

不均等な鉛直応力下にある飽和砂地盤の 液状化に関するモデル実験

山本 哲朗*・石川 光雄**・大原 資生***

Model Tests on Liquefaction Characteristics of Saturated Sand Deposits under Nonuniform Vertical Stresses

Tetsuro YAMAMOTO, Mitsuo ISHIKAWA and Sukeo ŌHARA

Abstract

In our previous study, in order to clarify the liquefaction characteristics of saturated sand deposit under nonuniform vertical stresses, shaking table tests on models were performed. It was found from the tests that RVS and k_h affects the occurrence of liquefaction of the models.

In this paper, in order to investigate it in more detail, shaking table tests on three models having RVS of 0.57, 0.35 and 0.21 prepared in two Kjellman's type shear boxes are performed. Here $RVS = (\sigma'_{vo})_l / (\sigma'_{vo})_h$, in which $(\sigma'_{vo})_l$ and $(\sigma'_{vo})_h$ denote lower and higher vertical stresses of two neighboring sand elements.

It is found from the tests that the liquefaction characteristics of the model are affected by the values of RVS and horizontal seismic coefficient k_h of vibration. It is also shown that an initial shear stress $\Delta\tau$ affects the liquefaction characteristics of the model (1) at k_h less than 0.1.

1. まえがき

構造物周辺の飽和砂地盤では、構造物直下よりも早く液状化が生じるという興味ある実験的事実がある^{1),2)}。

著者らは先の研究^{3),4)}で、Fig. 1 に示すような不均等な鉛直応力下にある飽和砂地盤の液状化特性を明らかにするために、モデルの振動台実験を行った。その実験結果からモデルの液状化特性には、モデルを構成する2つの砂層の鉛直圧の比RVSと水平震度 k_h が関与することを定性的に明らかにした。

本論文では、不均等な鉛直応力下にあるモデルの液

状化特性が、RVSと k_h の関係からさらに詳細に調べられた。すなわち、RVSの値が0.57, 0.35, 0.21である2つの砂層からなる3つのモデル(1), (2), (3)に対して振動台実験が行われた。実験は k_h が0.06~0.23の範囲で行われた。

また、モデル(1)の液状化特性に及ぼす初期せん断応力 $\Delta\tau$ の影響が調べられた。

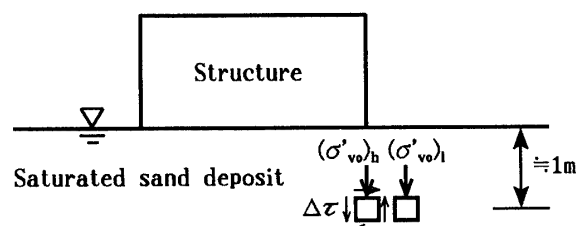


Fig. 1 Soil elements below and near a structure.

*社会建設工学科

**大学院社会建設工学専攻

***宇部工業高等専門学校

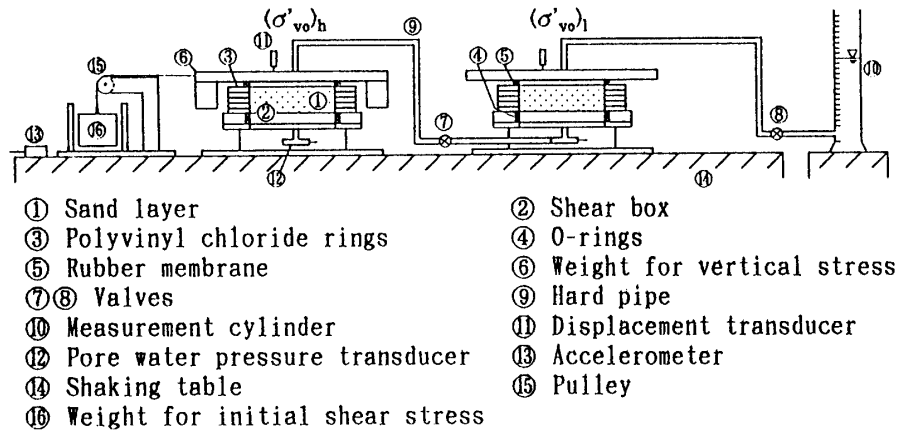


Fig. 2 Test apparatus used in this study.

