

超大型三軸圧縮・平面ひずみ圧縮（中間主応力制御型三軸）試験機の開発

Development of Super Large-scale Triaxial and Plane Strain Compression Testing Apparatus
for Coarse-grained and Gravelly Soils

福島 伸二（ふくしま しんじ）

（株）フジタ技術研究所土木研究部土質グループ 主席コンサルタント

北島 明（きたじま あきら）

（株）フジタ技術研究所土木研究部土質グループ 主任

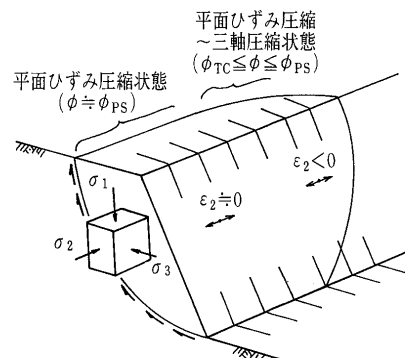
1. はじめに

山岳空港や工業・住宅用地開発で生じる高盛土、ロックフィルダムあるいは道路・鉄道盛土等の大型土構造物は主に大粒径の岩塊を含む粗粒土により盛り立てられるが、このような粗粒土の強度・変形特性はその粒径に見合った寸法の供試体を用いた土質試験により調べる必要がある。そこで当社では1972年（昭和47年）に粗粒土の強度・変形特性を正確に求めるために供試体寸法が直径／高さ $D/H=1\,200\text{ mm}/2\,400\text{ mm}$ の超大型三軸圧縮試験機を開発し^{1),2)}、これまでに数多くのロックフィル材や捨石材などの粗粒土の試験を実施してきた³⁾。しかしこの試験機は既に25年以上を経過し老朽化したため、これに代わる超大型三軸圧縮試験機を新たに開発した。ここではこの新しい試験機の概要を紹介したい。

2. 超大型試験機の開発にあたって

粗粒土の盛土材料としての特徴は、ただ単に粒径の大きい土粒子を含む土質材料であるというほかに、一連の盛土造成中に粒子破砕が生じやすく、粒径や粒度分布が種々変化してしまうことである。このため粗粒土の力学的特性は多様に変化し、強度に及ぼす各種要因を砂質土や粘性土のように体系的に整理しにくい。したがって粗粒土の強度は、相似粒度やカット粒度等によりモデル化せずに、大粒径分を含んだ原粒度の状態かあるいはそれに近い粒度での試験により直接求めることが望ましく、粒径の大きさに見合った大型供試体の土質試験が必要となる。

一方、実際の土構造物の破壊は図—1に概念的に示すように長手方向に一樣ではなく、ある限定された領域で発生し、その内部の土要素が受ける応力状態は三軸圧縮試験で供試体に再現されるような軸対象応力状態（ $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ）ではなく、長手方向の変形が拘束された平面ひずみ圧縮状態（ $\epsilon_2 = 0$ ）か、あるいはこれに近い三次元応力状態（ $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ）にあるものと考えられる。このため安定解析や応力変形解析では平面ひずみ状態で単純化した条件で行われるのが普通である。これらの解析には三軸圧縮試験により求められた土要素の強度パラメータや変形特性が使用され、解析条件との整合性に問題がある。三軸圧縮試験による強度は平面ひずみ条件におけるものより小さくやや安全側の値を与えるので、強度



図—1 盛土等の土構造物の破壊（概念図）

のばらつきや異方性の影響等の不確実性をカバーできるなどの利点がある。しかし、三軸圧縮試験による強度・変形特性はより合理的な設計が要求される場合には不経済となり、また、正確な変形予測では三軸圧縮条件と平面ひずみ条件との相違を考慮しておかなければならない。重要な土構造物ではもともと良質な盛土材の使用を前提としているので、安全率で考慮する以外の過度の安全側設計は経済性を大きく損なう。特に民間工事における大規模盛土造成のように経済性が要求される場合にはより合理的な設計が重要である。

