

鉛直圧が部分的に異なる飽和砂地盤の 液状化特性に関する実験的研究

山本哲朗*・大原資生**・石川光雄***

Liquefaction Characteristics of Saturated Sand Deposits under Partially Different Vertical Stresses

Tetsuro YAMAMOTO, Sukeo ŌHARA and Mitsuo ISHIKAWA

Abstract

In order to clarify the characteristics of liquefaction and liquefaction-induced settlement of liquefiable saturated sand deposits below the soil structures such as road embankments and earth dams including those with a free surface near the soil structures, a series of shaking table tests are performed on five kinds of model sand layers.

The model sand layers were prepared using three Kjellman's type simple shear boxes. Most of the tests were carried out on the model sand layer (1) consists of three saturated sand layers of which the effective vertical stresses (σ'_{vo}) are 10.4kPa, 30.0kPa and 49.6kPa. Moreover, for comparison similar tests were performed on other four model sand layers (2) to (5) consist of two sand layers which changed the ratio of small vertical stress to large one (RVS).

It is found from the tests that the liquefaction characteristics of such model sand layers was affected by the RVS-values and the magnitude of vibration. Furthermore, it is shown that the distribution of liquefaction-induced settlement of the model sand layer (1) is that the amount of it remarkably increases in the range of smaller vertical stresses and takes almost a constant value as the vertical stresses increase.

1. まえがき

道路盛土、アースダムなどの土構造物がそれ自体あるいはその基礎の飽和砂地盤の液状化に起因して崩壊した例がいくつか報告されている^{1)~3)}。

土構造物および土木構造物の直下にある飽和砂地盤には、その周辺の自由場の地盤に比べて大きな鉛直応力が作用しているが、そういった鉛直圧がかなり異なる飽和砂地盤の液状化特性については2, 3の実験的

研究がなされているに過ぎない^{4)~7)}。これらの実験のすべては振動台上に取り付けた砂箱内に模型飽和砂層を作製し、その上にある大きさの剛な構造物を置いたり、あるいは堤体を作製して、その模型について振動実験を行って砂層内に生じる間隙水圧を測定するというものである。それぞれの実験方法は異なるものの、構造物の直下の飽和砂層には液状化は発生せず、周辺の砂層で液状化が発生するという同じような結果が得られている。その理由としては構造物の自重によってその直下の砂層では有効鉛直圧が増加することが挙げられている。

一方、飽和砂の液状化抵抗は有効拘束圧が増加すると若干ではあるが、小さくなることがわかっている^{8),9)}、構造物直下の砂層が液状化を生じないことに対

*社会建設工学科

**宇部工業高等専門学校

***大学院社会建設工学専攻

する上述の理由は必ずしも理にかなっているとは思われない。

本文ではFig. 1に示すように盛土直下とその周辺地盤のように、ある深さで部分的に鉛直圧の大きさがかなり異なるゆるい飽和砂地盤を想定し、そのモデル砂層(1)を3連式ケルマン型せん断箱を用いて作り、その液状化特性および液状化によって生じる沈下特性を振動台実験によって調べた結果がのべられている。

また鉛直圧の大きさが異なる2つの砂層からなる4種類のモデル砂層についても同様の実験を行って式(1)で定義した両方の砂層の鉛直圧の比(RVS)がモデル砂層の液状化特性に与える影響について考察している。

2. 実験装置および方法

実験には今回試作したFig. 2に示す3連式ケルマン型せん断箱を用いた。せん断箱は従来の実験¹⁰⁾で用いてきた型と同じものである。したがって、その仕様については以下に簡単にのべる。

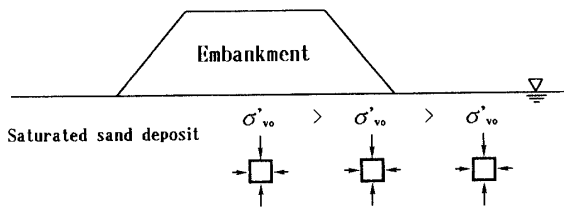


Fig. 1 Vertical stresses induced in saturated sand deposit below embankment

せん断箱は、内径30.2cm、外径35.0cm、厚さ1cmのドーナツ状の塩化ビニール板製リングを6枚積み重ねたもので作られており、この内側に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。

実験ではまず次の方法でモデル砂層を作った。各せん断箱の中に直径30cm、高さ約6cmの飽和豊浦砂層を詰めた後、その表面に所定の鋼板、鉛製リング型の重錘をのせて所要の大きさの鉛直圧(σ'_{vo})を与える。

