

## 飽和砂の液状化に対する二、三の考察

大原 資生\*・宮内 彰\*・藤井 信夫\*

Some Considerations on the Liquefaction of Saturated Sand Layer

Sukeo ŌHARA, Akira MIYAUCHI and Nobuo FUJII

### Abstract

The experimental studies on the liquefaction of saturated sand layer has been developed rapidly since the Niigata Earthquake at 1964 which brought many damages to the foundations or structures, and these studies will give us some suggestions to defend the disaster of sand basement.

Nevertheless these studies are not done unified because of the difference of the experimental methods and these results can not be compared each other. Therefore, each experiment of the laboratorial studies was done in our laboratory and we compared about each result. And in this time, we could recognize a few facts by additional experiments.

### 1. 緒 言

飽和砂の液状化現象に対する実験的研究は1964年の新潟地震以来急速に進展してきた。飽和したゆるい砂層にせん断振動が作用した場合に、それまで安定して存在していた砂層の骨格構造がくずれて砂粒子が水中に浮遊した状態となる。これが振動による砂層の液状化現象である。

従来までの研究によって、飽和砂の液状化発生に影響を与える因子として次の4つがあげられている<sup>1)</sup>。すなわち、(1)砂の密度、(2)砂に作用している有効応力、(3)地震力によって生ずるせん断応力の大きさ、(4)せん断力の繰返し回数である。

これら4つの因子相互間の関係を定量的に究明する実験方法として2種類の方法が考えられている。一つは、地震時の土要素が受ける応力状態を単純化し、同じ応力状態で土の供試体にせん断応力を与えて行う実験方法である。この方法には動的三軸試験および動的単純せん断試験の2通りの方法が考えられる。

他の一つは、土要素を考えるのではなく、半無限に広がった砂層のモデルを水平方向に振動させて液化を生じさせる方法で、振動台実験である。

これら2種類の実験に共通する液状化現象の根本的な考え方は、所定のせん断応力を繰返して加えた際に飽和砂中に発生する過剰間ゲキ水圧が次第に増大していき、そのため有効垂直応力が次第に減少していく。そしてついには砂にせん断破壊が生ずるまでの過程を追

跡していくことによって砂の液状化現象を明らかにしようという考えである。

前者による実験方法は供試体の応力状態を明確に規制できるという利点があるが、供試体と実際の地盤との相似性に問題があると考えられる。後者の方法では、砂層自体を一つの縮小した地盤とみなせるので振動に対する液状化現象として深さ方向の間ゲキ水圧分布を測定できる利点がある。しかし、砂箱の形状、寸法が実験結果に影響することが考えられるが、この実験方法での最大の欠点である砂層の拘束圧の規制が困難であるという点は特殊な方法によって改善し、ほぼ満足すべき結果を得たことは先に報告した<sup>2)</sup>。

そして、われわれは動的な三軸試験、単純せん断試験、振動砂箱による振動台試験についてのそれぞれの結果を比較して、振動砂箱による結果の位置付けを明確にすることができた<sup>3),4)</sup>。そこで今回はさらに振動によって生ずるせん断力の大きさが周期的に変化する場合にはついての実験も行ない、地震によって生ずるせん断応力の大きさが必ずしも一定ではなく、ランダムな変化をしていることの液化への影響をしらべた。

また今回の実験では、先の実験で使用した砂の他にさらに平均粒径の細かい砂についての実験も行なった。それらの結果および考察について述べる。

### 2. 試料砂および実験方法

実験に用いた砂は豊浦標準砂(細砂)、新宮浜砂

\* 土木工学科

(粗砂)および徳山砂(微細砂)の3種類である。これらの砂の諸定数は Table 1 に示し、粒度分布は Fig. 1 に示す。

Table 1 Soil properties of sands used in these tests

Sample name	Shingu sand	Toyoura sand	Tokuyama sand
Specific gravity, $G_s$	2.633	2.635	2.654
50% Grain size, $D_{50}$	0.82	0.23	0.13
Uniformity coefficient, $C_u$	1.37	1.44	2.38
Maximum void ratio, $e_{max}$	0.89	1.06	1.01
Minimum void ratio, $e_{min}$	0.58	0.68	0.60
Angle of internal friction, $\phi$	$36^\circ (e=0.82)$	$42^\circ (e=0.85)$	$39^\circ$

