

極低圧下での砂の動的変形特性 I

——実験方法の検討——

Dynamic Deformation Properties of Sand at Extremely Low Pressures

——Testing Method——

プラダン, テーシ B.S.*・孔 憲 京**・龍 岡 文 夫*・田 村 重四郎***

Tej B.S. PRADHAN, KONG Xian Jing, Fumio TATSUOKA and Choshiro TAMURA

1. は じ め に

地震時におけるアースダムの破壊機構を調べるために、千葉実験所に設置されている大型振動台を用いて、小名浜砂で築造したアースダムの模型について、動的破壊実験を行った¹⁾。この実験結果を数値解析によりシミュレーションするためには、模型材料の動的物性が必要になる。そこで動的中空ねじり試験装置^{2)~5)}を用いて、拘束圧約 0.05~0.84 kgf/cm² における不飽和小名浜砂の動的物性試験を行った。その結果、拘束圧約 0.3 kgf/cm² 以下での不飽和小名浜砂のせん断変形および減衰比の歪依存性には、より高い圧力の下における従来の試験結果と比較して、若干異なる特徴があることが判明した。

2. 試験材料と試験条件

試料は模型実験¹⁾で使用した小名浜砂で、粒径加積曲線および物理定数を図 1 に示す。振動実験時における材料の力学状態を考慮して、主に含水比 $w=1.8\sim 1.9\%$ の湿潤砂について模型内に生じる応力レベルに相当する低拘束圧の下で等方圧密した供試体を用い、せん断歪 $\gamma=10^{-2}\sim 10^{-6}$ の範囲でのせん断変形係数 G 、減衰比 h を求めた。追加実験として含水比 0.5% 程度の空気乾燥砂 ($e=0.85$) でも $\sigma'_c=0.01\sim 0.8$ kgf/cm² で実験を行った。 $w=1.8\sim 1.9\%$ の供試体に対しては、初期間隙比 $e_0=0.93$ 一定のもとで σ'_c を 0.05~0.84 kgf/cm² まで変化させ、次いで間隙比の影響を調べるため、拘束圧 $\sigma'_c=0.1$ kgf/cm² 一定のもとで初期間隙比 $e_0=0.83\sim 0.95$ まで変化させ

た。実験条件を表 1 に示す。

3. 試験装置と実験方法

東京大学生産技術研究所龍岡研究室で 1979 年開発した荷重制御による繰返しねじり荷重装置の概略を図 2、写真 1(a) に示す。この装置のポイントは以下の 5 つである。(1) ねじり荷重は通常の空気式繰返し三軸試験に用いるペロフラムシリンダーを用いている。(2) ペロフラムシリンダーの直線往復運動をワイヤーの往復運動に変換し、それを円形のプレートの回転運動に変換し、その回転運動をボールスプライン軸を介して載荷軸の回転運動に変換している。(3) 載荷軸はフレーム板と三軸セルに対して合計 4 つのストロークベアリングでガイドされていて、鉛直変位を自由にしながらスムーズに回転運動できるようにしてある。(4) 今回の研究では低拘束圧においては鉛直荷重は小さいので従来用いられていた鉛直荷重用ペロフラムシリンダーを錘に替えた。(5) 供試体に作用する鉛直荷重とトルクは両者の干渉がきわめて少ない 2 方向ロードセル^{6,7)}を三軸セル内に設置して、非常に精度よく測定した。これは谷ら⁶⁾の基本デザインによるものに基づいて原ら⁷⁾が製作したものである。

鉛直応力、せん断応力、せん断歪を精度よく測定するために、三軸セル内に 2 方向ロードセル、非接触型変位計—ギャップセンサーを設置した (写真 1(b))。供試体の上下端面にはポーラスストーンに刃を付けたものを

表 1 実験条件

含水比 w (%)	一定にしたパラメーター	変化させたパラメーター
1.8~1.9	$e_0=0.925\sim 0.930$	$\sigma'_c=0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.56, 0.84$, kgf/cm ²
	$\sigma'_c=0.1$ kgf/cm ²	$e_0=0.831, 0.869, 0.925, 0.953$
0.5	$e_0=0.839\sim 0.884$	$\sigma'_c=0.01, 0.02, 0.5, 0.1, 0.3, 0.8$ kgf/cm ²

