

## (22) 遠心力载荷装置を用いた砂地盤の永久変位に関する振動台実験

九州工業大学工学部 ○永瀬英生

University of Colorado Hon-Yim Ko

University of Colorado Hubert Law

University of Colorado Ronald Y.S. Pak

### 1. はじめに

筆者の一人は、地震時の液状化によって引き起こされる永久変位の発生メカニズムを明らかにするために、1g下での振動台実験を数多く行ってきた<sup>(1)</sup>。その結果、永久変位は砂地盤内のある一面においてせん断変形が卓越することにより起こるのではなく、せん断変形が比較的一様な形態をとって生じることにより発生するものであることが明らかになっている。しかしながら、砂の非排水せん断における大変形時の挙動は拘束圧の影響を大きく受けることも報告されている<sup>(2)</sup>。したがって、1g下の振動台実験では拘束圧の影響を十分に考慮することができないため、遠心力载荷装置を用いた振動台実験により永久変位の発生メカニズムをさらに追究する必要がある。そこで本研究では、振動台が搭載された遠心力载荷装置を用いて、文献(1)に準じた方法で永久変位のシミュレーション実験を行ってみた。

### 2. 試料と実験装置

実験に用いた砂は、F-75と言われる石英質で、粒形は丸く、色の白い砂である。この粒径加積曲線を Fig.1に示す。物理的性質はそれぞれ、土粒子の比重  $G_s = 2.65$ 、平均粒径  $D_{50} = 0.185\text{mm}$ 、均等係数  $U_c = 1.79$ 、最大間隙比  $e_{max} = 0.808$ 、最小間隙比  $e_{min} = 0.516$  である。

使用した遠心力载荷装置は、アメリカ合衆国のコロラド大学ボルダー校に設置されているもので、半径 5.49mのアームを有し、最大積載重量は2t、最大遠心加速度は200gで、400g-ton程度の载荷能力を有している<sup>(3)</sup>。遠心力载荷装置に搭載された振動台は、油圧をアクチュエーターで制御するタイプのものである。

Fig.2 は実験に使用したせん断土槽を示したものである。土槽の内のは、長さ58cm、幅24cm、深さ17cmである。この土槽は13枚のアルミニウム板をFig.2に示すように重ね、それらを側方と端部の支持板で固定して作られたものである。それぞれの板の間にはベアリングが入れられており、それによってアルミニウム板間の摩擦が軽減されている。この土槽の内部に二重のゴム膜を取りつけることによって、実験中に土槽の側方や底部からの漏水を防ぎ、非排水状態が十分に保たれた。

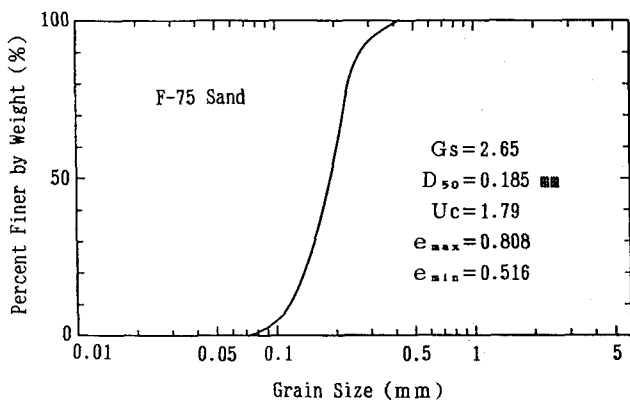


Fig.1 粒径加積曲線

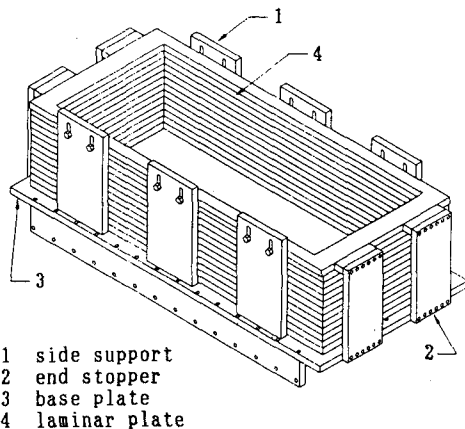


Fig.2 せん断土槽

### 3. 実験方法

Fig.3 は実験に用いたモデル地盤を示したものである。この作製方法は以下のとおりである。①F-75砂を用いて、縮固めにより所定の傾斜を有する基盤を作製する。②ホッパー内の乾燥したF-75砂を所定の高さから落下させる。この際、目の開き2mm のふるい

