

(60) 飽和砂層の再液状化ポテンシャルに関する実験的研究

宇部工業高等専門学校 正会員 大原 資生
 山口大学工学部 正会員 ○山本 哲朗
 同上 学生会員 百合野博司

1. まえがき

著者らは先に一度液状化を生じ、排水によって密度が増加した飽和砂は再液状化を生じ難いことを実験によって明らかにした¹⁾。一方、最近では1989年ロマ・ブリエタ地震の際には飽和地盤に再液状化が発生した例²⁾を初めとし、これまでに飽和地盤が初回の液状化の場合よりも小さい地震動を受けて再液状化が発生した例がいくつか報告されている³⁾。このように室内実験から得られた飽和砂の再液状化の難易度と現場のそれにはかなりの差異がみられるが、これは再液状化には液状化後の地盤の締り具合、排水条件や地震動の大きさとその継続時間等といった多くの因子が複雑に影響しているためと考えられる。

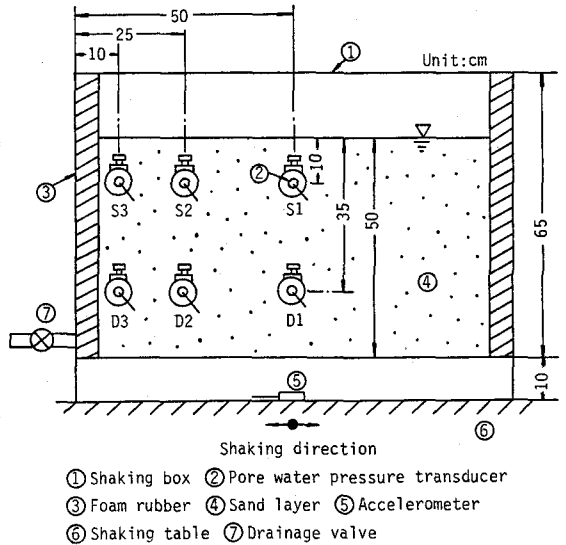
本文ではそういった因子の中でとくに初回の液状化発生時の振動継続時間をとりあげ、その飽和砂層の再液状化ポテンシャルに及ぼす影響を砂箱および単純せん断箱を用いての振動台実験で調べてみた結果がのべられている。

2. 実験装置および方法

今回の実験には振動台上に固定した砂箱(図-1)およびケルマン型単純せん断箱(図-2)が用いられた。それぞれの試験機の詳細については文献4)、5)に譲り、以下にそれぞれの箱を用いたときの実験方法をのべる。

【砂箱による実験】まず、長さ、幅、深さがそれぞれ100cm×35cm×65cmの砂箱内に厚さ50cmの飽和した豊浦砂層を作製する。その状況を図-1に示す。砂層の相対密度 D_r は平均で38.9%である。

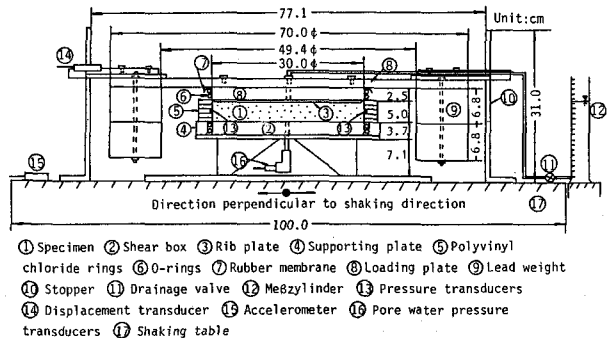
次に、振動台を駆動して砂箱に振動数(f)=3Hzで、水平震度(k_h)=0.1の正弦波状振動を加えて、砂層上面からの排水を許した状態で初回の液状化実験を行った。砂層に液状化が発生した直後に振動を停止するものから約30秒間振動を継続するものまで液状化発生時の振動継続時間(t_{Ls})を数通り変えて、 t_{Ls} の再液状化ポテンシャルに与える影響を調べることにした。液状化の発生は砂層に生じる間隙水圧がほぼ初期有効鉛直圧(σ'_{v0})に等しくなる時と定義した。振動停止後、液状化による砂層の沈下が完全に止まったのを確認し、15分後の沈下量を測定した。その後、もう一度、初回と同じ大きさの振動を砂層に与えて再液状化実験を行った。砂層に生じる間隙水圧 u は図-1に示す6箇所の位置で、間隙水圧計によって測定した。



