振動台による飽和砂の再液状化特性に関する実験的研究

(Experimental Studies on Reliquefaction Characteristics of Saturated Sands, Using Shaking Table)

大 原 資 生* (Sukeo O-hara)
山 本 哲 朗** (Tetsuro Yamamoto)

キーワード：液状化／間隙圧／繰返し荷重／地震／
室内実験／密度／動的 (IGC : D 6/D 7)

1. 緒 言

飽和砂地盤が過去に地震等によって微小ひずみあるいは、比較的大きいひずみを受けたというひずみ履歴が砂地盤の液状化に対する抵抗力に及ぼす影響に関する実験的研究は Finn ら¹⁾, Seed ら²⁾, 石原ら³⁾等によって多く行われている。

これに対して、一度液状化を生じた砂地盤がその後の余震あるいは別の地震に対して液状化を生じやすくなるのかあるいは生じ難くなるのかという、砂地盤の再液状化特性に関する実験的研究はわずかに Finn ら^{1), 4)}によって行われているにすぎない。

砂地盤の再液状化特性を明らかにすることは砂地盤の耐震設計上、重要な課題と考えられる。すなわち、液状化を生じた砂地盤の骨格構造はその後の排水圧密によって初期の骨格構造とは異なった構造になっていると考えられるので、その状態での地盤のその後の地震に対する液状化抵抗を知ること重要であり、液状化防止対策工法を考えるうえからも重要であろう。

現位置の砂地盤の再液状化特性には、地盤を構成する砂の粒度、密度、透水性あるいは地盤の厚さおよび排水に対する境界条件等の地盤自体の性質のほかに、一度液状化を生じた後、次に液状化を生じるまでの間隙水圧の消散の程度あるいは排水量といった因子等が複雑にからみあって影響を及ぼしていると考えられる。

本論文の主な目的は一度完全液状化を生じた土の再液状化特性を実験的に明らかにすることにある。実験には振動台上に設置した実験装置⁵⁾を用いている。実験方法はまず、供試体に完全液状化を生ぜしめた後、供試体内の間隙水を排水して液状化によって生じた間隙水圧を完全に消散する。その後、同一供試体に対して再び完全液

状化を生ぜしめるという方法で同一の供試体に対して液状化実験を合計 3 回繰り返している。すなわち、このような実験で液状化を生じて排水圧密によって密度が大きくなった地盤の液状化抵抗の変化を調べようとするものである。

実験に用いた装置は振動台を用いて直径が 60 cm、高さが 4~8 cm の比較的大きい供試体に対して液状化実験が行われる装置である。

この装置を用いた先の実験結果⁵⁾では供試体の高さが 4 cm 程度のときに供試体はせん断変形に近い状態で変形するとの結果を得ている。したがって、この装置を用いて粒径の大きい試料の液状化実験を行うには高さの点でやや問題はあるが、この装置での供試体の高さはわれわれの用いている単純せん断試験機での供試体の高さ 2 cm より大きいので、比較的大きい粒径の試料の液状化実験をも行うことができる。したがって、試料の寸法効果が問題となるような比較的大きい粒径の土の試験も行うことができると考えられるので、砂をはじめとして、最大粒径 5.66 mm のまさ土および礫といった粒度分布のかなり異なる 4 試料を実験に用いている。

ところで前述した Finn ら^{1), 4)}によって行われた動的三軸試験、動的単純せん断試験および振動台を用いた試験での飽和砂の再液状化実験結果によれば、いずれの試験でも 1 回の液状化を生じた後の排水によって供試体の密度が大きくなるにもかかわらず、2 回目の液状化は 1 回目の液状化よりも早く生じるとの結果が得られている。この原因として 0.5% 以上のひずみを受けると砂の構造が液状化しやすい状態にかかわるとの結論が述べられている。

しかし、一般によく知られているように砂地盤の液状化に対する抵抗力は密度が大きくなると大きくなること^{6)~8)}から、Finn らの実験結果を検討することを目的として、著者らの研究室で動的三軸試験機によっても再液状化実験を、上述の振動台を用いた再液状化実験とは別に行ってみた。

また、本論文では 1 回の完全液状化を生じて 10% 程度のせん断ひずみを受けた供試体の液状化抵抗と過去に

* 山口大学工学部土木工学科 教授 (宇部市常盤台)

** 山口大学工業短期大学部土木工学科 講師 (宇部市常盤台)
(1981. 7. 30 原稿受付・討議期限 1983. 4. 1)

液状化を生じていない、いわゆる処女供試体のそれとを比較すること、すなわち大ひずみ履歴が液状化抵抗に与える影響を明らかにすることを目的とした実験も行っている。

本論文では始めに振動台を用いた液状化実験装置および方法を述べ、次に1回あるいは2回の完全液状化を生じた土の再液状化実験結果、また大きいひずみ履歴が再液状化抵抗に及ぼす影響を検討した結果およびそれらに対する考察を順次述べることにする。