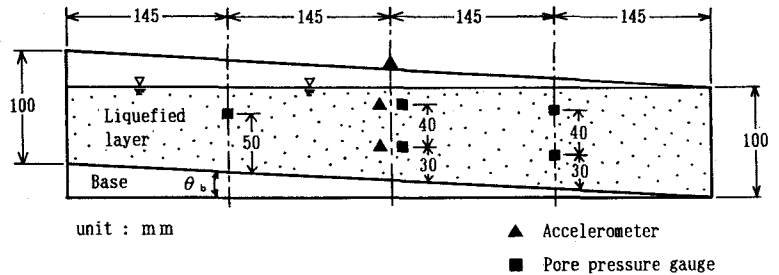


Fig.3 モデル地盤

Table 1 実験条件

Test No.	Slope angle $\theta$ (%)	Spinning acceleration (g)	Relative density $D_r$ (%)
1	5	20	34.0
2	10	20	17.7
3	10	20	41.4
4	5	80	27.9
5	10	80	31.7
6	5	20	43.6
7	10	80	30.0
9	10	20	36.6

を通過させながら行う。この所定の高さは、目標相対密度 30%を得るために必要な落下高さであり、予め求められた値である。③Fig.3 に示す配置に従って、小型の加速度計と間隙水圧計を設置する。④斜面最下端部に設置されたスタンドパイプより水(間隙水)をゆっくりと供給し、モデル地盤を飽和させる。⑤成形によりモデル地盤の傾斜を所定の値にする。⑥この状態で15時間程度放置してから当間隔に11個の画鋲を地表面に置き、土槽を振動台の上に設置する。⑦当間隔に11本の中華麺を地中に設置し、画鋲の位置を計測する。⑧中華麺が柔らかくなるまで1時間程度放置してから、所定の遠心力を載荷する。⑨5~10分間所定の遠心力を載荷した後、振動台実験を行う。⑩加振終了後、5分程度その状態で放置し、遠心力の載荷を終了する。⑪土槽を振動台から取り外し、モデル地盤上の画鋲の位置を計測する。⑫計器類を取り外してからモデル地盤を注意深く手で掘り、中華麺の位置を確認する。なお、遠心加速度は20gと80g、斜面勾配は地表面と液状化層下面共に5%と10%とし、入力波には10波程度の正弦波を用いた。Table 1 には今回行った実験の条件を示している。

相似則に関しては文献(4)に従った。すなわち、今回の実験のような液状化の問題に対しては、せん断応力比  $\tau/\sigma_v' (= \alpha/g)$  が一定であること、ng下における入力波の周波数は1g下での値のn倍であることを満足させる必要がある。ただし、 $\tau$  はせん断応力、 $\sigma_v'$  は垂直有効応力、 $\alpha$  は振動台による水平加速度、 $g$  は重力加速度をそれぞれ表す。したがって、1g下においてせん断応力比が0.25、入力波の周波数が3Hzと仮定し、20gと80g下では、入力波の加速度振幅と周波数にそれぞれ5gと60Hz、20gと240Hzを採用した。

4. 実験結果および考察  
全実験の結果を整理してTable 2 に示している。20g 下の実験では液状化が発生したのに対し、80g 下では液状化が起らなかった。その理由としては、入力加速度が所望の値よりも小さかったこ

Table 2 実験結果

Test No.	Average value of acceleration of the base motion (g)	Liquefaction occurred or not	Average value of permanent displacement measured by pins on the ground surface (mm)	Average value of settlement measured by pins on the ground surface (mm)
1	5.0	occurred	4.3	1.7
2	2.9	not	9.3	3.3
3	9.2	occurred	12.7	3.0
4	12.0	not	1.0	1.0
5	12.7	not	2.7	2.0
6	3.5	occurred	1.8	2.0
7	16.6	not	6.3	1.5
9	6.5	occurred	21.5	8.0