今回は部分的に鉛直圧の大きさがかなり異なり、液状化を生じる可能性がある比較的ゆるい飽和砂層の液状化実験を行うことを目的にしたので、各砂層に加わる鉛直圧としては $\sigma'_{vo}=10.4, 30.0, 49.6\text{kPa}$ を用いた。砂層の相対密度(D_r)は約55%とした。

繰返しせん断時に3つの砂層の中で隣合うもの同士では間隙水が自由に移動できるようにするため、隣合う砂層の表面と底面の中央部の間は間隙水を満たした内径8mmの硬質チューブ^⑩で接続してモデル飽和砂層(1)を作った。

豊浦砂の諸定数は $G_s=2.65, D_{max}=0.85\text{mm}, D_{50}=0.16\text{mm}, U_c=1.7, e_{max}=0.94, e_{min}=0.61$ である。

次に振動台を駆動してモデル砂層(1)に周期1/3secで、振幅一定の正弦波状の水平加速度を与えて非排水条件下で液状化実験を行った。その大きさは震度 k_n に換算して0.09, 0.13, 0.17の3とおりである。したがって本実験では各砂層に作用する応力比 τ/σ'_{vo} は一定となる。 τ は砂層底面に作用する繰返しせん断応力振幅である。

比較のために各砂層間のバルブ^⑦, ^⑧を閉じて砂層間の間隙水の流出入がない状態での3つの個々の砂層(以下、要素砂層という)に対しても同様の液状化実

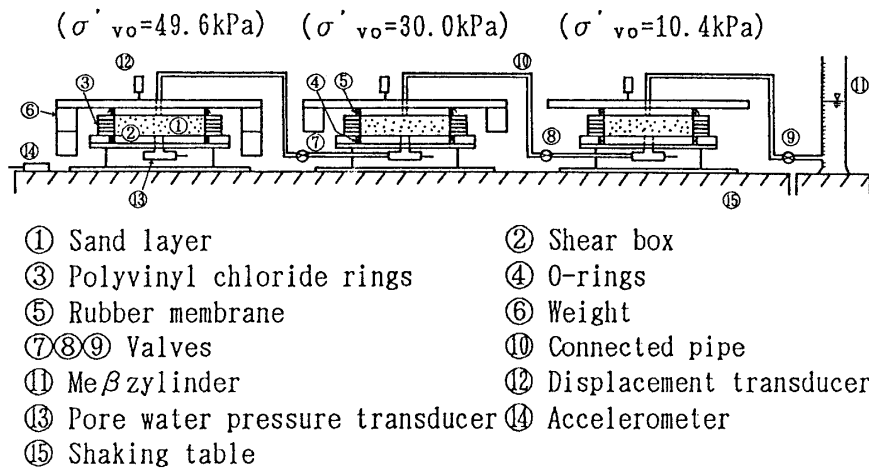


Fig. 2 Test apparatus

験を行った。

実験時には振動台の加速度、砂層のせん断変位振幅あるいは高さ変化量、間隙水圧をそれぞれ加速度計(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)で測定し、すべてペン書きオシロに記録した。

さらに鉛直圧の違いがモデル砂層の液状化特性に与

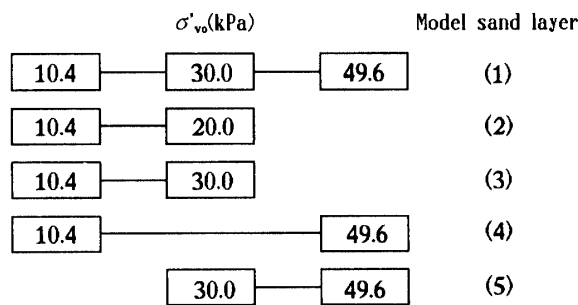


Fig. 3 Kind of model sand layers tested

える影響を調べるため、2連の砂層で、それぞれの鉛直圧の大きさの比(RVS)を変えた4種類のモデル砂層(2)、(3)、(4)、(5)についても $k_h=0.13$ で同様の液状化実験を行った。すべてのモデル砂層の種類とその各砂層の鉛直圧の大きさはFig. 3に示す。

3. 結果および考察

3.1 代表的な記録波形

モデル砂層(1)および要素砂層の実験記録の代表例をそれぞれFigs. 4(a), (b)に示す。両方とも $k_h=0.09$ で行った実験である。Figs. 4(a), (b)の記録線は上から順に振動台の加速度、 $\sigma'_{vo}=10.4, 30.0$ および49.6 kPaの砂層の体積ひずみ(ϵ_v)、砂層底部中央部の間隙水圧(u)を示す。本文では液状化の発生は砂層に生じる間隙水圧が間隙水圧比 u/σ'_{vo} に換算して1.0に達した時と定義した。液状化時の砂層のせん断ひずみ両振幅は約10%である。