Shaking direction

- ① Shaking box ② Pore water pressure transducer
- ③ Foam rubber ④ Sand layer ⑤ Accelerometer
- ⑥ Shaking table ⑦ Drainage valve

図-1 砂箱



- ① Specimen ② Shear box ③ Rib plate ④ Supporting plate ⑤ Polyvinyl chloride rings ⑥ O-rings ⑦ Rubber membrane ⑧ Loading plate ⑨ Lead weight
- ⑩ Stopper ⑪ Drainage valve ⑫ Meßzylinder ⑬ Pressure transducers
- ⑭ Displacement transducer ⑮ Accelerometer ⑯ Pore water pressure transducers ⑰ Shaking table

図-2 ケルマン型単純せん断箱

豊浦砂の物理定数は次のとおりである。 $G_s = 2.642$ 、 $D_{max} = 0.84\text{mm}$ 、 $D_{50} = 0.21\text{mm}$ 、 $U_c = 1.7$ 、 $e_{max} = 0.941$ 、 $e_{min} = 0.643$

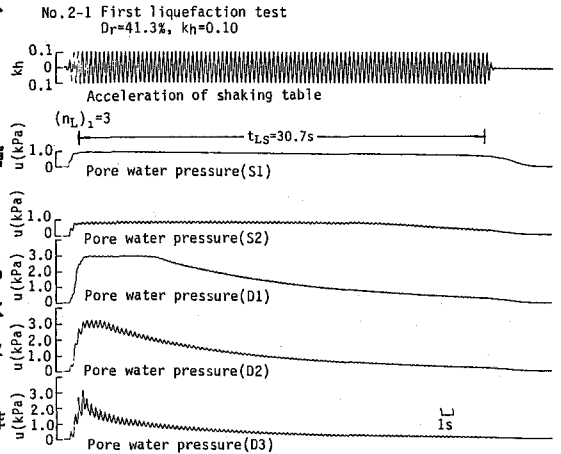
【ケルマン型単純せん断箱による実験】 図-2に示す、せん断箱内に平均の相対密度 $D_r = 53.7\%$ の飽和砂層（直径30cm、高さ約5cm）を作製し、砂箱の実験の場合と同様に t_{LS} を数通り変えて初回の液状化実験（ $k_h = 0.15$ ）を行った。すなわち初回の液状化が発生するまでは非排水状態とし、液状化が発生した直後に排水バルブ①を開け、砂層上面の中央部から排水を許した状態で所定の t_{LS} の間、砂層に振動が加えられた。振動停止後、砂層からの排水を20分間行い、その間の排水量および沈下量を測定した。 σ'_{vo} は49kPaである。

次に、初回の実験と同じ大きさの振動を砂層に加えて再液状化実験を行った。実験時には間隙水圧はせん断箱底面の中央にとり付けた間隙水圧計で測定した。せん断変位振幅は抵抗線ひずみ計式変位計で測定した。

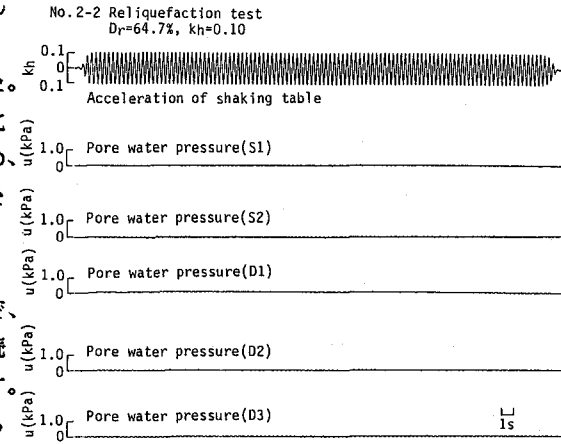
この実験では液状化過程での砂層の土圧係数の変化および液状化による静止土圧係数の変化も調べるため、4個の小型圧力変換器を中間のリングに互いに直角をなす位置にはめこんで水平応力の測定も行った。