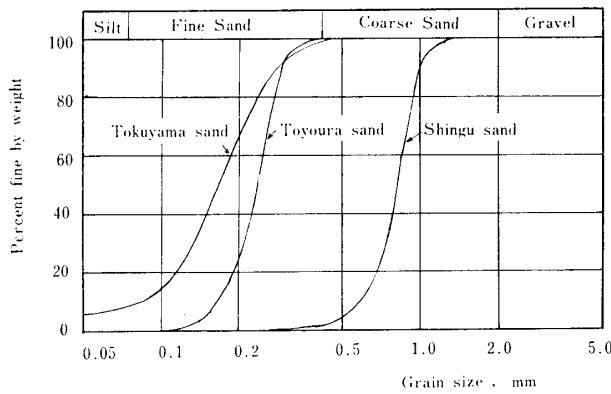


Fig. 1 Grain size distribution curves

今回用いた実験装置は動的三軸試験機、単純セン断試験機、振動砂箱の3種類で、すべて前回は発表した

ものと同じであるのでそれらの説明は省略する<sup>4)</sup>。

また実験方法も三軸、単純セン断試験では前回と全く同じである。振動砂箱による振動台実験で以前では加速度一定の条件で液状化を検討してきたが、今回の実験では加速度振幅を周期的に変化させることによって砂層中に生ずるセン断応力がこれに比例して変化するようにした。すなわち、モーター回転数を最小120 rpm から最大300rpm の間を周期5 sec で自動的に変化する回転を与えることにより振動台の加速度を周期的に変化させ、液状化が発生するまで振動を続行させた。上載空気圧は加速度一定の時と同じように3段階とし、豊浦細砂について実験を行った。この実験においては間ゲキ水圧計(土圧計にフィルターをつけたもの)の位置は Fig. 2 に示されている。この実験の記録例が Fig. 3 である。

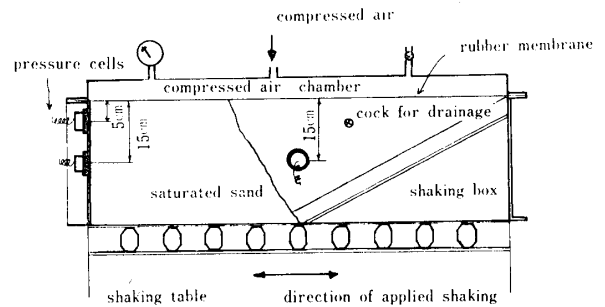


Fig. 2 State of pressure cells and outline of shaking table

### 3. 実験結果および比較検討

#### 3.1 動的三軸試験

今回の実験に用いた試料は新宮粗砂、徳山微細砂である。供試体の直径は3.6cm、高さはほぼ9cmである。実験条件を Table 2 に示す。

Table 2 Applied test condition conducted triaxial test

Applied test condition	Shingu coarse sand	Tokuyama very fine sand
Initial confining pressure	1.5kg/cm <sup>2</sup>	0.7, 1.0, 1.5kg/cm <sup>2</sup>
Void ratio after consolidation	0.82	0.74
Cyclic frequency	0.5cps	0.5cps

