

(5) 鉛直圧が部分的に異なる飽和砂地盤の液状化特性

山口大学工学部 正会員 ○ 山本 哲朗  
 宇部高専 正会員 大原 資生  
 山口大学大学院 学生会員 石川 光雄

1. まえがき

盛土や構造物の直下とその周辺地盤とでは鉛直圧が部分的にかなり異なるが、本文では、このような飽和砂地盤の液状化特性および液状化によって生じる沈下特性を、モデル砂層に対して振動台を用いての液状化実験を行って調べた結果がのべられている。

2. 実験装置および方法

図-1に示すように構造物直下およびその周辺の飽和砂地盤からなる地盤に対するモデル飽和砂層（以下モデル(1)という）を3連式ケルマン型せん断箱（図-2）内に作製し、それについて振動台を用いた液状化実験を行った。図-1に示すようにモデル(1)の各砂層に作用する有効鉛直圧 $\sigma'_{vo}$ はそれぞれ10.4、30.0、49.6kPaとした。せん断箱の仕様および砂層の作製方法の詳細については先の論文を参照されたい<sup>1)</sup>。

実験ではまず各せん断箱の中に直径30cm、高さ約6cmの飽和状態の豊浦砂層を詰めた後、その表面に所定枚数の鋼板およびリング状鉛製の重錘をのせて所要の鉛直圧を与えた。振動時にモデル(1)の3つの砂層内の間隙水が自由に流入入することができるようにするために、隣合う砂層の表面と底面の中央

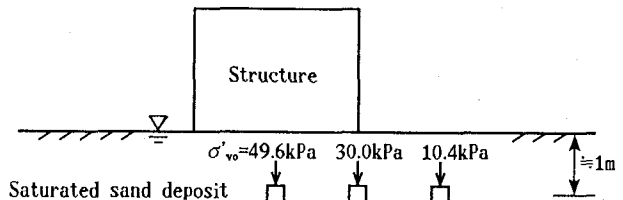
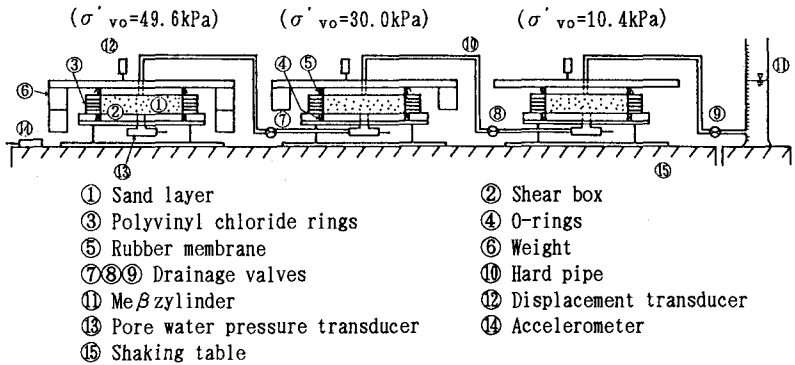


図-1 3つの砂層要素からなるモデル(1)

部の間隙水が満たされた内径8mmの硬質チューブ⑩で接続された。砂層の相対密度 $D_r$ は55%程度とした。豊浦砂の諸定数は次のとおりである。 $G_s=2.648$ 、 $D_{m,x}=0.85\text{mm}$ 、 $D_{s,0}=0.21\text{mm}$ 、 $U_c=1.7$ 、 $e_{m,x}=0.944$ 、 $e_{m,0}=0.610$



- ① Sand layer
- ② Shear box
- ③ Polyvinyl chloride rings
- ④ O-rings
- ⑤ Rubber membrane
- ⑥ Weight
- ⑦⑧ Drainage valves
- ⑨ Hard pipe
- ⑩ Me $\beta$ zylinder
- ⑪ Displacement transducer
- ⑫ Pore water pressure transducer
- ⑬ Accelerometer
- ⑭ Shaking table

図-2 実験装置

次に振動台を駆動して周期1/3sec、振幅一定の正弦波状の加速度をモデル(1)

に与えるという液状化実験を行った。加速度の大きさは水平震度 $k_h$ に換算して0.09、0.13、0.17の3とおりにした。また比較のために各砂層間のバルブ⑦、⑧を閉じて作られた3つの個々の要素砂層について同様の液状化実験を行った。