Fig. 4(a)の実験では、 $\sigma'_{vo}=10.4$ kPaの砂層は液状

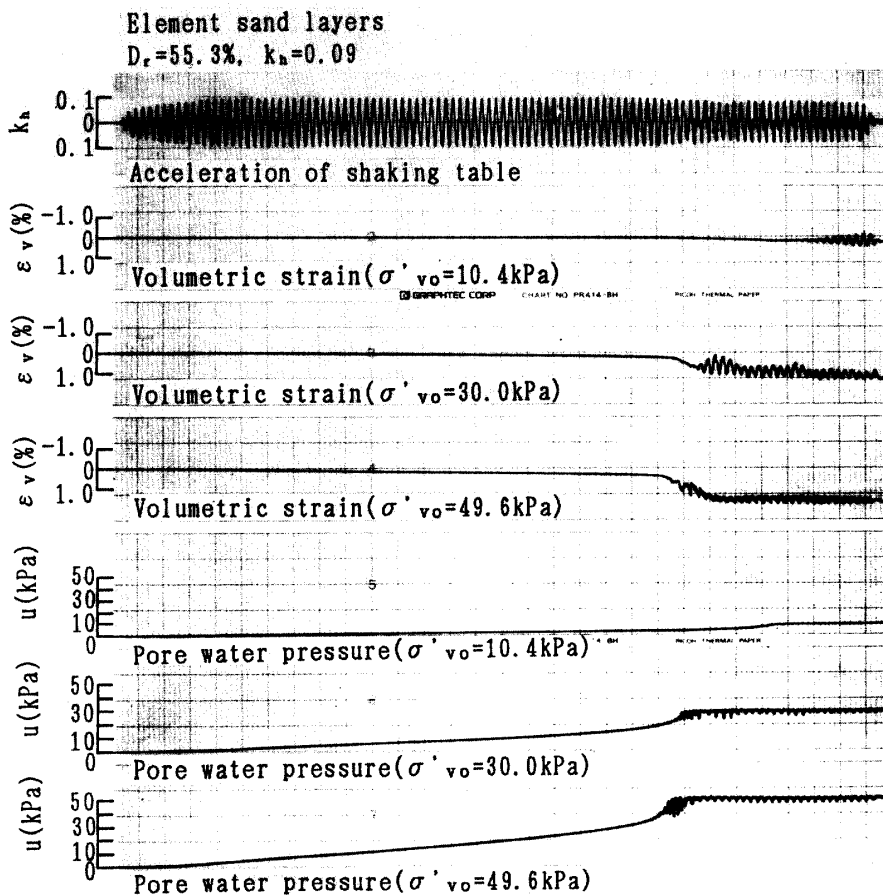
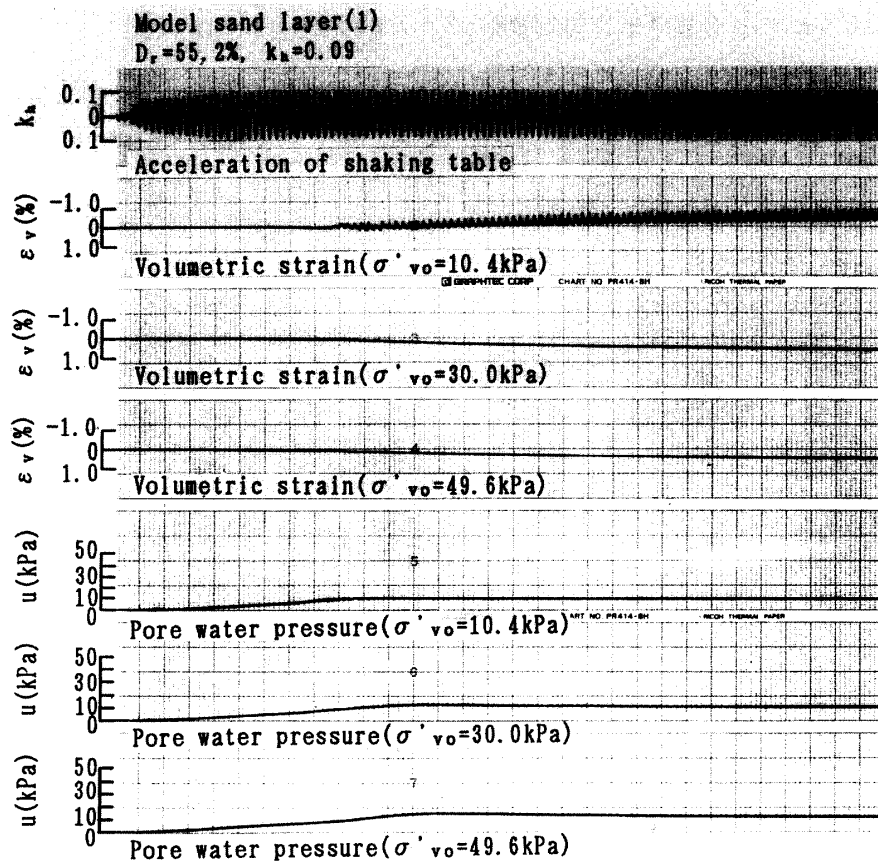


