

飽和砂地盤の再液状化ポテンシャルに関する実験的研究

山本 哲朗*・大原 資生**・百合野 博司***

Experimental Study on Reliquefaction Potential of Saturated Sand Deposit

Tetsuro YAMAMOTO, Sukeo ŌHARA and Hiroshi YURINO

Abstract

The fact exists that since the acceleration induced in the saturated sand deposits during reliquefaction is smaller than that during past liquefaction, the reliquefaction potential of those deposits is quite large.

In order to confirm this fact experimentally, liquefaction tests on saturated sand layer using Kjelman's shear box were carried out. It is found from the tests that the reliquefaction potential of a sand layer subjected to larger acceleration and shaking time during first liquefaction becomes much higher. Furthermore, it is confirmed that the reliquefaction potentials of the sand layers subjected to double amplitude of shear strain (γ_0) = 5.0% and 13.4% during first liquefaction are the same.

1. まえがき

日本海中部地震(1983), ロマプリエタ地震(1989)の際に過去に液状化が発生した飽和沖積砂地盤や埋め立て砂地盤で再度液状化が発生したことが確認されている^{1), 2)}. 再液状化が発生した時の地動加速度はほとんどの地盤の場合で過去の液状化時のそれよりも小さいことが分かっている. この事実から飽和砂地盤においては再液状化が発生する可能性, すなわち再液状化ポテンシャルは大きいのではないかと考えられている.

これまで飽和砂の再液状化ポテンシャルについては主として室内実験で調べられているが, それによると飽和砂の再液状化ポテンシャルには初回の液状化時に砂に生じるせん断ひずみの大きさ, 液状化後の残留ひずみの大きさおよび砂の密度, 排水条件などといった多くの因子が関与することが明らかになっている. しかし, それらの因子の中にはその再液状化ポテンシャル

の大きさに与える影響に関しては必ずしも統一した見解が得られていないものもある.

いずれにせよ飽和砂地盤の再液状化ポテンシャルを明らかにすることは砂地盤の液状化対策をどのように考えればよいかを知る上でもきわめて重要なことである.

著者らは最近, ケルマン型せん断箱を用いて初回の液状化時の振動継続時間(t_{LS})が飽和砂層の再液状化ポテンシャルに与える影響を調べる実験を行っている³⁾. この実験では初回の液状化実験と再液状化実験では砂層に加えられる加速度は同じにした.

しかし, 上でのべたように原位置砂地盤では過去の液状化時の地動加速度よりも小さい地動加速度で再液状化が発生していることを考慮して, 今回新たに初回の液状化時に砂層に与える加速度を再液状化時のものよりも大きくした場合について, t_{LS} を数通りに変えた実験を行ってみた.

これらの実験から初回の液状化時の加速度および振動継続時間(t_{LS})の大きさが飽和砂層の再液状化ポテンシャルに与える影響について考察した.

また初回の液状化時のひずみ振幅を変えた実験も行い, その飽和砂層の再液状化ポテンシャルに与える

*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

影響を調べてみた。

以下にこれらの検討結果を順次のべる。

2. 実験装置および方法

実験には Fig. 1 に示す振動台上に固定したケルマン型単純せん断箱が用いられた。これはこれまで飽和砂の液状化実験、繰返しせん断時の砂の水平応力を測定する実験等に用いてきたものである^{3),4),5)}。せん断箱は厚さ 1 mm のゴム膜の外側に積み重ねた 5 枚のドーナツ状の塩化ビニール製リングで作られている。リングは厚さ 1.0cm, 内径 30.2cm, 外径 35.0cm である。1 枚のリングにはその内面と受圧面が同一平面上にあるように、互いに 90 度をなし、円周を 4 分割する 4 箇所位置に受圧面積 6 mm の小型圧力変換器をはめ込み、繰返しせん断時の水平応力が測定できるようにした。

