振動砂箱による飽和砂の液化に関する実験結果の検討

(The Results of Experiment on the Liquefaction of Saturated Sands with a Shaking Box: Comparison with Other Methods)

大 原 資 生* (Sukeo O-hara)
鈴 岡 直 彦** (Naohiko Suzuoka)

キーワード：液状化／振動／間ゲキ水圧／耐震
IGC： D7/E8

1. 緒 言

振動による飽和砂層の液化についての実験的研究を行なう場合、二つの方法が用いられる。一つは動的な三軸圧縮試験、動的な単純せん断試験によって供試体に繰返しせん断力を加える方法であり、もう一つは振動台上の砂箱の中に飽和砂をつめて振動を与えて液化現象を起こす方法である。

前者はシード (Seed)^{1),2)} らによって開発された方法であり、わが国においても、この方法に属する実験的研究は谷本³⁾、吉見⁴⁾、柴田⁵⁾、石原⁶⁾ などによって行なわれ、その成果が発表されている。この方法は、実験中、供試体の応力状態が明確に規制できるという利点があり、液化機構の力学的関係を実験的に明らかにするのに非常に役だったが、応力状態において、供試体と実際の地盤との相似性に問題があると思われる。この点では後者の方法では砂層自体を一つの縮小された地盤とみなせるから振動に対する応答を求めるには合理的であるが、振動箱の形状、寸法が実験結果に影響することや砂層から受ける拘束圧の規制が困難であるといった難点があり、また砂層に生じる振動時の繰返しせん断応力を直接知ることがほとんど不可能に近いことなど、前者の実験方法に比べると欠点が多いようである。

しかし、後者の方法は砂層の液化現象を直接観察でき、深さ方向の間ゲキ水圧分布も測定することができるといった利点もあるので、現在も用いられている。また、後者の方法はランダム振動台が普及しつつある現在ではなお広く用いられるようになるであろう。

そこで、われわれは振動砂箱による実験において、砂

表面にゴム膜を敷き、その上から空気圧を作用させるという特殊な方法を用いて砂層に作用する有効鉛直圧をかえて、その液化に対する影響を調べることを試み、それについては先に発表した⁷⁾。

同じような方法による振動砂箱の実験は先に吉見⁸⁾ によっても行なわれているが、その結果の解析は主として間ゲキ水圧によるものであって、その内容は著者らの内容と異なる。

以上述べたように、前、後者の方法にはそれぞれ長所も短所もあるが、現在までに発表されている研究成果のすべては前者または後者のどちらかの方法のみによるものであって、両者の方法を同一の試料砂について行なって得た結果を対比したものはまだない。

これは振動砂箱の実験から得られた結果の位置づけを明確にするために是非必要なことである。

そこで、われわれは先に行なった振動砂箱の実験に引き続いて同一の試料砂について動的三軸、動的単純せん断試験を行ない、両者の結果を比較、検討した。

本論文ではその結果について述べる。

2. 振動砂箱による実験および結果の概要

本論文では、先に発表した振動台による実験結果と今回行なった実験結果との比較を行なうので、先の論文の概要をここに述べておく。

振動台上の内法寸法が長さ 100cm、幅 58cm、深さ 30cm の鋼板製の砂箱の中に飽和砂をつめ、表面をならして、その上に厚さ 1mm のゴム膜を敷き、上ぶたをかぶせて砂箱と周辺部で緊結する。気密になったゴム膜とふたとの間に圧縮空気を入れて空気圧によって砂層を圧密する (図-1 参照)。このとき、砂層の鉛直有効圧は空気圧に等しくなる。この状態で振動台によって砂層に液化が生じるまで振動を与える。その際、砂層内の間ゲキ水圧の変化を測定した。

振動加速度の与え方はつぎの二通りとした。

- 1) 砂層に液化が生じるまで、加速度を一定の増加度で大きくしていく。

* 山口大学工学部教授 (宇部市常盤台)

** 清水建設(株) (中央区京橋 3 の 2 の 3)

• この論文に対するディスカッションは昭和 48 年 10 月 1 日までに
投稿下さい。

図-1 振動砂箱

2) あらかじめ定めた一定値の加速度の振動を、砂層に液化が生じるまで継続する。

1) の実験では、液化を生じるに必要な振動加速度と有効圧との関係が調べられ、2) の実験では、一定加速度の振動が加えられたときに液化を生じるに必要な振動継続時間が調べられた。試料としては後述される2種の砂が用いられた。