Fig. 4 (a) Typical test record of element sand layers ($k_h=0.09$)

Fig. 4 (b) Typical test record of model sand layer (1) ($k_h = 0.09$)

化までのせん断応力の繰返し回数(n_L)が26.0回の時に液状化を生じている。しかし、 $\sigma'_{v0} = 30.0$ および49.6 kPaの砂層では液状化を生じなかった。また $\sigma'_{v0} = 10.4$ kPaの砂層は液状化直後からかなり膨張しており、これに対して $\sigma'_{v0} = 30.0$ および49.6 kPaの砂層は著しく沈下を生じていることがわかる。

Fig. 4 (b)の要素砂層は、ほぼ同じ n_L のときに液状化を生じている。すなわち、 $\sigma'_{v0} = 10.4, 30.0$ および49.6 kPaの砂層の n_L はそれぞれ83.2, 72.7, 70.9回である。なお、液状化後にはすべての砂層は沈下を生じている。

3.2 モデル砂層(1)の液状化特性

モデル砂層(1)を構成する3つの砂層について応力比 τ/σ'_{v0} (k_h にほぼ等しい)と n_L との関係をFig. 5に示す。一組の○, △, □印の結果は1回の実験から得られたものであり、それぞれ $\sigma'_{v0} = 10.4, 30.0$ および49.6 kPaの砂層に対する結果を示す。液状化を生じなかった結果は図の右端に記号の横に∞印を記した。同図には要素砂層の同様の結果も示す。この図に示すように

要素砂層について得られた τ/σ'_{v0} と $\log n_L$ の関係は鉛直圧の大きさに依存せずに一本の曲線を与えているが、厳密には鉛直圧が大きい場合には τ/σ'_{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 ϵ_v の時間的な変化の代表的な例($k_h = 0.09$ の場合)をFig. 6 (b)に示す。これはFig. 4 (b)にその記録波形を示した実験に対するものである。これから3つの要素砂層にはほぼ同じ時間すなわち同じ繰返し回数に液状化が生じ、その後砂層の沈下ひずみが急増しているのがわかる。先の研究¹¹⁾によって砂層に生じる間隙水圧が $u/\sigma'_{v0} = 0.5 \sim 0.6$ に達したとき、砂層のせん断変位振幅は急増し、その後液状化に至ることが明らかにされているが、本実験でも同様の結果が得られた。

次にFig. 5のモデル砂層(1)の τ/σ'_{v0} と n_L の関係を注目すると $\tau/\sigma'_{v0} = 0.17$ のときには3つの砂層とも、要素砂層とほぼ同じ $n_L = 12$ 回のときに液状化を生じている。この場合のモデル砂層(1)の各砂層の間隙水圧上

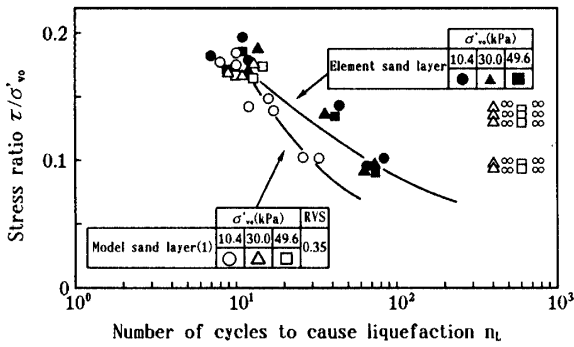


Fig. 5 Liquefaction characteristics of model sand layer (1) and element sand layer

昇曲線および体積ひずみ曲線はFig. 6 (b)の要素砂層の場合と非常によく似たものであった。

しかし、 $\tau/\sigma'_{vo} \leq 0.13$ のときには $\sigma'_{vo} = 10.4$ kPaの砂層は要素砂層の場合に比べて n_L が著しく小さいときに液状化を生じ、 $\sigma'_{vo} = 30.0$ kPaおよび 49.6 kPaの砂層は液状化を生じていないことが注目される。この場合のモデル砂層(1)の各砂層の間隙水圧上昇曲線および体積ひずみ曲線の例をFig. 4 (a)の $k_h = 0.09$ の場合について示したのがFig. 6 (a)である。この図にみられるようにモデル砂層(1)では繰返しせん断によって鉛直圧の大きな砂層に生じた間隙水圧が鉛直圧の小さな砂層に作用するため、 $\sigma'_{vo} = 10.4$ 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同じ上昇速度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 が大きいためであるが、間隙水圧が 10.4 kPaまで上昇し、 $\sigma'_{vo} = 10.4$ kPaの砂層が液状化を生じると、 $\sigma'_{vo} = 10.4$ kPaの砂層の砂粒子が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の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、前者の砂層は収縮し、後者の砂層は膨張することになる。

