

(91) 遠心载荷装置を用いた液状化実験における土槽の奥行きと底面形状の影響

東京大学生産技術研究所 正会員 古関 潤一
 建設省土木研究所 正会員 松尾 修
 同 上 正会員 近藤 浩市
 建設省常陸工事事務所 正会員 高橋 晃浩

1. はじめに

筆者らは、盛土のある地盤の液状化時の挙動に関して一連の動的遠心模型実験を実施し、地盤密度・盛土形状等の地盤条件、加振波形・加振周波数等の加振条件、及び加振履歴の影響について検討してきた^{1) 2) 3)}。ここでは、模型の奥行きと底面形状、及び縮尺の影響を明らかにするために実施した実験の結果を報告する。

2. 実験方法

図1に示す回転半径約2mの遠心载荷装置に、長さ×高さ×奥行きが50×30×10cm(土槽A)、80×30×10cm(土槽B)、及び80×30×20cm(土槽C)の3種類の土槽を搭載し、模型の縮尺に対応した遠心加速度を作用させた。

土槽AとBは回転腕から板バネで吊り下げた状態で図1中の油圧アクチュエーター(最大加振力±2.0tonf)を用いて、また土槽Cは図1中のつりあい容器側を改造した新たに搭載した振動台(最大加振力±3.8tonf)を用いて、いずれも円周方向に水平加振を行った。

土槽Cを用いた実験の模型断面と計測器配置を図2に示す。模型の縮尺は1/30で、重力下に換算すると砂地盤部の長さ×高さ×奥行きが24×6×12mとなり、盛土部の高さは2.1mとなる。気乾状態の豊浦砂を用いて空中落下法により相対密度60%程度の砂地盤部を作成し、また、豊浦砂とクレイサンドを4:1の重量比で混合し含水比が15%となるように調整した材料を用いて盛土部を作成したのち、負圧を作用させた状態で水の30倍の粘性のシリコンオイル(土槽Aでは水の50倍)を土槽の底部より注入して砂地盤部を飽和させた。模型の長手方向が装置の円周方向となるため、砂地盤部の表面を回転半径(土槽Cでは1.98m、Bでは2.10m、Aでは2.03m)に応じた円弧状として、重力下に換算した場合に水平面に相当するようにした。

土槽AとBを用いた実験は砂地盤部の底面を平面としたまま実施したが、これは重力下では中央部分が高い曲面に相当する。そこで、この影響を調べるために、土槽Cを用いた実験では石膏を用いて底面を円弧状に変更した場合と、平面の場合の比較を行った。実験条件をまとめて表1に示す。土槽Bを用いた実験は、模型の奥行きが土槽Cの約1/2となる以外は土槽

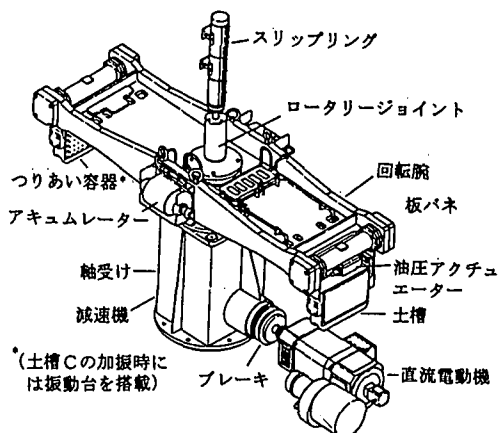


図1 実験に用いた遠心载荷装置

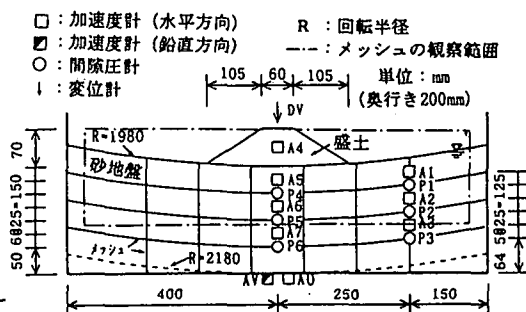


図2 模型断面と計測器配置
(土槽C:モデル6-1, 6-2の場合)