写真-1 は2) の実験で得られた記録の例を示したもので、4本の線の上から深さ5, 15, 25cmの所の間ゲキ水圧の変化および振動加速度を示す。振動開始後約60秒たったときに急に間ゲキ水圧が上昇しているのがわかる。このとき砂層の液化が生じたのである。

このような記録から液化が生じるに必要な振動継続時間とその震度、初期鉛直有効圧との関係を求めたのが図-2である。これから液化を生じる震度は初期有効圧と比例していることがわかる。

液化が生じる直前の鉛直有効圧と震度との関係を求めると図-3に示す直線関係が得られた。

図-2 震度と液化に要する振動継続時間の関係

このような直線関係が得られたということから、砂層の液化の条件として次式を考えることができる。

$$\tau_d = (\sigma_v' - u_f) \tan \phi \quad (1)$$

ここに τ_d : 振動によって生じるせん断応力

写真-1 振動砂箱による実験記録例

σ_v' : 初期鉛直有効圧

u_f : 液化時の間ゲキ水圧

ϕ : 内部摩擦角

図-3 震度と液化直前の有効圧の関係

図-4 応力比と液化に要する振動継続時間の関係

図-5 試料砂の粒度曲線

すなわち、振動という現象から τ_d と震度 k とは一次比例の関係にあると考えることができるので、(1)式を考えたのである。

そこで、(1)式において内部摩擦角を知ることができれば、図-3の関係から、この振動箱の中の砂層における k と τ_d との関係が求められ、図-2の縦軸を τ_d/σ_v' に書きかえて、 σ_v' が異なる結果をすべてプロットすること

表-1 試料砂

	Toyoura sand	Shingu sand
Specific gravity G_s	2.63	2.64
50 Grain size D_{50}	0.23mm	0.82mm
Uniformity coeff. C_u	1.44	1.36
Max. void ratio e_{max}	1.06	0.89
Min. void ratio e_{min}	0.70	0.58

ができる。先の論文では、ペーラム (Bujellum) の実験結果を参考にして $\phi=20^\circ$ としての結果を示したが、その後、この実験に用いた砂について後述のような三軸試験を行なった結果から、豊浦砂、新宮砂の内部摩擦角をそれぞれ 34° ($e=0.85$)、 30° ($e=0.82$) と得たので、この値を用いて得られた結果が図-4である。この結果から液化が生じるかどうかといったことや、液化に要する振動継続時間は応力比 τ_d/σ_v' によって一義的に決まるといことが確かめられた。

以上が前論文の概要であり、振動砂箱による実験でも飽和砂の液化に対する有効圧の影響を調べることができることを示したものである。

3. 試料

今回の実験は前述の趣旨により行なわれたので、振動砂箱の実験で用いられたと同じ2種類の砂について実験が行なわれた。その諸定数および粒度分布は表-1、図-5に示す。2種の砂はいずれも均等度のよいもので、平均粒径が比較的細かいもの(豊浦砂)と比較的大きいもの(新宮砂)の2種類である。先の論文にもあるように、これらの砂を振動砂箱内に飽和砂としてつめたときの間ゲキ比はそれぞれ0.85(豊浦砂)および0.82(新宮砂)であった。そこで、今回の実験では供試体の間ゲキ比はこの値に等しくなるように作られた。

表-1に示した内部摩擦角は三軸試験による圧密非排水試験による値である。

4. 実験装置

今回の実験に用いた装置は動的三軸試験機と動的単純せん断試験機の二つである。それぞれの概略について説明する。

4.1 動的三軸試験機

写真-2は動的三軸試験装置を示したものである。供試体の大きさは直径が3.5cm、高さは約8.0cmで、この供試体を所定の側圧で圧密した後、そのままの側圧で、所定の振幅の軸差応力を、一定の周期で振動的に作用させるようになっている。

その方法は、上部加圧板が連結されているスピンドルを複働式のエアシリンダーのピストンロッドに連結し、エアシリンダーの上下の圧力室に交替的に圧縮空気を送り込んだり、排気したりする。送気、排気の時間

