

飽和砂の液状化に関する実験的研究

大原 資生*・鈴岡 直彦**

Experimental Studies of Sand Liquefaction During Earthquake Loading Conditions

Sukeo OHARA, and Naohiko SUZUOKA

Abstract

Experimental studies of sand liquefaction during earthquake loading conditions was investigated by the test procedures conducted shaking table experiments, and triaxial and simple shear tests using Toyoura fine sand and Shingu coarse sand.

The experimental results indicate that occurrence of sand liquefaction is determined by the following factors : (1) void ratio, (2) confining pressure σ_v , and (3) applied cyclic shear stress τ_d . Further more sand liquefaction is determined by the stress ratio τ_d/σ_v : the higher the stress ratio, the more easily liquefaction will occur.

The comparison between shaking table experiments and triaxial and simple shear tests was discussed in this paper.

1. ま え が き

地震などの周期的繰返し応力を受ける非粘着性の飽和砂層は液状化現象 (Liquefaction) を生じ流動化することが知られている。たとえば1964年の新潟地震による大規模な土木構造物の被害は、この飽和砂層の液状化に帰因していると考えられている¹⁾。そのため構造物の耐震設計の上からも飽和砂の液状化現象の究明が急務となり研究が行なわれてきている。

液状化現象に関する研究²⁾は主に実験的方向より行なわれてきたが、地震を受けた野外の状態を実験室でどのように再現させるかによって、実験方法も大別して

- (1) 振動台を用いた実験
- (2) 三軸試験・単純せん断試験

の二通りの方法がとられてきている。これらの実験に関してはおのおの興味深い実験結果が提出されているが、それぞれの実験については問題点もあり一概に結論を下すことは困難である。

本論文はこの点を考慮して、振動台を用いた実験、および三軸試験・単純せん断試験を行い、これらの実験結果を整理しおのおの実験結果を比較したもので

あり、また飽和砂の液状化の一般的性質を求めるために行った基礎的実験について述べたものである。

2. 地震時の野外地盤のモデル化

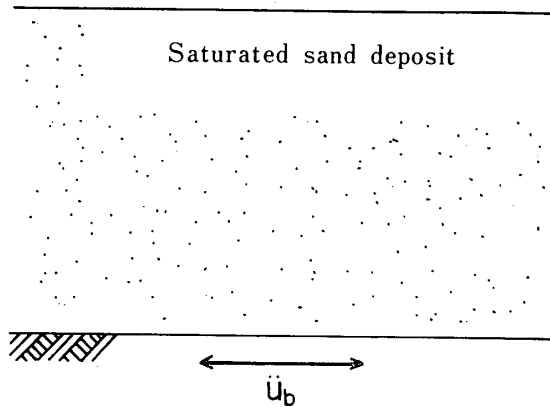
野外地盤が地震時に示す挙動を実験室で調べるには原位置での状態を忠実に実験室内で再現せねばならないが、そのために原位置の状態を知る必要がある。それは Fig. 1 のようであろう。なぜなら地震により基礎盤に到達する地震波の成分は水平・鉛直の両成分をもつが構造物の耐震設計上から考えると水平振動が重要である。

Fig. 1 の状態を直接実験室で再現したのが、振動台を用いた実験であり、振動台上の砂箱に飽和砂層を作ることにより、これを一つの縮小された地盤と見なし、振動台により地震に似せた振動を与え実験を行う方法である。しかしながらこの実験方法は砂層内の応力・変形状態を知ることができない欠点がある。

地震時に地盤 (Fig. 1 参照) 内の土の要素が受ける応力状態は複雑であるが、Seed³⁾らが示したように、基礎盤に到達する地震動によるせん断波の上方向への伝播によるものが大部分であると考えれば、土の要素は Fig. 2 に示す地震時に左右に方向を変える周期的な繰返しせん断応力 τ_d を受けることになるであろう。し

* 土木工学科

** 清水建設 KK



Base motion due to an earthquake

Fig. 1 Field conditions subjected to an earthquake

たがってほぼ地表面が水平なら，土の要素はその深さから地表面までの有効土かぶり圧 σ_v を受けたまま地震による周期的な繰返しせん断応力を受けることになる。

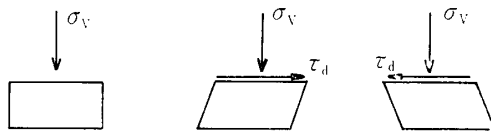


Fig. 2 Idealized stress conditions of soil element below ground surface during an earthquake (after Lee and Seed)

Fig. 2 に示す応力状態は実験室において三軸試験・単純せん断試験を行うことにより再現できる。

3. 実 験 装 置

3・1 振動台を用いた実験装置

この実験で用いた実験装置は従来まで振動土圧を測定する目的で製作されたものを一部改良したもので，砂箱内の飽和砂層に上載圧力が加えられるようになっている。この装置の概略は Fig. 3 に示す。すなわち砂箱一杯に満した飽和砂の表面にゴム膜（厚さ 1 mm）を敷き，その上に砂箱と同寸法の鋼製のフタを乗せ，砂箱とフタのフランジ部をボルトで結合し，ゴム膜とフタの間に圧縮空気を送込み，この空気圧により砂層に上載圧力を加えられるようにしたものである。

砂箱は内寸法が深さ 30cm，幅 58cm，長さ 100cm の鋼製のもので振動方向に直角な一つの側壁の中央部の深さが 5 cm，15cm，25cm，の位置に間ゲキ水圧測

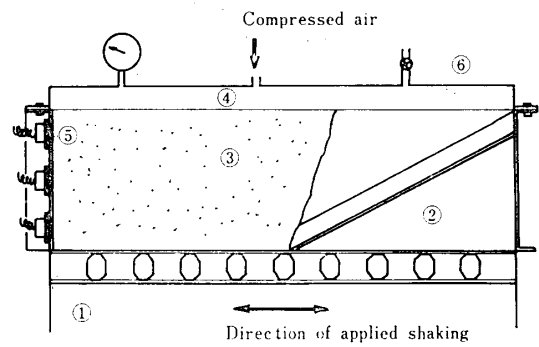


Fig. 3 Shaking sand box

- ① Shaking table
- ② Sand box
- ③ Saturated sand layer
- ④ Compressed air chamber
- ⑤ Pore pressure cell
- ⑥ Rubber membrane

定のための圧力計が取付けてある。この圧力計の受圧面の前には真ちゅう製のフィルターをかぶせ直接受圧面に砂粒子が接触しないようにし，水圧のみが測定できるようにしてある。