鉛直応力は鉛製の重錘で砂層に与えられ、せん断応力は振動時の重錘などの慣性力によって加えられる。今回の実験では鉛直圧 (σ'_{v0}) = 49kPa とした。

実験は次の方法で行った。最初にゴム膜内に脱気水をはって置き、その中に湿潤状態の豊浦砂を少量ずつ詰めた後、木製タンパーでその表面を軽く押さえて相対密度 (D_r) = 55% の飽和砂層を作製した。その直径は 30cm, 高さは約 6 cm である。豊浦砂の物理常数は次のとおりである。 $G_s = 2.642$, $D_{max} = 0.84\text{mm}$, $D_{50} = 0.21\text{mm}$, $U_c = 1.7$, $e_{max} = 0.933$, $e_{min} = 0.628$

その後、砂層表面に重錘を載せた後、振動台を駆動して砂層に周期 0.33 秒で振幅一定の正弦波状の加速度を与えて初回の液状化実験を行い、液状化時に発生した間隙水圧の消散を行った後、同じ砂層に対して再液状化実験を行った。

原位置地盤では再液状化時には過去の液状化時に比

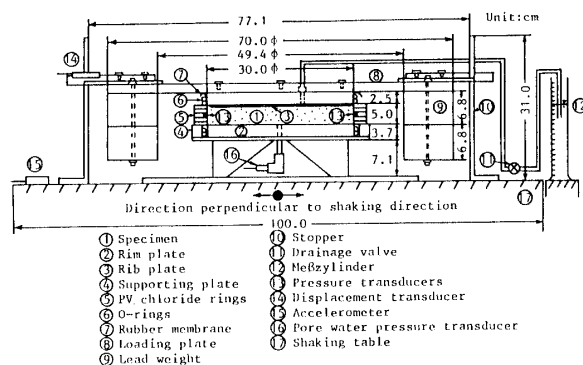


Fig. 1 Kjellman's type simple shear box

べて小さい地動加速度でもって発生していることが多いことを考慮して実験に用いる加速度の大きさを次のように決めた。すなわち初回の液状化実験の水平加速度は震度への換算値 $(k_h)_1 = 0.20$ とし、再液状化実験では $(k_h)_2 = 0.15$ とした。添え字 1, 2 はそれぞれ初回の液状化、再液状化を意味する。以下、本論文では加速度は震度値でのべる。

初回の液状化が発生した直後に排水バルブを開け、砂層表面の中央部の排水パイプによる排水を行いながら振動を継続した。このことは液状化後に生じる砂粒子の再配列に振動がどのようにかわるかを調べるためであり、その継続時間 (t_{LS}) はほぼ 0 から 30 秒まで数通りに変えて t_{LS} の再液状化ポテンシャルに与える影響を調べた。液状化時のせん断ひずみ両振幅 (γ_0) はほぼ 13.4% にした。

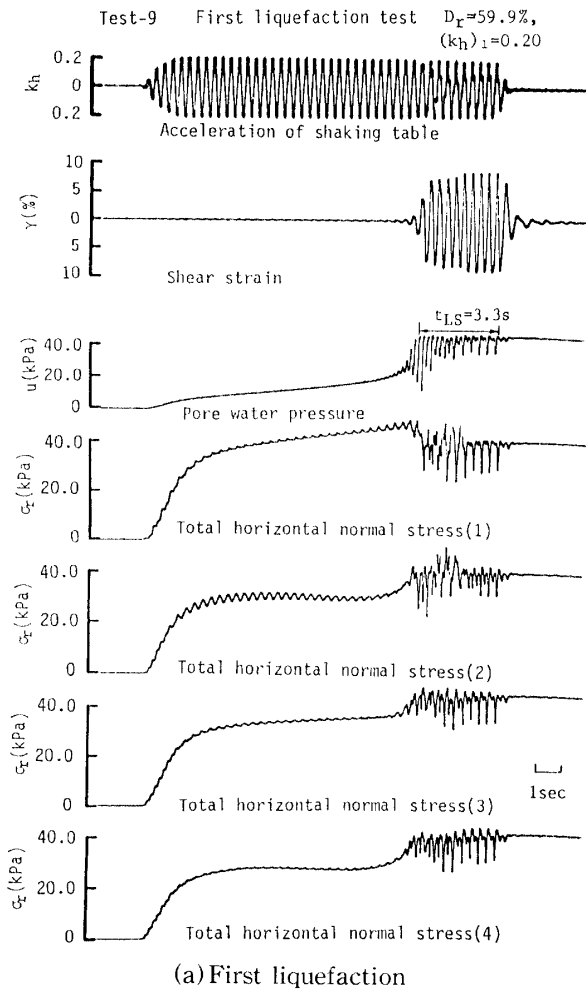
これとは別に初回の液状化と再液状化時の震度が同じ場合で $(k_h)_1 = (k_h)_2 = 0.15$ とした場合についても同様に実験を行った。この実験では初回の液状化時の γ_0 を 13.4% とした実験の他に、 $\gamma_0 = 5.0\%$ の場合の実験も行い、液状化時に砂層に生じるひずみ振幅の大きさが再液状化ポテンシャルに与える影響も調べた。

