

礫の微小ひずみレベルでの変形特性 I

——実験システムの開発——

Deformation characteristics of gravels at small strain levels I
—Development of the experimental techniques—

龍岡文夫*・後藤 聡**・澁谷 啓*
佐藤剛司*・孔 憲京***

Fumio TATSUOKA, Satoshi GOTO, Satoru SHIBUYA,
Takeshi SATO and Xian Jing KONG

1. はじめに

ロックフィルダムなどの大粒径材料からなる人工盛土や自然の礫質地盤の静的・動的荷重に対する変形・安定解析を合理的に行うためには、 10^{-6} (0.0001%) の微小ひずみレベルから 10^0 (100%) の大ひずみまでの 10^6 倍の大きなひずみ範囲における単調荷重および繰返し荷重に対する礫材料の一貫した応力・ひずみ関係と強度特性が必要である。すなわち、変形解析には 10^{-6} (0.0001%) ~ 10^{-2} (1%) のひずみでの変形特性が必要であり、破壊時解析には 10^{-1} (10% オーダー) までの応力・ひずみ関係と、ひずみが集中するせん断層内での 10^0 (100% オーダー) のひずみレベルでの変形特性が必要である。

しかし、一般に同一の試料で同一の応力状態での 10^{-6} ~ 10^0 での一貫した変形特性の全体像は不明である。すなわち、通常の土質試験機で測定できるひずみの範囲は通常 10^{-3} ~ 10^{-2} であり、特殊な試験機を用いても個々の試験法でのひずみの適用範囲が狭いからである。たとえば、弾性波測定 (共振法) で 10^{-6} ~ 10^{-3} 、従来の応力とひずみを直接精度良く測定できる土質試験で 10^{-4} ~ 10^{-1} 、リング直接せん断試験ではせん断層内で 10^0 ~ 10^2 以上である。

また、どのような微小ひずみレベルになると繰返し荷重時と単調荷重試験時の変形係数が一致し線形弾性状態になるのか、この二つの荷重法での変形係数のひずみ依存性は一致するのか、と言う基本的なこともはっきりしていない。したがって、解析にあたって変形特性を推定することが多く、また全体像が明らかでないので解析に用いる各種の変形係数は一貫性に欠けることが多い。このようなことから、FEM 等による計算手法の進展と変形特性の測定精度の間のアンバランスが目立ってきている。

一方、原位置地盤での応力・ひずみ関係を推定する方法を研究する必要性が高い。原位置で最も信頼をもって測定できる値は、弾性波速度から求められる 10^{-6} 程度の

ひずみレベルでのせん断剛性率 G_{max} と変形係数 E_{max} である。一方、粗粒土試料の場合、原位置の状態になるように締固めた供試体を用いた室内土質試験の結果からある程度信頼できる排水せん断強度 τ あるいは最大偏差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ を求められよう。しかし、この方法で得られる微小ひずみのレベルでの変形係数と応力・ひずみ関係は、原位置とはかなり異なっている可能性がある。

Drnevich and Massarsch (1979) は、ある種の粘土質砂質土の単純せん断変形において、基準ひずみ $\gamma_r = \tau_r / G_{max}$ を用いた $\tau / \tau_r \sim \gamma / \gamma_r$ 関係は、試料採取時等での乱れの影響によって τ と G_{max} の値が減少してもあまり変化しない、と述べている。この方法が礫にも適用できれば次の方法が考えられる。まず室内実験で 10^{-6} ~ 10^0 での一貫した変形特性を測定し、これの法則性を弾性変形係数 E_{max} 、最大偏差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ をパラメーターとして定式化する。実際の現場に対しては、上記の弾性波探査による E_{max} 、および何らかの方法によって求めた $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ を代入して、原位置での 10^{-6} ~ 10^{-1} のひずみ範囲での $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_1$ 関係を推定する。しかし、砂質土や礫に対してこの研究は皆無に近い。すなわち、 $\tau / \tau_r \sim \gamma / \gamma_r$ 関係が、供試体作製法・応力履歴等によらないでどの程度安定なものか、さらに双曲線関係が成り立つのかについての実測データに基づいた実証的研究は全く不十分である。