この $\sigma'_{vo} = 10.4$ kPaの砂層の膨張体積ひずみ量は、 $\sigma'_{vo} = 30.0$ kPaおよび 49.6 kPaの砂層の収縮体積ひずみ量の和(図中の破線)にほぼ等しくなっていることがわかる。 $\sigma'_{vo} = 10.4$ kPaの砂層に液状化が生じたときには $\sigma'_{vo} = 30.0$ kPaの砂層には $u/\sigma'_{vo} = 10.4/30.0 = 0.35$ 、 $\sigma'_{vo} = 49.6$ kPaの砂層には $u/\sigma'_{vo} = 10.4/49.6 = 0.21$ の間隙水圧しか生じておらず、これらは上述したように砂層が液状化を生じ始めるときの下限値である $u/\sigma'_{vo} = 0.5$ に比して小さいため、これらの砂層にはその後の間隙水圧の上昇がほとんど生じなくて液状化に至らない

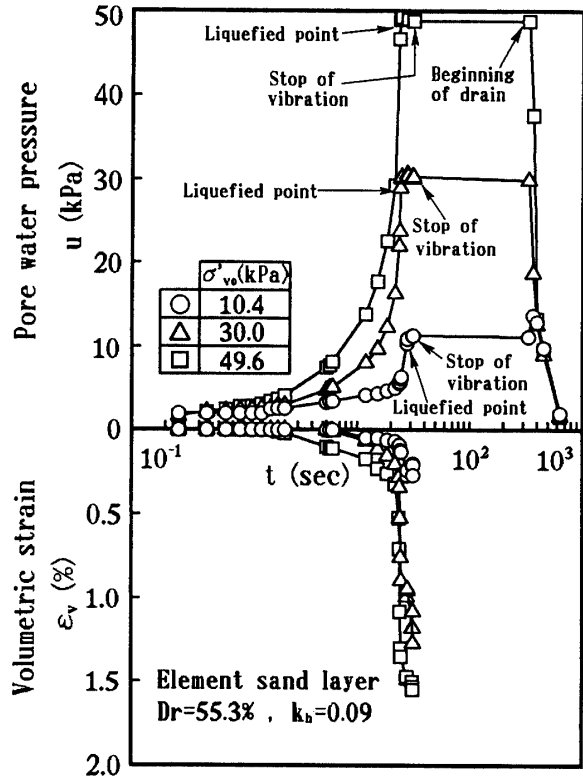


Fig.6(a) Time histories of pore water pressure and volumetric strain induced in the element sand layers ($k_h = 0.09$)

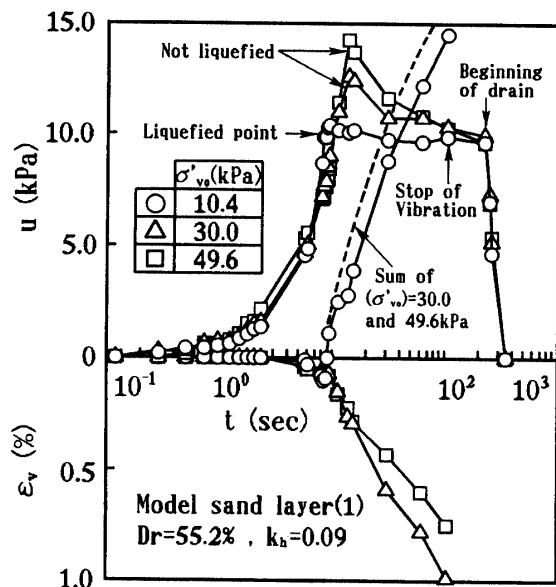


Fig. 6 (b) Time histories of pore water pressure and volumetric strain induced in model sand layer (1) ($k_h = 0.09$)

と考えられる。言い換えると式(1)で示す2つの砂層間で大きい鉛直圧(σ'_{v0})₁と小さい鉛直圧(σ'_{v0})_sの比(RVS)がこの場合には10.4/30.0=0.35であり、液状化を生じる下限であるRVS=0.5よりも小さいため、鉛直圧が小さい砂層に液状化が生じたときに鉛直圧が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。

