

中国福建標準砂の三軸試験による液状化強度 I ——実験方法の検討——

Liquefaction Strength of Fu Jian Standard Test Sand, China, by Triaxial Test I
——Discussion on Test Method——

王 中正*・龍岡文夫**
Zhongzheng WANG and Fumio TATSUOKA

1. はじめに

異なった2国の間でも将来、相互の動的土質試験の結果を交換し、比較検討できるようにするためには、動的土質試験法の必要で可能な部分での共通化をすることが望まれる。三軸試験での砂の非排水繰返しせん断強度(いわゆる液状化強度)は、試験機・試験法の詳細の違いによって大きくその値が左右されてしまい、同一の状態(同一の密度、拘束圧等)にある同一の砂を用いた同種の動的実験でも、異なった国で同一の結果が得られるという保証は残念ながらまだ十分にはない。今回、第一筆者が生産技術研究所に外国人招へい研究員として訪問する機会を得たので、中国で広く標準砂として用いられている福建砂を用いた非排水繰返し三軸試験を当研究所で行うことになった。実験そのものは標準的なものであるが、一連の実験から福建砂の液状化強度特性をある程度明確にすることができた。この実験結果は、将来、(1)両国で行われる多種の土の非排水繰返し三軸試験の結果の同一レベルでの比較検討を可能にし、(2)できうれば、両国の非排水繰返し三軸試験法の必要で可能な部分での共通化のための貴重な資料となるものと思われる。

2. 実験砂の物理特性

福建(Fu Jian)砂の粒度特性等の物理特性は図-1に示してある。福建砂を用いた実験結果は、同一の試験機を用いて得られたつぎの2種の日本の砂の実験結果と比較することにしたので、その物理特性も同時に示す。

(1) 豊浦(とよaura, Toyoura)砂。これは広く日本で標準砂として動的土質試験に用いられてきた。

(2) 浅間山(せんげんやま, Sengenyama)砂。これは千葉県産の山砂で、東京湾周辺で埋立材料として広く用いられてきた。

写真-1はこの3つの砂の粒子の拡大写真であり、福建

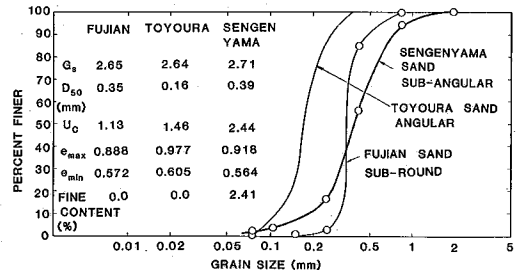
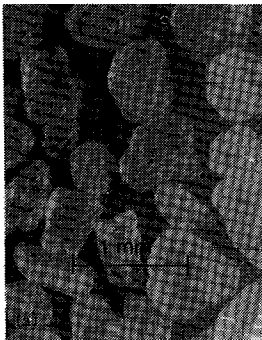


図-1 福建砂・豊浦砂・浅間山砂の物理特性



(a) 福建砂



(b) 豊浦砂



(c) 浅間山砂

写真-1 粒子近接写真

* 中国大連工学院 元東京大学生産技術研究所外国人招へい研究者

** 東京大学生産技術研究所 第5部

砂は粒形が角ばっておらず矩形であり、豊浦砂は角ばっており、浅間山砂は、やや角ばっていることが分かる。

図-1 に示す最大間隙比 e_{max} 、最小間隙比 e_{min} 、は全て日本土工学会基準「土質試験法 (1979), 第 9 章 砂の最大密度、最小密度試験」に従って求めたものである。なお、この論文に示す豊浦砂と浅間山砂の実験結果は文献^{1),2)} から引用した。