2. 実験装置

この実験に用いた実験装置を図-1に示す。

装置は振動台⑦に固定した振動箱の底板①と圧力室⑥から構成されている。底板は厚さ5mmのステンレス板で作られており、直径100cmの底板上には外径60cm、高さ3cmのリム⑮が取り付けられている。供試体⑭はこのリムの外側に取付けた厚さ1mmのゴムスリーブ内に作製される。

供試体の間隙水圧は底板の中央部および中央から25cmの位置で測定された。それぞれの場所には直径20mmのポーラスストーン板がはめこまれ、そこから硬質のナイロンチューブでそれぞれ間隙水圧計④、⑤の位置に導かれている。⑧、⑨がその位置である。

実験では振動時の供試体のせん断変形を拘束しないようにすることが必要であるが、そのために本装置ではゴムスリーブで包んだ供試体の外側に厚さ1cm、内径、外径がそれぞれ60.6、76.0cmのドーナツ状の塩化ビニール板リングが4枚積み重ねられた状態ではめこまれている。したがって、供試体は横方向に膨れ出すのは拘束される。

供試体には載荷板③の自重による鉛直圧が作用し、また繰返しせん断応力は載荷板等の振動時の水平慣性力によって負荷される。振動台の許容搭載重量が4.9kNであることを考慮して載荷板には重量2.5kNのものを

用いた。したがって、載荷板の自重によって供試体表面には鉛直圧(σ_v')=8.8kN/m²が作用することになる。これ以上の鉛直圧での実験を行う場合には、圧力室をセットして側圧を負荷した状態で実験を行うことになるが今回の実験では側圧を作用せず鉛直圧(σ_v')=8.8kN/m²の下で実験を行った。

載荷板と供試体上面が接触する部分には載荷板の底面に振動方向に直角な方向に高さ1cm、厚さ0.2cmの7本のリブ板⑩が取り付けられてあって、載荷板の慣性力によるせん断応力が確実に供試体に作用するようにしている。また、載荷板の中央には直径2cmのポーラスストーン板がはめこまれ、これに連結した内径4mmの硬質のナイロンチューブを通じて供試体中の間隙水の排水が可能である。

なお、先の研究⁵⁾で上述の実験装置によって平均粒径(D_{50})が0.83mmの新宮砂に対して液状化実験を行い、この装置で得られた応力比は他の実験室で行われた同様な液状化実験から得たDeAlbaら⁶⁾、原田ら⁹⁾の結果に近いこと、われわれの実験室の動的単純せん断試験で得た応力比よりもやや小さいものであること、動的三軸試験での供試体の砂粒子間にくい込んだメンブレン貫入量を補正して求めた応力比とはほぼ一致する等の結果を得ている¹⁰⁾。

3. 試料

本実験に用いた試料は豊浦砂、新宮砂(福岡県新宮町産の海浜砂)、まさ土(山口県宇部市産)および礫の4種である。それぞれの試料の粒子形状(粒径が0.42~0.25mmの範囲)、粒度曲線および物理定数を写真-1、図-2、表-1に示す。表中、 k_{15} は各試料の所定の相対密度(D_r)での透水係数を示す。また、最大間隙比(e_{max})および最小間隙比(e_{min})は土質工学会の土質試験法による方

図-1 実験装置

写真-1 粒子形状

図-2 粒度曲線

表-1 試料の物理的性質

	Toyouura sand	Shingu sand	Masado	Gravel
G_s	2.63	2.64	2.63	2.76
D_{max} (mm)	0.84	2.00	5.66	5.66
D_{50} (mm)	0.27	0.83	1.75	4.40
U_c	1.6	1.7	8.9	2.1
e_{max}	1.028	0.890	1.062	0.853
e_{min}	0.678	0.540	0.597	0.638
k_{15} (cm/s)	0.041 ($D_r=48\%$)	0.39 (39%)	0.078 (41)	5.2 (44)

法で求めた。

豊浦砂，新宮砂，礫はいずれもかなり均等係数が小さく，まさ土は風化はあまり進んでいないものであって，均等係数は大きい。

試料の粒子形状の特徴としては，まさ土はやや角ばっているが，豊浦砂，新宮砂および礫は丸味を帯びていることがあげられる。

粒度曲線の中に示す一点鎖線および破線で囲まれる粒度範囲は土田氏の提案による液状化を生じる可能性のある粒度範囲および特に液状化を生じる可能性のある粒度分布に入っている。