表1 実験条件

モデル	縮尺	奥行き*	底面	地盤のDr	土槽	ケース数	実施年度
1-5	1/50	6cm(3m)	平面	52~67%	A	4	H1, 4
1-6	1/50	10cm(5m)	平面	64~70%	A	3**	H4
63-1	1/30	10cm(3m)	平面	62~63%	B	9***	S63, H3, 4
6-1	1/30	20cm(6m)	平面	58%	C	1	H6
6-2	1/30	20cm(6m)	円弧	57%	C	1	H6

* カッコ内は重力下に換算した奥行き。

** 2ケースは背面が塗装鋼板、1ケースは前・背面がアクリル板。
(他のモデルは背面が無塗装の鋼またはアルミ板で、前面はガラス板)

*** 沈下の生じなかった1ケースを除く8ケースを検討対象とした。
(図4では、平成3, 4年度に実施した3ケースを検討対象とした)

Cと同じ条件とした。土槽Aを用いた実験では、模型の縮尺を1/50として、模型の奥行きが10cmの場合と、土槽の内部にアルミ板を入れて模型の奥行きを6cmに減らした場合（重力下に換算した奥行きが土槽Bを用いた場合と一致する）の2通りを実施した。なお、いずれの土槽も前面はガラス板で、土槽Aで奥行きが10cmの場合には合成樹脂ペイントで塗装した鋼板を背面として用いたのに対し、他の場合には無塗装の鋼板またはアルミ板を背面として用いた。そこで、背面の摩擦条件の影響を調べるために、土槽Aで奥行きが10cmの場合について、前・背面に厚さ約5mmのテフロン板を入れて摩擦を軽減した実験も行った。

縮尺1/30の模型は60Hz、縮尺1/50の模型は100Hzの正弦波20波を用いて加振を行った。これらを重力下に換算するといずれも2Hzの正弦波となるが、実際の加振加速度波形は図3に示すようにきれいな正弦波とは若干異なる。加振は一つの模型について数回実施したが、以下では1回目加振時のデータを検討対象とし（図6を除く）、平均的な振幅を加振加速度とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 奥行きの影響

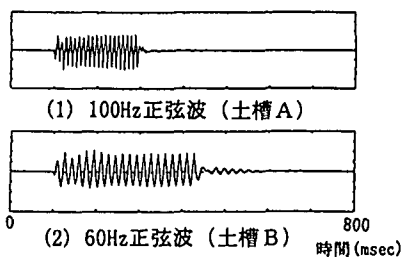
盛土天端の沈下量と加振加速度の関係を、縮尺が1/30と1/50のそれぞれの場合について図4及び図5に示す。縮尺1/30の模型では、模型の奥行きが大きい場合のほうが沈下量も大きかった。これは、土槽の前・背面と模型の間の摩擦の影響が、模型の奥行きが大きくなるほど相対的に小さくなるためと考えられる。一方、縮尺1/50の場合には逆の傾向が得られたが、奥行きの大きい模型は前述したように土槽の背面が塗装されていたことから、他の場合よりも地盤との間の摩擦が大きく、沈下が生じにくくなったものと考えられる。

図5には前・背面にテフロン板を用いた場合の結果もあわせて示したが、同じ奥行きで比較すると沈下量が約40%増加しており、摩擦の影響が無視できない大きさであることがわかる。ただし、いずれの場合も盛土は奥行き方向にほぼ一様に変形し、表面の亀裂も奥行き方向に平行に生じており、これらの定性的な変形状況には摩擦の影響は特に見られなかった。

3.2 底面形状の影響

底面を円弧状にした場合の盛土天端の沈下量と加振加速度の関係を図4中に示したが、同じ奥行きで底面が平面の場合よりも沈下量は小さくなった。

土槽前面のガラス板に接する砂地盤部に染色砂を用いて描いたメッシュの3回目加振後の変形状況を図6に示す（加振レベルは、最大約9Gで、重力下に換算すると約300gal）。底面を円弧状にすると、盛土下の地盤の残留水平変位量が最大となる位置が、底面が平面の場合よりも深くなった。