2つの砂層の鉛直圧の違いがモデル砂層の液状化特性に与える影響を明らかにするために、式(1)で定義した2つの砂層の鉛直圧比、RVS値が異なる4種類のモデル(2)~(5)についても同様に $k_h=0.13$ の場合について液状化実験を行った。

表-1 モデル砂層の種類

Model	$\sigma'_{vo}$ (kPa)				RVS
	10.4	20.0	30.0	49.6	
1	○	—	○	○	0.35
2	○	○	—	—	0.52
3	○	—	○	—	0.35
4	○	—	—	○	0.21
5	—	—	○	○	0.60

式(1)中、 $(\sigma'_{v0})_1$ 、 $(\sigma'_{v0})_2$ は、それぞれ鉛直圧が大きい方と小さい方の値を表す。各モデルのRVS値と $\sigma'_{v0}$ は表-1にまとめて示す。

$$RVS = (\sigma'_{v0})_2 / (\sigma'_{v0})_1 \quad (1)$$

### 3. 結果および考察

[モデル砂層の液状化特性] モデル(1)

を構成する3つの砂層および要素砂層の液状化実験から得られた応力比 $\tau/\sigma'_{v0}$  ( $k_h$ にはほぼ等しい)と液状化を生じるまでのせん断応力の繰返し回数 $n_L$ との関係を図-3に示す。 $\tau$ は砂層底面に作用する繰返しせん断応力の振幅である。液状化が生じなかった結果は記号の横に $\infty$ 印を記した。この図に示されるように要素砂層の場合の $\tau/\sigma'_{v0}$ と $\log n_L$ の関係は鉛直圧の大きにかかわらずに一本の曲線と与えられているが、厳密には鉛直圧が大きい場合には $\tau/\sigma'_{v0}$ は極めて僅かではあるが小さくなる。

繰返しせん断時に要素砂層に生じる間隙水圧 $u$ と体積ひずみ $\epsilon_v$ の時刻歴の一例を $k_h=0.09$ の場合について図-4(a)に示す。これから3つの要素砂層はほぼ同じ時間 $t$ すなわち繰返し回数 $n$ のときに液状化が生じ、その後、砂層の体積ひずみが急増していることがわかる。先の研究<sup>2)</sup>によって砂層に生じる間隙水圧がその比 $u/\sigma'_{v0}$ の値で0.5~0.6に達したときには、ほとんど例外なく砂層は液状化に至ることが明らかにされているが、本実験でも同ような結果が得られた。

次に図-3のモデル(1)の場合の $\tau/\sigma'_{v0}$ と $n_L$ の关系到注目すると $\tau/\sigma'_{v0}=0.17$ のときには3つの砂層とも、要素砂層の場合とはほぼ同じ $n_L=12$ 回のときに液状化を生じていることがわかる。一方、 $\tau/\sigma'_{v0}<0.17$ のときにはモデル(1)の $\sigma'_{v0}=10.4$ kPaの砂層は要素砂層の場合よりも $n_L$ がかなり小さいときに液状化を生じるが、 $\sigma'_{v0}=30.0$ kPaおよび49.6kPaの砂層は液状化を生じないことがわかる。図-4(b)に後者の場合のモデル(1)の $u$ および $\epsilon_v$ の時刻歴の一例を $k_h=0.09$ の場合について示した。この図からわかるようにモデル(1)では鉛直圧が大きい砂層の間隙水圧が鉛直圧が小さい砂層に影響を及ぼすため、 $\sigma'_{v0}=10.4$ kPaの砂層に液状化が生じるまでは3つの砂層の間隙水圧はほぼ一樣の値をもって増加している。このことは、3つの砂層が連結されており、また、この震度での $n_L$ が大きく、液状化を生じるまでの時間が長くなるためだが、間隙水圧が10.4kPaまで上昇し、 $\sigma'_{v0}=10.4$ kPaの砂層が液状化すると、