4. 供試体の作製および実験方法

各試料について相対密度 (D_r) が 50% 程度の飽和供試体を作製するようにしたが，供試体の直径が 60 cm で大きいために所定の密度の均一な供試体をつくるのがかなり困難であった。そのため後に示す実験結果では所定の相対密度に対し $\pm 2\%$ 程度の差のある供試体の実験結果までを採用することにした。そして実験結果のところでは各試料について供試体作製時の平均的相対密度という意味で (D_r)_{av} として示した。

供試体の作製は次のとおりである。まず，外径 60 cm，高さ 3 cm のリムの外側にゴムスリーブをかけ，その上に O リングを 2 本かける。更に O リングの外側を金属バンドで締めつけて間隙水圧の漏れを完全に防止した。

リムに取り付けたゴムスリーブの下端の周囲には厚さ 3 cm の二つ割りの支持板を固定し，その上に先に述べたドーナツ状の塩化ビニール板（厚さ：約 1 cm，質量：2.3 kg）を 4 枚積み重ねた。

次にゴムスリーブ内にあらかじめ水を入れておき，そ

の中に湿潤試料を粒子間に気泡が入らないように注意して少量ずつ流し込んで詰めた。その後，供試体表面を幅，長さ，厚さがそれぞれ 15×20×0.5 cm の木製タンパーで所要の密度になるように締め固め，平らに仕上げた後，載荷板を供試体表面上に載せた。

この場合，供試体の上面には水が張られた状態であり，載荷板を供試体表面に載せる場合，供試体上面に気泡が入らないように十分に注意した。その後，載荷板の外側のゴムスリーブに O リングを 2 本かけ，更に O リングの外側を金属バンドで締め付けた。

このようにして作製した供試体の直径は 60 cm で，供試体がせん断変形を生じる実質部の高さはほぼ 4 cm であるので，直径の高さの比がほぼ 1/15 となるが，この比が大きいほど供試体に単純せん断変形が生じやすくなると考えられる。高さを約 4 cm としたのは先の研究⁵⁾での結果である。

振動箱の底板上には供試体の周辺部の間隙水圧を短時間に消散することができるようにするために，試料砂を流し込む前にあらかじめ 6 本の硬質ナイロンチューブ（長さ：26 cm，内径：4 mm）を中央のポーラスストーン板を中心にして放射線状の配置となるように置いた。この硬質のナイロンチューブには 3.5 cm 間隔で直径 3 mm の小孔があけてある。

今回の実験では供試体に側圧を負荷していないが，先の実験⁵⁾と同じ方法で供試体を作製したので，間隙圧係数 B 値は先の実験と同様に 0.95 以上であり，供試体の飽和度が実験結果に及ぼす影響は無視できると考えられる¹¹⁾。なお， B 値は供試体に負荷した側圧とその時に供試体内に発生した間隙水圧の比から求めている。

次に，振動台を駆動して供試体全体に振動数が 3 Hz で振幅一定のほぼ正弦波形の水平加速度を与えた。この実験では加速度の大きさを変えることで供試体に与えるせん断応力の大きさを加減した。

図-3(a)，(b)，(c) の実験記録に見られるように振動中に間隙水圧 (u) は次第に増大し，ついにせん断ひずみ (γ) が急激に大きくなって完全液状化が生じる。実験では完全液状化が生じた後に，20 数パルスの振動を与えた。この状態では載荷板は水に浮いたような状態で左右にゆれる。

その後，振動台を停止し，載荷板の中央に直径 2 cm のポーラスストーン板をはめこんだ排水孔より硬質のナイロンチューブを通して 15 分間排水する。排水量はメスシリンダーによって測定した。このときの間隙水圧の消散時間は豊浦砂，新宮砂，まさ土および礫ではそれぞれ 3~6 分，1~3 分，3~10 分，1~3 分であって，供試体中央部の間隙水圧および中央から 25 cm の周辺部での

図-3 再液状化実験記録例（豊浦砂）

間隙水圧はほぼ同時に消散した。その状況は図-3でもみられている。なお、図-3では振動実験中の記録紙の送り速度と間隙水圧消散時のそれとは異なる。その速度は図-3に示してある。

次に、液状化後の排水に際しては供試体が沈下を生じ、ゴムスリーブに大きい「しわ」が生じるのでこの「しわ」を取り除くために載荷板とゴムスリーブを締め付けているOリングをかけ直した。この場合、Oリング上には水が張られた状態となっているので、供試体に気泡が入ることはなく、供試体の密度が変化することなかった。