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

3.3 モデル砂層の液状化特性に及ぼすRVSの影響

前節でRVS値がモデル砂層(1)の液状化特性に影響を与えることが示唆された。このことを確かめるために、2つの砂層で有効鉛直圧が異なる4種類のモデル砂層に対して同様に $k_h=0.13$ において実験を行った。実験から得られた τ/σ'_{vo} と n_L との関係はFig. 7に示す。同図には、比較のためFig. 5に示したモデル砂層(1)および要素砂層の場合の同様の曲線を再掲している。

Fig. 7から各々のモデル砂層の液状化特性は、RVS値に依存することがわかる。すなわち、RVS<0.5であるモデル砂層(3)(RVS=0.35)、モデル砂層(4)(RVS=0.21)の場合には、液状化特性はモデル砂層(1)のそれと同じであることがわかる。

一方、RVS>0.5であるモデル砂層(2)(RVS=0.52)およびモデル砂層(5)(RVS=0.60)の場合には両方の砂層はほぼ同じ n_L のときに液状化を生じ、その液状化特性は要素砂層の場合とほぼ等しいことがわかった。

こういったモデル砂層での間隙水圧上昇曲線および体積ひずみ曲線の一つをモデル砂層(2)の場合について示したのがFig. 8である。

以上から明らかのように震度が大きいときにはRVS値にかかわらず、2つの砂層はほぼ同時に液状化を生じる。一方、震度が小さいときにはRVS値が0.5よりも小さい場合には鉛直圧の小さな砂層は鉛直圧の大きな砂層の間隙水圧の作用を受けて液状化が早く生じ、その結果、鉛直圧の大きな砂層は液状化を生じない。構造物あるいは堤体直下での砂層は液状化を生じないが、その周囲の砂層は容易に液状化を生じるという実験結果は砂層上に置かれたモデル構造物あるいは堤体の振動台実験によって得られている^{4)~7)}。

繰返しせん断時に砂層に生じる間隙水圧 u は、それが急増し始める $u/\sigma'_{v0}=0.5$ までは繰返し回数 n にほぼ比例して増加することがわかったので、繰返しせん断による間隙水圧の上昇速度を表す指標として式(2)で示す a 値を求め、それと k_h の関係をすべてのモデル砂層と要素砂層について調べた。その結果はFig. 9に示す。

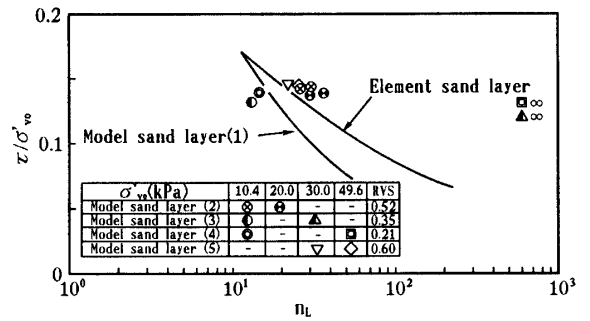


Fig. 7 Liquefaction characteristics of model sand layers (2)~(5)

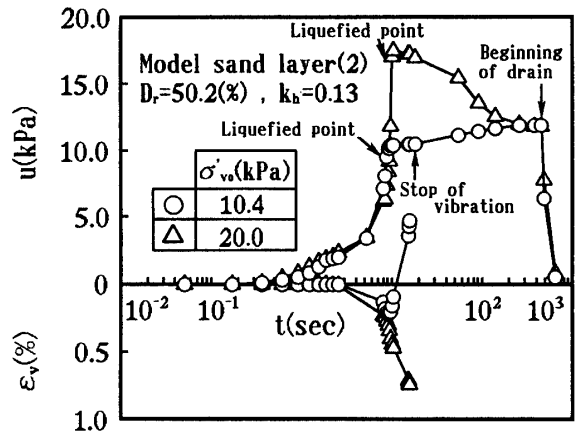


Fig. 8 Time histories of pore water pressure and volumetric strain induced in model sand layer (2) ($k_h=0.13$)