σ'_c : 有効拘束圧, e_0 : 供試体初期間隙比

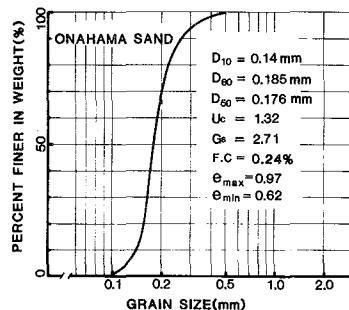


図 1 小名浜砂の粒径加積曲線と物理定数

* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

** 中華人民共和國大連工学院 (元客員研究員)

*** 東京大学生産技術研究所 第 1 部

研究速報
いた。

砂の低拘束圧状態の物性を対象とした本実験の場合、供試体の高さ方向の鉛直圧のわずかな違いが問題となる。そこでなるべく自重の影響を小さくするために中空円柱供試体の高さを 100 mm にした。また外径および内直径をそれぞれ 100 mm, 60 mm とした。供試体が不飽和状態であるため、有効拘束圧は負圧により加えることとし、写真 1(a) に示す⑪の負圧用ポテンシオメータで測定した。これにより供試体の高さ方向に対して有効水平応力は一定になる。実験中負圧を一定に保つように注意した。供試体の体積変化は図 2(b) に示すシステムで測定した。

供試体は含水比、間隙比が所定の値になるように所定の湿潤重量の試料をまず用意しそれを 5 分割して、一層ごとに突き固めて作成した (Wet tamping 法^{2),3)}。実験

終了後も含水比を測定した。所定の拘束圧まで負圧により等方圧密し、11 波の 0.1 Hz の正弦波形の振りせん断力を荷重として加え、次いで段階的に荷重レベルを上げ、これを繰り返して行った。データの記録はアナログ式 X-Y レコーダーにより行った。

4. せん断変形係数と減衰比の定義

X-Y レコーダーに記録された動的せん断力 T 、供試体上端での半径 $r=6.67\text{ cm}$ での動的せん断変位 $r\cdot\theta=6.67\theta\text{ (cm)}$ の典型的な例を図 3 に示す。これらの履歴曲線から図 4 のように等価せん断変形係数 G と履歴減衰比 h が定義される。

$$G = \frac{|\Delta\tau|}{|\Delta\gamma|} \quad (1)$$

$$h = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (2)$$

G は等価せん断変形係数、 $|\Delta\tau|$ 、 $|\Delta\gamma|$ はおのの繰り返し履歴曲線におけるせん断応力の片振幅とせん断歪の片振