2. 研究目的

上記の最終的目標に対する基礎的研究として、まず礫の 10^{-6} ~ 10^{-1} のひずみの範囲での変形特性および強度特性を求めその定式化を試みる。今回の実験の特徴は以下のようにまとめられる。

- (1) 単調荷重試験と繰返し荷重試験の両方を行い、変形特性のひずみ依存性の比較を試みる。特に、単調荷重試験でひずみが 10^{-5} 以下の荷重初期での変形特性が線形弾性的であるか調べる。
- (2) 単調荷重試験の途中で微小繰返し荷重を何回も行い、微小ひずみレベルでの変形係数に対する応力比 σ_1 / σ_3 の

*東京大学生産技術研究所 第5部

**大成建設技術研究所 (元東京大学大学院学生)

***中華人民共和國大連理工大学講師 (元博士研究員)

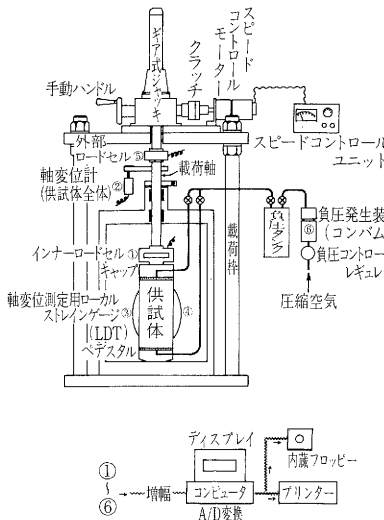


図1 ギヤ式静的荷重装置を用いた小型三軸試験機の全体システム図

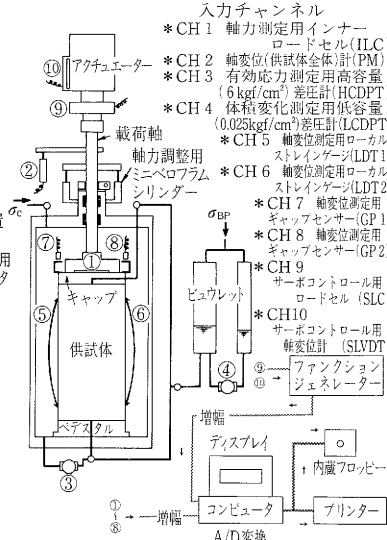


図2 大型三軸試験機の全体システム図

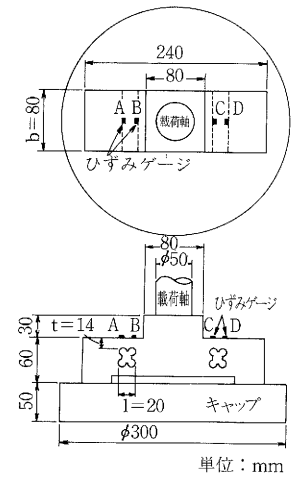


図3 大型供試体用ひずみゲージ式ロードセル

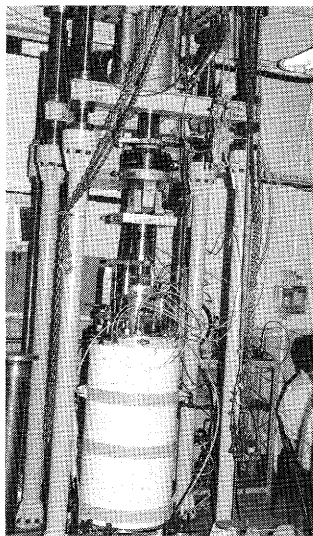


写真1 大型三軸試験機全体写真

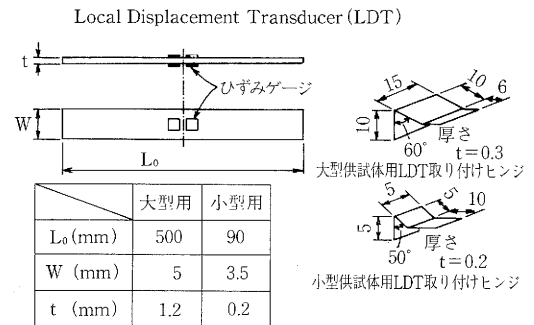


図4 製作した局所軸変位測定装置 (LDT)