2. 実験装置および方法

本実験にはFig. 2に示すように、振動台上に取り付けられた2台のケルマン型単純せん断箱が使用された。隣接する2つの砂層間は間隙水を満たした内径8mmの硬質パイプ⑨で接続され、間隙水が自由に移動できるようにしている。2つの砂層からなる3種類のモデル(1), (2), (3)に対する鉛直圧とRVSの値は、Tabel 1に示す。RVSは式(1)により定義される。

$$RVS = (\sigma'_{vo})_i / (\sigma'_{vo})_h \quad (1)$$

ここで $(\sigma'_{vo})_i$, $(\sigma'_{vo})_h$ はそれぞれ小さい方の鉛直圧、大きい方の鉛直圧を表す。

すべてのモデルにおいて鉛直圧 $(\sigma'_{vo})_i$ は10.4kPaで一定とし、鉛直圧 $(\sigma'_{vo})_h$ は18.3kPa, 30.0kPa, 49.6kPaのように変化させることによってモデル(1), (2), (3)が作製された。

せん断箱の仕様の詳細については先の論文³⁾⁻⁵⁾に譲り、ここでは以下に簡単に述べることにする。せん断箱は、内径30.2cm, 外径35.0cm, 厚さ1.0cmのドーナツ状の塩化ビニール板製リングを5枚積み重ねたもので作られ、この内側でリムに取り付けた厚さ1.0mmのゴム膜の中に飽和砂層が作製される。

実験ではまず脱気水で満たされた各せん断箱の中に静かに飽和状態の豊浦砂を注ぎ込み、表面を軽くならした後に直径30.0cm, 高さ約6cmの飽和砂層を作製する。その後、砂層表面に所定の鋼板、鉛製リングの重錘を載せて所要の鉛直圧を作用させた。砂層の相対密度 Dr はほぼ55%とした。豊浦砂の物理諸定数は $G_s = 2.646$, $D_{max} = 0.85\text{mm}$, $D_{50} = 0.16\text{mm}$, $U_c = 1.7$,

Tabel 1 Types of model.

Model	$(\sigma_{vo})_i$ (kPa)	$(\sigma_{vo})_h$ (kPa)	RVS
(1)	10.4	18.3	0.57
(2)	10.4	30.0	0.35
(3)	10.4	49.6	0.21

$e_{max} = 0.944$, $e_{min} = 0.610$ である。

Fig. 2に示す荷重⑯は、モデル(1)の液状化特性に与える初期せん断応力 $\Delta\tau = 2.0\text{kPa}$ の影響を調べるために、モデル(1)の $(\sigma'_{vo})_h = 18.3\text{kPa}$ の砂層表面に加えられた。

次に振動台を駆動してモデルに周期 $T = 1/3\text{sec}$ で、振幅一定の正弦波状の水平加速度を与え、バルブ⑦を開け、バルブ⑧を閉めた状態で液状化実験を行った。水平加速度の大きさは震度 k_h に換算して0.06から0.23の間の範囲で変化させた。これらの実験では、振動時に砂層に作用する応力比 τ/σ'_{vo} の大きさは k_h にほぼ等しい。ここで τ は砂層底面に作用する繰返しせん断応力振幅である。

実験時には振動台の加速度、砂層高の変化量、砂層底面での間隙水圧、せん断変位振幅が測定された。それらの測定は、それぞれ加速度計(容量: 5g), 抵抗線ひずみ計式変位計(容量: 10mm), 間隙水圧計(容量: 980kPa)によって行われ、測定値はすべてペン書きオシロに記録した。

本文では、2つの砂層に生じる間隙水圧が $(\sigma'_{vo})_i$ あるいは $(\sigma'_{vo})_h$ の値に等しくなったときに液状化が発生したと定義した。

3. 結果および考察

3.1 代表的な記録波形

モデル(1)の実験記録の代表例をFig. 3に示す。 $k_h = 0.09$ で行った実験である。Fig. 3の記録線は上から順に振動台の加速度、 $(\sigma'_{vo})_1 = 10.4\text{kPa}$ 、 $(\sigma'_{vo})_h = 18.3\text{kPa}$ の砂層の体積ひずみ ϵ_v 、各砂層での底面中央部の間隙水圧 u 、各砂層のせん断ひずみ γ を表す。

この実験では、 $(\sigma'_{vo})_1 = 10.4\text{kPa}$ 、 $(\sigma'_{vo})_h = 18.3\text{kPa}$ の各砂層は液状化までのせん断応力の繰返し回数(n_L)がそれぞれ87.1回、117.0回の時に液状化を生じている。