3. 実験装置

生産技術研究所試作工場でその部品を製作し、第 5 部 龍岡研究室で組み立てた繰返し三軸試験機を用いた。側圧と繰返し軸荷重は全て空気圧式で加えた。供試体は直径 7.5 cm、高さ 15 cm であり、用いたメンブレンは全てラテックスラバー (Latex rubber) で厚さ 0.3 mm、ヤング率 15.2 kgf/cm² である。試験装置の間隙水系の体積変化率 (system compliance) は 0.002 cc/kgf/cm² 程度 (1 kgf/cm² の間隙水圧変化に対して供試体体積の 3×10^{-6} 程度の体積変化) であり、無視できるほど小さい。ただし、いわゆる Membrane penetration による体積変化は小さくはないと思われる。この影響については本論文では触れなかった。供試体上下端は全面ポーラスストーンを用いた。

4. 供試体作成法

砂の非排水繰返しせん断強度は供試体の平均密度だけではなく、その堆積のしかたにより強く影響を受ける。^{1),2)} したがって供試体作成法を規定しないと、その砂の液状化強度の議論をすることができなくなる。今回、図-2 に示すいわゆる水中落下振動法 (Water-pluviation and vibration method) を用いた。すなわち、

(1) 空気乾燥砂を一定の高さから水中落下させる (総落下高さ約 8~10 cm、水深約 7.5 cm)。この状態での供試体平均間隙比はだいたい 0.78 になる。このとき、メンブレンとモールドの密着は、負圧 0.3 kgf/cm² を加えることによって行っている。

(2) 振動後の供試体内の上下方向の密度が一樣になるように (特に供試体上部が緩くならないように)、供試体上面に、傾斜しないでなめらかに上下運動のみ生ずるようにガイドされた重り (キャップと載荷ロッドと若干の付加荷重) をのせ、モールド側壁を木槌で軽く一様に連打する。このとき、供試体上面での平均鉛直圧が 0.0286 kgf/cm² となるようにした。この重りの上下位置はダイヤルゲージで常に監視し、供試体の平均密度が所定の値になったときモールド連打を止める。図-3 は、このモールド連打数と供試体平均密度の関係で、モールド除去後、0.3 kgf/cm² の負圧で自立させているときと、1 kgf/cm² (98 kN/m²) まで等方圧密したときの 2 つの関係が示されている。この試料作成法を用いると、図-1 に

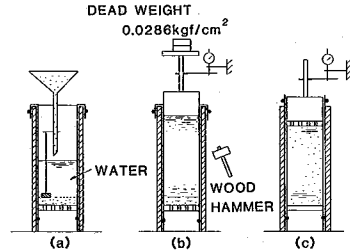


図-2 供試体作成法 (水中落下振動法) の説明図

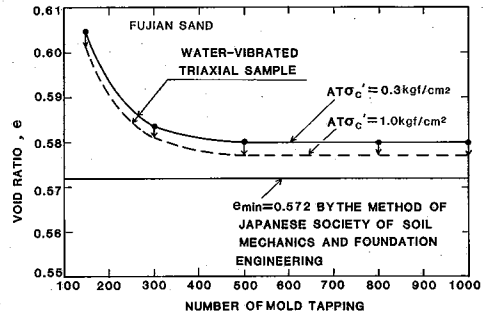


図-3 水中落下振動法におけるモールド打撃数と間隙比の関係

示す最小間隙比 e_{min} に近い間隙比は得られないことがわかる。図-1 に示す最小間隙比は、空気乾燥砂を内寸法、直径 6 cm、高さ 4 cm のステンレス鋼製のモールド内に 10 層に分けて入れて、上載圧がない状態で、各層でモールドを 100 回連打して (合計 1000 回連打して) 得られた値である。

(3) 供試体上端にポーラスストーン、キャップ (これに連結されている載荷ロッドは三軸室上盤に対してボールベアリングを用いてガイドされている) を載せる。このときの供試体上載圧は平均 0.019 kgf/cm² で十分小さい値である。つぎにメンブレンとモールドの間に加える負圧を 0.1 kgf/cm² にしてから、メンブレンをキャップにシーリングする。モールドとメンブレンの間に加えている負圧を除去し、供試体が上下方向に自由に収縮できるようにするために載荷ロッドを上下方向の動きに対して固定させることなしに、供試体に 0.05 kgf/cm² の負圧を加えて自立させる。このときの負圧が大きすぎると、メンブレンとモールドの間が完全に分離している保証がないのに加えて、供試体上端のポーラスストーンがモールド内を自由に落下する保証がないので、供試体の上下方向の自由な収縮が保証されていない状態での異方な (三軸伸張的) 変形が生ずるおそれがある。