実験時には砂層の底面中央部での間隙水圧を間隙水圧計 (容量 980kPa), せん断変位振幅をひずみゲージ式変位計 (容量 10mm), 4 箇所位置の水平応力を小型圧力変換器 (容量 196kPa) で測定し、すべてペン書きオシログラフに記録した。

3. 結果および考察

Figs. 2 (a), (b) は実験記録の代表例を示す。液状化時に $\gamma_0 = 13.4\%$ とした実験である。Fig. 2 (a) は $(k_h)_1 = 0.20$ で行った初回の液状化実験の記録である。Fig. 2 (b) は $(k_h)_2 = 0.15$ で行った再液状化の実験記録である。記録線は上から順に振動台の加速度、砂層のせん断ひずみ、砂層底部中央の間隙水圧、せん断方向の全水平応力 (1), (2) およびそれと直交する方向の全水平応力 (3), (4) を示す。

Fig. 2 (a) にみられるように先の研究³⁾と同様に初回の液状化時には繰返し回数の増加とともにある回数でひずみ振幅が急激に大きくなり、砂層の間隙水圧がほぼ有効鉛直圧 (σ'_{v0}) に等しくなって液状化が発生する。この時の γ_0 はほぼ 5% である。液状化までの繰返し回数 (n_L)₁ は 32 回である。これに対して Fig. 2 (b) にみられるように液状化後の排水によって密度が増大した砂層では Cyclic mobility が生じ、せん断ひずみ振幅は繰返し回数とともに徐々に増加し、間隙水圧は一時



的に σ'_{v0} に等しくなる。このように初回の液状化と再液状化の時には砂層に生じる間隙水圧とひずみ量の増加の仕方には違いがあるが、 $\gamma_0=5.0\%$ となった時に液状化が発生したと見做した。再液状化までの繰返し回数 $(n_L)_2$ は182回である。

このように初回に $(k_h)_1=0.20$ の震度を受けて液状化した後に排水を行って密度の増大した砂層に対して $(k_h)_2=0.15$ の震度を与えた再液状化実験から得られた再液状化を発生するまでのせん断応力の繰返し回数 $(n_L)_2$ と液状化時の振動の継続時間 $(t_{L,S})$ の関係は Fig. 3 に○印で示した。同図には比較のため、 $(k_h)_1=(k_h)_2=0.15$ の実験から得られた結果を●印で示している。両者の実験とも $\gamma_0=13.4\%$ として行われた。

Fig. 3 から両者の実験から得られた $(n_L)_2$ は $t_{L,S}$ が0秒近くで最も大きく、 $t_{L,S}$ が増加するにもなって減少することが分かる。 $t_{L,S}=0\sim 2$ 秒では $(n_L)_2$ は250~500回で、 $t_{L,S}=2$ 秒以降は初回の液状化時に $(k_h)_1=0.20$ の震度を受けた砂層の $(n_L)_2$ は $t_{L,S}$ とともに単調に減少するが、 $(k_h)_1=0.15$ を受けた砂層の場合には $(n_L)_2$ は $t_{L,S}$ が約8秒までは減少し、その後は一定でその値は約120回となる。

Fig. 3 中の記号の説明欄に示すように $(k_h)_1=0.15$ を受けた砂層が初回の液状化を生じるまでの繰返し回数 $(n_L)_1$ は55~78回の範囲にあり、また $(k_h)_1=0.20$ を受けた砂層の場合には $(n_L)_1$ は20~32回の範囲にある。初回