写真-2 動的三軸試験機

写真-3 動的単純セン断試験機

間隔の制御は電磁弁とそれを駆動するリレー回路によって行なわれ、送り込まれる空気圧は減圧弁によって加減された。ここに使用されたエアシリンダーはペロフラムシリンダーといって、ピストンとシリンダーおよびピストンロッドと軸受けとの間の摩擦はほとんどない特殊な構造のものである。有効面積は 17.7 cm^2 である。

軸差応力の振幅の測定にはエアシリンダーを支持しているロッドに抵抗線ヒズミ計式の力率計が用いられ、供試体の軸ヒズミはスピンドルの変位量を差働変圧器型の変位計で測定して求めた。また、供試体の間ゲキ水圧は試料台の透水板を通ってきた水圧を銅パイプで適当な位置に導き、受圧面の直径が 6 mm の小型圧力計で測定した。この圧力計も抵抗線ヒズミ計式のものである。

図-6(a) 動的三軸試験機の構造

エアシリンダーへの送気、排気は電磁弁で制御したので、軸差応力は矩形波状で変化し、振動数は 0.5 サイクルで実験を行なった。

4.2 動的単純セン断試験機

この試験機はわれわれの実験室で試作したもので、セン断箱はジェルマン (Kjellman) 型と同じ型式のものである。動的なセン断力が負荷できるようになっており、その主要部を写真-3 に、機構を図-6(a) に示す。

セン断箱は水平移動台①の上に固定された直径 7.5 cm の試料台②に設けられる。すなわち、試料台に直径 7.5 cm のゴムスリーブをかけて O-リングでとめる。その外側にデルリン製のリング受台③をはめ込む。これをはめ込むことによって、試料台にかけられた O-リングが外側から押えられるようになって試料台の周囲とゴムスリーブの間は水密となる。その受台の上にゴムスリーブを中におくようにして内径 75.2 mm 、外径 96.0 mm で 1 枚の厚さが 0.2 mm のアクリルリング④を $12 \sim 14$ 枚積み重ねる。そしてゴムスリーブの中に直径 75 mm で高さがおよそ 20 mm の供試体が作られるのである。供試体成形後はこの上にトップキャップ (直径 75 mm) ⑤をのせ、これにゴムスリーブの上端を O-リングでとめ、さらにその上からホースクランプで締めて水密とする。

トップキャップの上面には垂直荷重をのせるための軸棒がついており、その上端は球座となっていて、ここに分銅懸荷装置がのる。この軸棒は固定板⑥の中央にある軸受孔に水平方向のあそびがない状態ではまるようになっており、固定板は 4 本の支柱で固定される。したがって、この状態ではトップキャップは水平方向には動かない状態となるので、水平移動台を左右に移動することにより供試体にセン断力が加わることになる。

なお、試験中、供試体とトップキャップおよび試料台との間にスベリを生じないように、トップキャップと試料台の表面には縦、横にみぞ(溝)が切られた厚さ 2 mm のポーラスメタルが張り付けてある。

また、水平移動台と下の受台との間にはボールベアリングがはいっていて、水平移動台の移動に対してはほと

図-6(b) セン断応力の波形

図-6(c) 供試体のセン断変位

んど摩擦がない状態にしてある。

つぎに、繰返しセン断力の負荷装置であるが、これには動的三軸圧縮試験機に用いたと同じ型の複働式のエアースリンダーを用いた。ピストン軸と水平移動台との連結部には厚さ 4 mm、幅 20 mm、長さ 105 mm の板バネがあり、これには抵抗線ヒズミゲージがてん付してあって、供試体に加えられるセン断力はこの板バネに生じるヒズミ量によって測定する。この試験機では負荷セン断力を正弦波形式とするため、図-6(a) に示すような機構となっている。すなわち、A、B 2 個のエアースリンダーを図のように並列につなぎ、最初にピストンの位置を、いずれのシリンダーでも中央におく。その状態でバルブ A、B を同時に開いて減圧弁を通過してきた所定の圧力の圧縮空気を 2 個のエアースリンダーに送り込む。