(4) モールドを静かに解体して供試体の上下方向の自由な収縮を完全に保証したうえで、供試体に加えている負圧を 0.3 kgf/cm² に増加し、供試体の硬さを増した後、供試体の初期寸法を測定する。

研究速報

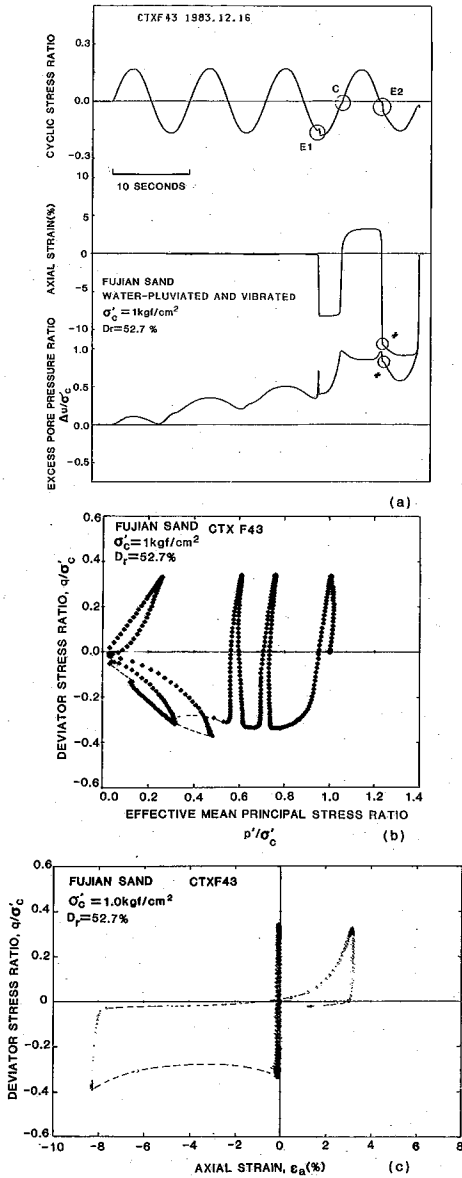


図-4 ゆるい福建砂の典型的実験例、(a) 時刻歴 (b) 有効応力径路 (c) せん断応力～軸ひずみ関係

(5) 三軸室を組み立て、セル水を注入し、背圧を側圧 (0.3 kgf/cm²) に置きかえた後、炭酸ガス (CO₂)、脱気水を供試体下部から供給し、背圧を 2 kgf/cm² 加えて供試体の飽和化を図る。この結果、供試体の B 値は全て 0.98 以上となり、ほとんどの供試体ではほとんど 1.0 となった。

(6) 有効拘束圧 $\sigma'_c = 1 \text{ kgf/cm}^2$ (98 kN/m²) で 0.5 時間等方圧密した後、非排水繰返し三軸試験を行った。