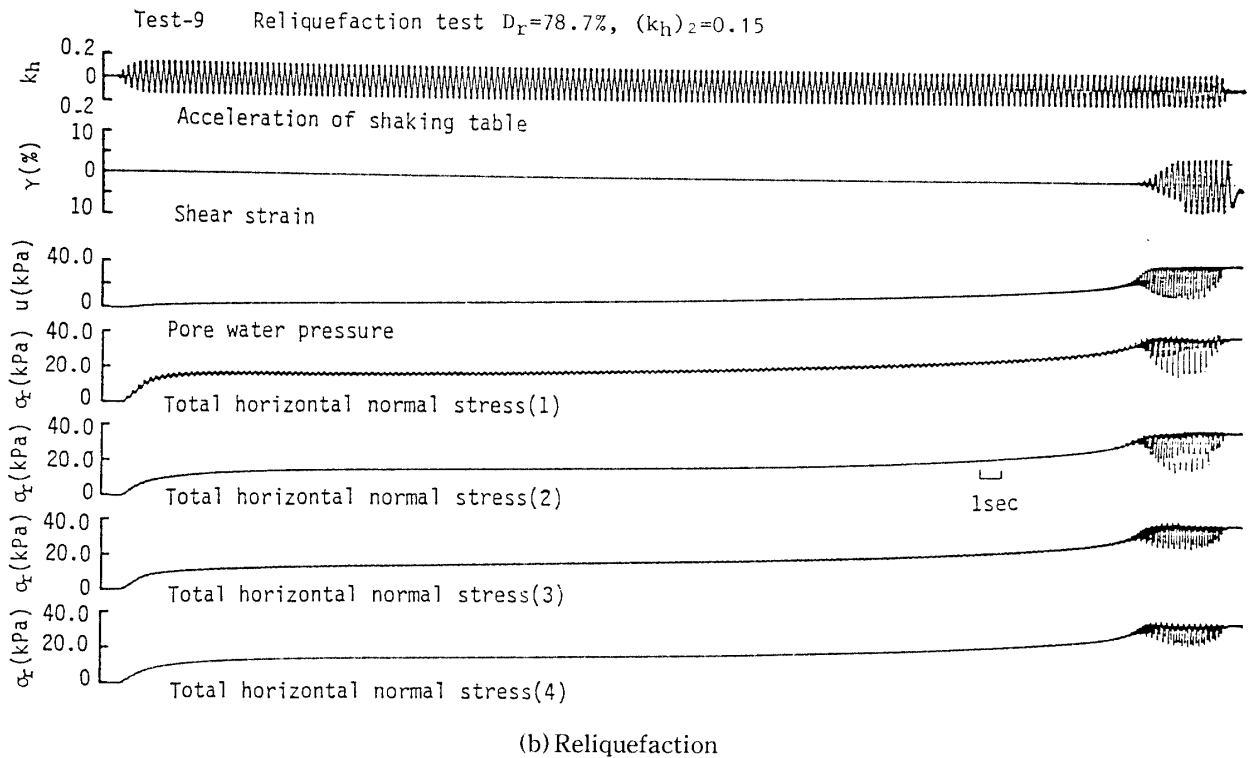


Fig. 2 Typical test record(Test-9)

に $(k_h)_1=0.15$ を受けた砂層の $(n_L)_2$ はすべて実験範囲の t_{LS} において $(n_L)_1=55\sim78$ 回よりも大きいので、初回と再液状化時に比較的小さい震度を受けて液状化した砂層の再液状化ポテンシャルは初回に比べてかなり小さくなっていると考えられる。一方、初回に $(k_h)_1=0.20$ を受けた砂層の $(n_L)_2$ は $t_{LS}=20$ 秒の付近で60回程度であり、それは初回に $(k_h)_1=0.15$ を受けた砂層の $(n_L)_1$ のバラツキの範囲内に入っているため、初回の液状化時に比較的に長い時間大きい震度を受けて液状化した砂層の再液状化ポテンシャルは変わらないかやや大きくなると考えることができる。