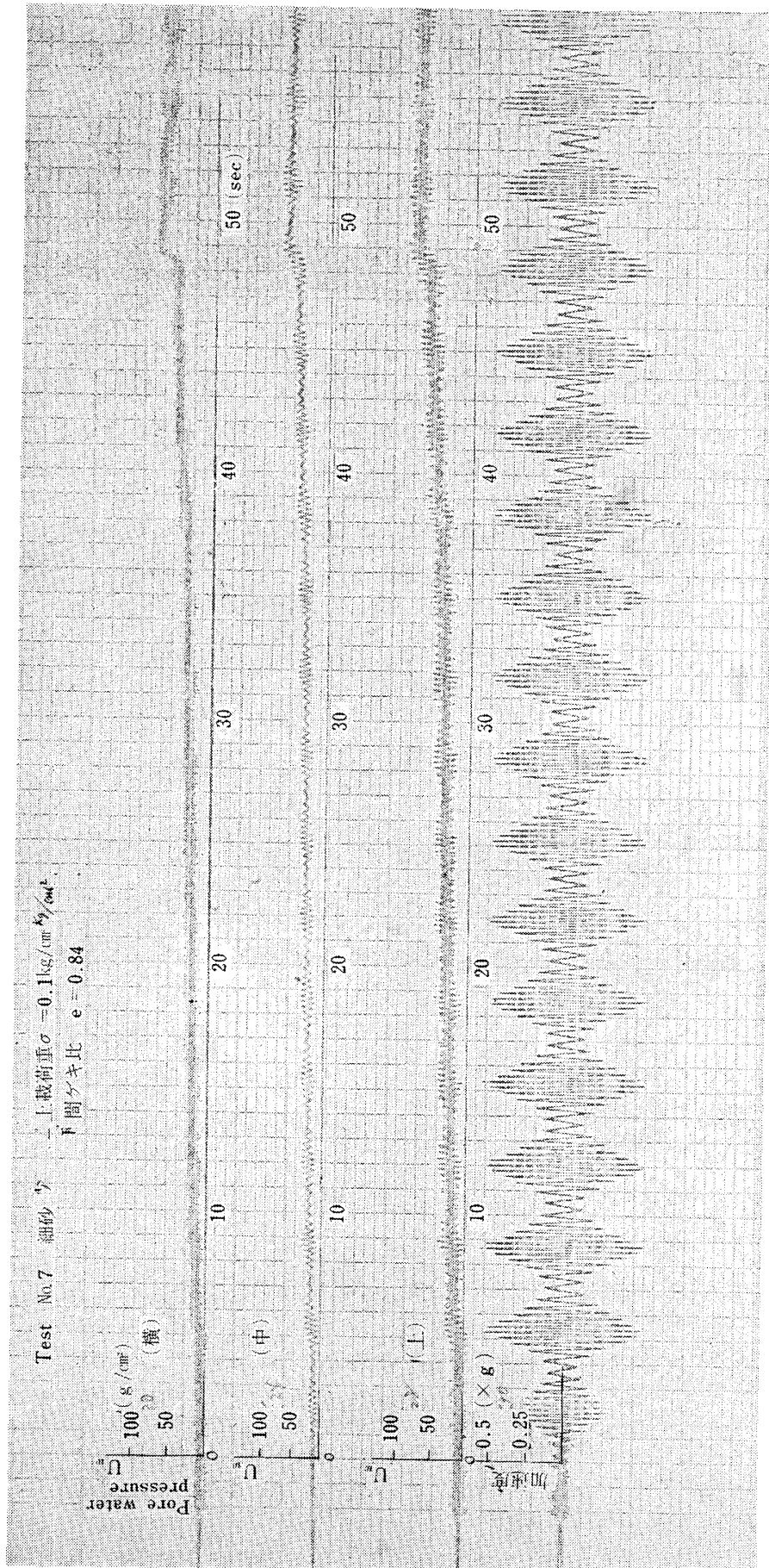


Fig. 3 Record of cyclic acceleration test

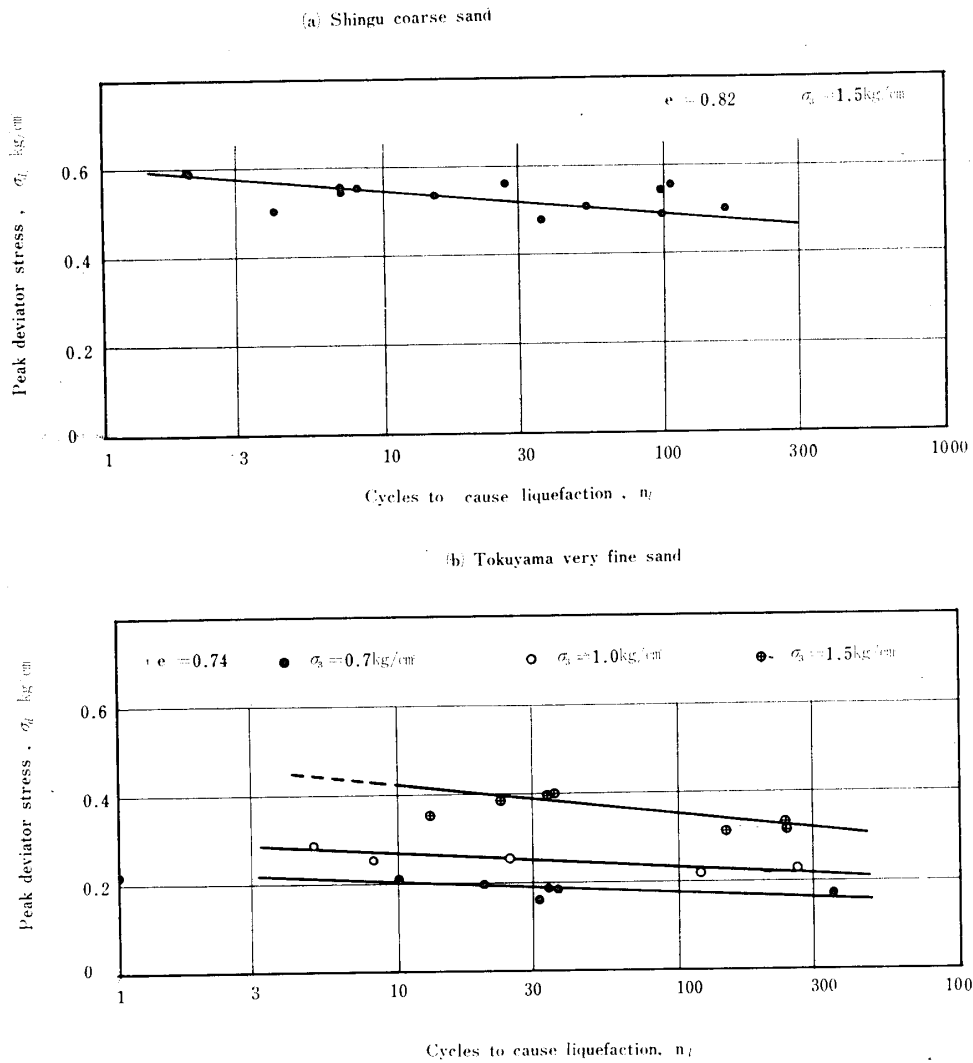
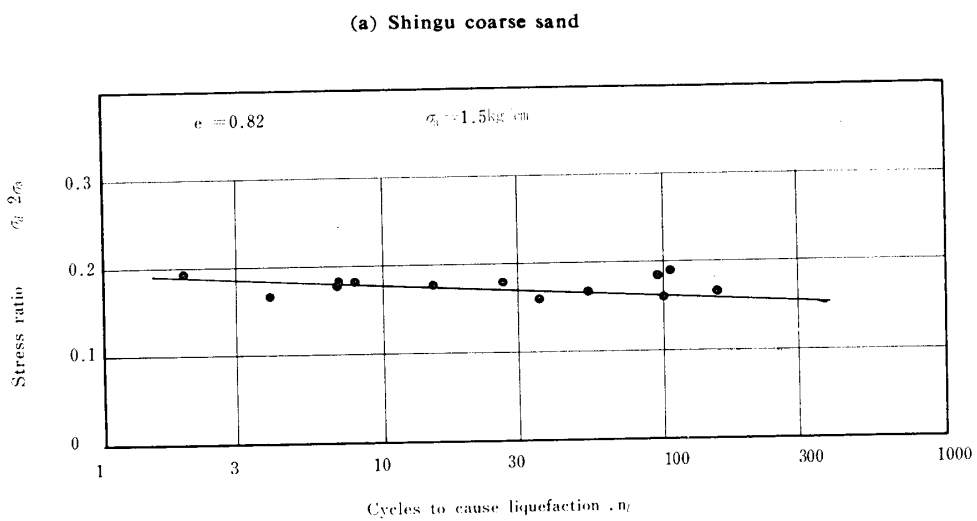