排水が終った後、再び所定の加速度の振動を与えて液状化を生じさせる。このようにして同一供試体に対し3回の再液状化実験を行った。各回の実験前の供試体の密度は液状化後の排水量より求めた。

この実験での測定量は振動台の加速度、供試体底部の中央部および中央部から25cmの周辺部での間隙水圧および供試体表面上の載荷板の水平変位振幅で、それぞれ図-1に示す加速度計（容量：5g）、④、⑤2個の間隙水圧計（容量：両者とも98kN/m²）、ダイヤルゲージ式変位計⑩（容量：20mm）を用いて測定した。これらの測定量は図-3でみられるようにすべてペンオシロに記録した。

5. 実験結果および考察

5.1 土の再液状化特性

図-3(a), (b), (c)はそれぞれ豊浦砂の1回目、2回目、3回目の液状化実験記録の例である。各記録波形において、記録線は上から振動台の加速度、供試体底部での中央部および中央部より25cmの周辺部の間隙水圧、供試体のせん断ひずみ振幅を示す。記録から分かるように所定の加速度振幅をあるパルス加えると、供試体のせん断ひずみが急激に大きくなり、また間隙水圧も急増し始めると同時に加速度波形の乱れが顕著となっている。

本論文ではこのように供試体のせん断ひずみ振幅が急増するときに初期液状化が生じたとし、初期液状化を起こすまでの加速度のパルス数、すなわち、供試体に加えられるせん断応力の繰返し回数を n_L で表すことにする。なお、本振動台はその機能上、第1パルスから所要の加速度の振動を与えることができないので、所要の加速度に達するまでの漸増段階での有効パルス数を先の研究⁷⁾に従って式(1)を用いて補正パルス数 n_p を求めた。

$$n_p = \frac{\sum (k_h)_i \times n_i}{k_h} \quad (1)$$

ここで、 $(k_h)_i$, n_i および k_h はそれぞれ加速度を漸増する段階での各波の水平震度とそのパルス数および所要の水平震度を表す。

(1)式は振動台を用いて先に行った液状化の実験で、供試体に振幅が変動する加速度を加えた場合の効果を等振幅、等周期の加速度として評価するために、実験結果の検討によって提案されたものである。すなわち、ある k_h は等価震度、 n_p は等価繰返し回数に相当する。この等価震度を用いて整理した実験結果と通常の一定震度を用いた液状化実験結果は良く一致するという結果が得られている。

図-3(a), (b), (c) に示す各実験は水平震度 (k_h) = 0.12 で実験が行われているので、各実験前の供試体の密度による n_L の違いが検討できる。すなわち1回目、2回目、3回目の液状化実験で供試体の相対密度 (D_r) がそれぞれ 54.3%, 73.1%, 80.6% と次第に大きくなるに従って液状化までの繰返し回数 n_L が8回、40回、88回と大きくなっており、完全液状化を生じた後の排水圧密によって供試体の密度が増加するため、1, 2, 3 回目の順で液状化を生じ難くなることが明りょうに分かる。

1回目の初期液状化時のせん断ひずみ (τ) はまき土、礫の場合、1~2%で、豊浦砂、新宮砂の場合には 0.5%前後であった。また、完全液状化時でのせん断ひずみの最大値は供試体に加えられる加速度の大きさによっても異なるが、供試体の高さが約 4cm で載荷板の水平変位の振幅が 4.2 mm 以上にならないようにストッパーで抑えられているので一応、せん断ひずみは最大で 10%程度となる。しかし、先に述べたように完全液状化時には載荷板が水に浮いた状態となり、載荷板のロッキングが生じて図-3(a)の記録にみられるように見掛け上、せん断ひずみは 20% に達することもある。しかし、この状態では載荷板は既に水に浮いた状態となっているので、このひずみが供試体のせん断ひずみとは考えられない。なお、記録より完全液状化時のせん断ひずみは 1, 2, 3 回目の液状化実験の順で小さくなっていることも分かる。

実験結果の整理においては、鉛直応力 $(\sigma_v)_0'$ は載荷板および供試体に生じる回転モーメントを考慮して(2)式から求めた。

$$(\sigma_v)_0' = (\sigma_v)_b' - \frac{M}{I} \cdot \frac{c}{2} \quad (2)$$

ここで、 $(\sigma_v)_b'$ 、 M 、 I 、 c はそれぞれ供試体の底面に作用する鉛直応力、供試体底面における載荷板と供試体に作用するモーメントの和、断面二次モーメントおよび供試体の直径である。