* 土槽Cの加振波形は図7を参照

図3 加振加速度波形の例

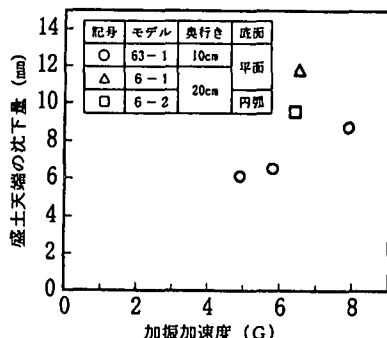


図4 盛土天端の沈下量と加振加速度の関係（縮尺1/30の場合）

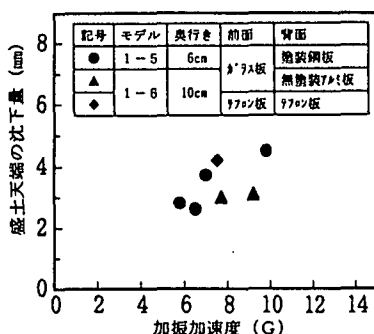


図5 盛土天端の沈下量と加振加速度の関係（縮尺1/50の場合）

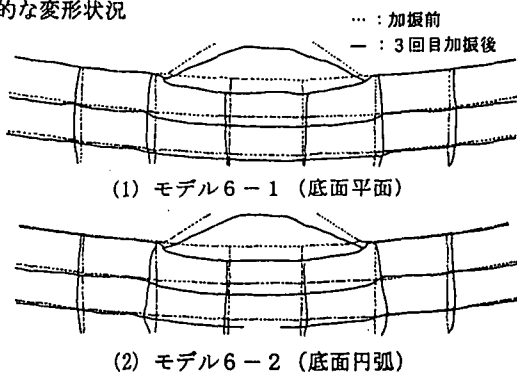


図6 模型の変形状況

加振時に模型内で測定した過剰間隙圧と応答加速度の経時変化を図7に示す。盛土下の地盤の上部の過剰間隙圧 (P 4) は、底面が円弧状の場合には加振初期に一旦負圧を示し、加振終了時においても底面が平面の場合よりもかなり小さい値であるのに対し、盛土下の地盤の下部の過剰間隙圧 (P 6) は、逆に底面が平面の場合のほうが加振終了時には小さい値を示した。また、盛土 (A 4) と盛土下の地盤 (A 5, 6) の応答加速度は、底面が円弧状の場合のほうが、加振中の振幅の減少が著しかった。これは、底面が円弧状の場合に盛土下の地盤の下部における過剰間隙圧 (P 6) の発生量が大きかったこと、及び、盛土下の地盤の水平変位量が最大となる位置が深かったことと関連しているものと考えられ、過剰間隙圧の発生により下部の軟化がはやく進行して水平変位量が増加し、それよりも上方の加速度応答が小さくなったと推測している。なお、水平地盤部の過剰間隙圧 (P 2) と応答加速度 (A 2) には、底面形状の影響は特に見られなかった。

以上のような挙動の違いが現れたメカニズムは現時点では不明であるが、模型の中心から離れるほど重力下に換算した加振方向が水平方向からずれることも結果に影響している可能性が考えられる。これらの影響を避けるためには、模型の長手方向と加振方向を円周方向と垂直 (図1中の鉛直方向) にする必要がある。

加振中の盛土の応答加速度振幅が減少し、盛土下の地盤の残留水平変位量が最大となる位置が深くなる現象は、砂地盤部の相対密度を30%程度に低くした場合にも観察されている¹⁾。ただし、密度を低くした場合