Fig. 4 Peak deviator stresses required to cause initial liquefaction in dynamic triaxial test



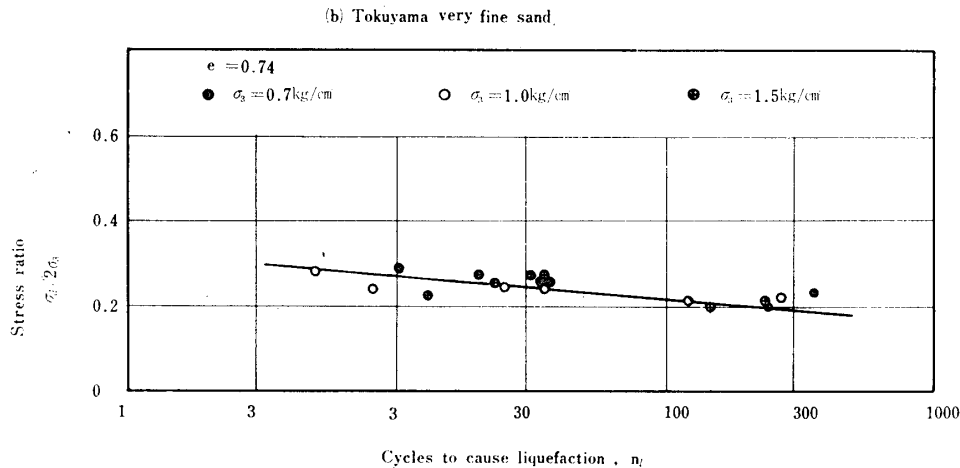


Fig. 5 Stress ratio  $\sigma_d/2\sigma_3$  required to cause liquefaction

各条件について液状化発生時の軸差応力と載荷繰返し回数との関係を求めたのが Fig. 4 である。Fig. 5 は縦軸に繰返しせん断応力  $\sigma_d/2$  と初期有効主応力  $\sigma_3$  との比を、横軸に繰返し回数をとり、その関係を求めたものである。

新宮粗砂に関しては、先の報告で  $e=0.82$  の状態

の場合について  $\sigma_3=1.0 \text{ kg/cm}^2$  の結果を示した。そこで今回は同一間ゲキ比に近似するようにして、 $\sigma_3=1.5 \text{ kg/cm}^2$  の拘束圧をかけて液状化を生ずるに至るせん断応力と繰返し回数の関係を調べた。Fig. 6 は  $e=0.82$  における前回の結果 ( $\sigma_3=1.0 \text{ kg/cm}^2$ ) と今回の結果 ( $\sigma_3=1.5 \text{ kg/cm}^2$ ) を整理したものである。