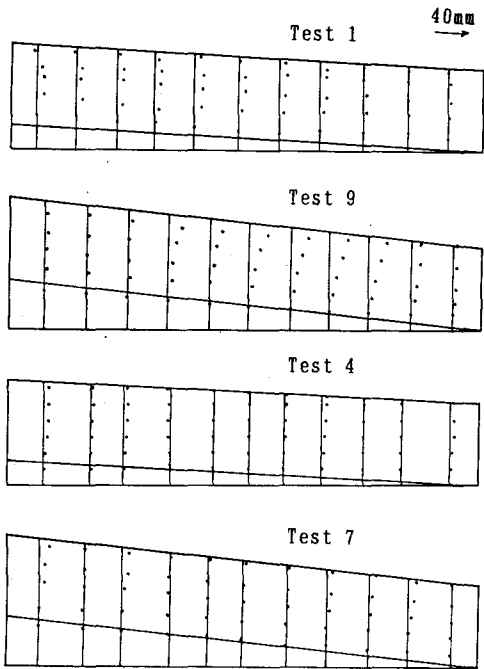


Fig. 4 モデル地盤中の中華麵の最終位置

と、排水時間に関する相似則が満足されていなかったこと等が挙げられる。

Fig. 4 には、Test 1、4、7、9 で得られた中華麵の最終位置を示している。Test 1では、土槽の中央部における永久変位が、地表面付近で斜面上方に発生し、液状化層の中ごろで斜面下方に最大となっているが、ある一面で大きく変位する傾向は見られていない。また、両端部、特に斜面下端部付近では端面の影響で変位が拘束されているようである。Test 9の結果によると、両端部付近を除いたところでせん断変位による永久変位が液状化層全体にわたって発生しているようである。一方、80g 下の実験、Test 4、7 では、液状化が十分に起こらなかったため、永久変位は大きく発生してはいないが、液状化層全層のせん断変位によって生じているようである。また、これらのデータのなかには永久変位が斜面上方に発生しているものもあるが、これは変位が振動の影響を受けたためと思われる。同一の結果を用いて地表面の永久変位量と沈下量を示したのがFig. 5 である。地表面の永久変位量は、Test 9のように液状化が発生するとかなり大きくなるのが分かる。沈下については、Test 1と9 の場合のように液状化が起こると斜面上方で大きく発生し、斜面下方では小さいかまたは逆に隆起する傾向が見られる。それに反して、Test 4と7 のように液状化が起こらなかった場合は全体にわたって沈下するようである。

Fig. 6 は、画鋏で測定された地表面での永久変位量 $D_s$  と液状化層厚 $H$ の関係を両対数グラフに示したものである。この変位量には土槽中央部にある6つのピンで測定されたものの平均値を、液状化層厚としてはプロトタイプに換算したものをを用いている。また、B-1~B-4とG-3~G-4のデータは文献1で得られたもので、それではB-1、B-3、B-4 のデータに基づいて直線が描かれている。図中にはそれらの実験条件、砂地盤の相対密度 $D_r$ と斜面勾配 $\theta$ も示している。今回の実験で得られたデータは括弧の中のテスト番号でそれぞれ区別されている。この図から、相対密度 $D_r$ が 35%で斜面勾配 $\theta$ が5%の結果、G-3と(1)、と $D_r$ が 35%で $\theta$ が

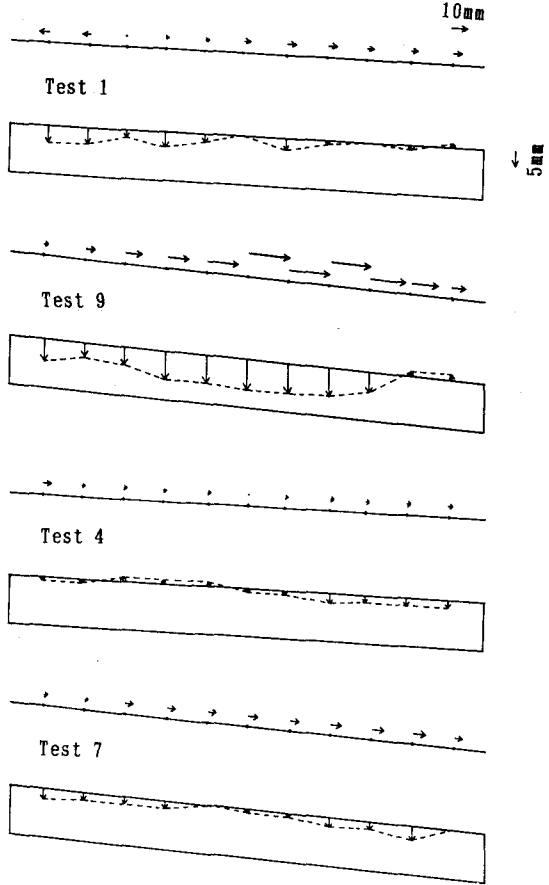


Fig. 5 地表面での永久変位量と沈下量

10%の結果、G-4と(9)または(3)に対して、文献1で得られている直線と平行な直線が描かれるようである。これは地表面における永久変位量 $D_s$ と液状化層厚 $H$ の間に