3. 結果および考察

【砂箱】 図-3(a)、(b)は実験記録波形の一例で、それぞれ初回の液状化実験(No.2-1)とその後に引き続いて行われた再液状化実験(No.2-2)の記録波形を示す。再液状化が発生しなかった例である。記録線は上から順に振動台の加速度、測点S1、S2、D1、D2、D3の間隙水圧を示す。(a)図に示すように初回の液状化までの繰返し回数 $(n_L)_1$ は3回であり、初回の液状化が生じてからの振動継続時間 (t_{LS}) は30.7秒である。



(a) 初回の液状化実験



(b) 再液状化実験

図-3 実験記録波形の一例（砂箱）
（再液状化は発生しない場合）

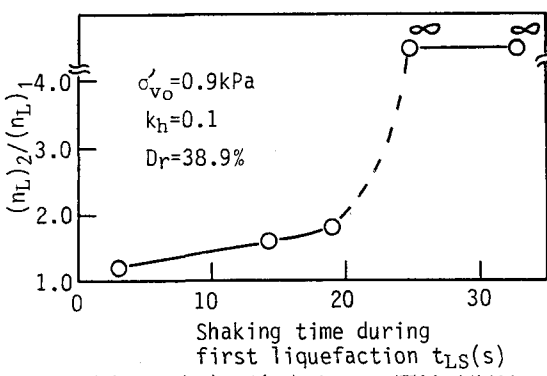


図-4 $(n_L)_2 / (n_L)_1$ と t_{LS} の関係（砂箱）

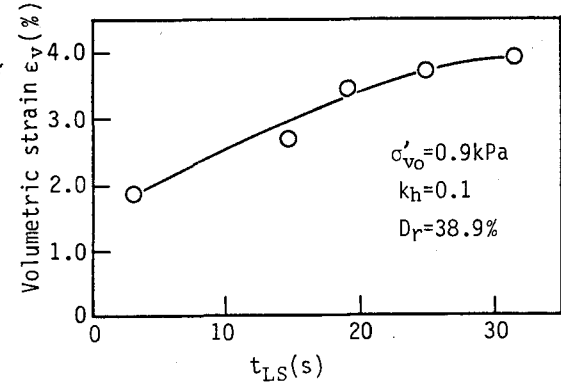


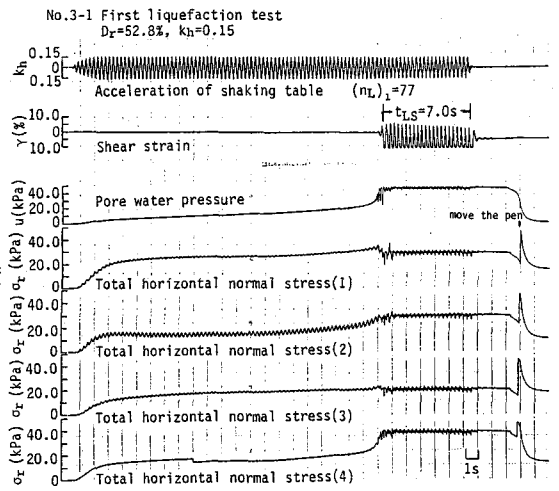
図-5 ϵ_v と t_{LS} の関係（砂箱）

(b)図からわかるように各測点の間隙水圧の上昇量はゼロであって再液状化は発生していないので $(n_L)_2 = \infty$ となる。 n_L に付けたサフィックス1、2はそれぞれ初回の液状化および再液状化であることを示す。

