、高さ $h_s=240\text{ cm}$ ）の検定をするために、砂の超大型三軸圧縮試験と小型三軸圧縮試験を拘束圧領域 $\sigma_3=0.5\sim2.0\text{ kgf/cm}^2$ において実施し、両試験の結果を比較したものである。

2. 試 験 方 法

2.1 超大型三軸圧縮試験

本研究で使用した超大型三軸圧縮試験機は粗粒材料の力学的特性を調べる目的で開発されたもので、供試体寸

法は直径 $d_s=120\text{ cm}$ 、高さ $h_s=240\text{ cm}$ である¹⁾。

図-1 に本試験システムの全体図を示してある。側圧 σ_c はコンプレッサーからの高圧縮空気をレギュレータにより所定の圧力に制御して、供試体体積変化測定用タンク (TA) 内で水圧に変換して供試体に加える。また軸荷重は、油圧ユニットからの加圧油を載荷シリンダー内に一定流量ずつ流し込み、載荷プランジャーを押し上げることに供試体に加える。軸荷重載荷時の軸変位速度は油圧ユニットからの油量を流量調整弁により調節するが、本研究では軸変位速度は $\dot{\epsilon}_a=0.3\%/min$ とした。供試体の体積変化は、供試体の体積変化分だけの水が三軸セル内からタンク TA に流入するようしておき、このタンク内の水位を差圧計により測定して求める。載荷プランジャーが三軸セル内に貫入すると、この貫入した容積分の水はそれぞれ載荷プランジャーの半分の断面積をもつ2つの補正シリンダー (CA, CB) に流入する。こうすることにより載荷プランジャー貫入による三軸セルからのタンク TA への水の流出をなくし、タンクへは供試体の体積変化分だけの水が流出する。

供試体の上下端面は、この面が主応力面となるように図-2 に示すように厚さ 0.5 mm のゴムシートをキャップあるいはペデスタル面にシリコンシーラント (タイルメント社製、H型) で接着し、更にシリコングリース (信越化学 KS63G) をはさんでゴムシートを置いて摩擦を除去した。

(軸応力・側方応力の計算)

本試験は寸法の大きい供試体を用いているので、供試体に作用している応力を求めるには供試体の自重、セル水位 (供試体の高さ方向にセル水圧が異なる)、ゴムスリーブによる供試体の変形の拘束などの影響を考慮する必要がある。

軸応力 σ_a は供試体の自重の影響を考慮して図-3 に示すように、平均的な応力として供試体中央部 (高さ h_s の $1/2$ の位置) で計算している。鉛直方向の力のつり

i) フジタ工業 (株) 技術研究所 トンネル研究室 (横浜市港北区大
棚町 74)
ii) フジタ工業 (株) 技術研究所 トンネル研究室 室長
iii) フジタ工業 (株) 土木本部 原子力部
(1988. 6. 22 原稿受付・討議期限 1989. 10. 1, 要請があれば 1 か月
の期限延長可能)

図-1 超大型三軸圧縮試験システム

図-2 超大型供試体の端面条件

合いから、供試体中央部での軸応力は

$$\sigma_a = (P_a + W_c + W_w) / A_s + \sigma_c (1 - a / A_s) + \rho_a h_s / 2 \quad (1)$$

となる。また比較のために、供試体上端と下端での軸応力

$$\sigma_a^{\text{TOP}} = \sigma_a - \rho_a h_s / 2, \quad \sigma_a^{\text{Bottom}} = \sigma_a + \rho_a h_s / 2 \quad (2)$$

も求めた。ここで P_a はロードセルによる軸荷重の測定値、 W_c はキャップ重量、 W_w はキャップ上部の水の重量で、供試体下面からタンク TA 内の水面までの高さを $h_B (= h_{BD} + \Delta h_B)$ とすると $W_w = (A_s - a')(\Delta + h_B - h_{TP})\gamma_w$ となる。ここで Δ は三軸セル上面からキャップ上面までの平均高さ、 a' はロードセル部の断面積である。また ρ_a は試料砂の乾燥密度である。