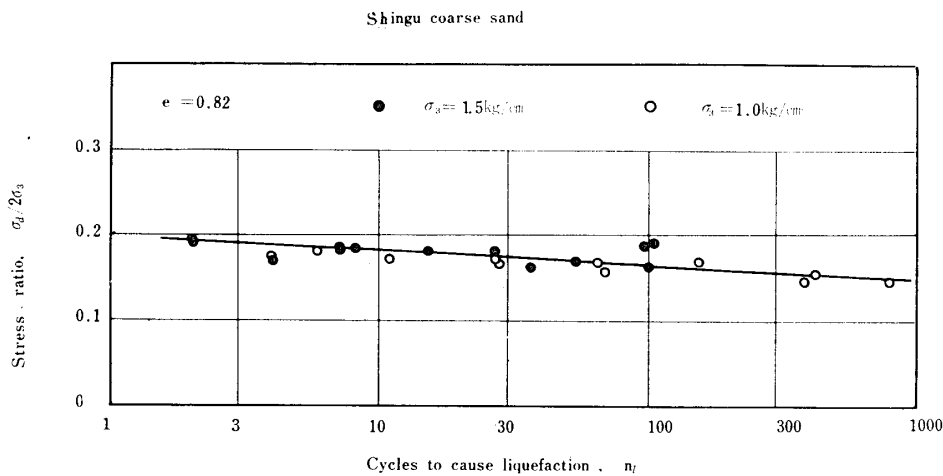


Fig. 6 Comparison of stress ratio  $\sigma_d/2\sigma_3$  required to cause liquefaction in two different confining pressures.

これによると、同一間ゲキ比のもとでは拘束圧  $\sigma_3$  が異っていても、液状化を発生させるに必要な繰返し回数はその時の繰返しせん断応力と拘束圧の比によって一義的に決まることがわかる。すなわち拘束圧が大きくなればそれだけ液状化を生ずるに必要なせん断応力も大きな値が必要である。

徳山微細砂においても  $e=0.74$  ( $Dr=66\%$ ) の場合、 $\sigma_3=0.7, 1.0, 1.5 \text{ kg/cm}^2$  のいずれの場合にも  $\sigma_d/2\sigma_3-n_f$  曲線が接近して1本の線にまとまる

様子がみえ、液化の発生が応力比  $\sigma_d/2\sigma_3$  できまるという結果が得られた。

### 3・2 動的単純せん断試験

動的単純せん断試験として豊浦細砂、新宮粗砂を対象に  $\sigma_v=0.5 \text{ kg/cm}^2$  の場合については、先の実験で行なわれていた。今回は徳山微細砂について  $\sigma_v=0.5 \text{ kg/cm}^2$  および  $\sigma_v=0.3 \text{ kg/cm}^2$  の条件で実験を行なった。いずれも間ゲキ比  $e=0.75$  で周期は前回と同様  $0.5 \text{ cps}$  である。

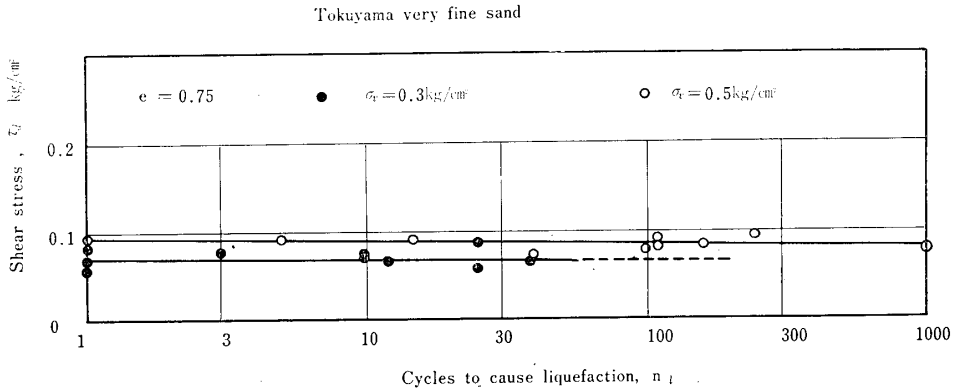


Fig. 7 Peak shear stress required to cause initial liquefaction in simple shear tests

