

地中構造物の浮上に関する実験的研究

毛利栄征¹・河端俊典²・松島健一¹

¹農博 農林水産省農業工学研究所 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-2)

²工博 株式会社クボタ (〒160-8310 東京都中央区日本橋室町3-1-3)

A series of shaking table tests was performed to investigate the effect of multi-directional loading on the uplift behavior of buried structure during liquefaction of sand deposit. Two type of containers were used to hold a simulated stratum of sand with buried structure during dynamic base shaking experiments, a stuck of rings and a box with walls. Two kinds of shaking patterns are "single directional shaking" and "two directional shaking" include vertical shaking component. A few results were presented from shaking table tests using a stucked rings container. There is evidence that even vertical shaking component of input acceleration can influence results when the buried structure float up to the ground surface during shaking.

Key Words : *shaking table test, vertical shaking, stucked ring container, liquefaction, buried structure, float up*

1. はじめに

地中に埋設される構造物の地震時の挙動は周辺地盤の特性に大きな影響を受ける。特にパイプラインのような線状の構造物の場合には、地盤の変形によるパイプの抜けだしなど地盤と構造物の相互作用が大きな問題となる。また、地中構造物周辺の地盤が液状化を生じる場合には、地盤の支持力低下による変形やすべりの増大だけでなく、大きな浮力が地中構造物に作用することも考慮しなければならない。地盤の液状化にともなって有効応力が大きく低下する場合には地中構造物は流体内に設置された状態となり大きな浮上を生じることとなる。

実際の地震による被害実態調査でも同様の現象が確認されており、新潟地震(1964年6月14日, M=7.5)では砂層地盤が液状化してパイプラインやマンホールが地表面まで浮上し、多くの構造物が沈下や傾斜を生じるなどの特徴的な被害を生じたことが報告されている。Mohriら¹⁾は北海道南西沖地震(1993年7月16日, M=7.2)の被災調査によって埋め戻し材料の液状化に伴って幹線のパイプラインが地表面まで浮上し、大きな被害が生じていることを報告している。Tohda²⁾(1995)は兵庫県南部地震による水道管路の被災について報告している。

液状化時の地中構造物の挙動に関する実験的研究については、片田・伯野³⁾が模型振動台実験を実施し、飽和した地盤よりも含水比の低い不飽和地盤の方が不完全液状化時の加速度応答が大きいことを指摘している。また、関口ら⁴⁾は埋設管を対象とした液状化対策工法の有効性について振動台実験によって検討している。Kosekiら⁵⁾は模型振動台

実験によって現地盤と埋め戻し材の密度が埋設管の挙動に与える影響を明らかにし、その浮上防止方法と有効性を検討している。しかし、これらの研究では水平一方向の振動に対しての安全性評価を実施しており、鉛直振動を同時に負荷したときの地中構造物の挙動についての研究は見当たらない。

本論文ではせん断土槽を用いた二次元振動台実験を実施し、鉛直方向の振動が地中構造物や周辺地盤の挙動に与える影響を調べ、構造物の地震時挙動を確認した。その結果、水平一方向だけに加振した場合に比べて、鉛直振動が同時に入力されると地盤の過剰間隙水圧の応答は増幅され、地盤が液状化して構造物の水平加速度応答が減少した状態でも構造物は鉛直方向に大きな振動を受け、その浮上速度は2倍以上になることがわかった。また、剛な土槽を用いた実験でも構造物の浮上速度がせん断土槽の場合に比べて2倍以上早く、土槽境界の影響を強く受けていることが確認された。

2. 実験の概要

(1) せん断土槽

実験に用いた土槽は高さ80cm、直径81cmの円形の内空断面を持つせん断土槽である。せん断土槽の概要を図-1に示す。土槽は厚み50mmの円形プレートを16段積み上げて構成されており、プレートはアルミニウム製である。プレート間はボールベアリングによって支持されており、水平面で自由にスライドできる構造としている。土槽の内側には漏水を防止するための厚さ1mmのゴムメンブレンを取り付けている。プレートの重量は約24kgである。