本試験では供試体はすべて水中に入っており、またその容積も大きいので、供試体には大きな浮力が鉛直上向

図-3 超大型供試体の応力の算定

きに作用する。この浮力による応力は図-3 を参照して、対象とする断面までの供試体の水中容積より以下のように求まる。

$$\begin{cases} \Delta\sigma_{VF}^{\text{TOP}} = (1 - A_p / A_s)(h + h_s)\gamma_w - W_{PE} / A_s \\ \Delta\sigma_{VF} = (1 - A_p / A_s)(h + h_s / 2)\gamma_w - W_{PE} / A_s \\ \Delta\sigma_{VF}^{\text{Bottom}} = (1 - A_p / A_s)h\gamma_w - W_{PE} / A_s \end{cases} \quad (3)$$

(1) 式にこれを加えて浮力の補正をしたが、上式で計算される補正量が負になる場合、つまり浮力そのものがペデスタル重量 W_{PE} より小さい場合にはこの補正量

は0である。ここで A_P はプランジャの断面積（直径 40 cm）、 h はペデスタルの平均高さ（20 cm）、そして W_{PE} はペデスタルの重量である。

側方応力は以下のように求める。ゴムスリーブの外側から作用する側方応力 σ_r^* は、供試体中央部での水平方向の力のつり合いから

$$\sigma_r^* = \sigma_c + (h_B - h_s/2) \gamma_w$$

となるから、求めるべき側方応力 σ_r は以下に示すゴムスリーブの拘束力の補正（（5）式）をした

$$\sigma_r = \sigma_r^* - \Delta\sigma_{rm} \quad (4)$$

である。

（ゴムスリーブの拘束力の補正）

試験後の供試体の観察によると、供試体が軸方向に圧縮されると、ゴムスリーブは軸方向に座屈しており、ゴムスリーブはこの方向に供試体を拘束しないが、横方向への供試体の変形を拘束するものと考えられる。したがってゴムスリーブによる供試体の変形の拘束の影響は、側方応力のみゴムスリーブが、理想的な弾性薄肉円筒として供試体と共に変形するものとしてゴムスリーブの拘束力を求めて補正した。供試体の側方ひずみを ε_r とすると、水平方向の力のつり合いから補正值は

$$\Delta\sigma_{rm} = 2t_m(\sigma_r^* - E_m\varepsilon_r)/d_s \quad (5)$$

となる。ここで t_m 、 E_m はゴムスリーブの厚さとヤング率で、今回使用したゴムスリーブはそれぞれ $t_m = 0.5$ cm、 $E_m = 45$ kgf/cm² である。

（供試体の作製方法）

本試験で使用した砂は豊浦砂 ($G_s = 2.64$, $e_{\max} = 0.977$, $e_{\min} = 0.605$) である。供試体は以下のように作製した。ゆる詰め状態の供試体は、空気乾燥状態にある砂を多重ふるい（4層でふるい目の組み合わせは上から 9.54, 4.76, 4.76, 4.76 mm）により約 80 cm の高さから雨を降らすように自由落下させて作製した。この時の供試体の間隙比は約 $e = 0.84 \sim 0.88$ ($D_r \approx 34\%$) である。また密詰め状態の供試体は、ゆる詰め状態の供試体と同様に砂を自由落下させた後、層厚 60 cm ごとにバイブレータにより加振して作製した。この時の供試体の間隙比は約 $e = 0.68 \sim 0.70$ ($D_r \approx 70\%$) である。本試験はすべて乾燥状態の供試体を所定の拘束圧 (σ_{rc}) まで等方圧密した後、排気状態で圧縮せん断した。尚、供試体内の間隙空気は図-1 の負圧タンク (TB) を開放状態にして行う。

2.2 小型三軸圧縮試験

小型三軸圧縮試験は、供試体寸法が直径 $d_s = 10$ cm、高さ $h_s = 20$ cm で、供試体の端面条件は超大型試験と同じになるように図-4 に示すように厚さ 0.15 mm のメンブレンシートとシリコングリース (KS63G) の互層を上・下端面に置いている。また供試体を被うメンブレ