影響を調べる。

(3) 軸荷重は三軸セル内に設置したロードセルで、微小軸変位は後藤 (1986) が開発した局所的測定法で、高精度に測定する。

(4) 一つの供試体と一つの試験機を用いて $10^{-6} \sim 10^{-1}$ での一貫した変形特性とせん断強度を同時に求める。

(5) 供試体直径7.5cm, 高さ15cm小型供試体と供試体直径30cm, 高さ60cmの大型供試体との比較実験を行い, 供試体寸法の影響を研究する。一般に大型三軸試験を精度

良く行うことは容易ではない。もし小型供試体で妥当な結果が出ることがわかれば、小型供試体で実験をしても良いことになる。

3. 試験方法

使用した小型および大型三軸試験機の部品は、生産技術研究所試作工場で作した。小型三軸試験機での単調荷重は変位制御で行い、容量2.5tonfのギヤ式静的荷重装置 (図1) を使用した。繰返し荷重は、空圧式繰返し荷重装置 (龍岡, 1988) を用いて荷重制御で行った。大型三軸試験機 (図2, 写真1) での単調荷重と繰返し荷重には油圧サーボ式軸荷重荷重装置 (島津サーボバルサー EHF-JB50-20L形) を用いた。

供試体の等方圧は負圧によって与え、ポテンショメータ型負圧計で測定した。したがって、圧力セルは使用していない。荷重ピストンの軸受け部に作用する摩擦力に

研究速報

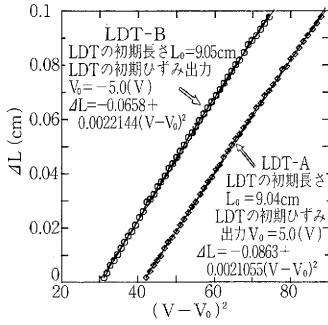


図5 製作したLDTの検定結果 (小型供試体用)

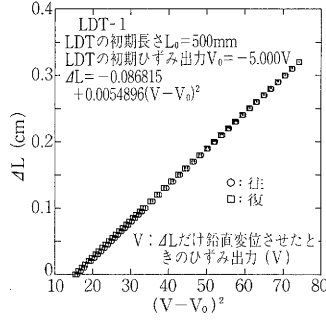


図6 製作したLDTの検定結果 (大型供試体用)

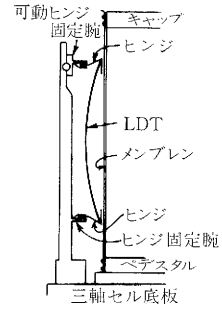


図7 供試体へのLDTの取り付け方法

よる測定誤差をなくすために、軸荷重は供試体のキャップ直上に設置した平行平板形門型構造 (谷, 1982) を持つひずみゲージ式ロードセル (図3) で測定した。ロードセルの容量は小型供試体用で±140kgfであり、大型供試体用で±50tfである。

軸変位は二種類の方法で測定した。大ひずみ用として載荷ピストンの動きを電気式変位変換器で測定した。この測定値には供試体上下端での緩み層の過大な変位を含んでおり精度は高くない。一方、微小ひずみは以下に示す局所変形測定装置 (LDT) で測定した。図4に製作した小型および大型供試体用のLDTの詳細を示す。材料はリン青銅板を用いている。これの軸方向の圧縮に伴う曲げ量をひずみゲージで測定する。LDTは各供試体側面の対角位置に二つセットして、それらの測定値を平均した。ほとんどの試験で二つのLDTの測定値の差は非常に小さかった。