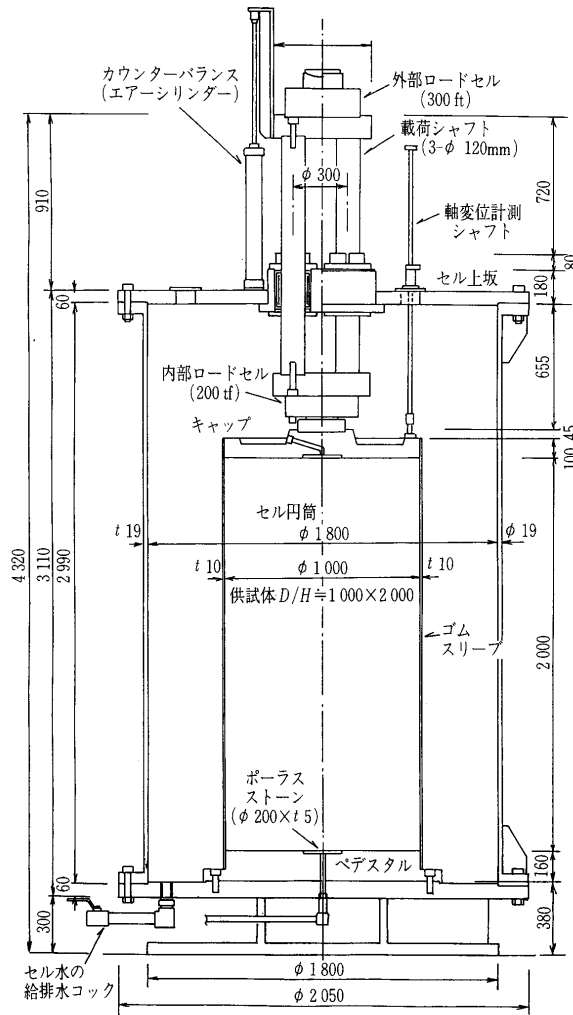
そこでここでは、超大型三軸圧縮試験機を基本にして、土構造物のより合理的な設計や変形解析のために必要な粗粒土の強度・変形特性を調べることが出来る平面ひずみ圧縮（中間主応力制御型）試験が可能なものとした。

この試験機の製作にあたっては試験可能な粗粒土の最大粒径を旧型試験機と同レベルとすること、試験費用が安価でかつ試験操作が簡単な実用的な試験機とすること、試験機一式を他の研究機関や大規模土工の現場試験室へ必要に応じて貸出し可能なことを目指した。

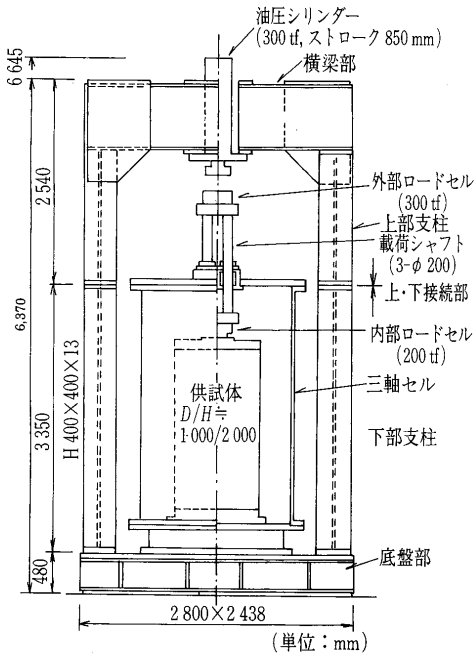
3. 超大型三軸圧縮・平面ひずみ圧縮（中間主応力制御型三軸）試験機の概要

新たに開発した超大型三軸圧縮試験機における三軸圧縮用供試体を設置した状態の三軸セル部と載荷フレームの全体図を図—2、3(a)、(b)にそれぞれ示し、また新・旧試験機の比較を表—1に示す。新しい試験機は供試体を D (直径)/ H (高さ) = $1\,000\text{ mm}/2\,000\text{ mm}$ (V (体積) $\approx 1.571\text{ m}^3$ で旧型の約6割程度)としたが、この供試体寸法であれば人頭大程度（200～300 mm）の最大粒径 $D_{\max}$ を持つ粗粒土でも粒度分布が良ければ原粒度の