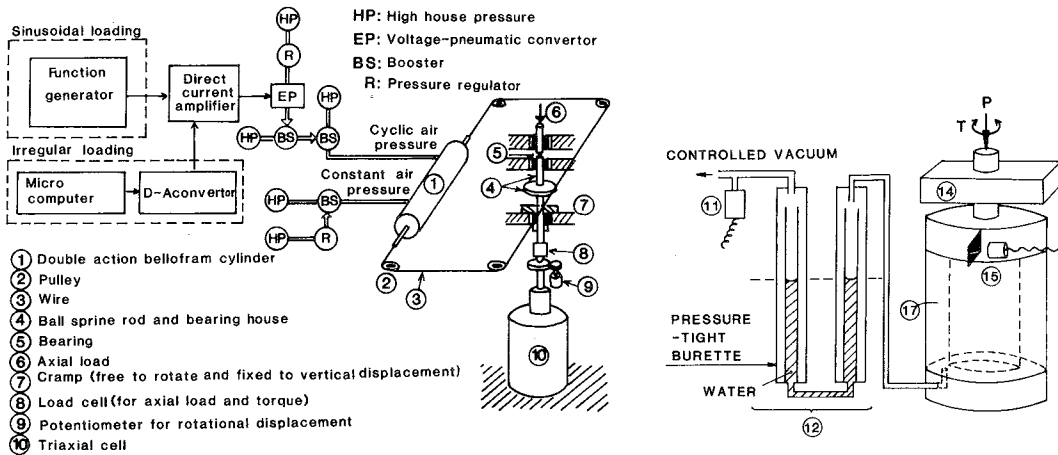


図 2 繰り返しねじりせん断装置の (a) 全体図³⁾, (b) 部分図

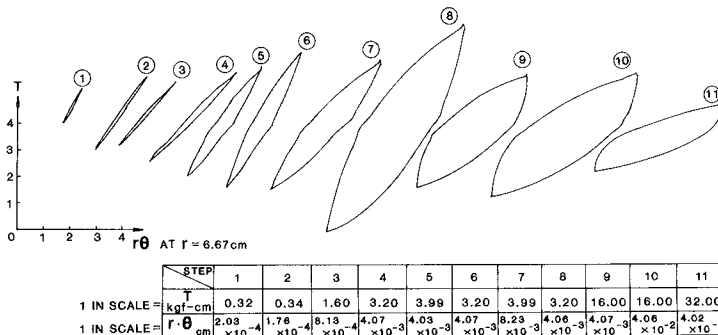


図 3 トルク T と供試体上端 $r=6.67\text{ cm}$ での回転変位の履歴曲線の典型的記録 ($w=1.83\%$, $e_o=0.953$, $\sigma'_c=0.1\text{ kgf/cm}^2$, $N=1\sim 11$)

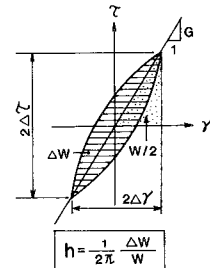


図 4 割線せん断変形係数 G と履歴減衰係数 h の定義

研 究 速 報

幅をそれぞれ意味している。また h は履歴減衰係数、 ΔW は減衰エネルギーと呼ばれるものであり、 W は変形エネルギーである。

ねじり試験では中空供試体の断面においてねじりせん断応力の分布が均一ではない。この非均一性はせん断ひずみが小さいほど大きい。ねじり単純せん断試験ではトルク T だけ測定しているの、せん断応力分布を仮定して、トルクの力のつり合いから、せん断応力を求めなければならない。これまでいろいろな研究者が採用しているせん断応力の計算方法は次の 3 つの方法である。

(1) 供試体を線型弾性体と仮定する場合：供試体に加えたトルク T は

$$T = \int_{r_i}^{r_o} 2\pi r \cdot \tau_r \cdot r dr \quad (3)$$

ここで τ_r は供試体の中心軸から半径 r におけるせん断応力であり、次式で示される。 r_i と r_o はそれぞれ供試体断面の内半径および外半径である。

$$\tau_r = Kr \quad (4)$$

K は砂を弾性体と仮定した場合のせん断応力の変化率である。式(3)、(4)から K は

$$K = \frac{2T}{\pi(r_o^4 - r_i^4)} \quad (5)$$

平均半径 $\bar{r} = \frac{r_o + r_i}{2}$ の位置における平均せん断応力 τ_{ave} は

$$\tau_{ave} = \frac{T}{\pi(r_o^2 + r_i^2)(r_o - r_i)} \quad (6)$$

また、面積の重み付き平均のせん断応力 τ'_{ave} は

$$\tau'_{ave} = \frac{\int_{r_i}^{r_o} \tau_r \cdot r dr}{\int_{r_i}^{r_o} r dr} = \frac{4(r_o^3 - r_i^3)T}{3\pi(r_o^2 - r_i^2)(r_o^4 - r_i^4)} \quad (7)$$

(2) 供試体を剛一完全塑性体と仮定した場合：せん断応力は、供試体の断面上どこでも同じ大きさであり

$$\tau_r = \tau_{avp} \quad (8)$$

である。ここで τ_{avp} は剛一完全塑性体の場合におけるせん断応力を表している。式(3)、(8)、からせん断応力 τ_{avp} は

$$\tau_{avp} = \frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} \quad (9)$$

として与えられる。

(3) 上記 2 者の平均をとる場合：砂を弾性体および剛一完全塑性体と仮定したときの値における差は小さいので、2 つの値の平均値を採用すると、次のようになる。

$$\tau_{avm} = \frac{\tau_{ave} + \tau_{avp}}{2} \quad (10)$$

$$\tau'_{avm} = \frac{\tau'_{ave} + \tau_{avp}}{2} \quad (11)$$

以上述べた 5 つの計算方法の中でどの方法が妥当であ

るかについては福島⁹⁾が詳細な計算を行って調べている。それによるとひずみが大きいときほど τ_{avp} を用いるのが妥当である。今 $r_o = 5$ cm, $r_i = 3$ cm として各計算法による平均せん断応力の比較をすると、 $\tau'_{ave}/\tau_{ave} = 1.021$, $\tau_{avp}/\tau_{ave} = 1.041$, $\tau_{avm}/\tau_{ave} = 1.020$, $\tau'_{avm}/\tau_{ave} = 1.031$ となりあまり差が生じない。今回はせん断応力 τ_{at} として τ_{avp} を用いた。一方せん断ひずみ γ_{at} としては次の 2 つの考え方がある。