図-4 小型供試体の端面条件

ンの厚さは $t_m = 0.3$ mm である。

供試体に作用している応力は、供試体自重を考慮して、供試体中央部において計算し、ゴムスリーブの拘束力による影響は超大型試験と同様に（5）式で補正した。

供試体はモールド中に空気乾燥状態にある砂をロードで雨を降らすように自由落下させて作製し、密度の調節は落下高さを変えて行った。

供試体は、すべて飽和状態にして、所定の拘束圧 (σ_{rc}) まで等方圧密し、排水条件で軸ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_a = 0.3\%/min$ でせん断した。

超大型 (L-TC) と小型三軸圧縮試験 (S-TC) の結果を比較するために、試験条件はできる限り同じになるようにしたが、両試験の主な相違は以下のようである。S-TC では試料として飽和砂を用いているが、L-TC では乾燥砂を用いている。このため L-TC では供試体高さが大きいだけでなく、乾燥砂を用いているために自重の影響が現れやすいといえる。また供試体を作製するために乾燥砂を自由落下させる時に、L-TC では多重ふるいを用いたが（密詰め供試体では更にバイブレータで加振）、S-TC ではロートを用いた。

3. 試験結果

図-5 (a), (b), (c), 図-6 (a), (b), (c) にそれぞれ拘束圧 $\sigma_{rc} = 0.5, 1.0, 2.0$ kgf/cm² における L-TC と S-TC により得られた応力-ひずみ関係を示してある。ここで示した軸ひずみ (ε_a) と体積ひずみ (ε_v) は、供試体が理想的な円柱として変形するものとして求めた値である。これらの図において L-TC では自重、セル水位、浮力などの影響により供試体の高さ方向に軸応力、側方応力が非一様に分布しているため、L-TC の供試体の上端部 (Top) と下端部 (Bottom) において求めた応力比 ($(\sigma_1/\sigma_3)^{\text{Top}}$ と $(\sigma_1/\sigma_3)^{\text{Bottom}}$) も示してある。また図中には供試体中央部における最大応力比時 ($(\sigma_1/\sigma_3)_{\max}$) の最小主応力 (σ_{3f}) も示してある。これらの

図から、L-TC から得られる供試体各部の応力-ひずみ曲線は差があり、これらの差は供試体各部の拘束圧の差では説明できないようである。この傾向は拘束圧が低いほど顕著である。また L-TC と S-TC から得られた応力-ひずみ関係を比較すると、L-TC の応力-ひずみ曲線は S-TC のものより初期剛性が高く、体積変化もより

密な挙動を示している。

図-7 (a), (b), (c) には各拘束圧での応力-ひずみ曲線から最大応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_{\max}$ 時において粘着力成分を 0 とした求めた内部摩擦角

$$\phi = \sin^{-1} \left[\frac{(\sigma_1/\sigma_3)_{\max} - 1}{(\sigma_1/\sigma_3)_{\max} + 1} \right] \quad (6)$$

と $\sigma_{rc} = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ における間隙比 $e_{0.5}$ の関係を示してある。これらの図には、L-TC では供試体の高さ方向の位置により応力状態が異なるので、最大応力比時の最小主応力 σ_{3f} を数字で示してある。また S-TC では供試体中央部における値のみ示してある。砂の (6) 式により得られる内部摩擦角は拘束圧依存性があるから、もし内部摩擦角を比較するなら同一拘束圧で行なう必要がある（乾燥砂と飽和砂の内部摩擦角の差が考えられるが、この差がもしあったとしても図-7 (a) などに典型的にみられる応力の非一様分布による差よりずっと小さいので、ここではこの差はないものとする）。しかし L-TC の供試体の高さ方向に応力状態が一様に分布していないので、同一拘束圧における比較は必ずしも可能ではないが、以下これらの図からわかる一般的傾向について述べる。供試体中央部で、かつ同一拘束圧でみると、低拘束圧でゆる詰め状態では中央部における内部摩擦角の方が S-TC によるものより大きいが、密詰め状態では逆になる傾向がある。そして拘束圧が高くなると密度によらず全体的に L-TC による内部摩擦角は S-TC によるものより小さくなる傾向がみられる。

(a) ゆる詰め, $\sigma_{rc} = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$

(b) ゆる詰め, $\sigma_{rc} = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$

(c) ゆる詰め, $\sigma_{rc} = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$

図-5 応力-ひずみ関係

4. 考 察

供試体が要素としての条件を満足していれば、供試体の寸法に関係なく同じ応力-ひずみ関係、強度を示すはずである。L-TC と S-TC を比較すると、L-TC の供試体は高さ方向に自重、セル水位、浮力などの影響によ