そして、再びバルブ A、B を同時に閉じる。エアースリンダー A のピストン軸は偏心距離が 15 mm の偏心軸に連結されているので、偏心軸を回転することによって、エアースリンダーの二つの圧力室の圧力が交差的に、また正弦的に変化するので、エアースリンダー B のピストンロッドに正弦的な押し引きの力が発生し、供試体に正弦波状の繰返しセン断力が働くことになる。

その波形を図-6(b) に、試料の変形を図-6(c) に示した。図中の 1, 2, 3, 4 の番号は偏心軸の位置の番号に対応する。その振動数は偏心軸の回転数をかえることによって変化することができるが、この実験では三軸試験と同じ 0.5 サイクルとした。

間ゲキ水圧は試料台の表面のポーラスメタルを通った間ゲキ水をポリエチレン管で間ゲキ水圧計まで導いている。この実験で用いた間ゲキ水圧計は三軸試験に用いたのと同じ型のものである。

セン断変位は水平移動台の変位量を測定して求めた。変位計は三軸試験に用いたのと同じ型のものである。

図-7 飽和砂の作り方

5. 実験方法

今回行なわれた動的三軸試験と動的単純セン断試験について述べる。

5.1 動的三軸試験

振動砂箱による実験に比べて、三軸試験では供試体が小さいので、供試体は完全飽和状態で試験されなければならない（このことは単純セン断試験でも言えることである）。このため試料は前もって、水を満たした三角フラスコの中に入れ、約 1 時間煮沸し、試料中の空気を完全に追い出したものを用いた。

供試体の成形の際にも、空気の混入を防ぐために図-7 のような方法を用いた。この方法を用いたのは上記の目的のほかに、ゆる詰め供試体を作る目的を持っている。

すなわち、試料台にゴムスリーブの下端を締めつけ、その外側に二つ割りモールドをはめる。ゴムスリーブの上端を引き上げモールドの上端にひっかけるようにして外側に折り曲げる。その上に図-7 で見るようにロートのついたゴムせんをはめ込む。ロートおよびモールドの中に脱気水を満たした後、ロートの底にストッパーをおき、先に準備した砂をロートの中に入れ、十分にかき回して気泡がはいっていないことを確かめてからストッパーを引き抜くと、砂粒子は水中を静かに沈殿しながらモールド内につまる。全部の砂がモールド内につまったならば、ゴムせんをはずしてトップキャップをおき、ゴムスリーブを緊結する。そして、供試体内を水銀柱 4 cm ぐらいの負圧にし、供試体が自立しうる状態にしてモールドをはずす。供試体の寸法を測り、圧力室を組立てて所定の側圧を加え圧密した後、トップキャップとエアースリンダーのピストン軸とを結合する。

減圧弁を操作して、エアースリンダーに送り込む空気圧を調節し、また、軸差応力計、変位計、間ゲキ水圧計などの測定装置を調整した後、電磁弁を駆動し、供試体に液化が生じるまで繰返し軸差応力を供試体に加える。

各変換量をペン書きオシログラフに記録する。

5.2 動的単純せん断試験による実験

水平移動台を定位置におき（このときエアースリンダーBのピストンは中立位置におかれる）、試料台に径7.5cm用のゴムスリーブの下端をかけ、O-リングで緊結する。

つぎにアクリルリングの受台をセットする。ゴムスリーブを中におくようにして、受台の上にアクリルリングを12~14枚積み重ね、ゴムスリーブの上端をアクリルリングにひっかけるようにして外側に折り曲げる。

ゴムスリーブの中に適量の脱気水を入れ、三軸試験のときと同じ要領で脱気された飽和砂を静かに流し込む。

表面をならした後に、トップキャップをおいて、ゴムスリーブとO-リングで緊結する。固定板によってトップキャップを固定する。つぎに排水コックを閉じ、間ゲキ水圧計が働くようにして圧密荷重を加える。圧密圧にはほぼ等しい間ゲキ水圧が発生したことを確かめた後、排水コックを開いて圧密する。このときの排水量を測定し初期間ゲキ比を求める。圧密終了後、再び排水コックを締め、図-6(a)に示したバルブA、Bを同時に開いて所定の空気圧を二つのエアースリンダーに送り込んだ後、再びバルブA、Bを閉じる。モーターを駆動して供試体に液化が生じるまで、繰返しせん断力を加える。せん断力、せん断変位および間ゲキ水圧変化などの変換量はペン書きオシログラフに記録される。