3・2 三軸試験機

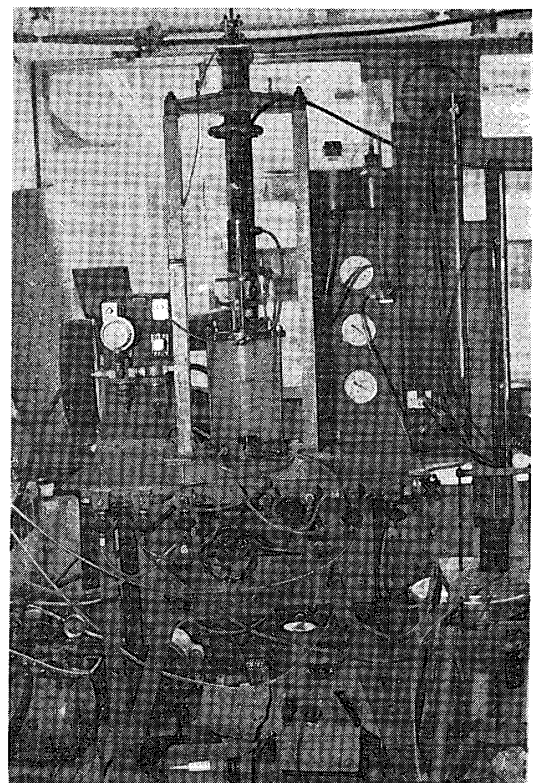


Fig. 4 Triaxial test apparatus

三軸試験機は通常使用されている標準型の試験機を繰返し軸差応力が加えられるように改良したもので、この繰返し軸差応力は複働式のエアシリンダーを用いることによって与えた。Fig. 4 にこの三軸試験機を示した写真を掲げる。エアシリンダー内の二つの圧力室にはソレノイドバルブの働きにより交互に圧縮空気が送込まれ、エアシリンダーのピストンに推力を生じ、このピストンがトップキャップに連結されており、供試体に繰返し軸差応力を加える仕組みになっている。

3.3 単純せん断試験機

単純せん断試験機はこの実験の目的のために新たに試作されたもので Kjellman 型¹⁾と同型であるが、供試体に繰返しせん断応力が与えられるようにしてある。Fig. 5 はこの試験機の全景を示す写真であり、Fig. 6 は機構を示す説明のための図である。試験機は水平移動台上に設けたせん断箱と供試体に繰返しせん断応力を与える負荷装置および鉛直応力を加える載荷装置より構成されている。

この装置を簡単に説明すると水平移動台上の試料台の外側にゴムスリーブをかけ、その外側にリング受合をはめこむ。この上に厚さ 2 mm のアクリルリング（内径 75.2 mm, 外径 96.0 mm）を重ね、この中に砂試料を入れる。砂試料を所定の量だけ入れた後に載荷キャップを乗せる。この載荷キャップには鉛直荷重を受けるための軸棒が付いており、この軸棒が 4 本の支柱で固定された固定板の中央部の孔にガタがない状態ではまるようになっている。そのため載荷キャップは固定され、供試体の上端が固定される。したがって水

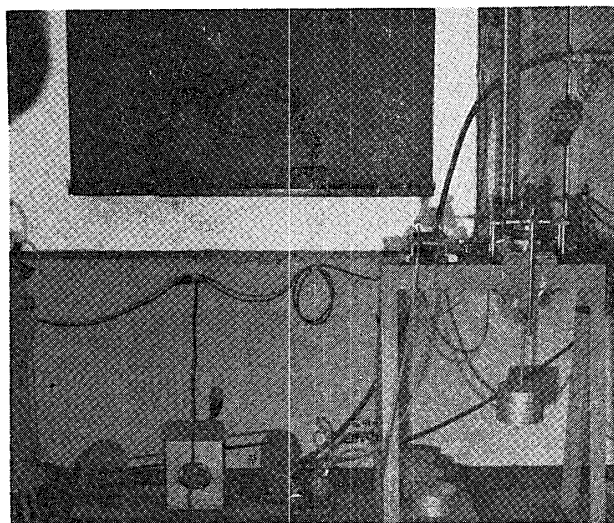
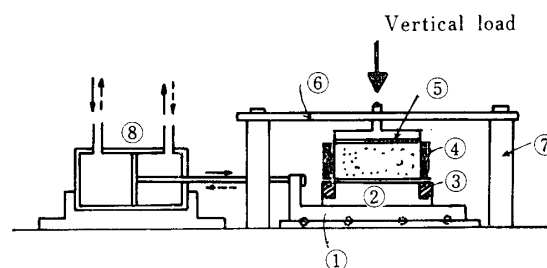


Fig. 5 Simple shear test apparatus



- ① Horizontal carriage
- ② Pedestal
- ③ Ring holder
- ④ Plastic rings
- ⑤ Top cap
- ⑥ Top plate to fix top-cap
- ⑦ Columns to support top plate
- ⑧ Double acting air cylinder

Fig. 6 Detail of simple shear apparatus

水平移動台を移動させることによって供試体にせん断変形が与えられる。水平移動台に水平力を与えるために複働式のエアシリンダーを用いたが、エアシリンダーのピストンは水平移動台の一辺の両端の小支柱で、支持されたステンレス板に連結されているので、エアシリンダーが発生する推力は水平移動台に伝えられ、これが供試体に伝えられることになる。このステンレス板のひずみによって推力が測定される。

4. 試料および実験方法

4.1 試料

実験に用いた試料は豊浦標準砂と新宮砂の 2 種類とともに大部分が石英と長石より成り、それぞれの平均粒径は 0.23 mm および 0.82 mm である。これらの砂はともに均等係数が 1 に近く非常に良く砂粒子のそろった均質なものである。Table 1 および Fig. 7 はこれらの砂の物理的性質と粒径分布曲線を示したものである。

Table 1 Physical properties of Toyoura sand and Shingu sand used in this experiments

		Toyoura sand	Shingu sand
Specific gravity	G_s	2.63	2.64
Mean grain size	D_{50}	0.23 mm	0.82 mm
Uniformity coefficient	C_u	1.44	1.35
Maximum void ratio	e_{max}	1.06	0.89
Minimum void ratio	e_{min}	0.70	0.58

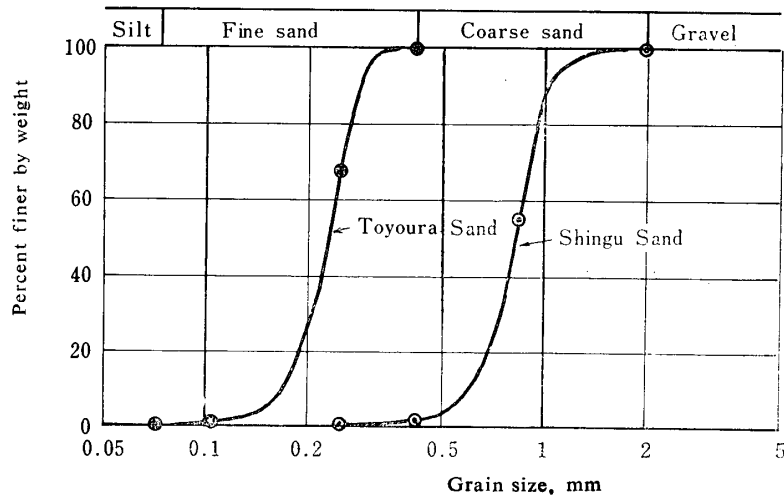


Fig. 7 Grain size distribution curves of Toyoura sand and Shingu sand used in this experiments