$(k_h)_1=0.20$ および $(k_h)_1=0.15$ の震度を受けた後の砂層の相対密度 D_r の t_{LS} による変化は Fig. 4 に示す。この図からわかるように t_{LS} の増加による砂層の相対密度増は両者の場合で同じであり、とくに $t_{LS}=8$ 秒までは t_{LS} ともなって相対密度が著しく大きくなり、その後は漸増する。

初回の液状化時の排水と振動停止後の排水による圧密によって生じた砂層の体積ひずみ (ϵ_v) の時間的な変化

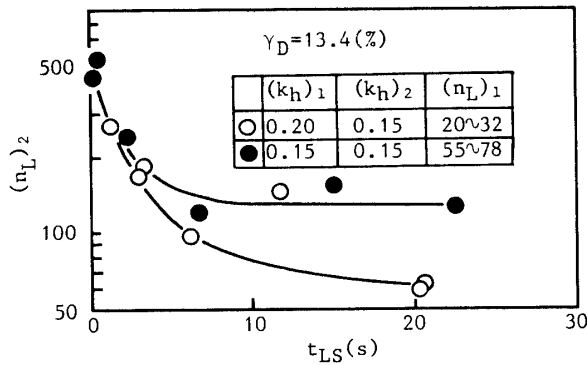


Fig. 3 Variation of $(n_L)_2$ with t_{LS}

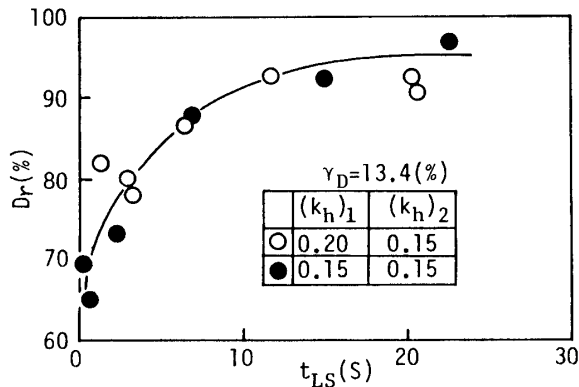


Fig. 4 Variation of D_r of sand layer after first liquefaction with t_{LS}

を $(k_h)_1=0.20$ の場合について示したのが Fig. 5 である。図中、矢印をつけたところが初回の液状化後に振動を停止した時点である。これから初回の液状化後の間隙水の排水によって生じた砂層の ϵ_v は $t_{LS}=1.3$ 秒の場合には 4%程度で、 $t_{LS}=8.3\sim20.7$ 秒の場合には 6~7%程度であることが読み取れる。 $(k_h)_1=0.15$ の場合もこの図の曲線とほぼ同ようであった。

Figs. 6 (a), (b) はそれぞれ Figs. 2 (a), (b) に示し

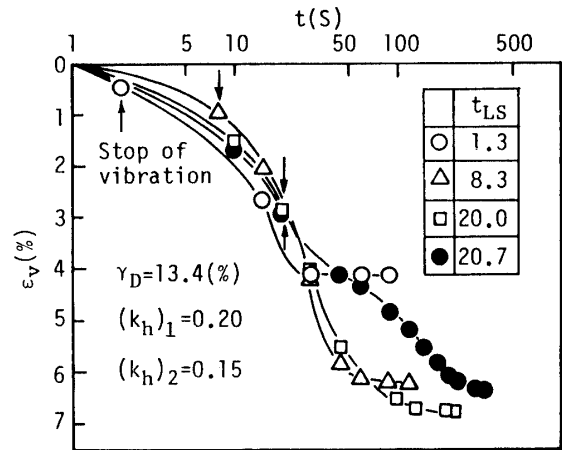
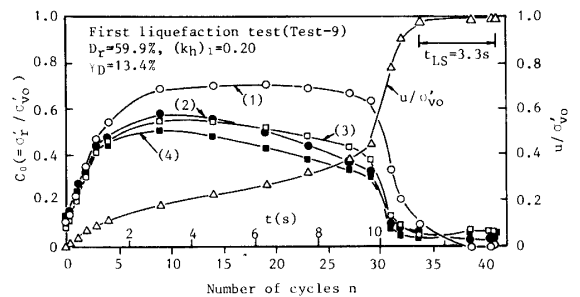
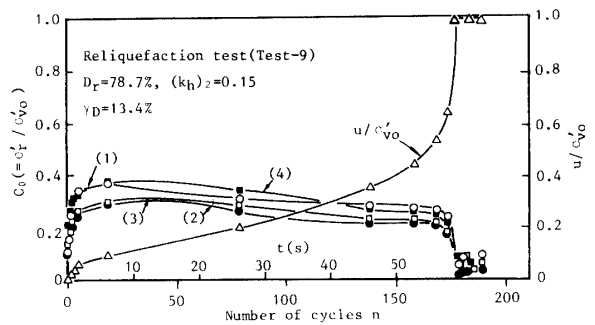