6. 実験結果およびその考察

今回行なった動的三軸圧縮試験および動的単純せん断試験の結果について別々に述べる。

6.1 動的三軸試験の結果

写真-4は初期有効拘束圧 $\sigma'_3 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ 、繰返し軸差応力 $\sigma_d = 0.33 \text{ kg/cm}^2$ で、間ゲキ比 $e = 0.81$ (相対密度 $D_r = 26\%$) の状態でつめられた新宮砂の実験記録の

写真-4 動的三軸試験の記録例

図-8 液化に至るまでのモール円表示

例である。

この記録から、軸差応力の繰返し回数が21回目の圧縮時までは軸ヒズミに大きい変化はみられないが、伸張時には軸ヒズミが一挙に9%にまで達していることがわかる。つぎの22回目の載荷時には圧縮側の軸ヒズミも生じ、これに続く2~3回の繰返し軸差応力の載荷で軸ヒズミは大幅に増加し、供試体が変形に抵抗できなくなっていることを示している。繰返し回数22回以後の伸張時の軸ヒズミが同じ値となっているのは、変位計の働長以上に供試体の変位したために変位計が供試体の変位に追従できなかったためで、実際にはこれ以上の軸ヒズミが生じているのである。

間ゲキ水圧の記録をみると、軸差応力の繰返し回数が21回目の圧縮時まではほぼ一定の割合で増加しているが、供試体には顕著な軸ヒズミはみられない。しかし、間ゲキ水圧がある値にまで達すると急激な軸ヒズミの増加を生じ、続く1回の載荷で一挙に間ゲキ水圧が上昇し、その値はほぼ拘束圧に等しくなっている。

以上述べたように、このようなゆるい砂では急激な軸ヒズミの増加により初期液状化を生じ、それに続く2~3回の繰返し軸差応力の作用で完全に液状化されるのが特徴である。これを有効応力によるモール円で説明すると図-8に示すようになる。繰返し軸差応力が1回目に載荷されたときのモール円は(a)に示す。このとき生じた間ゲキ水圧値 $u = 0.05 \text{ kg/cm}^2$ だけ左方にモール円は移動する。さらに繰返し応力が10回作用したときのモール円(b)は、10回の繰返し応力によって生じた間ゲキ水圧値 $u = 0.25 \text{ kg/cm}^2$ (圧縮側), $u = 0.23 \text{ kg/cm}^2$ (伸張側) だけ左方に移動するが、このときはまだ供試体には大きい変形は認められず、供試体は液化されていない。つぎに21回目の繰返し軸差応力を受けたときのモール円を(c)に示す。このときまでに発生した間ゲキ水圧値は $u = 0.52 \text{ kg/cm}^2$ (圧縮側, 伸張側とも同じ) であるが、ここで注目すべきは、この間ゲキ水圧値は圧縮時には供試体に大きな軸ヒズミをもたらさないが、伸張時には大きな軸ヒズミをもたらしていることである。すなわち、この間ゲキ水圧値によって供試体は伸張時に

において初期液化状態にはいったのである。

そして、つぎの 22 回目の圧縮時には圧縮側の間ゲキ水圧が急激に増加し、 $u=0.82 \text{ kg/cm}^2$ となって軸ヒズミに変化が認められた。すなわち、このとき、供試体は伸張、圧縮の両方で液化されたと考えられる。圧縮側でのモール円は (c') に示す。この初期液化が生じた時点を破壊と考えて、モール、クーロン包絡線より、この供試体の内部摩擦角を求めると伸張時 28° 、圧縮時 27.5° となり、伸張時および圧縮時ともほぼ等しくなり、これが動的な内部摩擦角であると思われる。

このような実験記録から得られた結果を整理するにあたって、供試体に作用している最大セン断応力（軸差応力 σ_d の $1/2$ ）と初期有効圧 σ'_3 との比 $\sigma_d/2\sigma'_3$ と供試体に初期液化が生じるまでの軸差応力の繰返し回数 n_L との関係求めたのが図-9である。新宮砂では間ゲキ比 $e=0.82$ の場合の結果で、豊浦砂では $e=0.85$ の場合の結果である。初期有効圧 σ'_3 が、新宮砂では 0.7 kg/cm^2 と 1.0 kg/cm^2 、豊浦砂では 0.5 kg/cm^2 と 1.0 kg/cm^2 の場合の結果をいっしょに記入した。両者の間には