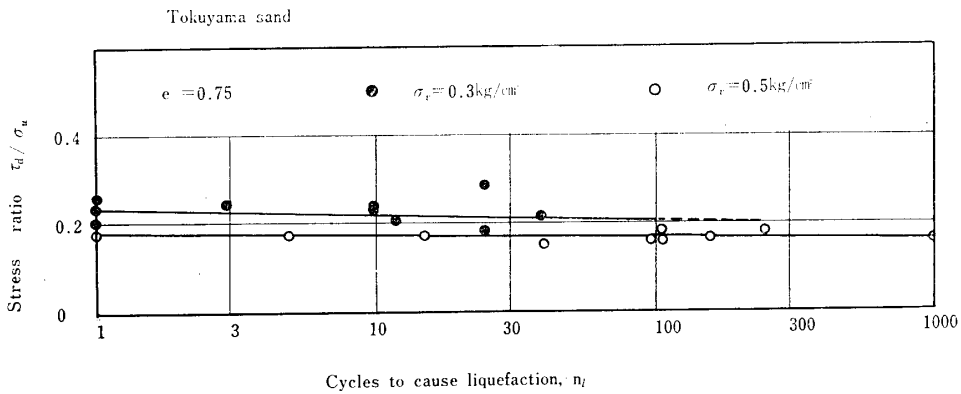


Fig. 8 Stress ratio  $\tau_d/\sigma_v$  required to cause liquefaction in simple shear tests

この実験結果を Fig. 7 に、そして応力比と液状化に要する繰返し回数との関係を Fig. 8 に示した。

これらのグラフから、垂直拘束圧が大きいほど同一間ゲキ比の下では液状化を生じるまでの繰返し回数は多く必要とし、より大きなせん断力が要求されること

がわかる。

つぎに、 $\sigma_v = 0.5 \text{ kg/cm}^2$  の場合の豊浦細砂、新宮粗砂、徳山微細砂の結果を一括して図示したのが Fig. 9 である。

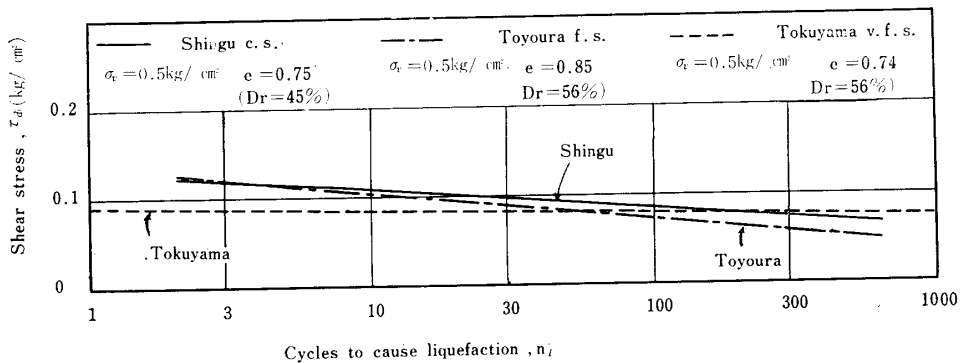


Fig. 9 Comparison of shear stress  $\tau_d$  required to cause liquefaction on each sand at  $\sigma_v = 0.5 \text{ kg/cm}^2$