3.2 モデルの液状化特性に与えるRVSと k_h の影響

Figs. 4 (a), (b)は、2つの砂層の間隙水圧 u 、体積ひずみ ϵ_v 、せん断ひずみ γ の時刻歴を示す。Fig. 4 (a)はFig. 3の実験に対する結果であり、 $(\sigma'_{vo})_h = 18.3\text{kPa}$ の砂層に生じた間隙水圧が $(\sigma'_{vo})_1 = 10.4\text{kPa}$ の砂層に作用するため、2つの砂層の間隙水圧がほとんど同じ割合で上昇し、ほぼ同時に液状化が生じている場合の例である。一方、Fig. 4 (b)は $k_h = 0.06$ での実験に対する結果であり、 $(\sigma'_{vo})_1 = 10.4\text{kPa}$ の砂層が液状化を生じるまでは、2つの砂層の間隙水圧は一樣な値で上昇し

ているが、その後 $(\sigma'_{vo})_h = 18.3\text{kPa}$ の砂層の間隙水圧は $(\sigma'_{vo})_1 = 10.4\text{kPa}$ の砂層が膨張し始めた時点から若干減少して液状化を生じるに至っていない。

Fig. 5は振動中にバルブ⑦を閉めて行われた実験($k_h = 0.09$)から得られた要素砂層に対する u 、 ϵ_v および γ の時刻歴を示す。Figs. 4 (a), (b)とFig. 5を比較すると、モデルにおける $(\sigma'_{vo})_1$ の砂層の間隙水圧は $(\sigma'_{vo})_h$ の砂層の間隙水圧の影響を受けて上昇するが、2つの要素砂層の間隙水圧は独立して上昇している。これは、言うまでもないが、モデルの2つの砂層は脱気水で満たされた硬質パイプで互いが接続されているために、大きい鉛直圧の砂層に生じた間隙水圧が小さい鉛直圧の砂層の間隙水圧の上昇に影響するからである。

Fig. 6はすべてのモデルに対する実験の結果を2つの砂層の液状化の発生の仕方を区別して、RVSと k_h の関係図に示したものである。○印は両方の砂層に液状化が生じた結果を示し、●印は $(\sigma'_{vo})_1$ の砂層は液状化を生じたが、 $(\sigma'_{vo})_h$ の砂層には液状化が生じなかった結果を示す。これより、モデルの液状化特性はRVSと k_h の関係図において一本の直線によって、2つのA, Bタイプに分けられることがわかる。すなわち、Aタイプは両砂層が液状化を生じる場合であり、Bタイプは $(\sigma'_{vo})_1$ の砂層は液状化を生じるが、 $(\sigma'_{vo})_h$ の砂層は液状化を生じない場合である。