せん断応力 (τ) は (3) 式から計算した。

$$\tau = \frac{k_h \cdot W}{A} \quad (3)$$

ここで、 k_h 、 W 、 A はそれぞれ水平震度 (供試体+載

荷板+リング) の重量、供試体の断面積である。

(2) 式および (3) 式から分かるように供試体に作用する鉛直圧 $(\sigma_v)_0'$ およびせん断応力 (τ) は供試体底面での値を用いている。これは振動中の載荷板等の慣性力によって生じるせん断応力の最大値が供試体底面に作用して供試体が液状化を生じると考えられるからである。このような考え方は既に DeAlba ら⁶⁾によって示されている。

図-4 再液状化実験結果 (豊浦砂)

図-5 再液状化実験結果 (新宮砂)

図-6 再液状化実験結果 (まさ土)

図-7 再液状化実験結果 (礫)

図-4 から図-7 まではそれぞれ豊浦砂, 新宮砂, まさ土および礫についての応力比 $\tau/(\sigma_v)_0'$ と初期液状化を生じるまでのせん断応力の繰返し回数 n_L との関係を示す。いずれの結果も供試体の上面に作用する有効鉛直圧 $(\sigma_v)_0'$ が 8.8 kN/m^2 のときの結果である。図中, ○, ●, ①印は1回目, 2回目および3回目の液状化実験結果を示す。2回目および3回目の液状化実験前の平均的相対密度 $(D_r)_{av}$ の数値の()内横に示した数値は供試体の相対密度の範囲を示す。このように相対密度にある範囲があるのは, 供試体に与えた加速度の大きさの違いによって液状化後の排水量が異なることによるものである。まさ土および礫のように粒径の大きい試料では加速度の大きさによって液状化後の相対密度の範囲が大きいためである。なお, 各実験曲線の両端に示した k_h の値は各実験で用いた加速度の最大・最小値である。

図-4 から図-7 より分かることは, いずれの試料においても相対密度が大きくなるにしたがって, n_L が同じ場合, 応力比 $\tau/(\sigma_v)_0'$ が大きくなっている。すなわち, 豊浦砂の記録波形についての考察のところで述べたように, 液状化後に供試体の密度が増加するので供試体は液状化を生じにくくなるといえる。

Finn⁴⁾は長さ, 幅, 深さがそれぞれ $241 \times 45 \times 58 \text{ cm}$ の砂箱内に詰め厚さ 15.9 cm の飽和砂の再液状化実験を行い, 1回目の液状化後, 排水で供試体の密度が大きくなるにもかかわらず, 2回目の液状化は1回目よりも少ない繰返し回数で生じること, また3回目の液状化は1回目よりかなり多い繰返し回数で生じる場合あるいは3回目には液状化を生じない場合があることを示している。彼らの実験では砂層上にゴム膜が敷かれており, ゴム膜の上から空気圧を加えて砂層に鉛直圧が作用するようになっており, 鉛直圧は, $0.9, 1.8, 3.5 \text{ kN/m}^2$ の3通りで実験を行っている。

ところで, われわれは先に本実験装置による再液状化実験を行う場合, 供試体上面のゴム膜の膨出しを直さないで実験を行い, 図-8 に示す結果を得た¹²⁾。図から分かるように2回目の液状化は1回目とほとんど同じ繰返し回数で生じ, また, 3回目の液状化は1回目よりかなり多い繰返し回数で生じており, この結果は上述の

図-8 供試体上面のゴム膜の膨出しを除去しないで行った再液状化実験結果

Finn⁴⁾の結果に近い。Finn⁴⁾の実験方法の詳細については明らかでないが, われわれの行った再液状化実験で, 1回目の液状化を生じた後の排水で供試体上面に生じたゴム膜の膨出しを取り除いた場合, 2回目の液状化は1回目より生じ難いとの結果を得ており, この結果はFinn⁴⁾の報告と異なる。

図-9, 10 は動的三軸試験機による再液状化実験結果である。試料は豊浦砂で供試体は直径 5 cm , 高さ約 12 cm である。完全液状化時の供試体の軸ひずみ振幅は約 8% である。図中, σ_3, σ_d はそれぞれ側圧, 繰返し軸差応力を示す。動的三軸試験機および実験の方法は文献⁹⁾に詳しく述べてある。

図-9, 10 はそれぞれ1回目の完全液状化後の排水時に, 供試体の上部に生じた“くびれ”を, 直した場合(写真-2(a))とそうでない場合(写真-2(b))の再液状化実験結果を示す。図-9 の結果では振動台を用いた再

図-9 動的三軸試験による再液状化実験結果(供試体上部の“くびれ”を直した実験)

図-10 動的三軸試験による再液状化実験結果(供試体上部の“くびれ”を直さない実験)