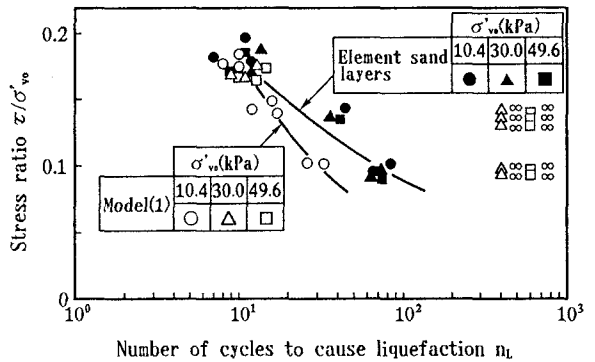


図-3 モデル(1)および要素砂層の液状化特性

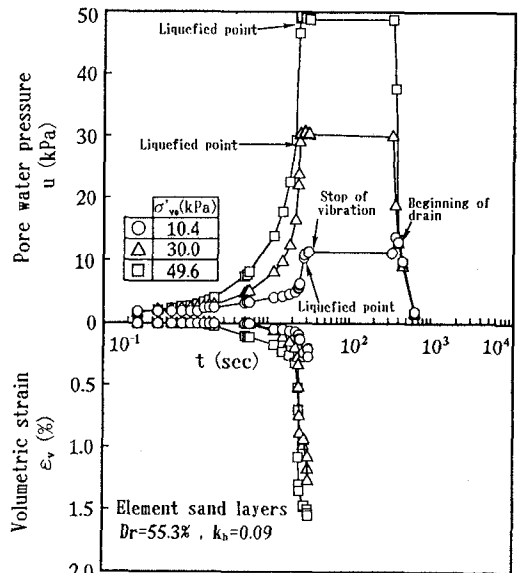


図-4(a) 要素砂層の間隙水圧および体積ひずみの時刻歴の代表例 ( $k_h=0.09$ )

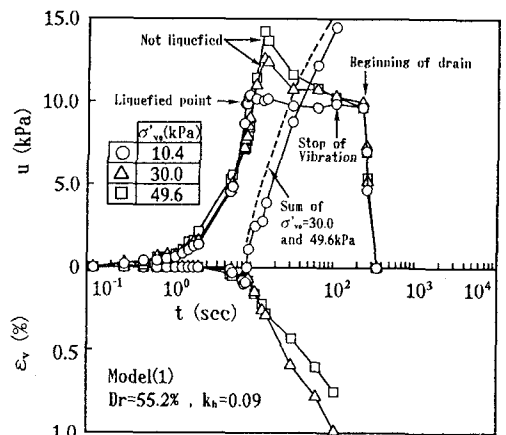


図-4(b) モデル(1)の間隙水圧および体積ひずみの時刻歴の代表例 ( $k_h=0.09$ )

この砂層の砂粒子が間隙水中に浮遊した状態となるので、鉛直圧が大きい砂層の間隙水が鉛直圧が小さい砂層の方にますます流れ込むようになる。その結果、鉛直圧が大きい砂層は収縮し、小さい砂層は膨張することになる。ところで、 $\sigma'_{v_0}=10.4\text{kPa}$ の砂層に液状化が生じたときには $\sigma'_{v_0}=30.0\text{kPa}$ および $49.6\text{kPa}$ の砂層では、それぞれ $u/\sigma'_{v_0}=10.4/30.0=0.35$ 、 $u/\sigma'_{v_0}=10.4/49.6=0.21$ といった小さい間隙水圧比に達しているにすぎない。これらの間隙水圧比は砂層が液状化を生じるに必要な下限値と考えられる  $u/\sigma'_{v_0}=0.5$  に比して小さいため、両方の砂層にはその後、ほとんど間隙水圧の上昇が生じなくて液状化に至らなかったものと解釈されよう。言い換えるとモデル(1)のRVSは $10.4/30.0=0.35$ であり、この下限値 $0.5$ よりも小さいので、鉛直圧の小さい砂層に液状化が生じても鉛直圧の大きい砂層に液状化が生じなかったということであろう。

このことを確かめるために行われたモデル(2)～(5)についての実験から得られた液状化特性を図-5に示す。同図には図-2のモデル(1)および要素砂層の液状化特性が再掲されている。この図からRVS $<0.5$ であるモデル(3) (RVS=0.35)およびモデル(4) (RVS=0.21)の2つ砂層の液状化特性はモデル(1)のそれとほぼ同じであり、一方RVS $\geq 0.5$ のモデル(2) (RVS=0.52)およびモデル(5) (RVS=0.60)の2つの砂層の液状化特性は要素砂層のそれとほぼ同じことがわかった。