4・2 実験方法

4・2・1 振動箱を用いた実験

砂箱内に所定の間ゲキ比をもつように砂を詰めたのち、前述のような方法により、飽和砂層に上載圧力を加え、この圧力で砂層を圧密する。砂層を圧密する上載圧力は $\sigma = 0.1, 0.2, 0.3 \text{ kg/cm}^2$ とし、圧密が完了した時点で振動台により砂層に加速度を与える。なお振動加速度の周期は $1/4$ 秒（振動数 4 cps）である。この加速度の与え方は実験の目的により次の 2 通りとした。

- (1) 砂層が液状化するまで加速度を増加させる方法で、これを加速度増加実験と呼ぶ。
- (2) 最初から一定の加速度を与えて砂層の液状化が生じるまで振動を継続する方法で、これを一定加速度実験と呼ぶ。

(1) の実験は液状化が生ずるに必要な加速度を求める実験であり、(2) の実験は (1) の実験で求められた加速度より小さい加速度を砂層に与えた場合に液状化が生ずるに必要な振動継続時間を求める実験である。この実験の測定量は砂層の各深さにおける間ゲキ水圧と振動台加速度で、これらは電気抵抗ヒズミ計応用のピックアップにより動ヒズミ計を通して電磁オシログラフに記録される。

4・2・2 三軸試験・単純せん断試験

所定の間ゲキ比をもつように形成された飽和供試体（供試体寸法は三軸試験で直径 3.6cm、高さ 約 9cm、単純せん断試験で直径 7.5cm、高さ 約 2cm）は所定の拘束圧で圧密されたのち是非排水状態で試験され

る。供試体に加えられる繰返し軸差応力（三軸試験）および繰返しせん断応力（単純せん断試験）の周期はともに 2 秒である。

試験中の挙動はロードセル、間ゲキ水圧計、差動変位計を用いヒズミ計を通してペン書きオシログラフに記録される。

5. 実験結果の観察と考察

5・1 振動台を用いた実験

Fig. 8 は豊浦砂で行った実験記録の例で (a) が加速度増加実験、(b) が一定加速度実験の結果を示している。この記録の上から 3 本の波形は砂層中の間ゲキ水圧の変化を示し、残りの波形は振動台加速度の変化を示している。

振動を与える前の砂層内の間ゲキ水圧値は静水圧と等しいが、振動を与えるに従って砂層内に過剰水圧が発生しこれが増加してくる。ここで記録に見られる間ゲキ水圧の振幅は振動によって生ずる動間ゲキ水圧であり、この間ゲキ水圧の振幅の平均値が砂層内に生ずる過剰間ゲキ水圧を示す。振動を受けた場合の砂層中の間ゲキ水圧の挙動は加速度増加実験と一定加速度実験ではわずかに異なるが (Fig. 8, (a), (b) を比較参照)、豊浦砂、新宮砂を問わず一般的性状は次のようである。すなわち振動継続時間が経過して行くに従って砂層中の間ゲキ水圧は徐々に増加し、ある時点で達すると急激に増加し、その後ピークになりほぼ一定値に落ち着く。間ゲキ水圧が一定値を示したとき、砂層は完全に液状化され、あたかも砂が水中に浮遊した液体

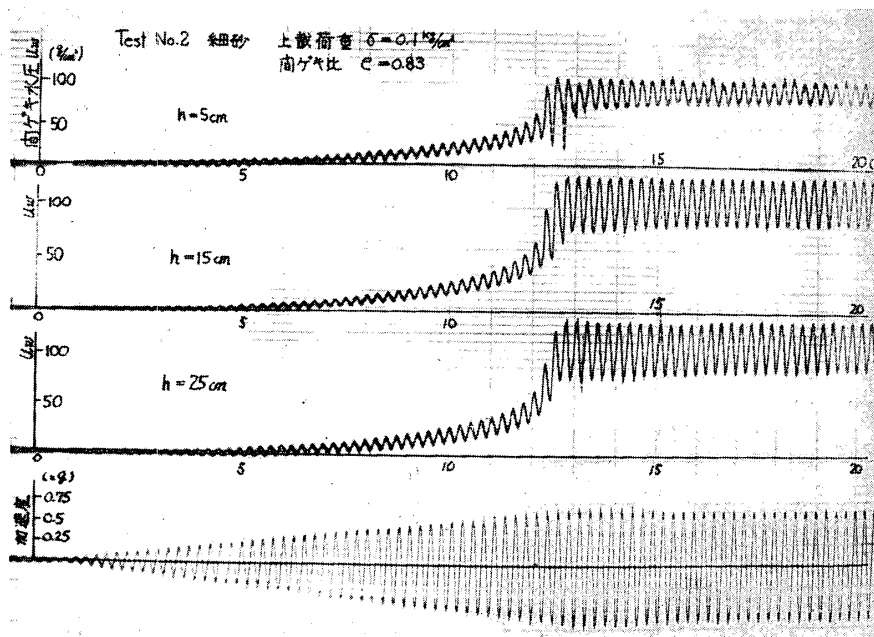


Fig. 8 (a) Record of shaking table experiment

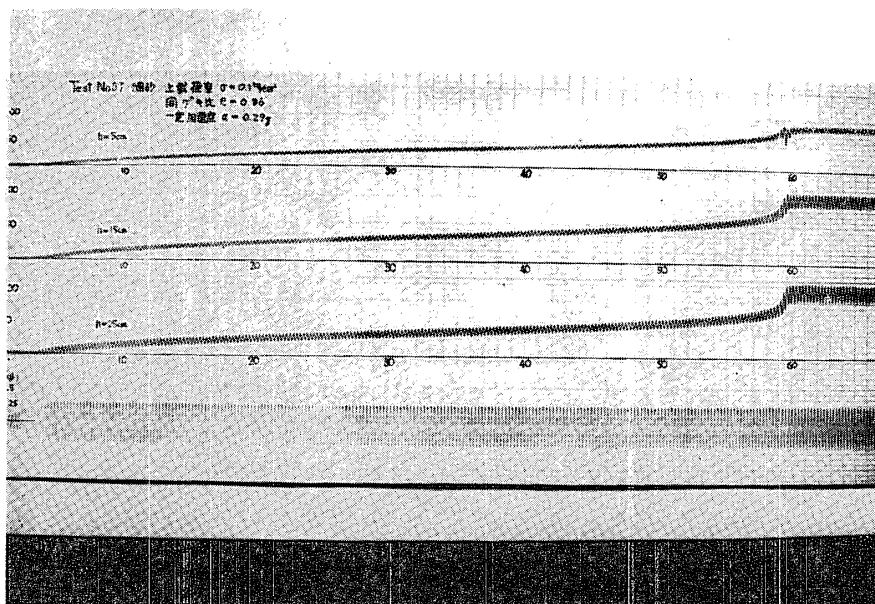


Fig. 8 (b) Record of shaking table experiment

のような状態にあると考えられる^{*}。ゆえに液状化が
 起り始めたのはこの時点より、前の間ゲキ水圧が急増
 する時点であると考えられ、振動台を用いた実験では
 結果を整理するに当たって、間ゲキ水圧が一定値を示し
 た時点を完全液状化、それより前の間ゲキ水圧が急増
 する時点初期液状化とみなして整理を行った。