(1) 平均半径での γ を用いる：この場合、供試体高さ

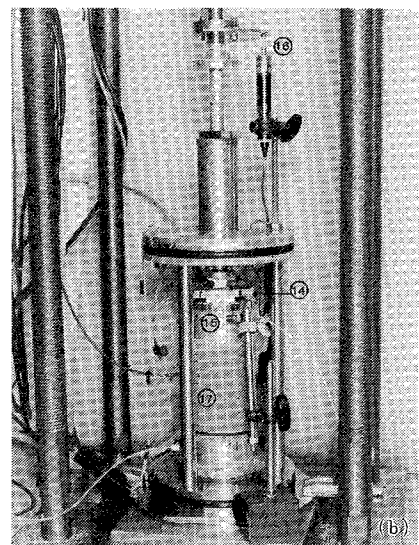
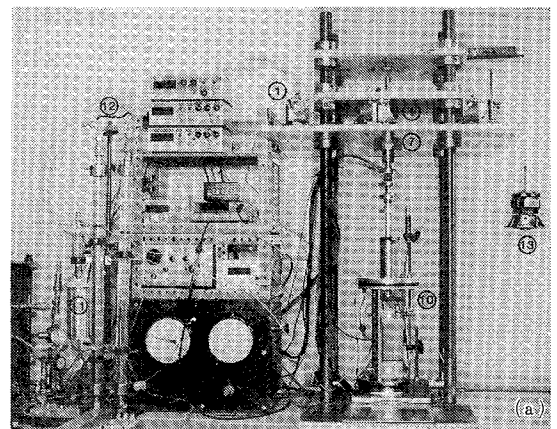


写真 1 繰り返しねじりせん断装置の (a) 全体写真 (b) 部分写真 番号①～⑩は図 2(a) 参照 ⑪負圧測定用ポテンショメーター ⑫体積測定用ビューレット(図 2(b) 参照) ⑬軸荷重制御用死荷重 ⑭二方向ロードセル ⑮非接触変位計 ⑯軸方向変位計(ストレイネージタイプ) ⑰供試体

研究速報
を H , 供試体上端でのねじり角を θ (ラジアン) とすると

$$\gamma_{av} = \frac{\theta}{H} \frac{r_o + r_i}{2} \quad (12)$$

となる。

(2) 面積の重み付きのせん断ひずみを用いる：この場合半径 r でのせん断ひずみを γ_r とすると、

$$\gamma'_{av} = \int_{r_i}^{r_o} \gamma_r r dr / \int_{r_i}^{r_o} r dr = \frac{2}{3} \frac{\theta}{H} \frac{r_o^3 - r_i^3}{r_o^2 - r_i^2} \quad (13)$$

$\gamma'_{av}/\gamma_{av} = 1.021$ で両者に大差はない。今回はせん断ひずみ γ_{at} として γ_{av} を用いた。

5. メンブレン力による応力補正について

低拘束圧下における場合、一般にメンブレン力の補正が必要となる。そこで中空供試体を用いたねじりせん断試験におけるメンブレン力による応力補正をまず検討した。メンブレンの変形は圧縮、伸張と単純せん断の組み合わせによるものであると仮定する。さらに、メンブレンの軸方向ひずみ ε_{am} と接線方向ひずみ $\varepsilon_{\theta m}$ は式(14)のように定義する。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{am} &= \varepsilon_{am}^0 + \varepsilon_{am}^* \\ \varepsilon_{\theta m} &= \varepsilon_{\theta m}^0 + \varepsilon_{\theta m}^* \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 ε_{am}^0 と $\varepsilon_{\theta m}^0$ はそれぞれ軸方向と接線方向の供試体をセットしたときの初期メンブレンひずみで、 ε_{am}^* と $\varepsilon_{\theta m}^*$ はそれぞれ軸方向と接線方向の等方圧縮中とせん断中にメンブレンに生じたひずみである。

実際に供試体に作用している平均応力を σ'_a , σ'_r , τ_{at} , 測定値を $(\sigma'_a)_{measured}$, $(\sigma'_r)_{measured}$, $(\tau_{at})_{measured}$ とし、メンブレン力に対する補正量を $\Delta\sigma'_{am}$, $\Delta\sigma'_{rm}$, $\Delta\tau_{atm}$ とすると、メンブレンのヤング率、厚さを E_m , t_m とし、ポアソン比 $\nu = 0.5$ として次式が得られる^{4),7),8)}。ただし、 ε_{amo} , ε_{ami} は $r = r_o$, $r = r_i$ での ε_{am} をあらわす。