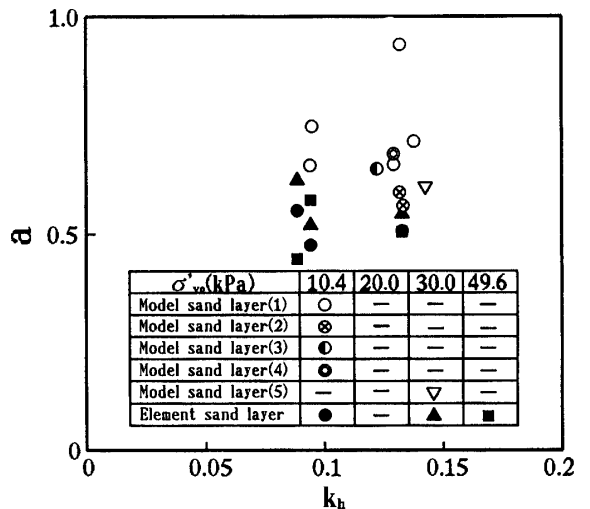


Fig. 9 a-values for model sand layers (1)~(5) and element sand layer

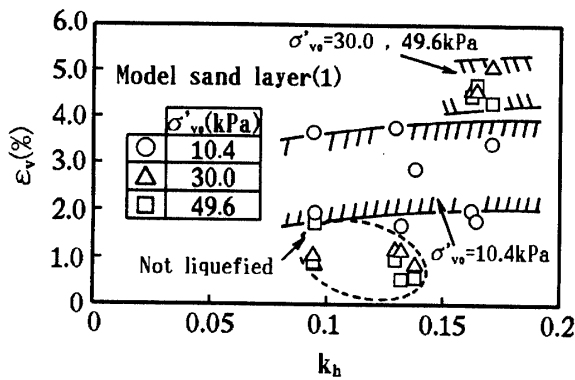


Fig.10(a) Relation between volumetric strain ϵ_v after liquefaction and horizontal seismic coefficient k_h for model sand layer (1)

$$a = (u/\sigma'_{v0}) / (n/n_t) \quad (2)$$

Fig. 9 から鉛直圧が小さい砂層には鉛直圧が大きい砂層からの間隙水圧が作用するために、すべてのモデル砂層での $\sigma'_{v0} = 10.4 \text{ kPa}$ の砂層の a 値は、0.65 以上であって、要素砂層のそれよりも大きいことがわかる。またモデル砂層(1)での $\sigma'_{v0} = 10.4 \text{ kPa}$ の砂層は鉛直圧がそれよりも大きい2つの砂層の間隙水圧の影響を受けるため、その影響を1つの砂層から受けるモデル砂層(2), (3), (4)での同じ鉛直圧の砂層に比べて a 値はやや大きい。さらにモデル砂層(2)~(4)の場合での $\sigma'_{v0} = 10.4 \text{ kPa}$ の砂層の a 値はもう1つの砂層の鉛直圧が大きい場合に若干増加することがわかる。

3.4 モデル砂層の液状化によって生じた沈下量

Figs. 10(a), (b) はそれぞれモデル砂層(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ひずみ ϵ_v と k_h の関係を示す。実験毎に液状化時の加振時間 $t_{L5}^{12)}$ に若干の差があるため、 ϵ_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図中の斜線を入れた範囲で示した。両図からわかるようにモデル砂層と要素砂層の違いにかかわらず、両者とも k_h が増加するのにもなって液状化後の砂層の ϵ_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 ϵ_v は大きくなる。

Fig. 10(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砂層(1)での $\sigma'_{v0} = 30.0 \text{ kPa}$ および 49.6 kPa の両砂層の ϵ_v は $0.5 \sim 1.7\%$ であって、これは Fig. 10(b) の液状化を生じた同じ鉛直圧の要素砂層の

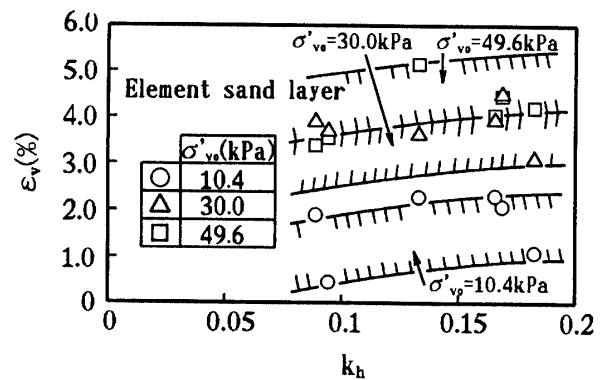


Fig.10(b) Relation between volumetric strain ϵ_v after liquefaction and horizontal seismic coefficient k_h for element sand layer