^{*} このことは砂層に上載圧力を与えるためにフタをかぶせたため直
 接肉眼で観察できないが、上載圧力をとくに与えないで行った実験
 からの観察結果と一定値を示したときの砂層の間ゲキ水圧値がほぼ
 与えられた上載圧力に等しいということに基づいて結論された。

Fig. 9は豊浦砂で行った加速度増加実験と一定加速
 度実験の結果を整理したもので、振動台加速度とその
 加速度で砂層が初期液状化するまでの振動継続時間
 t_L との関係を上載荷重別にプロットしたものである。
 これによると当然予想されたことではあるが、砂層
 の液状化が、与えられた加速度が大きいほど短い振動
 継続時間で生じ、また上載圧力が大きいほど液状化を
 生ずるに必要とする加速度は大きくなることが認めら
 れた。さらに Fig. 9によるとわずかな加速度の減少に
 より、液状化が起るまでの振動継続時間はかなり長く

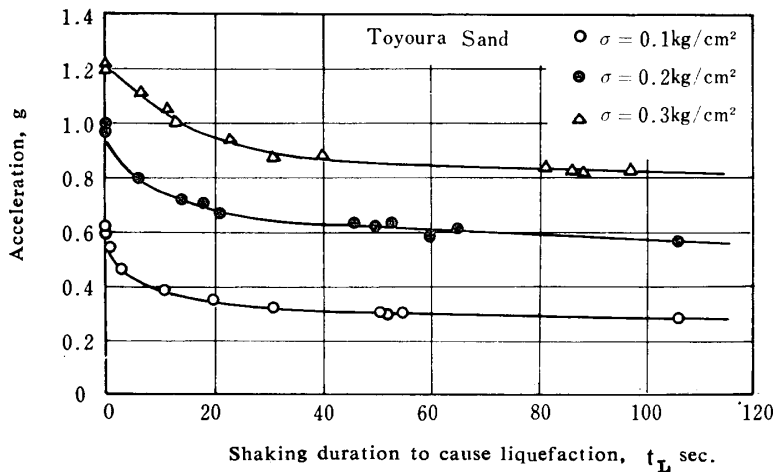


Fig. 9 Relationships between acceleration and shaking duration to cause initial liquefaction on Toyoura sand at three confining surcharges

なり、液状化が起りにくくなることを暗示している。

さて液状化が生ずるか否かを決定する量、すなわち(1)上載圧力、(2)振動加速度、(3)振動継続時間の間の関係は Fig. 9 に示したが、この中で実験により得られた加速度値は実際に液状化が起った地域で記録された値よりはかなり大きな値となった。これは限られた寸法をもつ箱の中の砂層での実験のためと思われるが、この実験で得られた加速度値をそのまま野外での液状化の判定規準に用いるのは適当ではない。

2. で述べたように、地震時の地盤内の土の要素は基盤からのせん断波の伝播により繰返しせん断応力を受けると考えられる。したがって過大な加速度値を含むFig. 9 を検討するために、振動により砂層内に発生する繰返しせん断応力を求めて Fig. 9 を考察する。しかしながら振動により、砂層内に発生する繰返しせん断応力を実測することは技術的に困難であり、現在までまだ行なわれていない。しかるにこの繰返しせん断応力を推定することは可能である。

液状化にともなう砂層の破壊が有効応力減少に帰因するせん断破壊と考えると、Coulomb の破壊規準が適用できるとすると、砂のせん断抵抗は次式で表わされる。

$$\tau_s = (\sigma_v - u) \tan \phi$$

ここに： τ_s ：せん断抵抗

σ_v ：垂直応力、ここでは、

$$\sigma_v = \sigma + \gamma_{sub} \cdot h$$

σ ：上載荷重、 γ_{sub} ：水中単位重量、 h ：土かぶり深さ

u ：間ゲキ水圧

ϕ ：内部マサツ角

さて砂層の破壊は振動による繰返しせん断力、 τ_d が砂層のせん断抵抗を上回った時点で生ずると考えられる。ゆえにその限界、 $\tau_d = \tau_s$ を考えて、

$$\tau_d = \tau_s = (\sigma_v - u_f) \cdot \tan \phi$$

とおく。式中、 u_f は破壊時の間ゲキ水圧で、この値は前に述べた初期液状化の時点の過剰間ゲキ水圧を採用する。一方、 τ_d は加速度に比例すると考えられるゆえに $(\sigma_v - u_f)$ は加速度に比例する。この関係を豊浦砂について示したのが、Fig. 10 で、

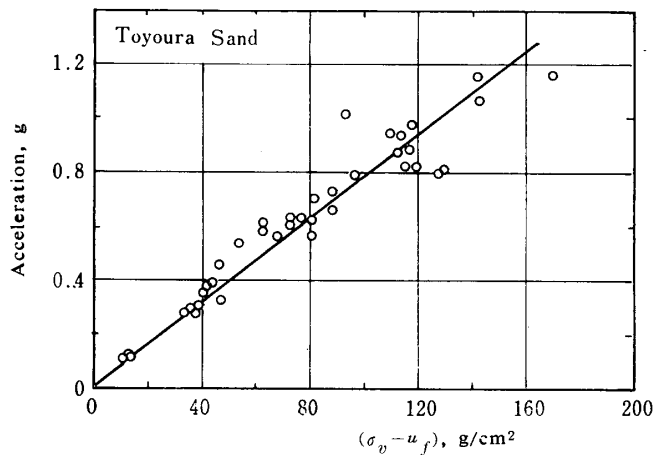


Fig. 10 Relationship between $(\sigma_v - u_f)$ and acceleration

これによると予想したように $(\sigma_v - u_f)$ はほぼ加速度に比例すると考えられ、また砂の内部マサツ角は一定であると考えれば、振動による繰返しせん断応力は一応加速度のみの関数となり、求めることができる。

この繰返しせん断応力を決定するためには、砂の内部マサツ角を知らなければならないが、これは静的非排水せん断試験*を行って決定した。その結果、豊浦砂： $\phi = 34^\circ (e = 0.85)$ 、新宮砂： $\phi = 30^\circ (e = 0.82)$ となり、この値を用いて繰返しせん断応力を計算した。

この求めた繰返しせん断応力を用いて先に示した Fig. 9 の結果を改めて整理したのが Fig. 11 である。Fig. 11 は Fig. 9 の関係をより明らかにするため繰