これで見れば、各試料の相対密度が同一でないで、同一の評価はできないが、豊浦細砂と新宮粗砂についてはほぼ同じ傾向を示している。しかし徳山微細

砂では繰返し回数の大小にかかわらず液化に要するせん断応力はほとんど同一であり、わずかのせん断力の違いによって早く液化が生じたり遅くなったりするこ

がわかる。

3.3 振動台実験

今回の試験は豊浦細砂について行なった。上載圧として0.1, 0.2, 0.3kg/cm<sup>2</sup>の条件で実験を行なった。

初期間ゲキ比は0.84である。その結果震度  $k$  と振動継続時間の関係は Fig. 10の実線で描かれているような傾向にあることが示された。

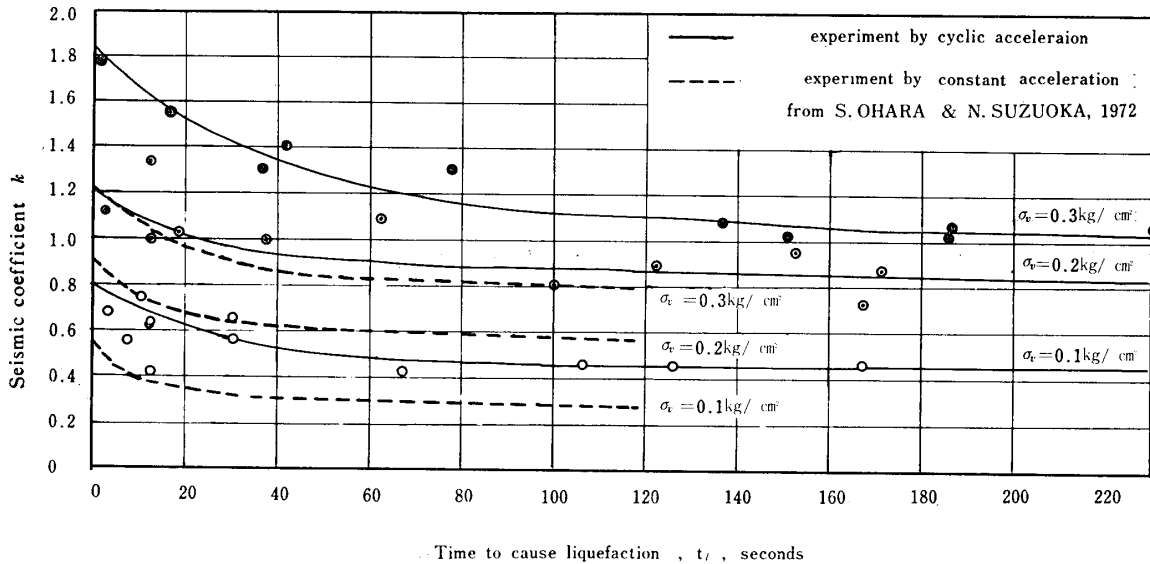


Fig. 10 Relationship between seismic coefficient and time to cause liquefaction in two accelerating methods

Fig. 10において点線で描かれている曲線は前回に報告した豊浦細砂の加速度一定の場合の結果である。今回の結果と前回の加速度一定の場合の結果とで液化までの継続時間と震度との関係を調べてみると  $\sigma_v = 0.3\text{kg/cm}^2$  の場合には  $k_{\text{const}}/k_{\text{cyclic}} = 0.64$ ,  $\sigma_v = 0.1\text{kg/cm}^2$  では  $k_{\text{const}}/k_{\text{cyclic}} = 0.63$  となっている。ただし  $k_{\text{cyclic}}$  は最大震度の値を採用している。この震度比は振動継続時間が80secを越える時の比較である。継続時間が20sec以内では、振動台が所定の振動加速度の振動となるまでに10sec~15secの時間を必要とし(振幅を増大するまでに要する時間)、また加速度の変化の周期が5secであるために震度  $k$  とモーター回転数が液化発生までの継続時間が短いところでは、実験値にバラッキが生じることは免れない。

なお、実験では振動台のモーターの回転数が120rpmのとき最小加速度を得300rpmのとき最大加速度を得るのであるが、120rpmのときの  $k$  は  $\sigma_v = 0.1 \sim 0.3\text{kg/cm}^2$  のいずれの場合にも加速度一定で求められた  $k-n_L$  曲線よりも下まわっており、液状化発生には大きな影響は与えておらず、最大加速度が液状化を発生させるのに大きい影響があるといえる。

4. 動的三軸試験および動的単純せん断試験の総合比較

今までに行なわれた実験のうち、動的三軸試験および動的単純せん断試験では、豊浦細砂、新宮粗砂、徳山微細砂とそれぞれ粒径の異っている試料では液状化に対する抵抗性がどのように変化するかを評価するためにせん断応力  $\tau_d$  とせん断強度  $\sigma_v \cdot \tan\phi$  との比によって今までに行なったものを整理してみた。ここで  $\sigma_v \cdot \tan\phi$  という値を用いるのは砂のもつ密度すなわち間ゲキ比の違いが内部摩擦角に影響を与えるため、この影響による強度を考慮したためである。Seedらは相対密度  $D_r$  をとって、 $\sigma_v \cdot D_r$  なる量で整理している。

Fig. 11-(a)は動的三軸試験について整理したもので、各砂とも液状化に要する繰返し回数と内部摩擦角を考慮した応力比との関係はほとんど一致することがわかる。また単純せん断試験では粒径の大きいものから小さいものへとその応力比が小さくなっているが、30回以上の繰返し回数が必要なところでは、徳山微細砂に関しては応力比の減少割合が小さくなっている。このことは液状化が発生するまでの間ゲキ水圧の上昇過程が砂粒子の大きさや形状などに密接に関係してい