表-1 地盤の相対密度

	1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	6層目	7層目	平均値
CASE-A	48.5	46.6	26.3	61.7	17.6	39.5	33.1	44.0
CASE-B	44.7	46.6	29.2	56.0	41.8	43.7	25.3	46.0
CASE-C	46.6	31.1	63.0	48.0	30.2	40.8	43.7	48.0
CASE-D	59.1	26.3	40.8	43.5	43.7	15.2	62.0	47.0
CASE-E	57.2	50.4	31.1	40.4	30.2	43.6	35.0	47.0
CASE-F	58.2	49.5	42.7	55.4	31.1	22.6	27.3	48.0

表-2 実験ケースと加振条件

	BOX	Unit weight	Acc.-Y	Acc.-Z
CASE-A	RIGID	0.5	200gal	-
CASE-B			200gal	100gal
CASE-C	LAMINAR		200gal	-
CASE-D			200gal	100gal
CASE-E		200gal	-	
CASE-F		1.0	200gal	100gal

(2) 地盤と模型の概要

模型地盤は、乾燥状態の豊浦標準砂 ($D_{50}=0.198\text{mm}$) を水深を約 20cm, 砂の落下高さを 30cm 程度として、水中落下で作製した。表-1 に深さ 10cm 毎の相対密度を示すが、土槽全体の平均では 6つのケースで 44~48%の相対密度が得られている。

地盤と構造物に設置した測定計器は、ひずみゲージ式加速度計、および間隙水圧計である。地表面の沈下量やせん断土槽のプレートの挙動についてはレーザ変位計によって計測した。地中に埋設している構造物は図-1 に示すように直径 10cm, 高さ 20cm のアクリル円筒で、加速度計、間隙水圧計、土圧計を設置している。

水平方向 (Y方向) の加振入力波は図-2 に示すように 0gal から 200gal まで 10秒間で直線的に増加する初期テーパ部分を持つ 5Hz のサイン波とした。鉛直方向 (Z方向) の加振入力波は水平方向の入力波の最大加速度を 1/2 としたものを用了。

実験ケースと入力波の一覧を表-2 に示す。水平と鉛直の同時加振の場合には同位相で開始しているので上下動を含んだ直線的な振動を負荷していることになり、合成加速度は 224gal で一方向のみの場合の 1.12 倍に相当する。CASE-A, B はプレートの動きを拘束して剛な土槽と同じ境界条件としたものである。CASE-C, D と E, F はせん断土槽による実験であるが、構造物の質量が異なっている。