* 液状化が有効応力減少に伴う破壊であることから、三軸室内で等方圧密した供試体に一定の付加軸応力に加え、バックプレッシャーを加える方法で供試体内の間ゲキ水圧を増加させ、供試体の有効応力を減少させせん断破壊を生じさせる方法をとった。

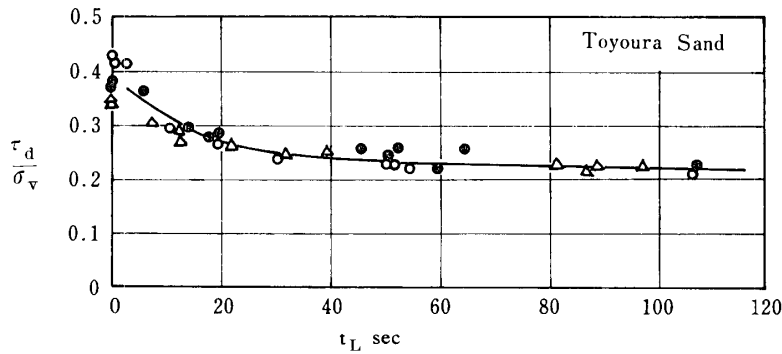


Fig. 11 Relationship between stress ratio τ_d/σ_v and shaking duration to cause liquefaction on Toyoura sand in shaking table experiment (symbols same as Fig. 9)

返しせん断応力 τ_d と初期有効垂直応力 σ_v の比 τ_d/σ_v と液状化が生ずるまでの振動継続時間の関係を示したものである。

これによると液状化が生ずるまでの振動継続時間は上載圧力に関係なく、 τ_d/σ_v によりほぼ一義的に決定されることを示している。

Fig. 11により Fig. 9に含まれた過大な加速度値は繰返しせん断応力に変換された。したがってこの τ_d/σ_v 値の評価が問題となるが、これは後に述べる三軸試験・単純せん断試験の結果と比較することにより検討する。

5.2 三軸試験・単純せん断試験

Figs. 12, 13 は新宮砂で行った三軸試験・単純せん断試験から得られた実験記録の例である。三軸および単純試験から得られた実験記録の例である。三軸および単純せん断状態での供試体の挙動は次のようである。すなわち記録にも見られるように、繰返し応力の作用回数がすすむに従って間ゲキ水圧は増加する。そのため供試体の有効応力は減少するが最初のある回数までは供試体に顕著なヒズミの変化は見られない。しかしある繰返し回数に達すると急激なヒズミの変化が生じ、さらに数回の繰返し回数の下で、ヒズミは大きく増加し供試体が与えられた繰返し応力に抵抗できず、液状化されたことを示している。すなわち最初にヒズミを生じた時点で供試体は初期液状化され、その後の数回の繰返し応力の作用で完全液状化されたと考えられる。

通常ゆるい砂では三軸試験の記録が示すように急激なヒズミの変化を伴って液状化が生ずるが、密な砂になるほど単純せん断試験の記録に見られるように、ヒズミが徐々に増加して液状化を生ずる傾向を示す。

液状化に至るまでの過程を有効応力による Mohr

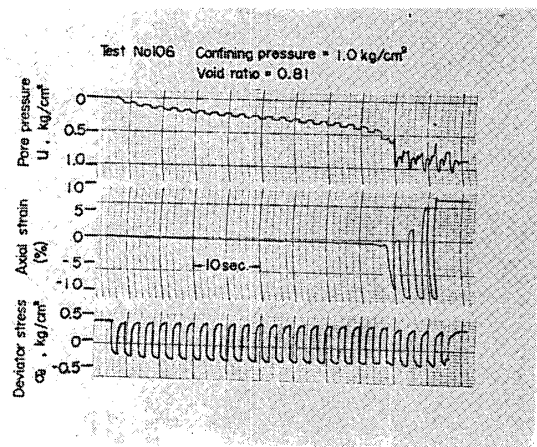


Fig. 12 Record of dynamic triaxial test

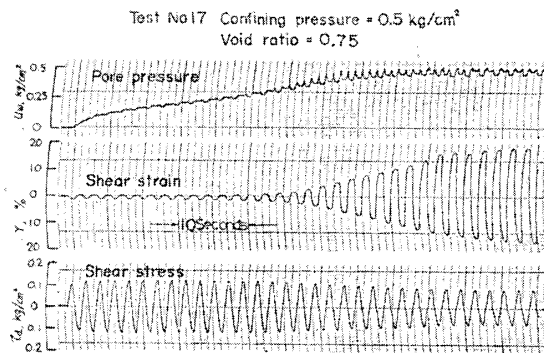


Fig. 13 Record of dynamic simple shear test

円で示すと Fig. 14 のようになる。Fig. 14 は Fig. 12 の三軸試験の結果を解析したもので、この Fig. 14 に示す Mohr 円は繰返し軸差応力が1回目(a)、10回目(b)および軸ヒズミが生じた21回目の伸張時と22回目の圧縮時(c)に作用したときのものである。供試体の間ゲキ水圧の増加に伴って Mohr 円は初めの状態(a)から徐々に左方へ移動して行く。しかし Mohr 円が(a)、(b)

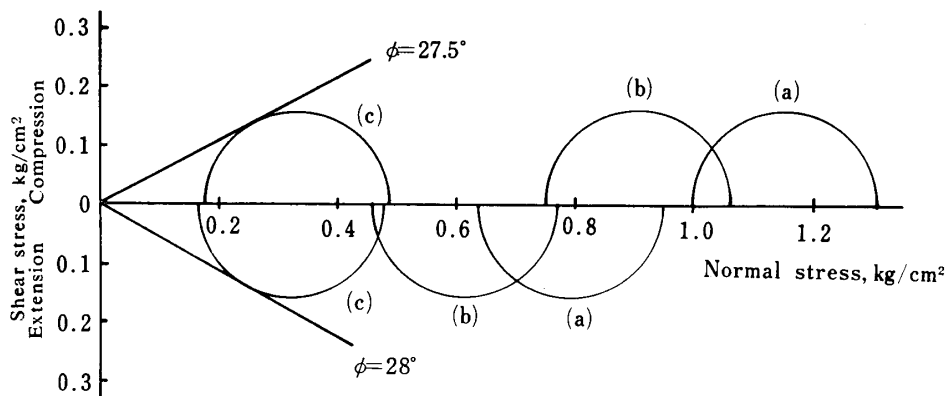


Fig. 14 Effective stress condition on loose Shingu sand

の状態にあるときはまだ供試体の軸ヒズミに変化は見られず、したがってまだ破壊されていない。さらに Mohr 円が移動して (c) の状態になると軸ヒズミが急激に生じ始め、この時点で供試体は破壊包絡線に接し破壊されたと考えられる。すなわち、この Mohr 円 (c) が破壊時の Mohr 円を与える、ゆえにこの Mohr 円から Mohr-Coulomb の破壊包絡線を逆に求めると、供試体の動態時の内部マサツ角を求めることがで