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_a &= (\sigma'_a)_{measured} + \Delta\sigma'_{am} \\ \sigma'_r &= (\sigma'_r)_{measured} + \Delta\sigma'_{rm} \\ \tau_{at} &= (\tau_{at})_{measured} + \Delta\tau_{atm} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Delta\sigma'_{am} &= -\frac{4t_mE_m}{3(r_o^2 - r_i^2)} [r_o(2\varepsilon_{amo} + \varepsilon_{\theta mo}) + r_i(2\varepsilon_{ami} + \varepsilon_{\theta mi})] \\ \Delta\sigma'_{rm} &= \frac{2t_mE_m}{3(r_o + r_i)} [(2\varepsilon_{\theta mo} + \varepsilon_{amo}) + (2\varepsilon_{\theta mi} + \varepsilon_{ami})] \\ \Delta\tau_{atm} &= -2E_mt_m \frac{r_o^3 + r_i^3}{(r_o^3 - r_i^3)(r_i + r_o)} \gamma_{at} \end{aligned} \quad (16)$$

本研究で対象となる γ_{at} は最大で 1% までである。 $E_m = 15 \text{ kgf/cm}^2$, $t_m = 0.3 \text{ mm}$ なので(16)式より $\gamma_{at} = 0.01$ の場合、せん断応力の補正量は $\Delta\tau_{at} = 0.017 \text{ kgf/cm}^2$ であり、 $\gamma_{at} = 0.01$ においても実験での値 $\tau_{at} > 0.1 \text{ kgf/cm}^2$ に比較するとたいへん小さい。したがってメンブレン力

による τ_{at} の補正は必要がないと思われる。しかし、供試体セット時におけるメンブレンの初期拘束による拘束圧に対する影響は無視できない。そこで式(16)を用いて拘束圧のメンブレン力に対する補正は行った。

6. あとがき

本論文に示した試験装置、試験方法を用いると、きわめて低い拘束圧 (0.01 kgf/cm^2 程度) でのきわめて小さいひずみ ($\gamma = 10^{-6} \sim 10^{-5}$) に対する単純せん断変形の下での土の変形特性を精密に測定しうる。具体的な実験結果は次回以降で示す。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり東京大学生産技術研究所佐藤剛司技官の協力を得た。また、孔憲京は日本学術振興会の昭和 59 年度外国人招へい研究者として来日した。末筆ながら関係諸賢に対し感謝の意を表します。

(1985 年 11 月 19 日受理)

参 考 文 献

- 1) 田村重四郎, 加藤勝行, 森田道比呂, “水平・鉛直の 2 方向加振した場合のフィルダム模型の振動破壊について” 第 18 回地震工学研究発表会, 457~460 頁, 1985.7.
- 2) Tatsuoka, F., Muramatsu, M., Sasaki, T. (1982), “Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sands by torsional simple shear test”, Soils and Foundations, Vol. 22, June, pp. 55~70.
- 3) Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii S., and Okamoto, M. (1986), “Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods”, Soils and Foundations, Vol. 26.
- 4) プラダン, テージ, B. S. 龍岡文夫・原勝重(1985), “非排水繰返しねじりせん断における砂の応力-ひずみ特性,” 土木学会第 40 回年次学術講演会第 (III) 部, 25~26 頁.
- 5) 龍岡文夫(1985), “室内土質せん断試験—理論と実習,” 生研セミナーコース 106 テキスト, 7 月.
- 6) Tani, Y., Hatamura, Y. and Nagao, T. (1983), “Development of small three-component dynamometer for cutting force measurement”, Bulletin of the Japanese Society of Mechanical Eng., Vol. 26, No. 214, April, pp. 650~658.
- 7) 原勝重・龍岡文夫・プラダン, テージ, B. S. (1985), “砂の非排水繰返しねじりせん断における応力-ひずみ関係の測定精度,” 第 20 回土質工学研究発表会, 名古屋, 6 月, 369~372 頁.
- 8) Tatsuoka, F., Sonoda, S., Hara, K., Fukushima, S. and Pradhan, Tej B. S. (1986), “Failure and deformation of sand in torsional shear”, Soils and Foundations, Vol. 26.
- 9) 福島伸二(1982), “ねじりせん断試験による砂の変形。強度特性の実験的研究,” 東京大学博士論文.