図-6は5つのモデルにおいて $(\sigma'_{v_0})_1$ の砂層に生じた間隙水圧比の最大値 $(u/\sigma'_{v_0})_{max}$ とRVSとの関係を $k_h=0.13$ の場合について示したものである。この図には石原・松本<sup>3)</sup>および吉見・時松<sup>4)</sup>が行った砂層上に設置した構造物モデルの振動実験から得られた実験値を本方法で整理した結果も示している。彼らの実験は砂箱に詰めた飽和砂層の表面中央部に荷重強度 $q$ が異なる数通りの構造物モデルを置き、それぞれの振動時に砂層内の数箇所の間隙水圧を測定するというものであり、前者および後者の実験での最大加速度はそれぞれ $k_h=0.04$ 、 $0.1$ である。彼らの実験からも構造物周辺の鉛直圧が小さい箇所は液状化が生じるが、構造物直下の鉛直圧が大きい箇所の砂層には液状化が生じないという結果が得られている。図-6から3者の実験では、その方法に差異はあるにもかかわらず、 $k_h \leq 0.13$ のように震度が小さい場合には鉛直圧が大きい砂層に生じる $(u/\sigma'_{v_0})_{max}$ とRVSとの関係は、 $(u/\sigma'_{v_0})_{max}$ 値はRVS値が大きくなると増加するというユニークな曲線で与えられ、とくにRVS $\geq 0.5$ の場合には $(u/\sigma'_{v_0})_{max}=1.0$ となって鉛直圧が大きい砂層も液状化が生じるという興味ある結果が得られた。

[モデル砂層の液状化による沈下特性] 図-7(a)、(b)はそれぞれモデル(1)および要素砂層について液状化後の排水圧密によって生じた体積ヒズミ $\varepsilon_v$ と $k_h$ の関係を示す。実験毎に液状化時の加振時間 $t_{Ls}$ に若干の差があるため、測定された $\varepsilon_v$ にはややバラツキがあるが、各鉛直圧の砂層について両者の関係は斜線で囲まれる範囲で示すことにした。両図からモデル砂層と要素砂層ともに、 $k_h$ が増加するのに伴って液状化を生じた砂層の $\varepsilon_v$ は増加し、また $k_h$ が同じ場合には鉛直圧が大きい砂層ほど $\varepsilon_v$ は大きくなることわかれる。図-7(a)から $k_h=0.09\sim 0.13$ の範囲で液状化を生じなかったモデル(1)での $\sigma'_{v_0}=30.0\text{kPa}$ および $49.6\text{kPa}$ の両

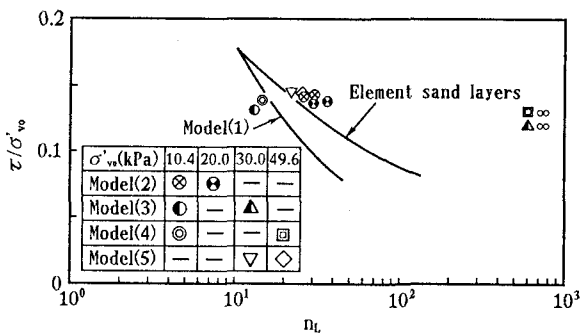


図-5 モデル(2)～(5)の液状化特性

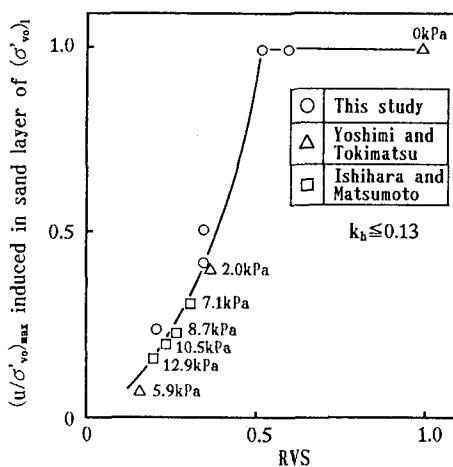


図-6 鉛直圧が大きい砂層に生じる間隙水圧比の最大値とRVSの関係

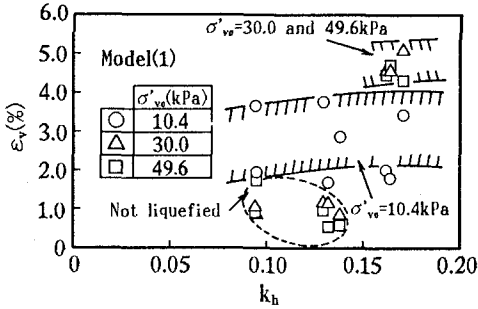


図-7(a) 液状化によって生じた砂層の体積ひずみ  $\epsilon_v$  と水平震度  $k_h$  との関係 (モデル(1))