(a) “くびれ”を取り除いた供試体

(b) “くびれ”のある供試体

写真-2 1回の液状化を生じた後の供試体

液状化実験結果（図-4）と同様に2回目のほうが1回目よりも液状化し難くなっていることが分かる。これに対して図-10の結果は2回目のほうが1回目よりも液状化しやすくなっている。この後者の結果は動的三軸試験による Finn ら¹⁾の結果と一致する。このように2回目のほうが1回目よりも少ない繰返し回数で液状化を生じる原因の一つとして供試体上部の“くびれ”部分に応力集中が生じることが考えられる。写真-2(b)に示す“くびれ”は1回の液状化を生じた供試体を排水圧密した後、セル室をはずした状態で供試体をモールドで支持し、供試体表面を軽くタンパーで押さえて平らにして取り除き写真-2(a)のようにした。図-9に示すようにこの状態での供試体の平均的相対密度は 82.1% でかなり締まっているので、供試体の表面を平らにする手段が供試体全体の構造全体を変化させることはないと考えられる。

図-11(a), (b) はそれぞれ図-3(a), (b), (c) に示した豊浦砂供試体の中央部および中央部からの距離 25cm の周辺部での間隙水圧の上昇の状況を間隙水圧比 $u/(\sigma_v)'$ と繰返し回数比 n/n_L との関係で示したものである。 n, u はそれぞれせん断応力の繰返し回数、間隙水圧を示す。両図から、供試体の中央部と中央部からの距離 25cm の周辺部での $u/(\sigma_v)' \sim n/n_L$ 関係に違いがな

図-11(a) 供試体の中央部での $u/(\sigma_v)' \sim n/n_L$ 関係 (豊浦砂)

図-11(b) 供試体の周辺部での $u/(\sigma_v)' \sim n/n_L$ 関係 (豊浦砂)

図-12 振動台試験による各試料の1回目の液状化試験から得た $\tau/(\sigma_v)₀' \sim n/n_L$ 関係および他の実験による結果

いことが分かる。このことは豊浦砂の結果のみならず、他の試料においても認められた。

図-12 はわれわれの振動台による実験結果で各試料の1回目の液状化実験で得た $\tau/(\sigma_v)₀'$ と n_L の関係を示す。また、この図に他の実験装置を用いて行われた結果も示している。他の実験装置による結果での試料の相対密度はわれわれの振動台による実験の試料の相対密度と異なるので、両者の実験での液状化に対する応力比は直接比較することはできないが、相対密度の違いも考慮に入れば、今回の振動台による実験結果の液状化に対する応力比は、他の実験室やわれわれの実験室で動的三軸、リングせん断、単純せん断などの試験装置によって求められた砂質土のそれよりやや小さいといえよう^{5), 8), 13) ~ 15)}。更に、完全非排水条件下では礫の応力比が最も小さいことが注目されよう。

Wong ら¹⁶⁾は動的三軸試験機を用いて直径 30 cm の大型供試体で礫の液状化実験を行い、礫の液状化を生じるのに必要な応力比は砂よりはいくらか大きく、この原因はゴム膜の土粒子間へのくい込みおよび system compliance によると述べている。すなわち、完全非排水条件下での礫の液状化に対する抵抗は小さいことを示唆していると思われる。

5.2 再液状化抵抗と通常の液状化抵抗の比較

前節の振動台による再液状化実験によって、完全液状化時に 10% 程度のせん断ひずみを受けて排水後、密度が大きくなった供試体の液状化に対する抵抗力は、液状化を生じる前の供試体のそれより大きくなることが明らかにされた。

ここでは、完全液状化によって大きいひずみを受けた供試体の液状化抵抗とその供試体と同じ密度の処女供試体のそれを比較した。すなわち、1回目の液状化を生じ

図-13 1回の液状化を生じた供試体と処女供試体の $\tau/(\sigma_v)_0 \sim n_L$ 関係 (豊浦砂)

た後、排水圧密された供試体の相対密度にほぼ等しい相対密度をもつ処女供試体を作製し、両者の液状化に対する抵抗力を比較検討してみた。

そのうち、豊浦砂に対して得られた結果を図-13に示す。図中、黒丸で示した結果は1回目の液状化を生じた供試体の再液状化の際の結果で供試体の平均相対密度 $(D_r)_{av}$ は 66.1% である。図-4に示した結果と同一のものである。また、白丸で示す結果は $((D_r)_{av})_0 = 67.2\%$ の処女供試体に対するものである。黒丸で示した実験値は1回目の液状化時に 10% 程度の大きいせん断ひずみを受け、その後、排水圧密によって相対密度が 66.1% になった供試体のものであるが、実験値は処女供試体のそれとほとんど一致することが注目される。