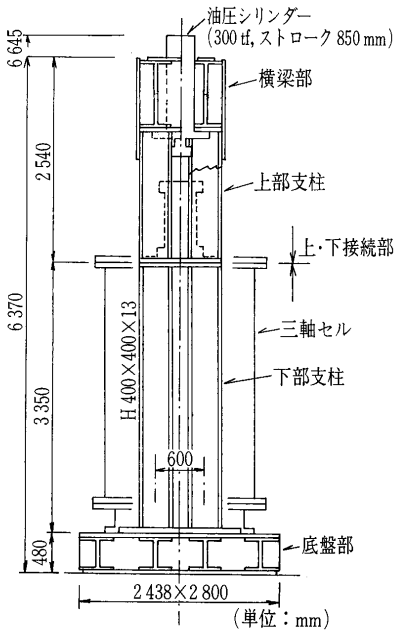
ままでの試験が可能である（著者らの経験によれば粒度分布がよければ供試体直径に対して $D_{\max} \leq (1/4 \sim 1/5) \cdot D$ である）。したがってこの試験機は、旧型に比較して試験可能な $D_{\max}$ をほとんど下げずに、試験機本体がコンパクトになったことで製作費用の低減化や、また試験に必要な土量を少なくできたので試験時間や試験費用の削減が可能になった。新・旧の試験機間の供試体寸法以外の大きな相違は試験可能な最大拘束圧を通常のコンプレッサーで負荷可能な $\sigma_{3\max} \leq 8 \text{ kgf/cm}^2$ （平面ひずみ試験では 5 kgf/cm^2 ）としてセルパイプや載荷フレームを経済的に製作できるようにした（この拘束圧でも法



図—2 超大型三軸圧縮試験機の三軸セル全体図



図—3 (a) 超大型三軸圧縮試験機の載荷フレーム (正面図)



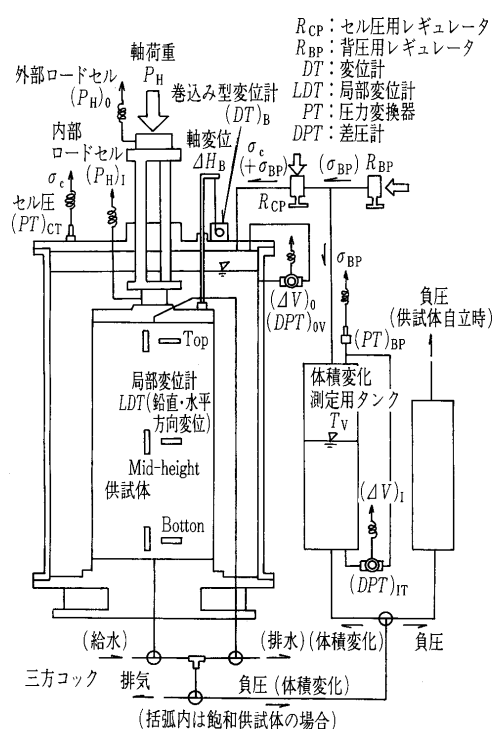
図—3 (b) 超大型三軸圧縮試験機の載荷フレーム (側面図)

表—1 新旧の超大型三軸圧縮試験機の比較

項 目	TC(旧型)	TC(新型)	PSC(σ_2 -TX)
供試体寸法 (mm)	$D/H=1\ 200/2\ 400$	$D/H=1\ 000/2\ 000$	$L \times W \times H=920 \times 800 \times 1\ 600$
試験可能な最大粒径 $D_{\max}$ (mm)	$240 \sim 300 [= (1/4 \sim 1/5) \cdot D]$	$200 \sim 250 [= (1/4 \sim 1/5) \cdot D]$	$160 \sim 200 [= (1/4 \sim 1/5) \cdot W]$
最大軸荷重 P_H (tf)	700	300	
最大圧縮変化 $\Delta H_{\max}$ (mm)	600	500	
最大側方応力 $\sigma_{3\max}$ (kgf/cm ²)	28.0 (パスカル増圧器)	8.0 (コンプレッサー)	5.0
最大水平荷重 P_L (tf)	—	—	2×20 (片側) = 40
制御可能な b -値の範囲	—	—	$0 \leq b \leq b_{ps}$ (TC~PSC)
最大水平変位 $\Delta L_{\max}$ (mm)	—	—	-180