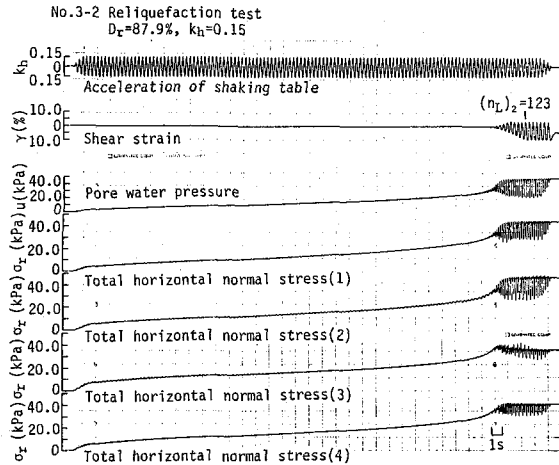
再液状化が初回の液状化に比してどの程度生じ難く、あるいは生じ易くなるかを繰返し回数が増減のみるために指標 $(n_L)_2 / (n_L)_1$ を用い、それと t_{LS} の関係を調べた。その結果を図-4に示す。 $(n_L)_2 / (n_L)_1$ が大きいほど再液状化が発生し難いことを示す。 ∞ の場合は再液状化は発生しなかったことになる。図-4からいずれの結果も $(n_L)_2 / (n_L)_1$ は1.0以上となっており、初回の液状化に比べて再液状化は発生し難くなるということがわかる。その度合は t_{LS} とともに増加し、とくに $t_{LS} > 25$ 秒では再液状化は発生していない。

初回の液状化によって生じた砂層の体積ひずみ ϵ_v と t_{LS} の関係は図-5に示す。図から $t_{LS} = 10$ 秒程度までは ϵ_v は急増し、それ以降は漸増していることがわかる。したがって図-4、5の結果から先の単純せん断箱を用いた実験¹⁾と同ように初回の液状化後の排水による密度の増加が大きくなるため、再液状化は発生し難くなるのが砂箱の実験でも再確認され、その度合は t_{LS} が大きくなると砂層の密度増によって増加することが今回明らかにされた。

【ケルマン型単純せん断箱】図-6(a)、(b)は記録波形の一例を示す。(a)図は初回の液状化実験のもので、 $(n_L)_1 = 77$ 回、 $t_{LS} = 7.0$ 秒である。(b)図は再液状化実験のもので、 $(n_L)_2 = 123$ 回である。記録線は上から順に振動台の加速度、せん断ひずみ、間隙水圧、振動方向の振動によって生じる全水平応力(1)、(2)およびその方向に直角する方向の全水平応力(3)、(4)を表す。



(a) 初回の液状化実験



(b) 再液状化実験

図-6 実験記録波形の一例(単純せん断箱)
(再液状化が発生した場合)

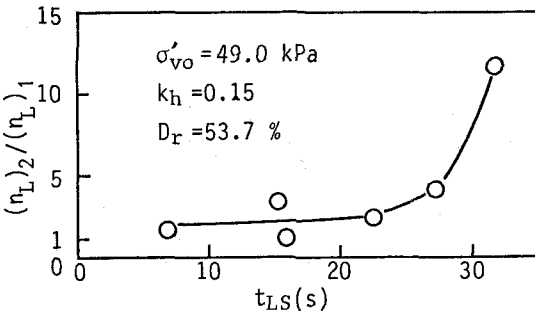


図-7 $(n_L)_2 / (n_L)_1$ と t_{LS} の関係(単純せん断箱)

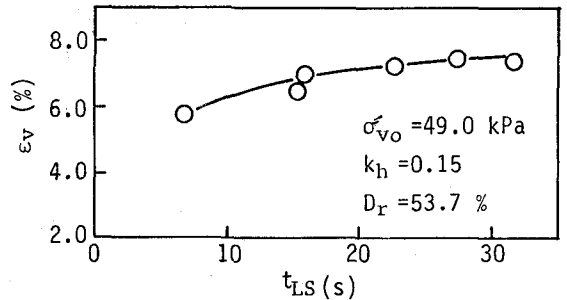


図-8 ϵ_v と t_{LS} の関係(単純せん断箱)