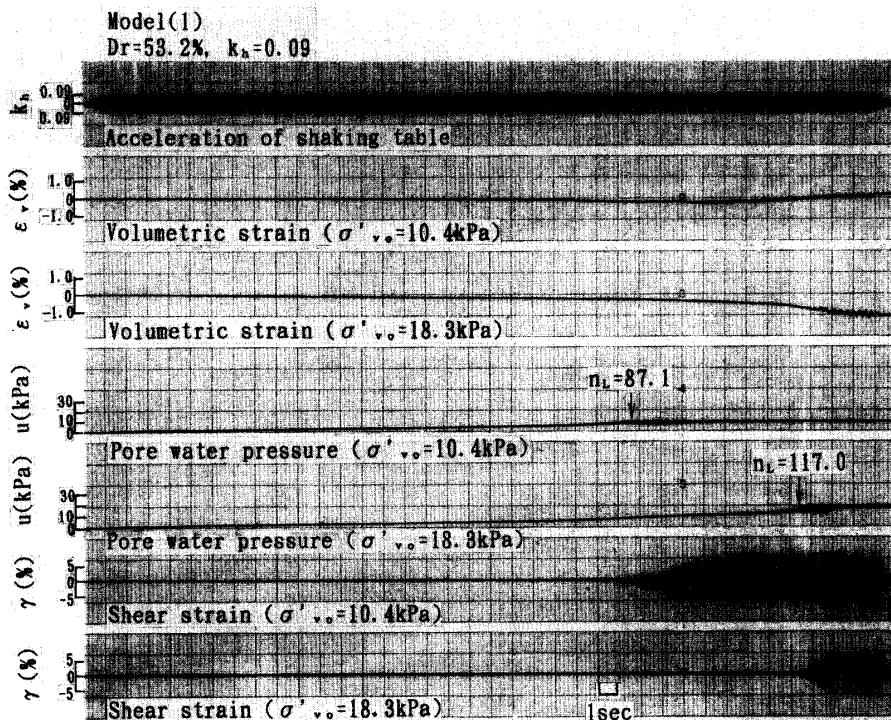


Fig. 3 Typical test record of model (1) ($\Delta\tau/(\sigma'_{vo})_h = 0$, $k_h = 0.09$).

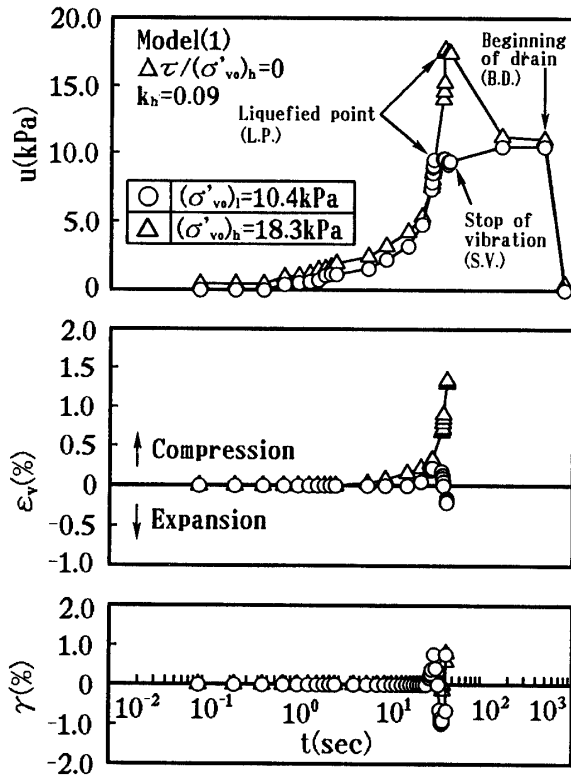


Fig. 4 (a) Time histories of pore water pressure u , volumetric strain ϵ_v and shear strain γ for model (1) ($\Delta\tau/(\sigma'_{vo})_h = 0$, $k_h = 0.09$).

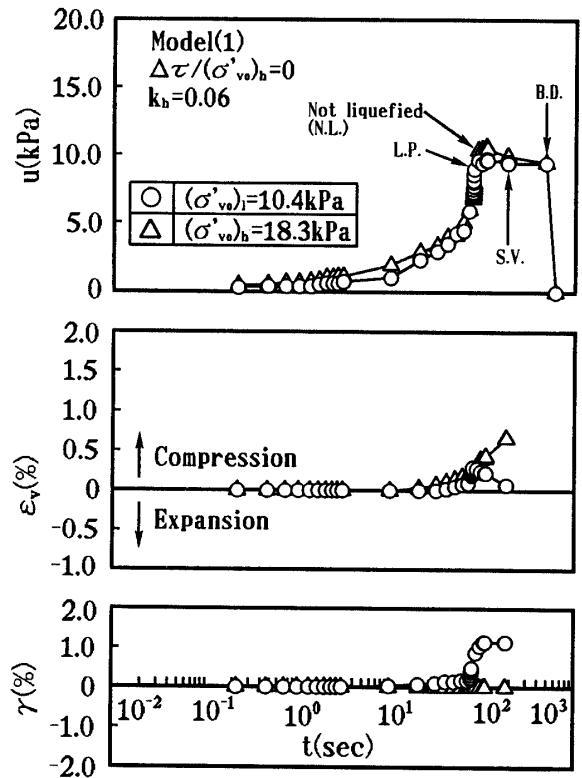


Fig. 4 (b) Time histories of pore water pressure u , volumetric strain ϵ_v and shear strain γ for model (1) ($\Delta\tau/(\sigma'_{vo})_h = 0$, $k_h = 0.06$).