面直高100 m を超える盛土まで十分対応できる)。また平面ひずみ圧縮試験は、三軸圧縮試験で使用する三軸セル内で試験できるように L (長さ) $\times$ W (幅) $\times$ H (高さ) $= 920 \times 800 \times 1\,600$ mm ($V \approx 1.178$ m³) の矩形供試体として (試験可能な試料の最大粒径は $D_{\max} = 160 \sim 200$ mm 程度)、三軸圧縮試験で使用する円形キャップ・ペダスタルを矩形供試体用と交換して矩形供試体の長さ方向 (中間主応力 σ_2 の方向) の変位を後述する中間主応力制御システムにより拘束してせん断するものである。

三軸セルは支柱のない圧力円筒 (内径1 800 mm $\times$ 肉厚19 mm) とし、軸荷重はこれを載荷フレーム底盤に定置させて載荷フレーム上部に設置した油圧シリンダー (載荷容量300 tf $\times$ ストローク850 mm) により載荷する方式である。三軸セル内の供試体に軸荷重を伝達する載荷シャフトは3本の軸径120 mm の焼入れ研磨鋼棒とし、これらをセル上板の同心円上 ($\phi = 300$ mm) に等間隔で配置したすり合わせ部のベアリングでガイドして軸荷重の偏心による横方向力に対する十分な剛性を確保した。載荷フレームは補剛リブ付き H-鋼と鋼板の組合せ構造で、三軸セルを固定する底盤、4本の H-鋼製の支柱、油圧シリンダーを設置した横梁部から構成されている。またこの載荷フレームは支柱の途中位置 (ほぼセル上板の位置) で底盤部と油圧シリンダーを設置したフレーム横梁部が分割できるようにしてあり、これは三軸セルを載荷フレーム底盤に定置した状態で供試体を作製するためと (このとき載荷フレームの横梁部は取り外しておく)、試験機移設のための分割輸送を容易にするためである。口絵写真—13に載荷フレームに三軸セルを設置した試験機の全景を示す (この口絵写真には図—2には示さなかった供試体作製時や載荷フレーム横梁部接続時に使用する作業台が付属してある)。