図-9 液化に要する繰返し回数と応力比の関係

差異は認められず、同一の間ゲキ比を持つ砂層の液状化の発生はセン断応力と初期有効圧との比によって決まることが、この実験結果からも認められたのである。

6.2 単純セン断試験の結果

写真-5は単純セン断試験の実験記録の例である。新宮砂で鉛直圧が 0.5 kg/cm^2 、間ゲキ比は 0.75 （相対密度 48% ）の場合である。

先の振動砂箱の実験では、新宮砂の間ゲキ比は 0.82 であったので、この実験でも新宮砂の間ゲキ比が 0.82 となるようにつとめたが、セン断箱の深さが小さいためか、新宮砂では間ゲキ比が 0.75 以上のゆる詰めの供試体を作ることができなかった。なお、豊浦砂では間ゲキ比 0.85 の供試体を作ることができた。

写真-5でわかるように、単純セン断状態での液状化に至るまでの過程はほぼ三軸試験と同じである。すなわち、セン断応力の繰返し回数の増加にともなって供試体中の間ゲキ水圧が上昇し、これにともなって供試体の有効応力は減少するが、セン断応力のある負荷回数までは供試体のセン断変位は小さいが、その後、セン断ヒズミが急に大きくなって液化が生じる。

この記録では繰返し回数が $16 \sim 17$ 回目で初期液化が起こり始めたと思われる。同時に繰返しセン断応力の振幅も減少し始め、供試体がセン断抵抗力を失い始めたことを示している。また間ゲキ水圧の記録をみると、大きいセン断ヒズミが生じるまではほとんど振幅を持たないで増加するが、セン断ヒズミが大きくなってくると間ゲキ水圧の波形はあたかも繰返しセン断応力の周期の $1/2$ の周期の波形を持つ挙動を示す。

これは、供試体が繰返しセン断応力を受けて変位した際に、セン断変位の正負にかかわらずダイレイタンスは相対的に正となるからである。このことは間ゲキ水圧の波形の谷の部分に、供試体のセン断変位が正、負の最大となった部分と一致していることから理解される。

三軸圧縮試験と同じように、初期液化時の間ゲキ水圧を求め、有効応力による破壊時の内部摩擦角を求めた結果、新宮砂では 24° 、豊浦砂では 25° となり、三軸圧縮試験結果より低い値を得た。

写真-5に示すような実験記録から、セン断応力と初期有効圧との比 τ_d/σ'_v と初期液化を生じるまでのセン断力の繰返し回数 n_L との関係求めると図-10 が得られる。

初期鉛直有効圧は新宮砂では 0.5 kg/cm^2 の場合の実験のみしか行なわなかったが、豊浦砂では 1.0 kg/cm^2 と 0.5 kg/cm^2 の場合の実験を行なった。なお、豊浦砂では供試体の間ゲキ比は 0.85 、新宮砂では間ゲキ比は 0.75 であった。

写真-5 動的単純セン断試験の記録例

図-10 液化に要する繰返し回数と応力比の関係

7. 各実験結果の比較

先に行なった振動砂箱の実験結果の検討のために今回行なった動的三軸試験、動的単純せん断試験の実験結果について述べてきた。これらの実験でも、シードラリが発表しているように初期有効圧が小さいほど、繰返しせん断応力の大きいほど、液化を生じるまでのせん断応力の繰返し回数が小さいことがわれわれの実験でも確かめられた。また、われわれは、液化に対する砂の密度の影響についての実験結果も得ているが、これはこの論文の目的と異なるので、ここでは言及しない。

そこで、振動砂箱、動的三軸試験、動的単純せん断試験の間の実験結果の比較は、同一の間ゲキ比を持つ砂において、繰返しせん断応力 τ_d と初期有効圧 σ_v' の比 τ_d/σ_v' と液化を生じるに要するせん断応力の繰返し回数 n_L との関係によって行なわれるのが合理的であると考えられる。