り応力分布が一様になっていないのはこれまで述べてきたとおりである。例えば、L-TC における拘束圧 $\sigma_{rc}=0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の試験は、供試体の非一様性の程度からみると、S-TC では $\sigma_{rc}=0.02\sim 0.03 \text{ kgf/cm}^2$ における試験に相当している。これに対して、S-TC の供試体は自重、セル水位の影響はあるが、供試体の高さが小さいから、本研究における拘束圧領域ではほとんど問題にならない（供試体の応力は一様に分布しているとみなせる）。このような拘束圧領域における L-TC と S-TC の試験結果の比較は供試体の寸法効果の問題というよりも供試体の応力の非一様性の問題としてとらえる必要があることがわかる。この観点からすれば、要素として S-TC の供試体は L-TC のものに比較して格段にすぐれているといえよう。このように L-TC においては応力の非一様性のためにせん断中に供試体各部が一様に変形をしない。この傾向は拘束圧が低いほど顕著である。例えば、写真-1 (a), (b), (c) にそれぞれ試験中の初期拘束圧が $\sigma_{rc}=0.5, 1.0, 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ における試験後の供試体の変形状態を示してある。これらの写真によると、拘束圧が低いほど供試体上部に変形が集中し、側方への膨張量が大きいたことがわかる。このことは供試体のうち、応力比 σ_1/σ_3 がより大きい上端部ほど大きな変形が生じ、先に破壊に至っていることを示している。

以下、L-TC の供試体の上端部からの破壊について応力の非一様から考えてみる。ここで S-TC の供試体から得られた応力-ひずみ曲線が砂の要素として真の応力-

(a) 密詰め, $\sigma_{rc}=0.5 \text{ kgf/cm}^2$

(b) 密詰め, $\sigma_{rc}=1.0 \text{ kgf/cm}^2$

(c) 密詰め, $\sigma_{rc}=2.0 \text{ kgf/cm}^2$

図-6 応力-ひずみ関係

ひずみ曲線とする。図-6 (a) の $\sigma_{rc}=0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の S-TC 応力-ひずみ曲線を、双曲線関数

$$R=1+\frac{\epsilon_1}{a+b\epsilon_1} \quad (7)$$

で近似する。係数 a, b の決定は図-8 のように決定される。L-TC の供試体の各部分もこの要素としての応力-

ひずみ曲線に従うはずである。もし L-TC の供試体の上端部が軸ひずみ $\epsilon_1^{\text{Top}}=10\%$ の変形が生じた時の応力比は上式から $R^{\text{Top}}=3.801$ となる。この時、供試体中央部、下端部における応力比を自重、セル水位、浮力の影響を考慮して求めるとそれぞれ $R=3.167$, $R^{\text{Bottom}}=2.760$ となる (図-9)。これらの応力比に対応する軸ひずみは、上式を ϵ_1 について解いた

$$\epsilon_1 = \frac{a(R-1)}{1-b(R-1)}$$

から求めると、それぞれ $\epsilon_1=1.61\%$, $\epsilon_1^{\text{Bottom}}=0.87\%$ となる。このことから、L-TC の供試体では応力の非一様性により上端部に変形が集中してしまうことがわかり、写真-1 の結果を裏付けている。つまり、もはや要素としてみることは無理があるようである。

L-TC の試験中の供試体の変形は、高さ変化、体積変化は外部から測定し、理想的な円柱として変形するものとして平均的な軸ひずみ、体積ひずみを求めている。このため供試体各部の実際の軸ひずみ、体積ひずみは図-6, 7 で得られた平均的な値と異なっているはずである。更に、これらのひずみ量により求めた供試体断面積、ゴムスリーブの拘束力から算定した応力も実際に供試体に作用しているものではなく、図-5, 6 で得られた L-TC の応力-ひずみ曲線における応力とひずみとは互いに対応していない。つまり、供試体の上端部ではひずみ量を過小評価しているため応力を過大評価しているのに対して、下端部ではこれとは逆にひずみ量を過大評価、応力を過小評価してしまっている。結果として、これまで