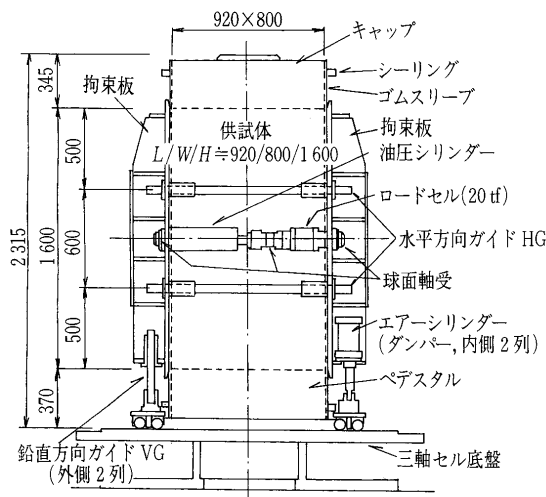
図—4 超大型三軸圧縮試験の全体システム図

図—4には超大型三軸圧縮試験システムの全体図を示す。セル圧 σ_3 は、三軸セル内の供試体が水没する位置まで満たしたセル水により、レギュレーター (加算型) R_{CP} で制御した空気圧を水圧に変換して加える。試験中の供試体の体積変化量 ΔV は、盛土材を自然含水比状態で締め固めて作製した不飽和供試体の場合や乾燥状態にある供試体の試験の場合には、セル水の水位変化を差圧計 (DPT)_{OV} で計測して求める (外体積測定)。また飽和させた供試体の試験では外部体積以外に供試体内の間隙水の出入り量を体積変化測定用タンク T_V 内に導いて、このタンク内の水位変化を差圧計 (DPT)_{IV} で計測して行うこともできる (内体積測定)。なお、この飽和供試体の試験において供試体の飽和度を高めるための背圧 σ_{BP} はレギュレーター R_{BP} により加える。供試体の高さ変化 ΔH は三軸セル上板に設置された巻込み型変位計 (DT)_B により測定する (外部変位)。これに加えて大型供試体は低拘束圧レベルでは高さ方向に自重の影響が大きく一様な変形をしないので⁴⁾、供試体の鉛直あるいは水平方向の局部的変位の測定についても検討している。

本試験機は、特に、粗粒土用の超大型試験を必要とするほかの研究機関や大規模土工の現場試験室へ試験機一式の貸出しが可能な形式としたが、そのためにこの試験機は移設時の輸送が簡単にできるように載荷フレーム部と三軸セル部を独立にして、かつ載荷フレームを支柱の中間位置から分割可能にした。また試験機全体を可能な限り軽量 (三軸試験用部品だけであれば総重量約30 tf、平面ひずみ試験用部品も加えると約38 tf) で、かつコンパクトにした (載荷フレーム底盤寸法は幅4.2 m $\times$ 奥行き3.4 m、全高さ6.65 m)。そして試験機の移設は、部品の重量、大きさが運搬可能になるように分解・分割して行うが、基本的な試験である三軸圧縮試験用設備のみであれば11 tf 積みトラック (ロングボディー) 3台で運搬が可能である。

4. 中間主応力制御システム

中間主応力制御システムは矩形供試体を三軸圧縮試験と同様にセル圧により最小主応力 σ_3 を加えた状態で、その長手方向 (中間主応力方向) の変形を拘束して平面ひずみ圧縮試験をする場合や、その方向の荷重を制御して中間主応力の影響を考慮できる3主応力試験の場合に使用するものである。このシステムは、図—5や口絵写真—14に示すように、ゴムスリートを被せた供試体を長手方向に挟むように設置した一対の拘束板 (ゴムスリートを拘束板間には摩擦軽減のためにシリコングリースを薄く塗付) と、これらを接続しかつ荷重を制御するためのロードセルと油圧シリンダーから構成されている (ロードセルと油圧シリンダーは軸力のみが作用するように球面軸受けで拘束板に接続)。この一対の拘束板は供試体の変形に応じて水平および鉛直方向のみに変位するように、以下に示すような水平・鉛直方向ガイドを設けてある。水平方向ガイドは、拘束板を車輪付き台車



図—5 中間主応力制御システム

に載せて、拘束板間に設置した油圧シリンダーの上・下段に設けた片側2本（両側で計4本）のガイドバーHGにより行っている。また鉛直方向ガイドは各拘束板に設置した2本のVG（ガイドシャフト）により行い、かつ拘束板と供試体間に生じる摩擦力の影響を軽減するために拘束板を各2本のDP（空圧シリンダー）で支持して浮動状態にして台車に載せてある。中間主応力制御システムの組立ては供試体を作製してから拘束板を限度まで広げた状態で供試体上方から降ろして行いが、この時供試体を破損させないように口絵写真—14に示すような拘束板の水平方向シャフトに取り付けたGS（ガイドサポート）と三軸セル底盤に立てたGP（ガイドポスト）によるガイド部を設けている（これらのガイドは図—5では省略してある）。