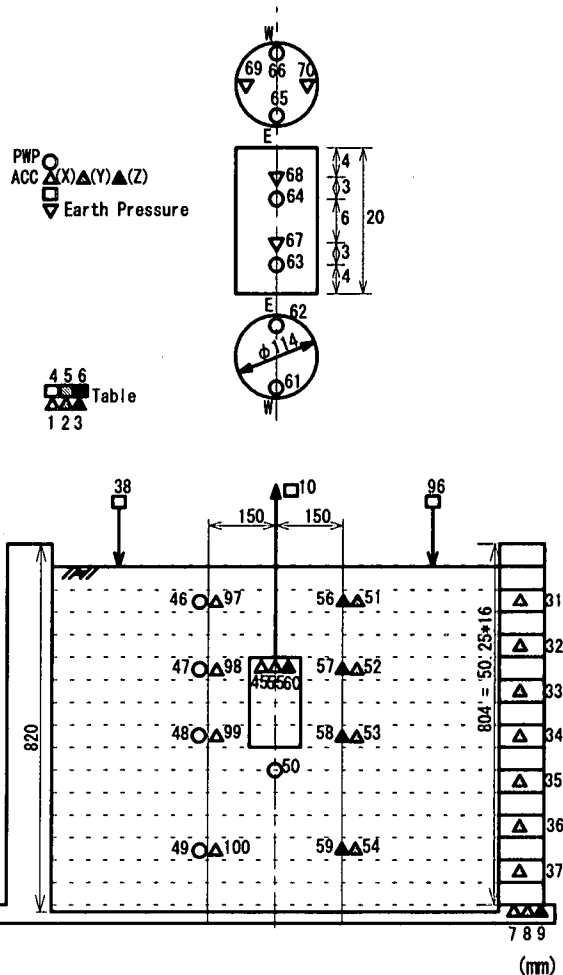


図-1 せん断土槽概略

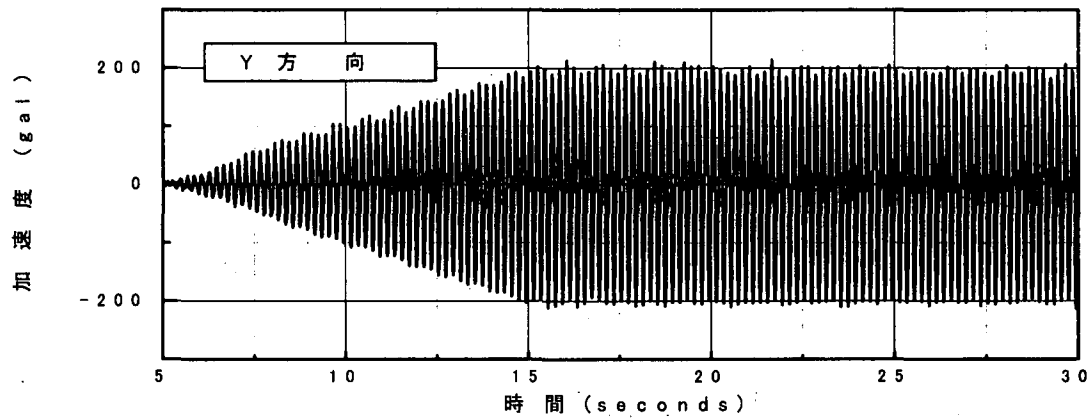


図-2 水平方向入力加速度

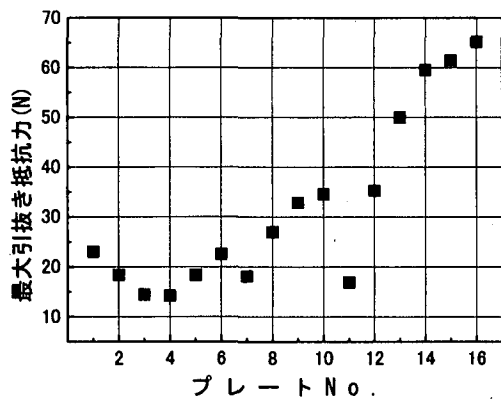


図-3 プレート最大引抜き抵抗力

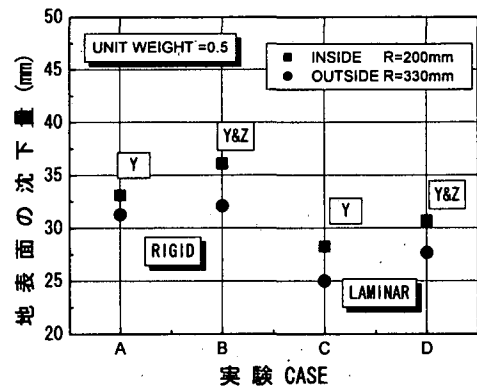


図-4 地表面の沈下量

3. 実験結果と考察

(1) せん断土槽の特性

せん断土槽に要求される基本的な特性として

- ① プレートの質量が極力小さいこと
- ② プレート間の摩擦が極力小さいこと
- ③ 土槽の断面が振動実験中に変化しないこと
- ④ 地盤の沈下を拘束しないこと