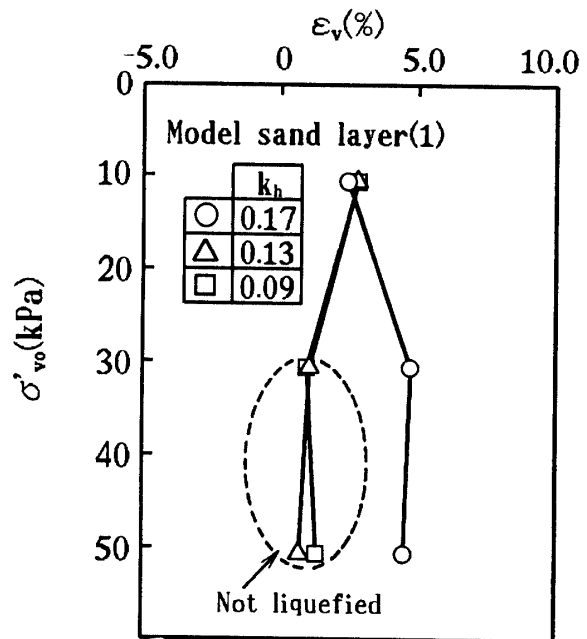


Fig. 11 Relation between ϵ_v after liquefaction and σ'_{v0} for model sand layer (1)

$\epsilon_v = 2.3 \sim 4.6\%$ ($k_h = 0.09$) から $3.1 \sim 5.3\%$ ($k_h = 0.13$) に比べてかなり小さいことがわかる。

Fig. 11 は Fig. 10(a) のモデル砂層(1)の各鉛直圧での ϵ_v の平均的な値を $k_h = 0.09, 0.13$ および 0.17 の場合について読み取り、それと鉛直圧との関係を示した図である。この図からわかるように、すべての砂層に液状化が生じた $k_h = 0.17$ 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鉛直圧が小さい範囲で急増し、鉛直圧が大きくなる場合に体積ひずみの鉛直圧に対する増加割合が小さくなる。

4. まとめ

道路盛土、アースダムの直下とその周辺のように鉛直圧の大きさがかなり異なる飽和砂地盤の液状化特性および液状化によって生じた沈下特性をモデル砂層に対する振動台実験を行って検討してみた。5つのモデル砂層は3連式のケルマン型せん断箱を用いて作った。得られた結果は次のように要約される。

モデル砂層の液状化特性にはそれを構成する砂層の鉛直圧の比(RVS)と震度(k_n)が関与することが明らかとなった。すなわち $k_n \geq 0.17$ の場合には、RVSの値にかかわらず、すべての砂層はほぼ同じ繰返し回数とともに液状化を生じる。しかし、 $k_n \leq 0.13$ の場合には $RVS > 0.5$ 以上のときには各砂層は同じ繰返し回数とともに液状化を生じるが、 $RVS < 0.5$ の場合には鉛直圧が小さい砂層はそれが大きい砂層の間隙水圧の作用を受けて、かなり早く液状化を生じるが、鉛直圧が大きい砂層には液状化は生じない。

モデル砂層(1)の液状化後の排水圧密によって生じた体積ひずみは鉛直圧が小さいところで急増し、鉛直圧が大きくなると体積ひずみはほぼ一定となる。

最後に実験ならびに結果の整理を手伝って戴いた本学大学院生百合野博司君および学部生島原善信君に謝意を表します。

文 献

- 1) (社) 土木学会編(1966)：昭和39年新潟地震震害調査報告
- 2) Seed, H. B., Lee, K., Idriss, I. M. and Makdisi, F. I. (1975)：The slides in the San Fernando dam during the earthquake of February 9, 1971, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ACSE, Vol.101, No.GT7, pp.651~688
- 3) 佐々木 康, 谷口栄一, 松尾 修, 伊藤良弘(1984)：日本海中部地震による土構造物の沈下, 土と基礎, Vol.32, No.9, pp.7~12
- 4) Yoshimi, Y. and Tokimatsu, K. (1978)：Two-dimensional pore pressure changes in sand deposits during earthquake, Proc. of 2nd International Conference on Microzonation, Vol.2, pp.853~863
- 5) 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
- 6) Koga, T. and Matsuo, O. (1990)：Shaking table tests on embankments resisting on liquefiable sandy ground, Soils and Foundations, Vol.30, No.4, pp.162~174
- 7) 阿部 博, 草野 郁(1991)：砂地盤と盛土の振動実験, 平成3. 都土木技研年報, pp.257~266
- 8) Tatsuoka, F., Iwasaki, T., Tokida, K. and Kon-no, M. (1981)：Cyclic undrained triaxial strength of sampled sand affected by confining pressure, Soils and Foundations, Vol.21, No.2, pp.115~120
- 9) 柚木祐二, 石原研而, 関 元治, 米田吉博(1982)：密な砂の繰返し三軸せん断挙動に与える初期有効拘束圧の影響, 第17回土質工学研究発表会講演集, pp.1649~1652
- 10) Ōhara, 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
- 11) 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
- 12) 山本哲朗, 大原資生, 百合野博司, 西田哲哉(1991)：液状化時の振動継続時間が飽和砂層の再液状化に及ぼす影響, 地盤の液状化対策に関するシンポジウム発表論文集, pp.199~204
(平成5年4月13日受理)