きる。この場合は伸長側 28°、圧縮側 27.5°となり、伸張時・圧縮時ともほぼ等しくなった。

Figs. 15, 16 は豊浦砂について行った間ゲキ比 $e=0.85$ の三軸試験・単純せん断試験結果を示したもので、繰返し軸差応力 σ_d (三軸試験) および繰返しせん断応力 τ_d (単純せん断試験) と初期液状化を生ずるまでの繰返し応力の作用回数 n_L の関係を示したものである。これによると与えられる繰返し応力が大

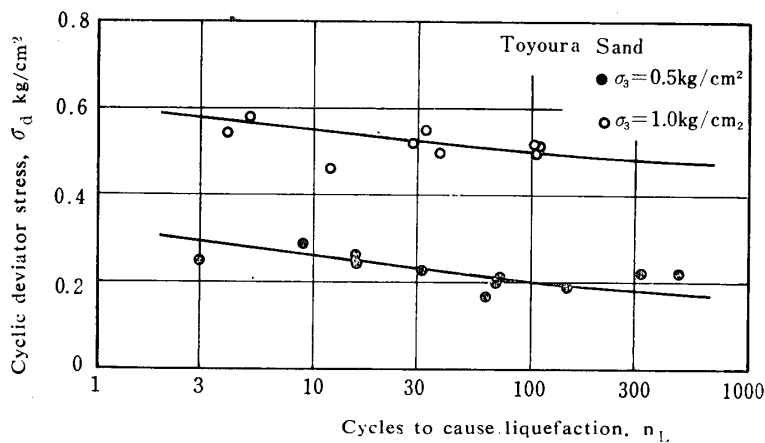


Fig. 15 Cyclic deviator stresses required to cause initial liquefaction on Toyoura sand at different confining pressures in triaxial test

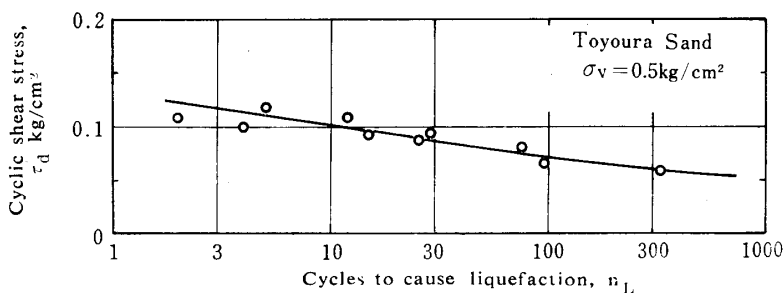


Fig. 16 Cyclic shear stress required to cause initial liquefaction on Toyoura sand in simple shear test

きいほど液状化が生ずるまでの繰返し応力の作用回数は少なく液状化が早く起ることを示している。また拘束圧を $\sigma_3=0.5, 1.0\text{kg/cm}^2$ について行った三軸試験については、拘束圧が大きいほど液状化を生ずるに必要な繰返し軸差応力は大きくなることを示している。これら三軸試験および単純せん断試験の結果は、前に述べた振動台を用いた実験での結果と一致した傾向を示している。

Fig. 17 は Fig. 15 の結果を振動台を用いた実験と同様に繰返しせん断応力 $\sigma_d/2^*$ と初期有効拘束圧 σ_3 の比 $\sigma_d/2\sigma_3$ で整理したものである。これによると多少のバラッキが見られるが、振動台を用いた実験

と同じく、液状化が生ずるまでの繰返し応力の回数は、繰返しせん断応力と初期有効拘束圧の比によって決定されることがわかった。

Fig. 18 は砂の液状化に密度がどのように影響するかを調べるために行った新宮砂の三軸試験結果で、同一の拘束圧 $\sigma_3=1.0\text{kg/cm}^2$ の下で、間げき比が **0.82, 0.75, 0.68** の場合の繰返し軸差応力と初期液状化が生ずるまでの繰返し軸差応力の回数の関係を示したものである。これより明らかなように密な砂ほど液状化が生ずるに必要な繰返し軸差応力は大きく、液状化されにくいことがわかった。

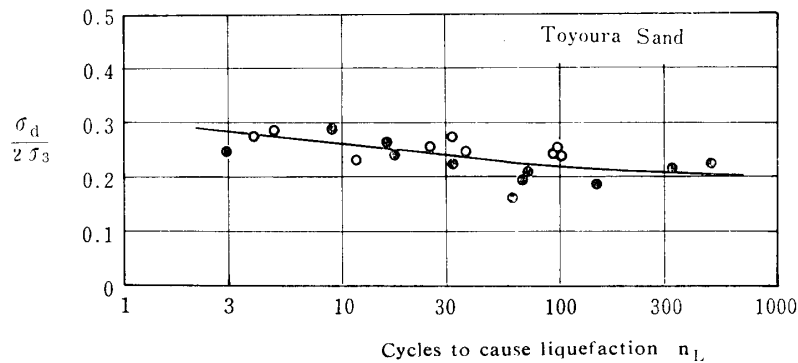


Fig. 17 Relationship between stress ratio, $\sigma_d/2\sigma_3$ and cycles to cause liquefaction on Toyouro sand in triaxial test (symbols sames in Fig. 15)

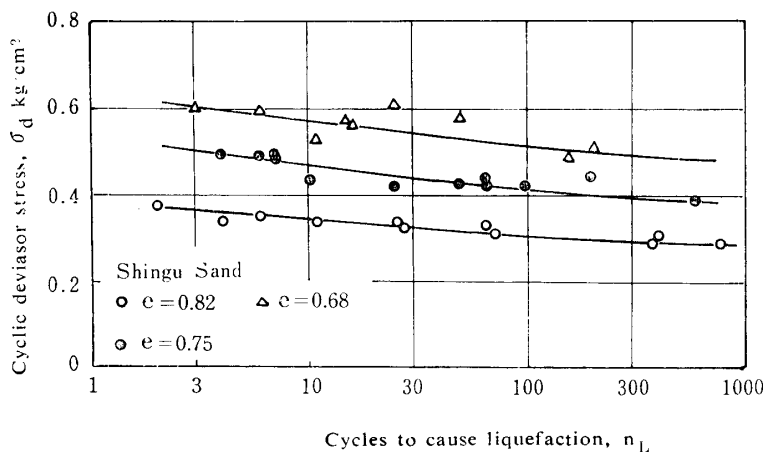


Fig. 18 Cyclic deviator stresses required to cause initial liquefaction on Shingu sand at three different void ratios in triaxial test