などが指摘されている。③の項目についてはアルミニウムのリングによってプレートを作製しているので十分な剛性を有しており、振動中に変形などは生じていない。また、④については土槽内面にはゴムメンブレンを設置しているので完全では無いものの大きな沈下拘束はしていないと考えられる。①について Whitman⁶⁾は、地盤の重量の15%程度のプレート重量をもつせん断土槽を示しているが地盤に与える影響には言及していない。今回用いたせん断土槽のプレートの質量は24kgであるから、プレートの厚みに内包される地盤の質量(平均飽和重量(1.91)として49.21kg)と比較すると約49%の質量比を持っており慣性力などが地盤の挙動に何らかの影響を及ぼしているものと考えられる。

また、②の項目は地盤の水平方向のせん断変形を拘束しないために重要な要件であるが、せん断土槽のみの状態での振動実験では10gal程度でプレート間の滑り出しが生じている。図-3に16枚のプレートの引き抜き試験の結果を示す。プレート間に作用する抵抗力の最大値を表示しているが、土槽底部のプレートでも65N程度の抵抗力であるから直径81cmの地盤のせん断強度に比較して無視できる値である。

(2) 地表面の沈下

プレートを拘束した土槽(CASE-A, B)とせん断土槽の実験(CASE-C, D)の地盤の最終沈下量を図-4に示す。土槽の中心部から20cmと30cmの位置の地表面の沈下量の平均値を示しているが、構造物の浮上によって土槽の中心部に空隙ができることから、この空隙に液状化地盤が流れ込む影響で、中心部ほど大きな沈下を生じているデータとなっている。プレートを拘束した場合にはせん断土槽に比べて沈下量は約2倍になっており、境界の影響で大きな振動が土槽上部に生じたことと対応している。また、両ケースとも鉛直方向の振動を入力した場合の方が大きな沈下を生じていることがわかる。