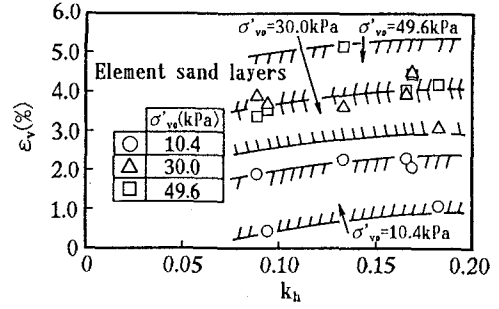


図-7(b) 液状化によって生じた砂層の体積ひずみ  $\epsilon_v$  と水平震度  $k_h$  との関係 (要素砂層)

砂層の  $\epsilon_v$  は 0.5~1.7% であって、これは図-7 (b) の液状化を生じた同じ鉛直圧の要素砂層の  $\epsilon_v = 2.3 \sim 4.6\%$  ( $k_h = 0.09$  の場合) から 3.1~5.3% ( $k_h = 0.13$  の場合) に比べてかなり小さいことがわかる。

図-8 は図-7 (a) のモデル(1)の各砂層の鉛直圧において  $k_h = 0.09, 0.13, 0.17$  での  $\epsilon_v$  の平均的な値を読み取り、それを鉛直圧との関係で示した図である。これからすべての砂層に液状化が発生した  $k_h = 0.17$  の場合には液状化後の排水圧密によって生じる砂層の体積ひずみは  $\sigma'_{v0} = 30.0 \text{ kPa}$  までは急激に増加し、それ以上の鉛直圧に対しては漸増してほぼ 0.5% の一定値となることがわかる。

#### 4. まとめ

鉛直圧が部分的に異なるモデル砂層の液状化特性には 2 つの砂層の鉛直圧比 RVS と振動の水平震度  $k_h$  が関与することが明らかになされた。すなわち震度が大きい場合 ( $k_h \geq 0.17$ )、RVS の値にかかわらず鉛直圧が異なる砂層はほぼ同時に液状化を生じる。一方、震度が小さい場合 ( $k_h < 0.17$ ) には RVS 値が 0.5 以上の場合には各砂層は要素砂層の場合と同じ繰返し回数で液状化を生じるが、それが 0.5 以下の場合には鉛直圧が小さい砂層には鉛直圧が大きい砂層の間隙水圧が作用するために要素砂層に比してかなり早く液状化を生じ、その後膨張するために、鉛直圧が大きい砂層には間隙水圧の上昇がやみ液状化が生じない。さらに液状化後の排水圧密によって生じた砂層の体積ひずみと鉛直圧の関係が示された。

最後に、本実験を手伝っていただいた百合野博司氏 (広島県) および島原善信氏 (株) 日本国土開発) に謝意を表します。

#### 文献

- 1) Ohara, S., Yamamoto, T. and Yurino, H. (1992): Experimental Study on Reliquefaction Potential of Saturated Sand Deposit, Proc. of the 10th WCEE, Vol. III, pp. 1425~1430
- 2) 大原資生、山本哲朗 (1982) : 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、土質工学会論文報告集、Vol. 22, No. 2, pp. 123~130
- 3) Ishihara, K. and Matsumoto, K. (1975): Bearing Capacity of Saturated Sand Deposits During Vibration、第4回日本地震工学シンポジウム講演集、pp. 431~438
- 4) 吉見吉昭、時松孝次: 構造物近傍の砂地盤における地震時の液状化、第4回日本地震工学シンポジウム講演集、pp. 439~446

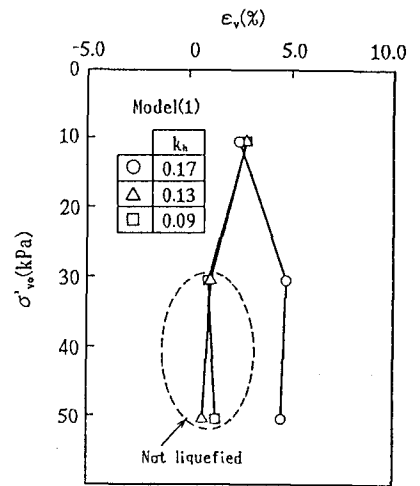


図-8 モデル(1)の液状化によって生じた体積ひずみと鉛直圧の関係