図-14は同じ豊浦砂に対して、はじめに $((D_r)_{av})_0 = 51.8\%$ として作られた供試体が2回の液状化を生じた後、 $(D_r)_{av} = 74.1\%$ となった場合の3回目の実験結果と $((D_r)_{av})_0 = 67.2\%$ の供試体が、1回の液状化を生じて $(D_r)_{av} = 77.5\%$ となった場合の2回目の実験結果を示す。両者の間には相対密度に約 3% の差はあるが、両者の結果はほぼ一本の曲線で示される。

図-15はまさ土について、 $((D_r)_{av})_0 = 51.3\%$ の供試体が1回の液状化を生じ、その後の排水で $(D_r)_{av} = 67.3\%$ となった供試体での実験結果と $((D_r)_{av})_0 = 66.2\%$ の処女供試体のそれとを一緒に示している。両者の間にはほとんど差は認められない。

図-14 2回の液状化を生じた供試体と1回の液状化を生じた供試体の $\tau/(\sigma_v)_0 \sim n_L$ 関係 (豊浦砂)

図-15 1回の液状化を生じた供試体と処女供試体の $\tau/(\sigma_v)_0 \sim n_L$ 関係 (まさ土)

図-16 2回の液状化を生じた供試体と1回の液状化を生じた供試体の $\tau/(\sigma_v)_0 \sim n_L$ 関係 (まさ土)

図-16は同じまさ土に対して $((D_r)_{av})_0 = 51.3\%$ の供試体が2回の液状化を生じて $(D_r)_{av} = 76.3\%$ となった場合の結果と $((D_r)_{av})_0 = 66.2\%$ の供試体が1回の液状化を生じて $(D_r)_{av} = 76.9\%$ となった場合の結果を示している。

以上の結果を総合して、豊浦砂、まさ土について再液状化に対する抵抗力を検討したが、それは過去に生じた液状化の回数、ひずみ履歴に関係せず、供試体の相対密度によって一義的に決まるように考えられる。

このように、均等係数が小さい比較的小さい粒子からなる豊浦砂および均等係数が大きく最大粒径が 5.66 mm

図-17 液状化に必要な応力比と相対密度との関係

といった粗い粒子からなるまさ土といった粒度分布のか
なり異なる二つの試料について再液状化についての実験
を行ったが、本実験の結果からは液状化に対する抵抗力
は、再液状化である、なしにかかわらず供試体の相対密
度によって決まることが示された。したがって、各々
図-4, 5, 6, 7 に示す豊浦砂、新宮砂、まさ土および礫
の再液状化実験結果からも液状化に対する抵抗力と相対
密度との関係を求め得る。この関係を初期液状化を起こ
すまでに供試体に加えられるせん断応力の繰返し回数
(n_L) が 10, 30, 100 回の場合についてまとめた結果が
図-17 である。

6. 結 語

振動台を用いて直径 60 cm、高さ約 4 cm の比較的大
きい供試体の液状化実験が行えるようにして、砂および
まさ土、礫の再液状化実験を行った。得られた結果を要
約すると次のようである。

1) 各試料について、1 回あるいは 2 回の液状化を生
じた後、15 分間の排水圧密を行って密度が大きくなっ
た供試体の再液状化抵抗は液状化を生じる前の供試体の
液状化抵抗より大きい。

2) 均等係数が小さい豊浦砂および均等係数の大きい
まさ土に対して、1 回の液状化を生じた供試体とその密
度にはほぼ等しい密度をもつ処女供試体とに対し液状化実
験を行って両者の液状化抵抗を比較したが、再液状化で
あるなしにかかわらず、応力比と液状化を生じるまでの
せん断応力の繰返し回数の関係は相対密度によって一義
的に決まることが各試料において示された。

3) 振動台を用いた実験結果との比較の意味で動的三
軸試験機によって豊浦砂の再液状化実験を行った。その
結果、液状化後の排水圧密後、供試体上部に生じた“く
びれ”を取り除いた状態での再液状化実験では、振動台
による結果と同様に 2 回目の液状化は 1 回目よりも生じ
難いとの結果が得られた。一方、“くびれ”が生じた状
態での実験では、2 回目の液状化は 1 回目よりも早く生
じた。この原因は供試体上部の“くびれ”部分に応力集
中が生じるためと思われる。

その他に次のことが付随して明らかになった。すなわ
ち、一般にいわれている液状化を生じる可能性のある粒
度分布に入っていない丸味を帯びた礫（最大粒径：5.66
mm、平均粒径：4.4 mm）は非排水条件下では本実験で
用いた試料の内でも最も液状化を生じやすい。