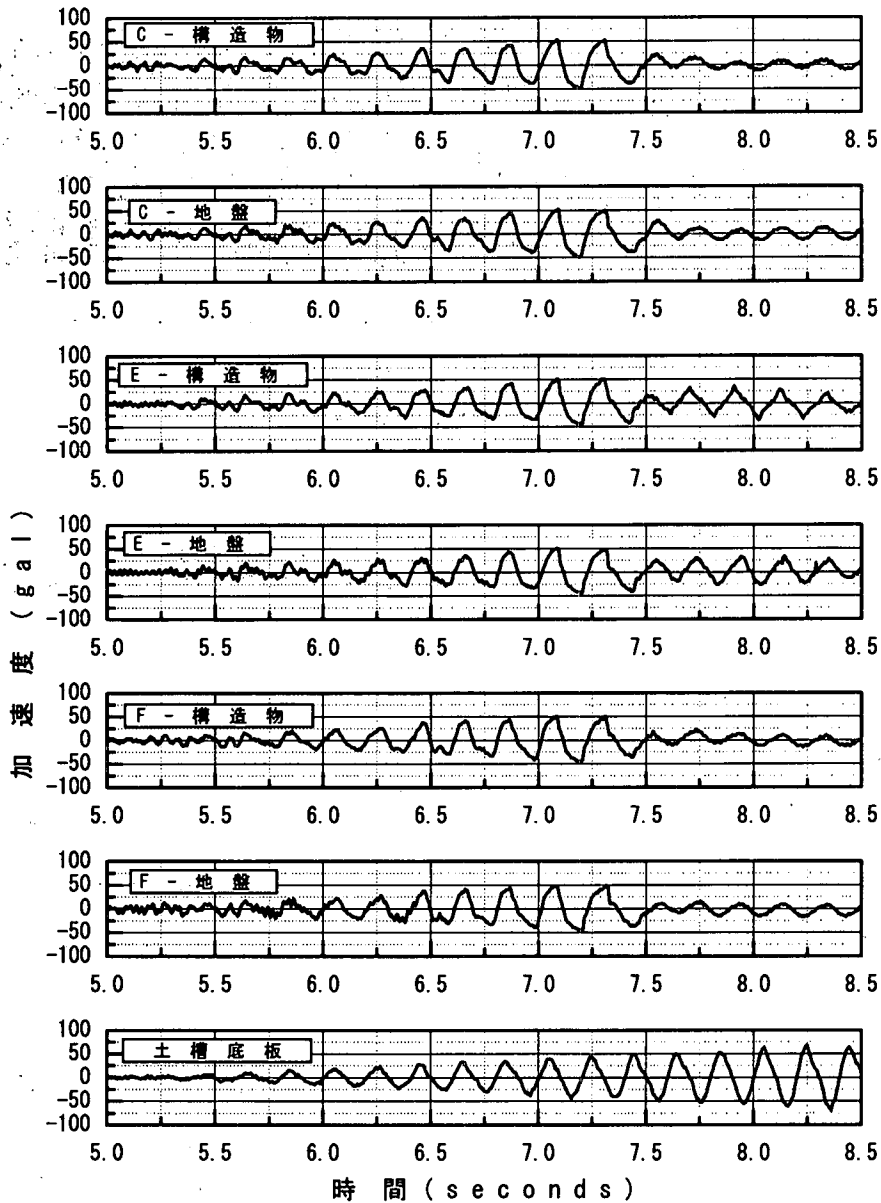


図-5 地盤と構造物の加速度応答

(3) 地盤と構造物の加速度応答

地盤と構造物の加速度応答を図-5に示す。加振加速度が漸増して行く過程で地盤が液状化しているために、7.4秒付近で地盤と構造物の応答が急激に低下している。液状化時の地盤の加速度は58galである。液状化直後の加速度波形を構造物と地盤で比較してみると、CASE-Cではこのような位相のずれは生じていないが、CASE-Eでは両者にわずかな位相差が生じている。このことはCASE-Eの構造物の質量がCASE-Cの2倍であることからその慣性力の影響と考えられる。また、鉛直振動を入力したCASE-Fの場合には地盤が液状化した7.4秒以降の地盤の加速度応答が小さく、CASE-Eの水平一方向の場合に比べて、最大で50%程度の反応しかしていないことがわかる。

(4) 間隙水圧と土圧の応答

構造物周辺の地盤と構造物に作用している過剰間隙水圧の時刻歴応答を図-6に示す。CASE-E, Fでは同様の過剰間隙水圧応答を示しており、時刻歴6.5秒から過剰間隙水圧の発生が始まり7.4秒時には有効応力は0近くまで低下している。CASE-Fの場合は鉛直振動が入力されているので、間隙水圧にもその影響が現れ動水圧が観測されているが平均的な過剰間隙水圧の大きさはCASE-Eと変わらない。同様の傾向は構造物に設置した間隙水圧計の応答にも見ることができる。周辺の地盤の液状化の進行に伴って、地盤の側土圧計数も変化し、完全に液状化状態では1.0となって飽和密度の流体として構造物に作用していることがわかる。