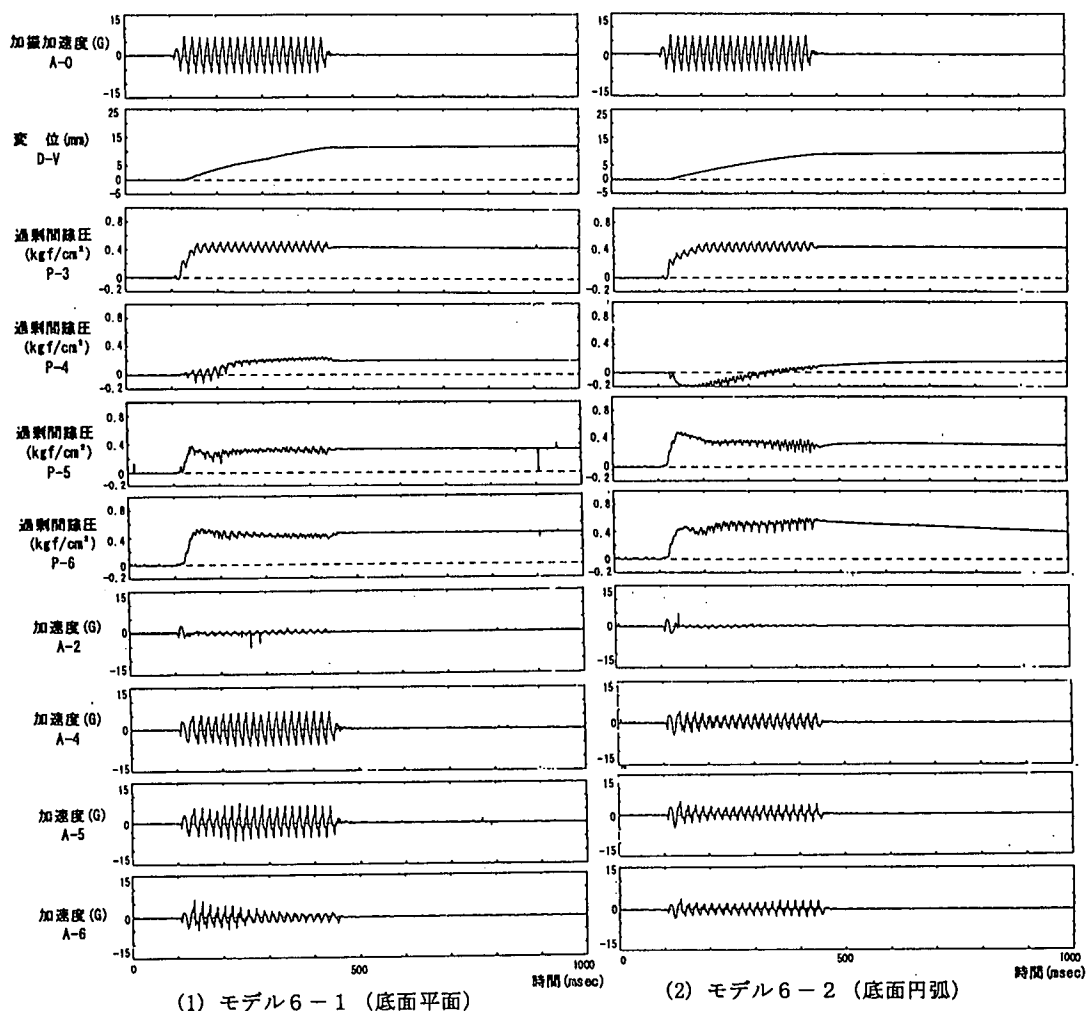


図7 加振時の測定データの時刻歴

には盛土天端の沈下量が大きくなっており、今回の実験とは沈下量の傾向が逆であった。盛土下の地盤の挙動と盛土の沈下量の関係について今後も検討を続ける必要がある。

3.3 縮尺の影響³⁾

重力下に換算した模型の奥行きが3 mの場合について、換算加振加速度と盛土天端の換算沈下量の関係を図8に示す。同じ縮尺でも実験の実施時期によって異なる記号を用いたが、全般的には縮尺1/50の模型のほうが換算沈下量が大きかった。

図8と同じ場合について、水平地盤部の過剰間隙圧(P2)が液状化時の値になるまでの繰返し回数と換算加振加速度の関係を図9に、盛土の換算沈下量との関係を図10に示す。液状化が生じるまでの繰返し回数は、図9より縮尺1/50の模型のほうが小さいが、その後の盛土の沈下は、図10より縮尺1/30の模型のほうが比較的是やく進行することがわかる。