図-11 は間ゲキ比が 0.85 (相対密度 58%) の豊浦砂で行なった各試験結果の比較を示したものである。

図-12 は新宮砂についての同じような各実験結果の比較である。新宮砂では 3 種類の実験を同一の間ゲキ比について行ない得なかったため、振動砂箱と動的三軸試験については間ゲキ比が 0.82 (相対密度 23%)、動的三軸試験と動的単純せん断試験については間ゲキ比 0.75 (相対密度 48%) で行なった実験結果を示してある。

ここで、振動砂箱の実験結果は振動数が 4 サイクルで得られたものであり、三軸圧縮試験、単純せん断試験の振動数 0.5 サイクルとは異なっているが、この点についてはピーコック (Peacock) とシードは振動数が 1/6 ~ 4 サイクルの範囲で実験を行ない、この範囲の振動数の違いの液状化に及ぼす影響は小さいと述べている¹⁾。

図-11 各試験結果の比較 (豊浦砂)

図-12 各試験結果の比較 (新宮砂)

図-13 ECU試験のモール円表示

それゆえに、図-11、図-12の振動砂箱の実験結果は図-4の横軸を振動の繰返し回数になおして記入したものである。

また、振動砂箱の実験結果で、図-2 から図-4 を導くときに用いた砂層の内部摩擦角の値は豊浦砂で 34° 、新宮砂で 30° としたことは前に述べ、その値を得た実験については後述することになったが、それはつぎのような実験である。

われわれはこの実験を三軸圧縮試験の ECU 試験と呼んでおり、一種の応力制御方式の試験である。その方法を簡単に説明すると、ある一定の側圧 σ_3 で等方圧密された供試体に所定の分銅をつり下げることによって付加軸差応力 σ_d を加える。つぎに試料台を通してバックプレッシャーを加え、供試体内の間ゲキ水圧を徐々に増加する。

そのため供試体の有効応力は徐々に減少し、ついに供試体は一定のせん断応力の下でせん断破壊を生じる。

このせん断方式のモール円表示を図-13 に示す。(a) は側圧 σ_3 で圧密され、その後、付加軸差応力 σ_d が加えられたときの応力状態である。この状態から試料中の

図-14 ECU-試験の間ゲキ水圧の増加による軸ヒズミの変化

図-15 内部摩擦角と間ゲキ比の関係

間ゲキ水圧を次第に高めていくと (b) の状態を経て、その値が u_f となったとき (c) の状態となって、このときモール円はモールクーロンの破壊線に接することとなる。この破壊の状況は、間ゲキ水圧増加時の供試体の軸ヒズミより観察することができ、間ゲキ水圧値がある値に達すると急に軸ヒズミが増加する。この様子はゆるい砂ほど緩慢である。

図-14 にその例を示す。破壊は軸ヒズミが急激に増加する時点で起こると思われるが、ゆるい砂の場合は軸ヒズミの変化が緩慢であるので、図-14 に示す曲線の曲率が最大になる点を破壊点と定めた。

したがって、内部摩擦角はこの破壊点の間ゲキ水圧により図-13 (c) に示すモール円を決め、試料の粘着力はないものとして (実際に測定してもほとんどないことが確かである)、このモール円に接する直線のコウ配より求めた。

その結果を図-15 に示す。ECU-Test としてあるのが、この方式の結果である。通常の CU-Test の結果も

図-16 各実験から得られた内部摩擦角の比較

図-17 各試験結果の比較

SCU-Test としていっしょに記入した。

われわれが、この方式のセン断試験を行なった理由は、液化現象では間ゲキ水圧が徐々に上昇していく過程で砂層のセン断破壊が生じるということであるので、これにより近い状態での内部摩擦角を求めるためである。

ECU の値は SCU の値より小さくなっており、前述の内部摩擦角の値として ECU の値を採用したのである。

以上のような配慮を行なった上で各実験値を比較したのであるが、図-11、図-12からわかるように、同一の繰返し回数で液化が生じるに要するセン断応力は振動砂箱による実験がもっとも大きく、三軸圧縮試験、単純セン断試験の順となっている (図-12 では間ゲキ比の違いがあるので同一の評価はできないが、ほぼ図-11 と同一の傾向を示していると考えられる)。