$$D_s \propto a \cdot H^b$$

の関係が成り立つことを意味している。ここに、 $a$ と $b$ は材料定数である。なお、(1)と(9)のデータは地盤が液状化した場合のもので、測定された永久変位量の最大値と考えられる。このような関係が成り立つことは、浜田ら<sup>5)</sup>による経験式と軌を一にしている。今回の実験結果からは、定数 $a$ に隠された材料の性質としては斜面勾配および相対密度が挙げられそうである。なお、直線の勾配 $b$ が1.0には等しくないため、永久変位は拘束圧等の影響で深さ方向に対して直線的には分布しないものと考えられる。

### 5. まとめ

遠心力載荷装置を用いて、地震時の液状化による永久変位に与える拘束圧の影響を調べた結果、次のような結論が得られた。

- (1) 遠心加速度20gと80gを受けた砂地盤においても、永久変位は液状化層全層のせん断変形によって発生するものである。
- (2) 砂地盤の相対密度と斜面勾配が一定であれば、永久変位量と液状化層厚の間には両対数紙上で直線関係がある。

### <参考文献>

- 1)Yasuda, S., Nagase, H., Kiku, H. and Uchida Y. (1992): 'The Mechanism and A Simplified Procedure for the Analysis of Permanent Ground Displacement due to Liquefaction,' Soils and Foundations, Vol.32, No.1, pp.149-160.
- 2)Ishihara, K., Verdugo, R. and Acacio, A. A. (1991): 'Characterization of Cyclic Behavior of Sand and Post-Seismic Stability Analyses,' IX Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, Thailand.
- 3)Ko, H. -Y.(1988): 'The Colorado Centrifuge Facility,' Centrifuges in Soil Mechanics, Edited by Craig and Schofield, pp.73-75.
- 4)Ko, H. -Y.(1988): 'Summary of the State-of-Art in Centrifuge Model Testing,' Centrifuges in Soil Mechanics, Edited by Craig and Schofield, pp.11-18.
- 5)Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R. and Emoto, K. (1986): 'Study on Liquefaction-Induced Permanent Ground Displacements and Earthquake Damage,' Proc. of Japan Society of Civil Engineering, No.376, III-6, pp.221-229(in Japanese).

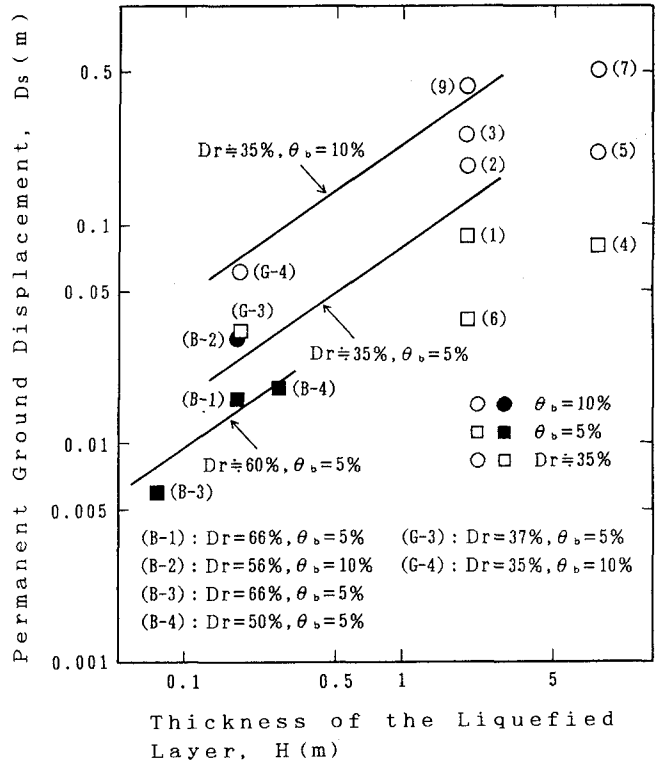


Fig.6 地表面での永久変位量と液状化層厚の関係