また、RVSの値が大きくなるにつれて両砂層に液状化を発生するのに必要な k_h の値は小さくなる。例えば、RVSが小さい0.21の場合、 $k_h \geq 0.20$ のような大きい震度で両砂層に液状化が生じるが、RVS=0.57のようにRVSが大きくなると、2つの砂層は $k_h > 0.06$ というように非常に小さい震度においても液状化が生じている。

3.3 初期せん断応力の影響を調べた実験の代表的な記録波形

Fig. 7 は $(\sigma'_{vo})_h = 18.3\text{ kPa}$ の砂層表面に $\Delta\tau = 2.0\text{ kPa}$ すなわち $\Delta\tau/(\sigma'_{vo})_h = 0.1$ を受けたモデル(1)についての実験から得られた代表的な記録波形である。 k_h は0.09である。

この記録からわかるように、 $(\sigma'_{vo})_1 = 10.4\text{ kPa}$ の砂層は $n_L = 59.5$ 回で液状化を生じているが、 $(\sigma'_{vo})_h = 18.3\text{ kPa}$ の砂層は初期せん断応力の影響を受けて液状化を生じていない。

3.4 初期せん断応力の影響

Fig. 8 はFig. 7の実験から得られた各砂層の u , ϵ_v および γ の時刻歴を示したものである。 $k_h = 0.09$ の同じ震

度で実験が行われたFig. 4 (a)およびFig. 8の時刻歴の図を比較すると、 $\Delta\tau/(\sigma'_{vo})_h = 0.1$ を受けた $(\sigma'_{vo})_h = 18.3\text{ kPa}$ の砂層は液状化を生じていないが、 $\Delta\tau$ を加えていない同じ鉛直圧の砂層は液状化を生じていることがわかる。

また、Fig. 8の γ の時刻歴に見られるように、 $\Delta\tau/(\sigma'_{vo})_h = 0.1$ を受けた $(\sigma'_{vo})_h$ の砂層に各サイクルの繰返しせん断後に発生した残留ひずみは、初期せん断応力を作用させた方向に蓄積していることがわかる。これは、初期せん断応力を与えた方向だけに慣性力によって生じる付加的なせん断応力が作用するためである。

Fig. 9はモデル(1)の2つの砂層に対する応力比 $(\tau + \Delta\tau)/(\sigma'_{vo})_h$ あるいは $\tau/(\sigma'_{vo})_1$ と液状化が生じるまでの繰返し回数(n_L)の関係を示す。○, △印および●, ▲印はそれぞれ $\Delta\tau/(\sigma'_{vo})_h = 0$ および0.1の場合の結果を表す。また、液状化を生じなかった結果については図の右側に∞印で表している。この図から $(\tau + \Delta\tau)/(\sigma'_{vo})_h \geq 0.12$ の場合、 $\Delta\tau/(\sigma'_{vo})_h = 0$ および0.1の両方の場合で2つの砂層がほとんど同じ n_L の時に液状化を生じている。しかし、 $(\tau + \Delta\tau)/(\sigma'_{vo})_h < 0.1$ すなわち $k_h < 0.1$ の時には $(\sigma'_{vo})_1$ の砂層は液状化を生じている

が、 $(\sigma'_{vo})_h$ の砂層には液状化が生じていない。 $\Delta\tau/(\sigma'_{vo})_h = 0$ の場合のモデル(1)に対する同様の結果が $(\tau + \Delta\tau)/(\sigma'_{vo})_h < 0.07$ の場合に得られた。このように初期せん断応力は $k_h < 0.1$ においてモデル(1)の液状化

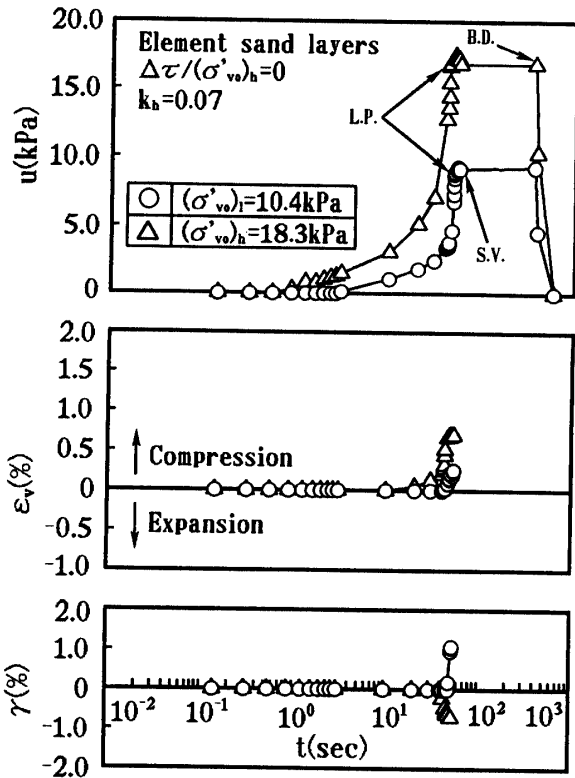


Fig. 5 Time histories of u , ϵ_v and γ for element sand layers ($\Delta\tau/(\sigma'_{vo})_h = 0$, $k_h = 0.07$).