Fig. 5 Variation of volumetric strain ϵ_v of sand layer with time t



(a) First liquefaction



(b) Reliquefaction

Fig. 6 Variation of C_0 with n (Test-9)

た初回および再液状化実験から得た砂層の土圧係数 C_0 ($=\sigma'_r/\sigma'_{v0}$) と繰返し回数 n (あるいは時間 t) の関係を示したものである。同図には間隙水圧比 u/σ'_{v0} の上昇曲線も示す。両図において砂層に生じる u/σ'_{v0} がおよそ0.6に達すると、各測点の C_0 は著しく低減することがわかる。また初回の液状化後の排水によって砂層の密度が増加するため、再液状化時の各点の C_0 は初回の場合よりも小さいことがわかる。

Fig. 7 は初回の液状化後の砂層の K_0 値と t_{LS} の関係を示す。 $t_{LS} = 0$ 秒の時の K_0 値は砂層を作った時の K_0 値の平均値を表す。この図から分かるように初回に $(k_h)_1 = 0.15$ および $(k_h)_1 = 0.20$ を受けた砂層の K_0 値の t_{LS} による変化には明確な差異はみられない。すなわち $t_{LS} = 0$ 秒の近傍では K_0 値は初期の K_0 値よりもやや大きいように見受けられるが、 t_{LS} が大きくなると K_0 値は減少し、一定となるようである。この関係は先の実験結果³⁾と一致する。

著者らのこれまでの研究^{3),6)}で主張してきたように初回の液状化後の排水によって生じる密度増によって飽和砂層の再液状化ポテンシャルは小さくなることは再確認されたが、このことは初回と再液状化時の震度を同じ0.15とした実験結果からの結論であった。今回、初回の震度を0.20とし、再液状化時に0.15の震度を与えるという実験を行った結果からは初回の液状化時の震度と振動継続時間が大きい場合には、再液状化ポテンシャルは変わらないかやや増大することが示された。すなわち初回の液状化時の震度と振動継続時間が大きくなると砂粒子がゆるい骨格構造を形成し勝ちになるため、液状化後の排水によって密度が増加した砂層の中に部分的にゆるい部分が多く形成されて再液状化ポテンシャルが大きくなるのであろう。そのことを確かめるため、初回の液状化後の砂層に対してコーン貫入試験を行ったが、初回の震度および振動継続時間の違いによってコーン抵抗値には有意な差は認められなかった。

液状化時のせん断ひずみ振幅の大きさが再液状化ポテンシャルに与える影響を調べた結果は Fig. 8 のようであった。両方の結果とも $(k_h)_1 = (k_h)_2 = 0.15$ の実験から得られたものであり、●印は $\gamma_D = 13.4\%$ の結果 (Fig. 3 と同じ)、○印は $\gamma_D = 5.0\%$ の結果を示す。

本実験では $\gamma_D = 5.0\%$ は液状化が発生したと判断した時のひずみ量に相当するが、この程度のひずみを受けた砂層の $(n_L)_2/(n_L)_1$ つまり再液状化ポテンシャルは $\gamma_D = 13.4\%$ の場合とほぼ一致することが分かる。 $t_{LS} = 0$ 秒付近では $(n_L)_2/(n_L)_1 = 7$ であるが、 t_{LS} の増加とともにそれは減少ないし一定となる。初回の液状化後の