大型供試体用LDTにはまず厚さ1.2mm、幅10mmのものを製作したが、軸方向圧縮に対するバネ力は約600gfでありメンブレンと供試体の密着を保証できないことがわかった。そこで幅を5mm (バネ力280gf) とした。小型供試体用にはまず厚さ0.3mm、幅3.5mmで製作した。しかし、バネ力は118gfとなり、メンブレン厚さ(0.3mm)に対して大きすぎた。そこで、使用ゲージ貼り付け面積の制限から幅を狭くできないため、0.2mmの厚さとした結果、バネ力は30gfと小さくなった。ひずみゲージは、大型供試体用と小型供試体用でそれぞれゲージ長2mm、0.5mmのものを使用し、リン青銅板の中央の表と裏側に4枚のゲージを貼り付けて4ゲージ法とした。こうすることにより温度補償ができるとともに4倍の出力を得られる。また、ひずみゲージはシリコンで防水した。

製作したLDTの検定結果を図5、6に示す。LDTの軸方向圧縮量ΔLとひずみ出力Vの関係は、二次関数：

$$\Delta L = C \times (V - V_0)^2 \quad (1)$$

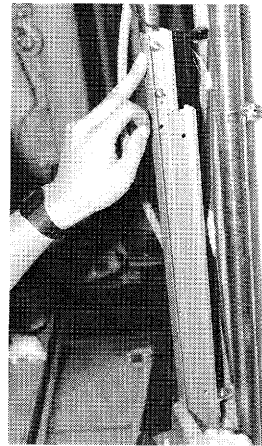


写真2 大型供試体へのLDTの取り付け

で近似できる (後藤, 1986)。ここで、Cは検定常数、V₀はLDTを自由状態でまっすぐにしたときのひずみ出力、VはLDTをΔLだけ軸圧縮させたときのひずみ出力である。図5、6を見てわかるように、(1)式の関係が成り立っている。(1)式の関係は非線形ではあるが、明確で安定した関係なので、実際の使用に際して非線形関係に起因する問題点は無い。

今回使用したLDTの最小読み取り値は以下のとおりである。大型供試体用LDTの場合、V₀ = -5 Voltになるようにアンプ出力を調整し、ΔL = 0.5mmでLDTを供試体に設置する。この時のアンプ出力をV = 0 Voltとする。1mVまで安定した読み取りが可能なので、C = 0.00548958として、Δd = C × (5.001² - 5.000²) = 5.5 × 10⁻⁵ (cm) = 0.55 (μm) (供試体軸ひずみで5.5 × 10⁻⁵ (cm) / 49.95 (cm) = 1 × 10⁻⁶) まで読み取れる。アンプ出力を10倍にすれば読み取り精度をさらに高くできる。小型供試体用LDTの場合も同様に、ΔL = 0.75mm (V = 1 Volt) で供試体に設置して測定開始した時、Δd = 2.088995 × 10⁻³ (5.001² - 5²) = 2 × 10⁻⁵ (cm) = 0.2 (μm)

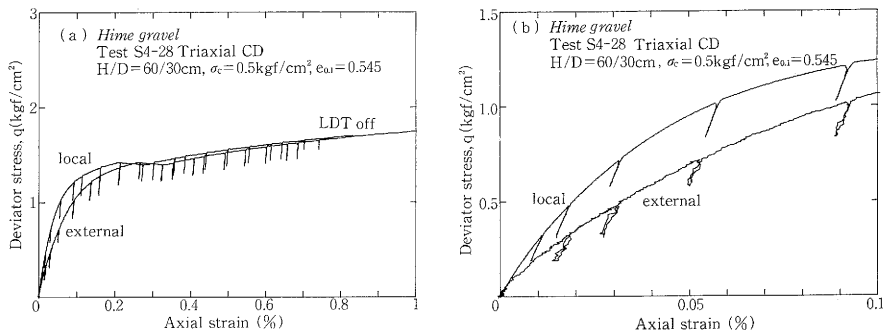


図8 大型供試体で三軸セル外部で測定した軸ひずみとLDTで測定した軸ひずみの比較の例：(a) $\epsilon_1 = 1\%$ まで、(b) $\epsilon_1 = 0.1\%$ まで