この原因については、まだ明らかではない。三軸圧縮試験結果と単純セン断試験結果との違いはシードやフィン (Finn) の論文⁹⁾ にもあるように、主応力方向の変化とか、最大主応力と平均主応力の違いなどが影響していると考えられるが、振動砂箱による実験についても同じ

ような事柄や砂箱といった有限な箱の内での振動といったことも考えられ、そのほかに実験結果の整理に用いた内部摩擦角の値に原因があるようにも思われる。

その裏付けとしては図-16 に示した各実験から得られた内部摩擦角の比較である。ECU-Test で得られた内部摩擦角は、動的三軸試験および動的単純せん断試験から得られた初期液化時の内部摩擦角より大きくなっている。いま、試みに振動砂箱の実験結果（豊浦砂の結果）の整理に単純せん断試験から得られた内部摩擦角 25° を用いた場合の結果を求め 3 者を比較すると、図-17 が得られ振動砂箱の結果は他の 2 者とさらに近いものとなることがわかる。

8. 結 語

以上、振動砂箱による飽和砂の液化の実験結果の位置付けを明らかにするために、同じ砂について動的三軸試験および動的単純せん断試験を行ない、3 者の結果を比較し、つぎの結論を得た。

(1) 先の研究結果^{1)~6)}にもあるように、飽和砂の液化は繰返しせん断応力 τ_d と初期有効拘束圧 σ_v' との比 τ_d/σ_v' によって一義的に決まることが、われわれの実験からも確認された。

(2) 同一の繰返し回数で液化が生じるに必要な τ_d/σ_v' の値は振動砂箱の実験から得られた値がもっとも大きく、三軸試験、単純せん断試験の順で小さくなる。その割合は振動砂箱の実験値を 100% とすれば、三軸試験の実験値は約 80%、単純せん断試験の実験値は約 68%となる。また、3 者の間に差が生じた原因の一つは内部摩擦角にあると思われる。

終りに、本実験結果の考察ならびに本論文の作製に昭和 46 年度の科学研究費（総合研究費）の一部を使用したことを付記する。

記 号 説 明

e = 間ゲキ比
 n_L = 液化に要する繰返し回数
 t_L = 液化に要する振動継続時間
 u = 間ゲキ水圧
 u_f = 液化時の間ゲキ水圧
 ϕ = 内部摩擦角
 τ_d = 繰返しせん断応力
 σ_d = 繰返し軸差応力
 σ_3 = 三軸試験側圧
 σ_3' = 初期有効側圧
 σ_v' = 初期鉛直有効圧

参 考 文 献

- 1) Seed, H. B. and Lee, K. L. (1966): "Liquefaction of saturated sands during cyclic loading," ASCE Vol. 92, No. SM 6, pp. 105-134.
- 2) Peacock, W. H. and Seed, H. B. (1968): "Sand liquefaction under cyclic loading simple shear conditions," ASCE, Vol. 94, No. SM 3, pp. 689-708.
- 3) 谷本喜一・植村隆晴(1970): 周期載荷をうける飽和砂の破壊, 「土木学会論文報告集」, No. 183, pp. 63~71.
- 4) 吉見吉昭・大岡 弘(1970): "Liquefaction of saturated sand during vibration under quasi-plane-strain conditions," 「第3回日本地震工学シンポジウム講演集」, pp. 183-190.
- 5) 柴田 徹・行友 浩(1970): 飽和砂の繰返し載荷による液化現象の研究, 「土木学会論文報告集」, No. 180, pp. 83~89.
- 6) 石原研而・川口徳忠(1970): "Triaxial torsion shear tests on saturated sands under simulated earthquake loading condition," 「第3回日本地震工学シンポジウム講演集」, pp. 175~182.
- 7) 大原資生・鈴岡直彦(1972): 飽和砂の液化に対する有効圧の影響について, 「土と基礎」, Vol. 20, No. 5, pp. 45~50.
- 8) Yoshimi, Y. (1967): "An experimental study of liquefaction of saturated sands," Soils and Foundations, Vol. 7, No. 2, pp. 20-32.
- 9) Finn, W. D. L., Pickering, D. J. and Bransby, P. L. (1971): "Sand liquefaction in triaxial and simple shear tests," ASCE, Vol. 97, No. MS 4, pp. 639-659.

(原稿受付, 1972. 3. 31)