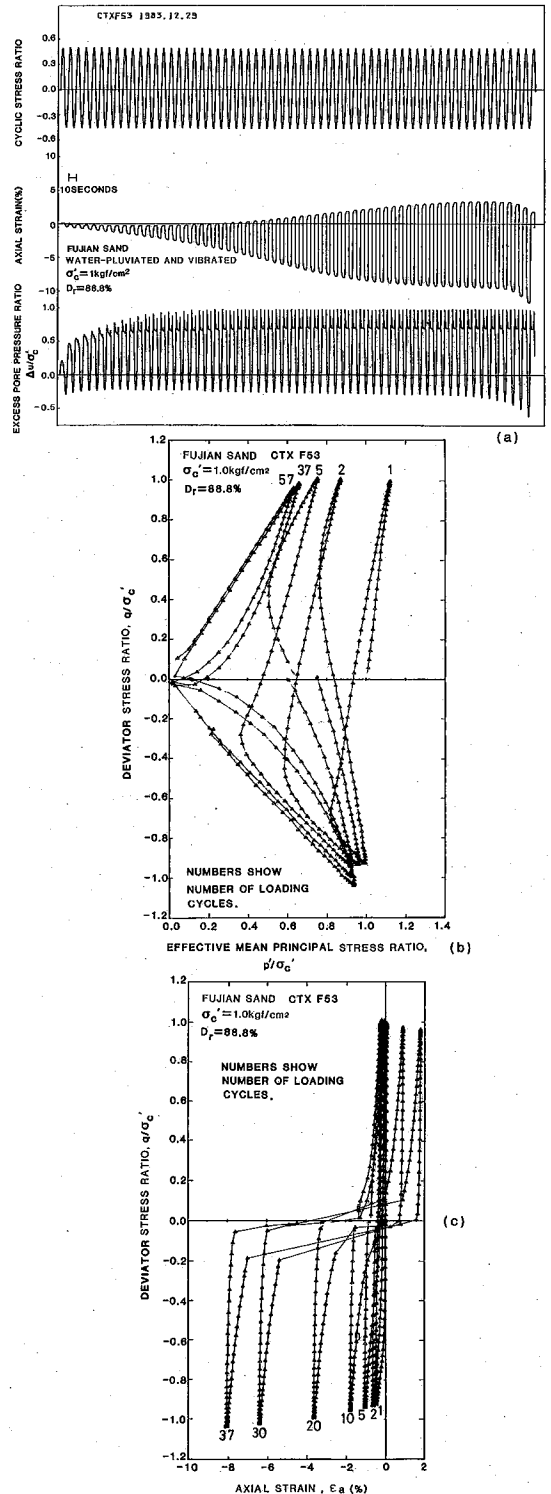


図-5 密な福建砂の典型的実験例、(a) 時刻歴 (b) 有効応力径路 (c) せん断応力～軸ひずみ関係

5. 繰返し載荷法

繰返し載荷は全て周波数 0.1 Hz の正弦波で行った。図-4, 5 にそれぞれゆるい供試体, 密な供試体の典型的な試験記録を示す。(a) の図には(名目軸差応力)/ $2\sigma_c$, 軸ひずみ, (過剰間隙水圧 Δu)/ σ_c の時刻歴を示す。名目軸差応力とは, 偏差軸荷重を圧密時の供試体断面積で除した値であり, 供試体に変形しているそのときどきの真の偏差応力 (deviator stress $q = \sigma_a - \sigma_r$) とは異なる。(b) の図は正規化された有効応力径路であり, $p' = (\sigma_a + 2\sigma_r)/3$ であり, σ_a, σ_r はそのときどきの真の有効軸方向応力と, 有効側方向応力である。(c) の図には q/σ_c と軸ひずみの関係を示す。

これらの図からつぎに示すように本研究のような荷重制御 (いわゆる応力制御) の実験では, 厳密な正弦波荷重を非排水状態にあるゆるい飽和砂に与えることは本質的に不可能であることが分かる。すなわち, 図-4(a) に E1, E2, C で示す時点では正弦波形が乱れているが, これは実験装置の欠陥を示しているのではなく, むしろ性能の良さを示している。つまり, この時点では, 供試体はその本質的特性から伸びながら $|q|$ ($q = \sigma_a - \sigma_r$ の絶対値) は減少をしようとして (図中の E1, E2 の時点), あるいは供試体は縮みながら q は減少しようとしている (図中の C の時点)。これは, いわば, 供試体に変形が進行しているにもかかわらず, 付加荷重が減少しているという post peak 的状态にあり, このとき, 荷重制御試験で増加付加荷重を与えようとするれば, 変形速度は理論的には無限大となる。実際には, 載荷装置の慣性抵抗と空気圧供給能力からある一定以上の変形速度にはならず, 逆に付加荷重は減少してしまうのである。これが載荷波形の正弦波形からの乱れの起因である。このほか, (a) の図で #印で示す軸ひずみと過剰間隙水圧の波形の乱れも, 上述の過大な変形速度に原因している。このような現象は, 荷重制御試験であることに原因があり, 載荷周波数 f をいくら小さくしてもこの現象はなくなる。