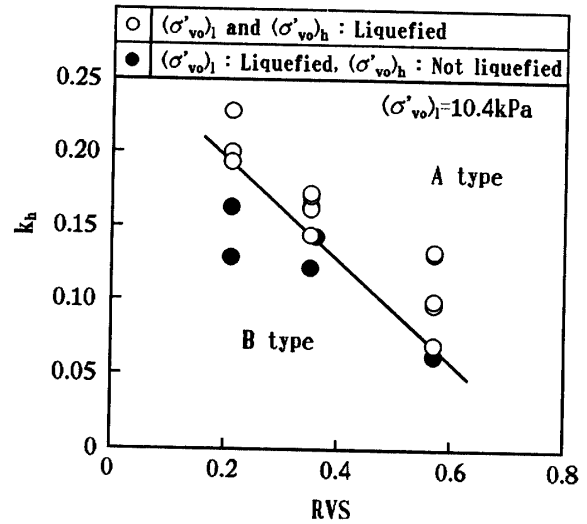


Fig. 6 Liquefaction characteristics of model shown by the relation of RVS and k_h .

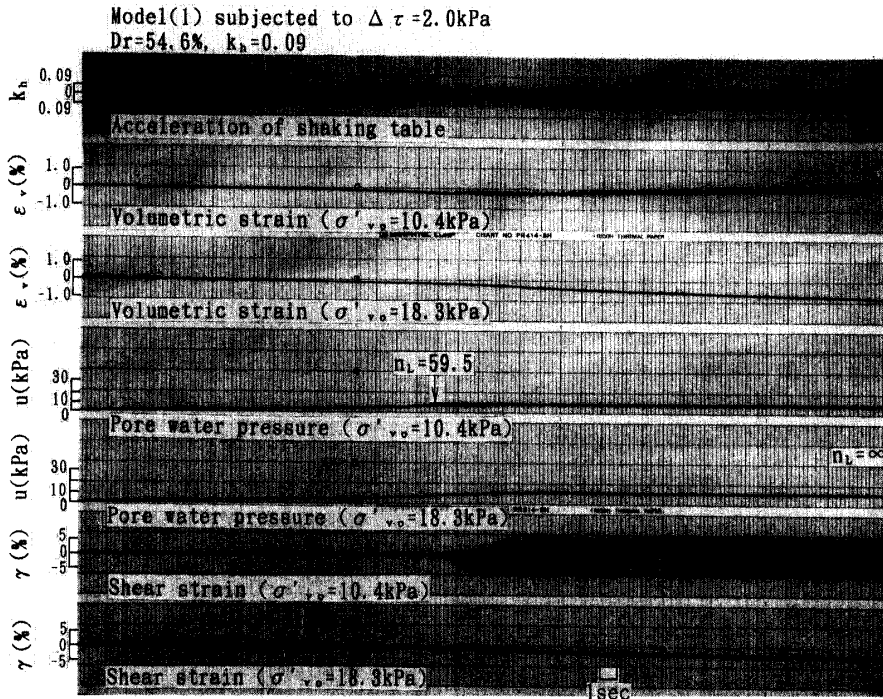


Fig. 7 Typical test record of model (1) subjected to $\Delta\tau/(\sigma'_{vo})_h = 0.1$ ($k_h = 0.09$).