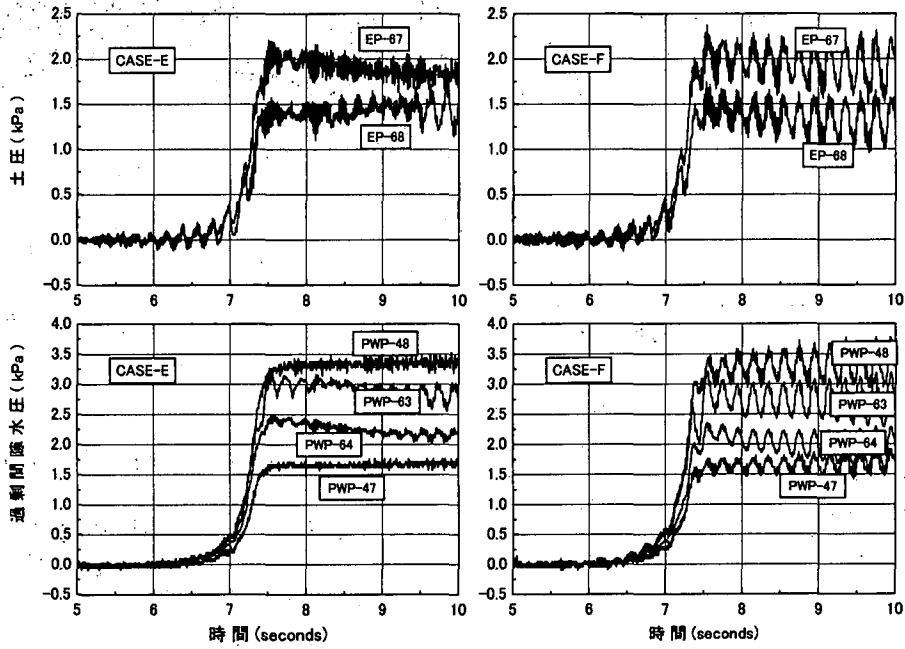


図-6 過剰間隙水圧と土圧の加速度応答

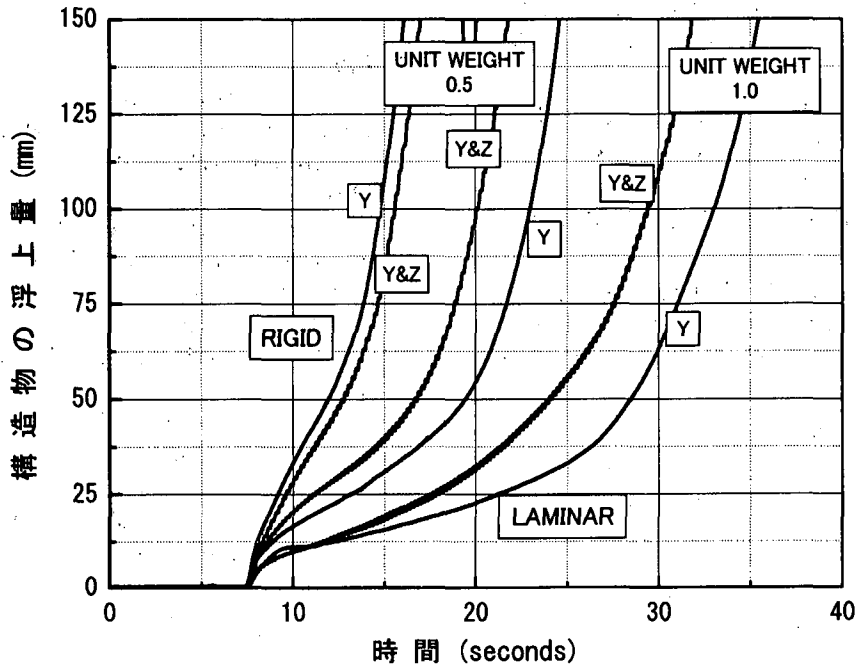


図-7 構造物の浮上量の時刻歴

(5) 構造物の浮上

構造物の浮上量の時刻歴を図-7に示すが、浮上の開始点は6つのケースともほとんど同時である。構造物周辺の地盤が液状化を生じて、有効応力比が0.2程度まで低下したときに構造物は浮上を開始する。CASE-A, Bのプレートを拘束した実験では土槽の上部で大きな加速度が生じていることから地盤の液状化も急激に発生し、構造物の浮上も速い

ことがわかる。せん断土槽での実験では構造物の質量が、0.5のCASE-C, DはCASE-E, Fに比べて1/2の時間で完全に構造物が地表面まで浮上している(浮上量100mmまでの到達時間)。構造物質量が1.0の場合には周辺地盤が完全に液状化する10秒以後もしばらくは中立状態にあり大きな浮上にいたらないことがわかる。

写真-1には、浮上した構造物の状況を示している。また、鉛直方向の加振入力があるCASE-D, Fでは水平一方向の場合に比べて大きな浮上を生じやすく、CASE-D, Fが100mmの浮上を生じた時点では、CASE-C, Eは55mmと60mmであるから、鉛直振動を同時に入力した場合には、構造物の浮上速度は水平一方向加振に比べて1.7~1.8倍の早さになることがわかる。