(a) ($\sigma_{rc}=0.5 \text{ kgf/cm}^2$)

(b) $\sigma_{rc}=1.0 \text{ kgf/cm}^2$

(c) $\sigma_{rc}=2.0 \text{ kgf/cm}^2$

図-7 内部摩擦角と間隙比の関係

(a) $\sigma_{cr}=0.5 \text{ kgf/cm}^2$ (b) $\sigma_{cr}=1.0 \text{ kgf/cm}^2$ (c) $\sigma_{cr}=2.0 \text{ kgf/cm}^2$

写真-1 試験後の供試体の変形状況

図-8 双曲線関数による近似

てきたように得られた L-TC の応力-ひずみ関係あるいは強度は、S-TC から得られたものと一致しないものと考えられる。したがって、本研究におけるような拘束圧領域における L-TC の供試体は、要素として考えずむしろ模型試験的に考えて、供試体各部の変形（軸変位、側方変位）を測定し、これを用いて軸ひずみ、体積ひずみを求め、更にこの変形に応じた供試体の断面積、ゴムスリーブの拘束力の補正量を求めて正確な応力を算定すれば、S-TC により得られた結果と一致するものと考えられる。ただし、供試体の破壊は応力比 (σ_1/σ_3) の小さい上端部から生じてしまうので、破壊までの応力-ひずみ曲線を求めるには上端部で計算する必要がある。

5. ま と め

超大型三軸圧縮試験では、自重、セル水位、浮力の影

図-9 超大型供試体における応力状態の非一様性

響により、供試体の応力状態は高さ方向に非一様である。この応力の非一様性の程度から考えると、超大型三軸圧縮試験の $\sigma_{rc}=0.5 \text{ kgf/cm}^2$ における試験は、小型三軸圧縮試験では $\sigma_{rc}=0.02\sim0.03 \text{ kgf/cm}^2$ のような超低拘束圧領域における試験に相当することになる。したがって超大型と小型試験による結果を比較することは単に供試体の寸法効果の問題ではなく、供試体の応力状態の非一様性をどのように取り扱うかという問題としてとられるべきであることがわかる。このため超大型三軸圧縮試験における供試体に作用している応力とこれに対応するひずみの算定するには特別な取扱いが必要である。ひとつの方法として、供試体を要素としてよりも模型試験的に考え、供試体各部の変形、つまり高さ変化、半径変化を測定し、この結果から応力、ひずみを求めるのがよいと考えられる。

通常の粗粒材の試験が、原位置に対応した拘束圧領域よりも高い拘束圧領域において実施されているが、この理由として以下のことが考えられる。

(1) 拘束圧が高くなると粒子破砕量も大きくなり、内部摩擦角を過小評価してしまうが、これは安全側の値を与える。

(2) 拘束圧が高くなれば圧密による供試体の均質化が期待でき、とにかく試験が容易である。

(3) 供試体が粗粒材の場合にはゴムスリーブに傷がつきやすく、肉厚の大きなものが必要である。例えば、布で補強した肉厚 10 mm のゴムスリーブが使用されている¹⁾。このため低拘束圧領域ではゴムスリーブの拘束力の影響が大きく、この補正が必要である。しかし、この補正法の完全なものがないため、ゴムスリーブの拘束による影響が小さい高い拘束圧領域における試験が実施される。

以上のことは、粗粒材の試験を現実的に実施するためにとられている方法である。しかし(1)にあるように強度のみを問題にする場合はよいが、粗粒材よりなる構造物の変形を扱う問題では、原位置よりも高い拘束圧領域における試験から得られた材料の応力-ひずみ特性を用いた変形解析結果はそれがすぐれた解析手法によるものであっても意味のないものである。したがって、より正確な変形解析を行うには原位置と対応した拘束圧領域における材料の応力-ひずみ特性が必要であり、このためには比較的低拘束圧領域における粗粒材の試験法の確立が必要であろう。

参考文献

- 1) 鎌田正孝・石井武美・酒見徳行・小山田吉孝・栗原明美(1975): 砂による大型三軸圧縮試験機の検定, 「フジタ工業(株)技術研究所所報」, No.12, pp.85~92.