図(b)からわかるように初回の液状化後の砂層の相対密度が87.9%とかなり大きくなり、Cyclic mobilityの現象が生じて間隙水圧およびせん断ひずみとも繰返し回数とともに漸増し、間隙水圧は一時的には初期有効鉛直圧にほぼ等しくなるが、通常の意味での液状化は発生しなかった。この場合にも間隙水圧が一時的に初期有効鉛直圧にほぼ等しくなった時に再液状化が発生したと考えて、その時までの繰返し回数を $(n_L)_2$ として $(n_L)_2/(n_L)_1$ を求めた。

その方法で得られた $(n_L)_2/(n_L)_1$ と t_{LS} の関係は図-7に示す。 ϵ_v と t_{LS} の関係は図-8に示す。図-7、8から本実験でも砂箱の実験と同様に液状化を生じた後の排水による密度増は t_{LS} が大きいほど大きくなり、この密度増によって再液状化は初回の液状化に比べて発生し難くなることが明らかになった。図-7において $t_{LS}=27.3$ 秒を受けた砂層では $(n_L)_2$ は229回であり、地震動の継続時間を考慮すると、この砂層は再液状化を発生しないと考えることも差し支えない。このように本実験でも砂箱の場合と同様に $t_{LS}>25$ 秒の場合には再液状化は発生しないという結果を得ることができた。

図-9は初回の液状化後に測定して得られた静止土圧係数 K_0 値と t_{LS} の関係を示す。砂層を作った時の初期の K_0 値($t_{LS}=0$ の場合)は●印で示す。この図から初期の K_0 値にはややバラツキがあるが、初回の液状化後の K_0 値はほぼ t_{LS} に比例して僅かに減少することがわかる。いいかえると図-7、8でのべたことから K_0 値は砂層の密度増が大きいほど小さくなるということである。

4. まとめ

初回の液状化発生時の振動継続時間(t_{LS})が飽和砂の再液状化ポテンシャルに与える影響を明らかにするため、砂箱およびケルマン型単純せん断箱を用いて再液状化実験を行った。得られた結論は次のようにまとめられる。両者の実験では砂層の密度、振動時の排水の方法、有効鉛直圧の大きさがかなり異なるが、両者の実験において t_{LS} が大きくなるにしたがって、砂層の密度増が大きくなることに起因して再液状化ポテンシャルは初回の液状化の場合に比べて減少することがわかった。とくに $t_{LS}>25$ 秒の場合には再液状化は発生しないと考えることもよい結果が得られた。

参考文献

- 1) 大原・山本：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、22巻、2号、pp.123~130、1982
- 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) Yasuda, S. and Tohno, I.: Sites on Reliquefaction caused by the 1983 Nihonkai-Chubu Earthquake, Soils and Foundations, Vol.28, No.2, 1988
- 4) 大原・山本：液状化対策としてのグラベルドレーン工法に関する一考察、土と基礎、31巻、12号、pp.29~34、1983
- 5) 大原・山本：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.412/111-12、pp.89~97、1989

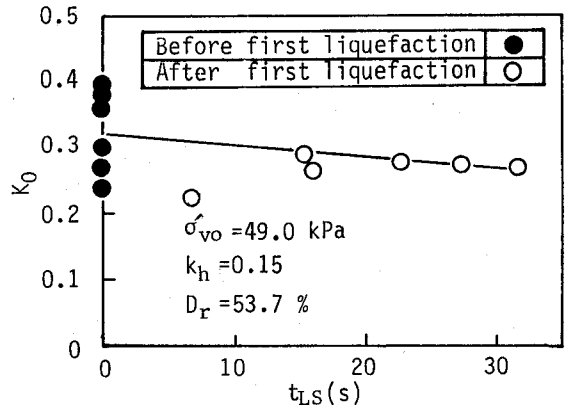


図-9 液状化による静止土圧係数の変化 (単純せん断箱)