5・3 各実験方法による結果の比較

振動台を用いた実験，三軸試験・単純せん断試験の

* 三軸試験場合，繰返し軸差応，力 σ_d が作用したとき，供試体には主応力と 45° の面に最大せん断力 $\sigma_d/2$ が作用することになる

結果については前項までに述べてきたが，その中で振動台を用いた実験，三軸試験については異なる上載圧力あるいは拘束圧の下では，液状化を生ずるに必要な繰返しせん断応力はほぼ拘束圧に比例して大きくなることを示し，その結果液状化が生ずるまでの時間は繰

返しせん断力と拘束圧の比 τ_d/σ_v あるいは $\sigma_d/2\sigma_3$ によって決まることを示した。そのため各実験で得られた実験値を評価する上で、とくに振動台を用いた実験の実験値を評価する上で、繰返しせん断力と液状化が生ずるまでの繰返し回数の関係と比較して見る。この比較は Fig. 19 に示す。Fig. 19 は豊浦砂で行った間ゲキ比が 0.85 での各実験値を比較したもので、振動台での実験値は振動継続時間を振動の繰返し回数に換算して示してある。これによると振動台を用いた実験から得られた実験値が三軸・単純せん断試験から得た実験値より大きくなっており、さらに三軸試験値が単純せん断試験値より上回っている。

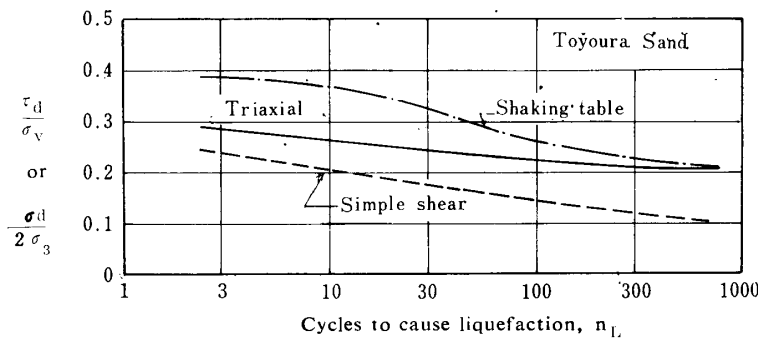


Fig. 19 Comparison of stress ratio τ_d/σ_v or $\sigma_d/2\sigma_3$ required to cause liquefaction in three experiments

ここで振動台による実験値は前にも述べたようにその整理において、静的な内部まさつ角を用いて求めた値である。それにもかかわらず Fig. 19 が示すように、この求めた値が三軸・単純せん断試験値とほぼ一致した傾向を示していることを見れば、設けた仮定が妥当なものであると言える。さて Fig. 19 に現われたように振動台での実験値が三軸・単純せん断試験値より大きくなった理由を考えて見ると、先に述べた仮定の中の繰返しせん断応力を具体的に求めるために与えた内部まさつ角の値を求めることができる。この内部まさつ角は静的非排水せん断試験より求めたものであるが、動態時には内部まさつ角が減少することが予想され、今回行った三軸試験・単純せん断試験においても動態時のまさつ角は静的試験から求めた値よりは小さいことが認められた。そのため振動台を用いた実験から求めた τ_d/σ_v 値は実際には幾分小さい値であろうことが予想される。これを示したのが Fig. 20 で、振

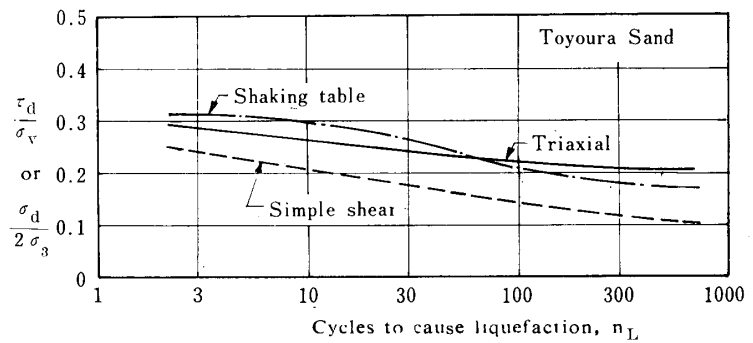


Fig. 20 Comparison of stress ratio τ_d/σ_v or $\sigma_d/2\sigma_3$ required to cause liquefaction in three experiments

動台の値は内部まさつ角を $\phi=25^\circ$ として計算したものである。 $\phi=25^\circ$ は単純せん断試験から得られた値であるが、この値を採用した理由は単純せん断試験が三軸試験よりは振動台を用いた実験に近い状態で試験できると考えられるからである。

Fig. 20 によると振動台の値はほぼ三軸試験値に一致している。しかしながら各実験値の間にはなお差異が見られ、これらはそれぞれの試験状態の違いによると思われる。

先に述べた動態時と静的状態の内部まさつ角の比較は Fig. 21 に示す。これは豊浦砂について内部まさつ角を相対密度の関数としてプロットしたものである。

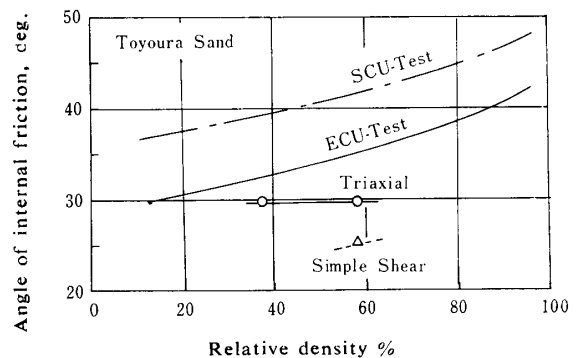


Fig. 21 Comparison of angle of internal friction obtained by dynamic or static tests

6. 液状化の可能性に対する解析例

野外での飽和砂質土層や飽和砂質土で構成されている土構造物は地震により液状化する危険性があり、そのため予想される地震に対して液状化の可能性を調査することは重要である。そのため簡単な土構造物を考

え、前に述べた実験結果を利用して液状化の可能性を解析した結果について述べる。

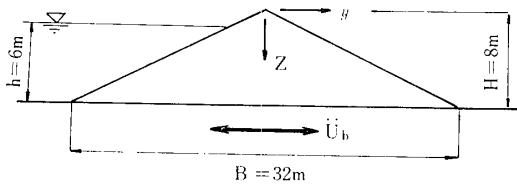


Fig. 22 Cross section of earth dam

解析しようとするモデルは Fig. 22 に示すアースダムで、このダムの諸元は次に示す値をもつとする。なお

- ダム材料の単位重量：
- 浸潤面より上部で $\gamma_d = 1.42 \text{ t/m}^3$
- 浸潤面より下部で $\gamma_i = 1.88 \text{ t/m}^3$
- せん断弾性係数： $G = 430 \text{ kg/cm}^2$
- (せん断波速度： $C_s = 160 \text{ m/sec}$)
- 水平断面積： A

この材料は豊浦砂の間ゲキ比が0.85の砂と同じであるとする。

また予想される地震動は長年にわたる地震観測によって決められるのが一般的であるが、ここでは簡単に計算できるように、基礎での加速度が $\ddot{u}_b = 0.1g$ 、周期が1/3秒、振動継続時間が10secの正弦状の地震波