(供試体軸ひずみで $2 \times 10^{-5} / 8.925 = 2.3 \times 10^{-6}$) である。

LDTを供試体に取り付けるために、図7に示す「取り付け定規」の「ヒンジ固定腕」にヒンジをはきみ、これにLDTをセットした。次に可動ヒンジ固定腕を移動させてから、LDTのひずみ出力をゼロVoltに調節してから、ヒンジを接着剤(パーマボンド社#268)を用いて供試体側面に固定した(写真2)。小型供試体の場合も同様の取り付け定規を用いた。また、実際の三軸圧縮試験は10%程度の軸ひずみまで行ったので、LDTを破損させないため、試験の途中で供試体側面から取りはずした。

すべての試験で測定されたアナログ量を12ビットA/D変換器でデジタル量に変えて16ビットマイクロコンピュータで記録した。

4. 若干の測定例

図8に大型供試体で三軸セル外部で測定した軸ひずみとLDTで測定した軸ひずみの比較の例を示す。今回の礫の実験では供試体上下端面はろ紙一枚でポーラスストーンと接しているにもかかわらず、三軸セル外部で測定した軸ひずみにはBedding errorとロードセルのたわみのため、大きな誤差が含まれていることがわかる。この違いは、軸ひずみ $\epsilon_1 = 0.1\%$ での割線変形係数 $E_{sec} = (\sigma_1 - \sigma_3) / \epsilon_1$ を比較すると、局部(local)測定と外部(external)測定で得た値は、それぞれ1180kgf/cm²と930kgf/cm²であった。図9に、今回の研究で用いた姫礫と、最近筆者らが測定したセメント改良砂質土の三軸圧縮試験におけるLDTを用いて測定した割線変形係数 E_{sec} と $\log \epsilon_1$ の関係を示す。①同一条件での試験S4-28(直径30cm)とS4-15(直径7.5cm)の比較から、姫礫の応力・ひずみ関係における供試体寸法の影響は極めて小さいこと、②初期線形領域は、姫礫とセメント改良砂質土で、それぞれ $\epsilon_1 < 2 \times 10^{-5}$ 、 $\epsilon_1 < 1 \times 10^{-4}$ であり、本試験法で初期剛性が正確に求まること、等が明らかとなった。

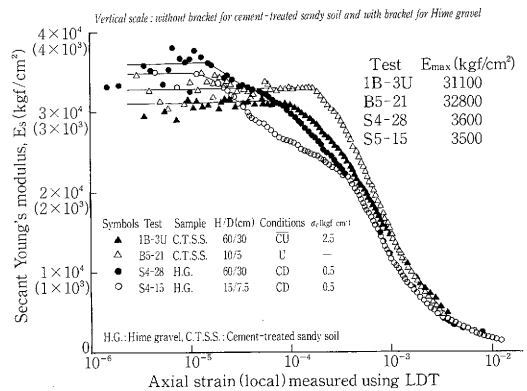


図9 LDTで測定した割線変形係数 $E_{sec} = (\sigma_1 - \sigma_3) / \epsilon_1$ と $\log \epsilon_1$ の関係の例

5. ま と め

三軸圧縮試験で微小ひずみレベルでの応力・ひずみ関係を正確に測定できるとともに強度も測定できる試験システムを開発した。この試験装置を用いて得られた試験結果は引き続き論文で紹介する。

謝 辞：

本研究で用いた試験機、試験用具の製作に携わって頂いた本研究所試作工場の方々には、未筆ながら深い感謝の意を表します。(1989年7月10日受理)

参 考 文 献

- Drnevich, P. D. and Massarsch, K. R. (1979): Sample disturbance and stress-strain behavior, Journal GE div., Proc. ASCE, Vol. 105, No. GT9, September, pp. 1001-1016.
- 後藤 聡 (1986): Strength and deformation characteristics of granular materials in triaxial tests, Dr. of Engineering thesis, Univ. of Tokyo.
- 龍岡文夫 (1988): 第4回三軸圧縮試験実技講習会報告, 土と基礎, 36-11, 135-136頁.
- 谷 泰弘 (1982): 切削加工の分野で使用されるロードセルについて, 生産研究, 34巻, 6号, 35-42頁.