図-4, 5 の (a) の図およびほかの同種の図から軸ひずみ両振幅 DA が 2%, 5%, 10% になったときの繰返し載荷数 N_c を読みとった。いわゆる初期液状化は, 今回破壊の定義には用いなかった。それは, 実際に密な砂では $\Delta u/\sigma_c = 1.0$ となることはないし, また, $\Delta u/\sigma_c$ の上限値で初期液状化を定義するにしても, 個人差が出やすくなるし, さらに, $\Delta u/\sigma_c$ の値が, 破壊の指標として適切であるかどうか (特に密な砂に対して) 大いに疑問のあるところであるからである。ただし, 整数の N_c に対して, 上記の DA の値が生ずるとは限らないので, $N_c < 10$ に

対しては, つぎの方法で小数点第 1 位まで N_c の値を求めた。すなわち, たとえば, $N_c = 5$ のとき, $DA = 8\%$, $N_c = 6$ のとき, $DA = 14\%$ が生じたとすると, $DA = 10\%$ に対する N_c は $5 + (10 - 8)/(14 - 8) = 5.3$ とした。

この繰返し三軸試験では, 名目偏差応力の片振幅 σ_{ap} が, 「押し」(三軸圧縮側) と 「引き」(三軸伸張側) で供試体の変形の進行にかかわらず一定でかつ対称であることに注意した。今回の実験では $DA = 10\%$ になるまでの σ_{ap} の値の対称性からのずれの許容値は 5% とした。また, 名目偏差応力の両振幅の変動は 5% 以上生ずることはなかった。しかし, このような規定は便宜的なものであり, 本質的なものではないことは明らかである。すなわち, 供試体の変形量の増大に伴って, ピーク荷重時の供試体断面積も変化していつているから, 真の応力の振幅は, 圧縮側でしだいに減少していつており, また, 伸張側ではしだいに増加していつており, 真の応力の対称性はまったく保持されていないし, 両振幅の一定性も保持されていない。このような意味でも, 非排水繰返し三軸試験は便宜的な Index 試験であるといえる。

6. ま と め

中国福建砂を用いた非排水繰返し三軸試験の方法と, 一部結果について紹介した。次号では, 日本の砂との比較等の解析の結果について報告する。

謝 辞

本研究は鹿島財団の研究助成による 1981 年～1983 年度に行われた「唐山地震を含む最近の中国の地震被害の耐震工学的解釈に関する日中共同研究 (田村重四郎東大教授代表)」の一環として行われた。第一筆者は 1983 年 10 月 8 日～本年 2 月 7 日まで生産技術研究所に滞在し, 本実験を行った。この間, 鹿島財団故原現吉氏, 生産技術研究所田村教授, 片山恒雄教授の暖かいご援助とご指導があった。また, 研究遂行上, 山田眞一助手, 受託研究員越智健三, 加藤祐之, 原勝重, 法政大学 4 年生山本博之各氏の親切なご協力があった。また, 試験機の製作には佐藤剛司技官はじめ試作工場のスタッフの多大なる協力を得た。また, 鳥光道枝氏にはいろいろお世話になった。末筆ながら, 関係各位に深い感謝の意を表します。

(1984 年 3 月 9 日受理)

参 考 文 献

- 1) Tatsuoka, F., Ochi, K. and Fujii, S.: (1984), "Effect of Sample Preparation Method on Cyclic Undrained Strength of Sand in Triaxial and Torsional Shear Tests", Bull. ERS, No.17, Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo
- 2) 越智健三・龍岡文夫・山本博之: (1984), "ねじりせん断液状化強度と三軸液状化強度の関係について", 第 19 回土質工学研究発表会発表論文集, 松山