を対象に考えた。まずこの地震によって生ずるアースダム内のせん断力を求めなければならないが、これを求めるために、アースダムを均一な弾性体としてせん断バリ理論⁵⁾より求めた。ここでアースダムの同一水平面内の変位は水平方向のみでかつ同じ大きさであると仮定すると振動方程式は次のようになる。

$$\frac{\gamma A}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial z} \left(GA \frac{\partial y}{\partial z} \right) = -\frac{\gamma A}{g} \ddot{u}_b(t)$$

この方程式の解を $z=H$ で $y=0$ 、 $z=0$ で $\partial y / \partial z = 0$ の境界条件の下に解を求めると、

$$y = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\phi_n \int_0^H \frac{\gamma A}{g} \phi_n dz}{P_n \int_0^H \frac{\gamma A}{g} \phi_n^2 dz} \int_0^t \ddot{u}_b(\tau) \sin P_n(t-\tau) d\tau$$

となる。ここで ϕ_n 、 P_n はこのダムの n 次の自由振動モードおよび固有円振動数である。またせん断応力は次のようになる。

$$\tau = G \frac{\partial y}{\partial z}$$

以上の式からダム内の最大せん断力の分布を求めると Fig. 23 (a) のようになる。

次に10秒間の地震動により液状化を生ずるに必要なせん断力を求める。この値は Fig. 19 より求められる。いま単純せん断値を採用すると、10秒後、すなわち地震動の周期は1/3秒であるから30回の繰返し回数で

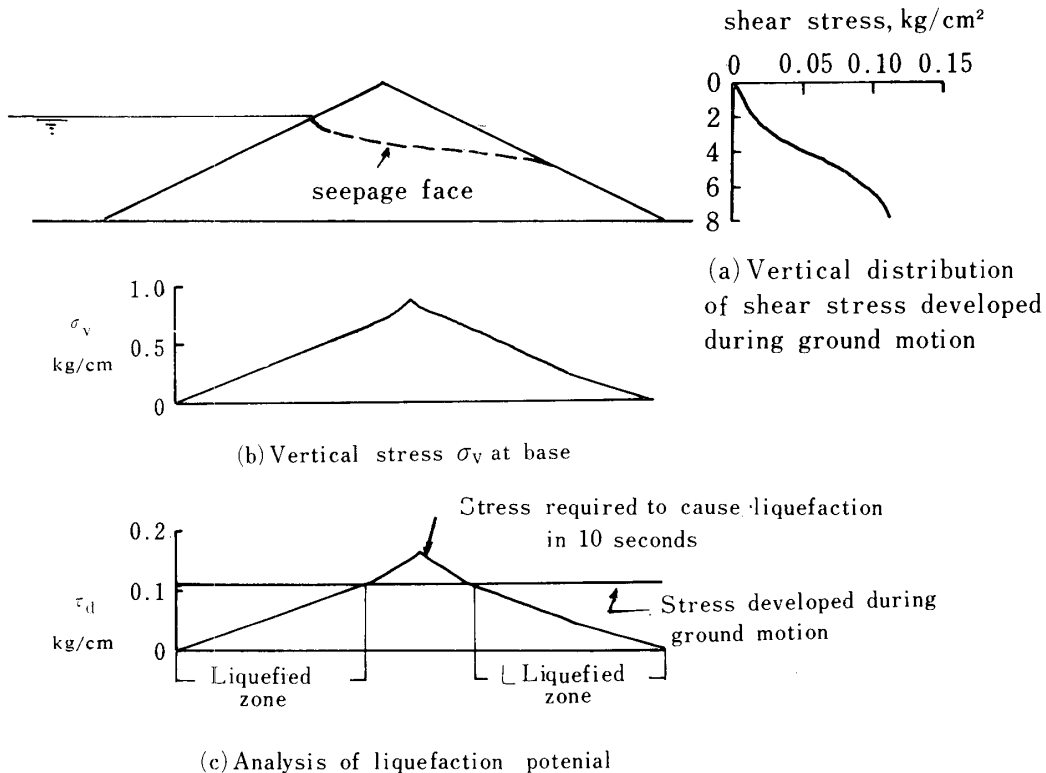


Fig. 23 Analysis of liquefaction potential

液状化を生ずる τ_a/σ_v 値は0.175である。したがって垂直応力 σ_v が求められれば液状化に必要なせん断応力 τ_a は求められる。これをダムの基礎で求めると Fig. 23 (b) のようになる。したがって、これに0.175をかけた値が液状化に必要なせん断応力となる。またアースダム内に生ずるせん断応力は Fig. 23 (a) に与えられているから、この二つのせん断応力を比較すると Fig. 23 (c) のようになり、アースダム内に生ずるせん断応力が液状化に必要なせん断応力を上回った領域で液状化が生ずることになる。これをアースダム内の全体について比較すれば、地震動が10秒間続いたとき液状化される領域が決定される。(Fig. 24 参照)。

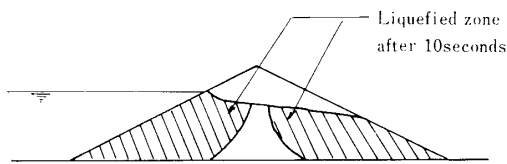


Fig. 24 Liquefied zone after 10 seconds of ground motion

6. 結 論

飽和砂の液状化現象について、振動台を用いた実験、三軸試験・単純せん断試験を行い、これらの実験から飽和砂の液状化現象の基礎的特性を明らかにしてきたが、その結果を要約すると次のようになる。

- (1) 飽和砂の液状化を決定する要因には、初期有効拘束圧、繰返しせん断応力、飽和砂の密度があ

り、これらの要素の相互関係によって液状化までの時間が決定される。とくに同じ密度もつ飽和砂においては繰返しせん断応力と初期有効拘束圧の比によって液状化までの時間が決定される。

- (2) 動荷重を受けた場合の飽和砂の内部マサツ角は低下することが予想されたが、三軸試験・単純せん断試験から求めた動的内部マサツ角は、静的非排水せん断試験より求めた内部マサツ角より小さく、動態時の内部マサツ角の低下が認められた。
- (3) 実験方法の異なる実験結果を比較した結果、 τ_a/σ_v の値は振動台を用いた実験が三軸・単純せん断試験値より大きくなったが、この値を求めるために設けに仮定などを考慮に入れれば妥当な値であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Seed, H. B., and Idriss, I. M.: Proc. ASCE, SM, 98, 83-108. (1967)
- 2) Seed, H. B. and Lee, K. L.: Proc. ASCE, SM, 92, 105-134. (1966)
- 3) 2) に同じ。
- 4) 土質学会編：土質試験法。(1969) p. 399-464
- 5) 岡本舜三：耐震工学，オーム社 (1972) .p. 372-374

(昭和47年3月27日受理)