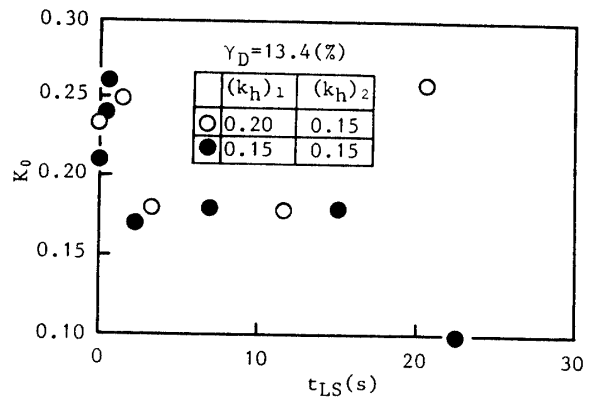


Fig. 7 Variation of K_0 with t_{LS}

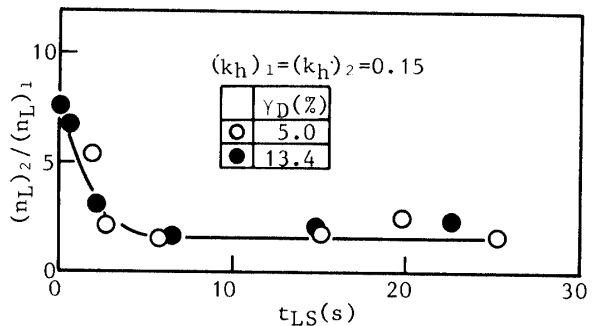


Fig. 8 Effect of amplitude of shear strain on $(n_L)_2/(n_L)_1$

砂層の密度増が小さくなり始める $t_{LS} = 8$ 秒以上 (Fig. 7) ではその値は1.5程度で一定となる。この一定値は先の結果と同じである³⁾。なお、 $\gamma_D = 5.0\%$ の実験から得られた初回の液状化後の砂層の相対密度と K_0 値の t_{LS} ともなう変化はそれぞれ Figs. 4, 7 のそれと非常によく似ていた。

4. まとめ

再液状化の発生は、その地盤が過去の液状化時に受けた地動加速度より小さい地動加速度で発生するという事実がある。われわれはこのことを調べるため、飽和砂層の再液状化実験を行い、初回の液状化時の震度が再液状化ポテンシャルに与える影響を調べた。さらに振動継続時間およびひずみ量が再液状化ポテンシャルに与える影響についても調べた。実験には振動台上に取りつけたケルマン型せん断箱を用いた。

得られた結論は次のように要約される。初回の液状化時の震度および振動継続時間 (t_{LS}) が小さい場合には

飽和砂層の再液状化ポテンシャルは小さくなるが、それらがかなり大きくなると、再液状化ポテンシャルは変わらないかやや増大する傾向が見られた。また初回の液状化時のせん断ひずみ両振幅 $\gamma_0=5.0\%$ および 13.4% を受けた砂層の再液状化ポテンシャルには差異はみられなかった。

最後に実験と結果の整理を手伝って戴いた本学学生立石英也、浜崎 克尚君に対して厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Yasuda, S. and Tohno, I.: Sites on Reliquefaction Caused by the 1983 Nihonkai-Chubu Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.2, pp. 61~71, 1988.
- 2) Yoshida, N. and Wakamatsu, K.: Re-liquefaction of Fill Land-A Comparison between the Loma Prieta Earthquake and Japanese Earthquakes, *ISSULF*, pp.3.1~3.15, 1990.
- 3) 山本哲朗・大原資生・百合野博司・西田哲哉：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.199~204，1991.
- 4) S. Ōhara and T. Yamamoto: Failure of the Cohesive Silty Soil Subjected to Cyclic Shear, *Proc. of Ninth WCEE*, pp.III-77~III-82, 1988
- 5) 大原資生・山本哲朗：繰返しせん断を受けているときの砂の土圧係数について，土木学会論文集，No.412/III-12, pp.89~97, 1989.
- 6) 大原資生・山本哲朗：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.123~132, 1982.

(平成4年3月30日受理)