最後に、本実験の一部を手伝ってくれた本学大学院生
岡孝、小串利勝両君に感謝の意を表したい。

記 号 説 明

- A = 供試体の断面積
- B = 間隙圧係数 (B -係数)
- c = 供試体の直径
- D_{max} = 最大粒径
- D_r = 相対密度
- $(D_r)_{av}$ = 平均的相対密度
- $((D_r)_{av})_0$ = 初期平均的相対密度
- D_{50} = 平均粒径
- e_{max} = 最大間隙比
- e_{min} = 最小間隙比
- G_s = 土粒子の比重
- I = 断面二次モーメント
- k_h = 水平震度
- $(k_h)_i$ = 加速度を漸増する段階での各波の水平震度
- k_{15} = 水温 15°C での透水係数
- L = 供試体の中央部からの距離
- M = 供試体底面における載荷板と供試体に作用するモーメントの和
- n = せん断応力の繰返し回数
- n_i = 加速度を漸増する段階での各波のパルス数
- n_L = 初期液状化を生じるまでのせん断応力の繰返し回数
- n_p = 加速度を漸増する段階での補正パルス数
- u = 間隙水圧
- U_0 = 均等係数
- W = (供試体+載荷板+リング) の重量
- γ = せん断ひずみ
- σ_d = 繰返し軸差応力
- $(\sigma_v)'$ = 供試体上面に作用する鉛直圧
- $(\sigma_v)_0'$ = 回転モーメントを考慮しない場合に供試体底面に作用する鉛直応力
- $(\sigma_v)_0'$ = 回転モーメントを考慮した場合に供試体底面に作用する鉛直応力
- σ_3 = 側圧
- τ = せん断応力

参 考 文 献

- 1) Finn, W. D. L., Bransby, P. L. and Pickering, D. J. (1970): "Effect of strain history on liquefaction of sand," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, No. SM 6, pp. 1917-1933.
- 2) Seed, H. B., Mori, K. and Chan, C. K. (1977): "Influence of seismic history on liquefaction of sands," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 103, No. GT 4, pp. 257-270.
- 3) Ishihara, K. and Okada, S. (1978): "Effect of stress history on cyclic behavior of sand," Soils and Foundations, Vol. 18, No. 4, pp. 31-45.
- 4) Finn, W. D. L., Emery, J. J. and Gupta, Y. P. (1970): "A shaking table study on the liquefaction of saturated sands during earthquake," Proceedings of the 3rd European Symposium on Earthquake Engineering, Sofia, Bulgaria, pp. 253-262.
- 5) 大原資生・山本哲朗 (1981): 振動台による砂の液状化試験について, 「土と基礎」, Vol. 29, No. 4, pp. 33-38.
- 6) DeAlba, P., Seed, H. B. and Chan, C. K. (1976): "Sand liquefaction in large-scale simple shear test," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 102, No. GT 9, pp. 909-927.
- 7) O-hara, S. (1973): "An experimental study on the

- liquefaction of saturated soil, using shaking table," Technology Reports of the Yamaguchi University, Vol.1, No.2, pp.261-270.
- 8) 大原資生・鈴岡直彦 (1972): 振動砂箱による飽和砂の液化に関する実験結果の検討, 「土質工学会論文報告集」, Vol.12, No.4, pp.85~94.
 - 9) 原田次夫・打田靖夫・大長昭雄 (1977): 大型単純セン断型液化試験機の開発と液化実験例, 「土質工学会第12回土質工学研究発表講演集」, pp.401~404.
 - 10) 大原資生・山本哲朗 (1982): 動的三軸による液化試験におけるゴム膜貫入量の影響について, 「土質工学会論文報告集」, Vol.22, No.1, pp.127~135.
 - 11) 吉見吉昭 (1980): 「砂地盤の液化」, 技報堂出版, pp.33~34.
 - 12) 大原資生・山本哲朗 (1981): 振動台による再液化試験, 「土木学会第36回年次学術講演会講演概要集」, 第3部, pp.76~77.
 - 13) Seed, H.B. and Lee, K.L. (1966): "Liquefaction of saturated sands during cyclic loading," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.92, No.SM6, pp.105-134.
 - 14) Finn, W.D.L., Pickering, D.J. and Bransby, P.L. (1971): "Sand liquefaction in triaxial and simple shear tests," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.97, No.SM4, pp.639-659.
 - 15) Yoshimi, Y. and Oh-oka, H. (1973): "A ring torsion apparatus for simple shear tests," Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.12, pp.501-506.
 - 16) Wong, R.T., Seed, H.B. and Chan, C.K. (1975): "Cyclic loading liquefaction of gravelly soils," Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE, Vol.101, No.GT6, pp.571-583.