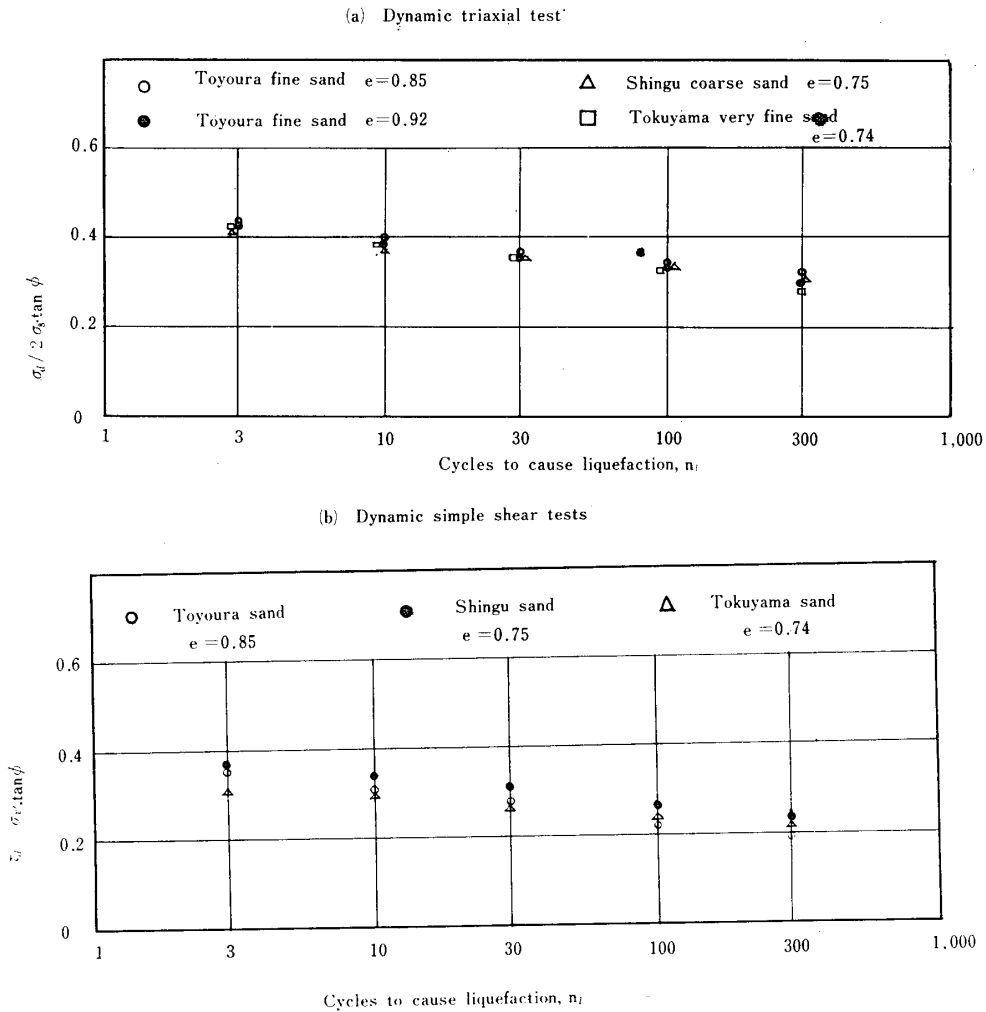


Fig.11 Relationship between stress ratio considered internal friction of sand and cycles to cause liquefaction

ると考えられるが明らかではない。

5. 結 語

以上述べてきた砂の液状化に関する実験的研究から実験結果の比較を行なうことにより試験方法の違いによる相互間の関係をさらに詳しく知ることができるようになった。

動的三軸圧縮試験, 単純せん断試験の追加実験では応力比と繰返し回数との関係をより明らかにすることができた。また振動合実験で周期加速度の加わる場合の実験を行なうことにより加速度一定の場合の震度と振動継続時間の関係を比較することができた。結論としてつぎのことがいえる。

- (1) ゆるい砂と密な砂とでは、液状化に対する抵抗力が違っており、同一間ゲキ比の下では液状化に要する繰返し回数と  $\tau_d / \sigma_v \cdot \tan \phi$  で表示すると

ほぼ同一の関係が得られる。

- (2) 振動合において、周期的に変化する加速度を与えて液状化を発生させた場合、回転数が120~300 rpmの間では加速度一定で求められる震度と液状化発生までの振動継続時間との関係を比較した結果  $k \text{ const} = 0.73 \sim 0.63 k \text{ cyclic}$  の関係があり、周期的加速度が加わる場合が、液状化が発生するまでにより多くの時間が必要であることが明らかになった。すなわち、ランダム波形の加速度による液状化の発生は、その最大加速度振幅の70~60%の振幅をもつ一定加速度による液化の発生と同値であるという結論が得られることになる。

この結果は、Seedらがランダム波による液化は、その最大加速度の65%の一定加速度による液化に相対するという説とはほぼ似たものである。



参 考 文 献

- 1) H. B. Seed, K. L. Lee : ASCE. SM 6, 105 (1966)
- 2) 大原資生, 鈴岡直彦 : 土と基礎, 171, 45 (1972)
- 3) 大原資生, 鈴岡直彦 : 第7回土質工学研究発表会講演集, 30 (1972)
- 4) 大原資生, 鈴岡直彦 : 昭和46年度文部省科学研究費総合研究 (B) 「構造物の基礎の地震時安定に関する研究」 (1972) P.13

(昭和47年9月14日受理)