プレートの動きを制限した実験(CASE-A, B)では、鉛直振動が構造物の浮上に与える影響を見いだすことができなかった。このことは土槽の高さと長さの比が1.0と小さいために境界での振動の反射が地盤全体に伝達しやすく、構造物周辺の地盤も境界の影響を受けて大きな振動を生じたことから、鉛直振動が負荷されたことによる差異が優位に現れなかったものと考えられる。

4. まとめ

せん断土槽を用いた振動台実験によって、地中構造物の浮上現象について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) せん断土槽を用いた相対密度48%程度の標準砂の地盤は60gal程度の加速度で液状化する。
- (2) 地盤の液状化によって有効応力比が0.2以下になると地中構造物は浮上を開始するが、それまでは全く浮上しない。
- (3) 地中構造物の浮上速度はその密度に依存している。
- (4) 加振入力波に、鉛直振動成分が50%含まれる二方向加振の場合には、水平一方向加振に比較して構造物の浮上速度は約2倍になる。
- (5) 加振入力波に鉛直成分が含まれる場合、間隙水圧の応答は大きくなる。
- (6) 地盤と構造物、せん断土槽のプレートは全く同位相で挙動しているが、地盤の液状化直後には地盤と構造物の位相がずれる。
- (7) 加振入力波に鉛直振動成分が含まれる方が沈下量は大きくなる。

しかしながら、今回実験に用いたせん断土槽は、

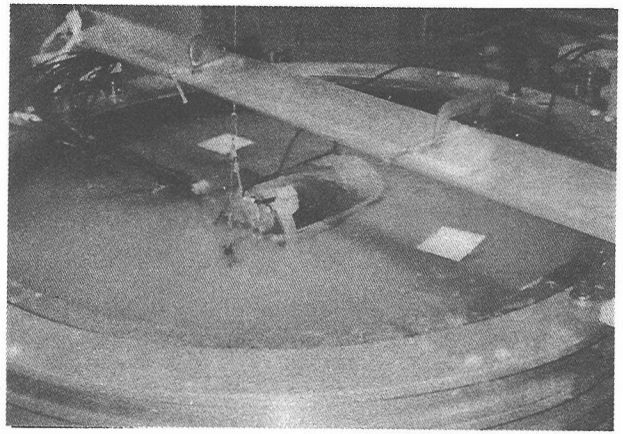


写真-1 構造物の浮上状況

高さと同径が1:1で、境界の影響を受けやすい形状であることや、プレートの質量が大きくその慣性力が実験地盤に影響していることが懸念される。せん断土槽についてはプレートの質量や摩擦抵抗、境界の影響などを明確にする必要があるが、さらに地盤の均一性との関係からも、せん断土槽の機能が模型地盤に与える影響評価を今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Mohri, Y. et al: Damage to buried pipeline due to liquefaction induced performance at the ground by the Hokkaido-Nansei-Oki earthquake in 1993., *Proc., of IS-Tokyo*, pp.31-36, 1995.
- 2) Tohda, J et al: Characteristic features of damage to the public sewerage system in the Hanshin. *Special issue of S&F*, pp.335-347, 1996
- 3) 片田敏行 他: 液状化過程における地中構造物の動的挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第306号, 1981
- 4) 関口宏二 他: 埋設管路の液状化対策工法に関する実験的考察, 土木学会論文集, 第382号, III-7, 1987
- 5) Koseki, J et al: Uplift Behavior of Under ground Structures Caused by Liquefaction of Surrounding Soil During Earthquake. *S&F*, Vol.37, 1997
- 6) Whitman, R V., Lambe, P C.: Effect of boundary conditions upon centrifuge experiments using ground motion simulation., *Geotechnical Testing Journal*, Vol.9, No.2, pp. 61-71, 1986.