なお、同じ縮尺の模型でも実験の実施時期によって結果が若干異なった理由としては、地盤材料の購入時期の違いによる物性の変化の影響と、飽和時のシリコンオイルの注入圧の違いによる地盤の乱れの程度の変化の影響が考えられる。

4. まとめ

(1) 盛土の沈下量は、土槽の前面をガラス板として背面の鋼板を塗装すると無塗装の場合よりも低下し、前・背面にテフロン板を用いると逆に著しく増加した。また、背面が無塗装の場合に模型の奥行きを大きくすると沈下量が増加した。これらより、模型と土槽間の摩擦の影響が無視できない大きさであることがわかった。

(2) 模型の長手・加振方向が円周方向となる本実験において、底面を回転半径に応じた円弧状とすると、底面が平面の場合よりも盛土の沈下量が小さくなり、盛土下の地盤の過剰間隙圧と応答加速度、及び残留水平変位の特性にも違いが現れた。盛土下の地盤の挙動と盛土沈下量の関係について今後も検討する必要がある。

(3) 縮尺1/50の模型のほうが、縮尺1/30の模型よりも換算沈下量が若干大きかった。液状化が生じるまでの繰返し回数も縮尺1/50の模型のほうが小さかったが、その後の盛土の沈下は逆に比較的ゆっくりと進行した。

参考文献

- 1) 古賀ら：盛土のある地盤の液状化時の挙動に関する実験的検討、土木研究所資料第3264号、1994。
- 2) 古賀ら：飽和砂地盤と盛土の地震時挙動に関する動的遠心模型実験、土と基礎、Vol. 40, No. 5, 1992。
- 3) Koseki, J. et al.: Liquefaction of sandy ground and settlement of embankments, Proc. of Int. Conf. CENTRIFUGE 94, 1994。

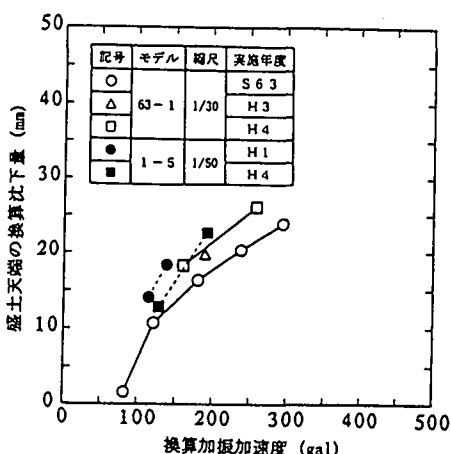


図8 盛土天端の換算沈下量と換算加振加速度の関係(換算奥行き3 mの場合)

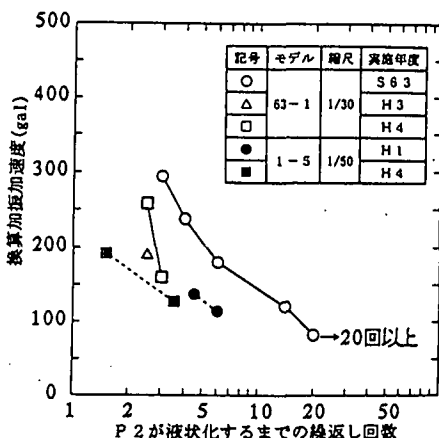


図9 P2で液状化が生じるまでの繰返し回数と換算加振加速度の関係(換算奥行き3 mの場合)

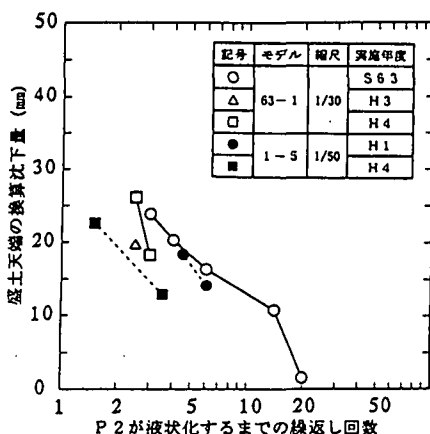


図10 P2で液状化が生じるまでの繰返し回数と盛土天端の換算沈下量の関係(換算奥行き3 mの場合)