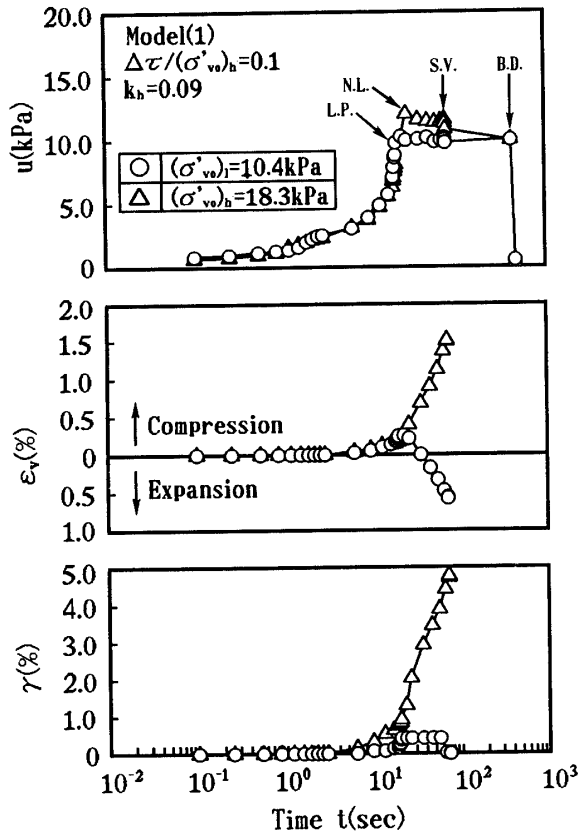


Fig. 8 Time histories of u , ϵ_v and γ of model (1) subjected to $\Delta\tau/(\sigma'_{vo})_h=0.1$ ($k_h=0.09$).

特性に影響を及ぼすものと考えられる結果が得られた。

4. まとめ

構造物の直下とその周辺地盤のように不均等な鉛直応力下にある飽和砂地盤の液状化特性を明らかにするために、ケルマン型単純せん断箱内に行った鉛直圧が異なる2つの砂層からなる3種類のモデルについて振動台実験が行われた。さらに、モデル(1)に対しては初期せん断応力の影響も調べられた。得られた結論は次のように要約される。

(1) モデルの液状化特性は2つの砂層の鉛直圧の比 $RVS = \{(\sigma'_{vo})_i/(\sigma'_{vo})_h\}$ と水平震度 k_h の関係によって2つのタイプに分けられる。すなわち、一方は2つの砂層がほとんど同時に液状化を生じるAタイプであり、他方は $(\sigma'_{vo})_i$ の砂層は液状化を生じるが、 $(\sigma'_{vo})_h$ の砂層は液状化を生じないというBタイプである。

(2) モデル(1)において $(\sigma'_{vo})_h=18.3\text{kPa}$ の砂層表面に初期せん断応力 $\Delta\tau=2.0\text{kPa}$ を作用させた場合、

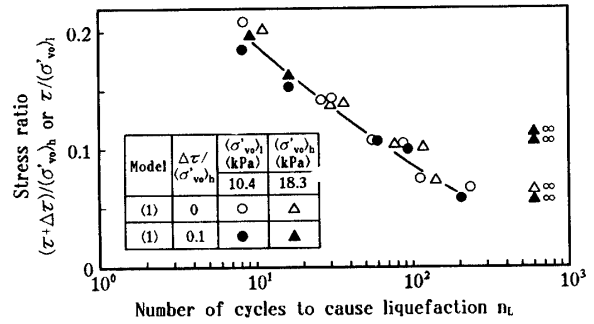


Fig. 9 Effect of initial shear stress on liquefaction characteristics of model (1).

$k_h < 0.1$ の範囲で初期せん断応力がその液状化特性に影響を与える。

謝 辞

実験ならびに結果の整理を手伝って頂いた本学学部生平山忠君（現東亜建設工業株）に謝意を表します。

参考文献

- 1) Ishihara, K. and Matsumoto, K. (1975): Bearing Capacity of Saturated Sand Deposits during Vibration, Proc. of the 4th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.431~438.
- 2) 吉見 吉昭, 時松 孝次(1975): 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論文集, pp.439~446.
- 3) 山本 哲朗, 大原 資生, 石川 光雄, 百合野 博司 (1993): モデル飽和砂地盤の液状化に関する振動台実験, 第28回土質工学研究発表会論文集, pp.1183~1186.
- 4) Yamamoto, T., Ōhara, S. and Ishikawa, M. (1994): Liquefaction Characteristics of Saturated Sand Deposits under Nonuniform Vertical Stresses, Soils and Foundations, Vol.34, No.2, 1994 (掲載予定).
- 5) Ōhara, S. and Yamamoto, T. (1992): Experimental Study on Reliquefaction Potential of Saturated Sand Deposit, Proc. of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.III, pp.1425~1430.

(平成6年3月23日受理)