中間主応力の制御はセル内の油圧シリンダーを、これと同径のセル外に設置した油圧シリンダーのピストンをスクリージャッキで正・逆変位させて、押し・引きして加えられた最大主応力である軸荷重に依じて水平荷重をある一定の3主応力状態になるようにして行うものである。つまり、中間主応力は図—6に概念的に示すように、変位制御で加えた軸荷重 P_H に対して、水平荷重 P_L を中間主応力係数 $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ が一定値になるように制御するものである。最小主応力 σ_3 はセル圧で加えているので、供試体に作用する P_H と P_L はそれぞれ偏差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$, $(\sigma_2 - \sigma_3)$ より

$$P_H = (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot L \cdot W$$

$$P_L = (\sigma_2 - \sigma_3) \cdot W \cdot H$$

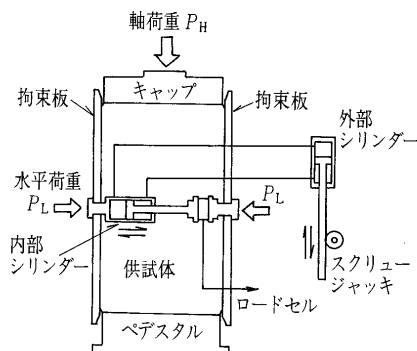
となる。そして中間主応力係数は

$$b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) = (P_L / P_H) \cdot (L / H)$$

となり、測定された軸荷重に対して水平荷重を

$$P_L = b \cdot P_H \cdot (H / L)$$

となるように制御すれば、 b -値が一定での中間主応力状態を供試体に再現できる。この時の試験における b -値の制御範囲は三軸圧縮状態 $(\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3, b = 0.0)$ と平面ひずみ圧縮状態 $(\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \epsilon_2 = 0, b = b_{PS})$ の間の中間主ひずみが膨張側にある $\epsilon_2 \leq 0$ の領域であり、この



図—6 中間主応力の制御方法

応力状態は通常の盛土やロックフィルダム等の土構造物内の土要素が受ける中間主応力状態の範囲にあると考えられるからである。なお、平面ひずみ圧縮試験の場合には供試体に両拘束板を接着させてからセル内の油圧シリンダーの回路を閉じて、拘束板の水平変位を固定し供試体の平面ひずみ条件を達成する。これらの平面ひずみ圧縮試験における拘束板や、中間主応力制御型三軸試験を行う時の中間主応力の制御方法は小型試験で実施した方式や試験実施のノウハウ^{5),6)}をそのまま採用したものである。

5. おわりに

本報告では、老朽化した旧型の超大型三軸圧縮試験機に代わる新しい試験機について紹介してきた。

この試験機は三軸圧縮試験を基本として、平面ひずみ圧縮（中間主応力制御型三軸）試験が可能なるものである。著者らは、今後この試験機を土構造物のより合理的な設計に必要な強度パラメーターを求めるため、特に民間の開発工事等で生じる高盛土のような土構造物の合理的かつ経済的な設計に役立てようと考えている。また現行の三軸圧縮試験による強度パラメーターを用いた設計体系から、解析・設計条件との整合性のよい平面ひずみ条件での強度変形特性を用いたより合理的な設計体系への対応に貢献したいと考えている。

参考文献

- 1) 鎌田正孝ほか：大型三軸圧縮試験機の性能について，フジタ工業技術研究所報，第11号，pp. 51～56, 1975.
- 2) 鎌田正孝ほか：砂による大型三軸圧縮試験機の検定，フジタ工業技術研究所報，第12号，pp. 85～92, 1976.
- 3) 福島伸二・北島 明：超大型三軸圧縮試験機の歩みとその果たした役割，土と基礎，Vol. 46, No. 11, pp. 29～32, 1998.
- 4) 福島伸二ほか：砂の低拘束圧領域における超大型三軸圧縮試験，土質工学会論文報告集，Vol. 29, No. 1, pp. 187～194, 1989.
- 5) 福島伸二：標準試験として大型三軸・平面ひずみ圧縮試験の適用性，土質工学会「三軸試験方法に関するシンポジウム」，pp. 181～186, 1991.
- 6) 福島伸二：砂の中間主応力を制御した三軸試験，土質工学会「三軸試験方法に関するシンポジウム」，pp. 187～192, 1991.

(原稿受理 1999.6.18)