

# 地盤拘束工法による既設タンク液状化対策の沈下抑制効果

酒見卓也<sup>1</sup>・田中 満<sup>2</sup>・湯浅欽史<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 大成建設株式会社 技術研究所 (〒245 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

<sup>2</sup>正会員 理修 大成建設株式会社 技術研究所 (〒245 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 東京都立大学助教授 (〒192-03 東京都八王子市南大沢1-1)

本論文では屋外貯蔵タンクの液状化対策工の一つである地盤拘束工法の沈下抑制効果を遠心力載荷試験機を用いて検証した。既設タンクの多くは臨海の埋立地にあり、これらのタンクは地震時の液状化による不等沈下が懸念され、関係法令による保安・管理基準の改訂に伴い緊急な対応策が求められている。効果の確実な締固め工法は施工時の振動等が周辺施設に影響を及ぼすため既設タンクには適用できない。ここでは適用可能な工法として鋼矢板締切工法をとりあげ、遠心力場における透水問題について実験・考察した後、50Gの遠心力場において液状化実験を行った。その結果、鋼矢板締切工法を適用することによりタンクの絶対沈下量及び不等沈下が未対策の場合の1/5以下に抑えられることがわかった。

**Key Words :** tank, liquefaction, steel sheet pile wall, settlement, centrifuge, model test

## 1. はじめに

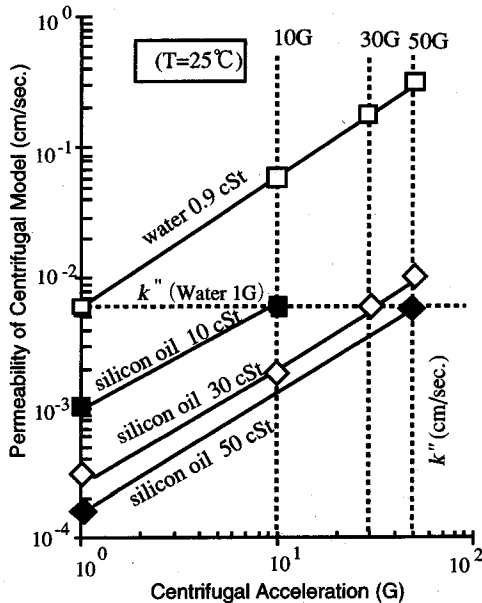
数多くのタンクを有する大規模な石油コンビナートが立地する東京湾岸の埋立地は、千葉県産の山砂や海底の浚渫砂で埋立てられ、過去のいくつかの地震で見られたように地盤の液状化によるタンクの傾斜や沈下が懸念されている。これらのタンクは昭和40年代に建造されたものが多く、最新の保安・管理基準による安全性のチェックとそのレベルに応じた対策が義務づけられている。

タンク地盤の液状化対策には、振動締固め・地盤固化・排水促進などの工法があるが、既設タンクを対象とする場合には隣接してタンクが存在していたり周辺施設が稼働中であるなど、これらに悪影響を与えずに適用できる工法は限られる。また、対策を必要とするタンクの数も多く、所有する企業等では一時に多くの予算を確保できないこともあり、経済的で対策効果の確実な工法が求められている。

本研究では既設タンクの液状化対策として経済的で施工の容易な鋼矢板締切工法に着目し、遠心力載荷装置による液状化実験を行ない、上記対策工法によるタンク不等沈下抑制効果について整理した。

遠心力載荷装置は、地盤模型を扱う場合、実際の有効上載荷重を再現できるという長所があるが、透水時間が現象に影響する地盤の液状化を再現する場合には、地盤材料と間隙流体に関わる問題が重要となる。例えば、砂地盤の材料を相似則に合わせて平均粒径を小さくすることも考えられるが、粒径が極端に小さくなると粒子間に粘着力が発生し、砂としての挙動が再現できなくなる。したがって、通常は地盤材料に実際の砂が用いられる場合が多い。しかし実物の砂と水を用いると、遠心力場での排水距離が実物の $1/n$ と短くなるため、加振により地盤内に生じる過剰間隙水圧の消散速度が実際の現象より早くなる。その結果、過剰間隙水圧が十分蓄積されず液状化が起りにくくなる。このような理由から、遠心力場における液状化実験での間隙流体としてシリコンオイルやセルロースが用いられているが、 $n$  Gの遠心力場における間隙流体の適切な粘性については未解決である。

本論文では、タンクの液状化実験の前にシリコンオイルの透液挙動（以後、透水と呼ぶ）について1 G場と遠心力場で透水試験を行い、 $n$  G場の液状化実験に用いる間隙流体の適切な粘性に関する知見を得たのでタンクの実験結果と併せて報告する。



図一 遠心力場における重力加速度と透水係数： $k''$ の関係（温度及び粘性による補正後の $k'$ を遠心力場で比較）

## 2. 遠心力場の間隙流体の相似則

遠心力場における相似則についてはいくつかの研究報告があるが、動的問題に関してはKutter<sup>2)</sup>、Schofield<sup>3)</sup>、Tan & Scott<sup>4)</sup> および北・八嶋・柴田・上田<sup>5)</sup>の研究がある。地盤材料の考え方としては、先に述べたように大きく2つに分けられる。一つの方法は実物と同じ材料を用いて間隙流体の粘性を変え実際の透水現象を再現するもので、実物材料を用いることは土質力学における模型実験の基本である。もう一つは地盤材料の平均粒径を小さくしたものをを用いて間隙流体には水を使用する方法で、この方法も一部で行われているが、筆者らはタンク地盤に使われている実際の砂の液状化挙動を調べるため、前者の方法を採用した。

このとき用いる間隙流体の適切な粘性については学会等でも議論の対象となっている。すなわち、 $n$  G場における間隙流体として、水を用いた場合、相似則での透水速度は $n^2$ 倍になる。このとき、間隙流体の粘性で相似則を合わせる場合には粘性を水の $n$ 倍にすることになるが、議論は「 $n$ 倍で良い」というものと、「 $n$ 倍より小さくないと合わない」<sup>6)</sup> というものに分かれており、結論が出されていない。

表一 遠心力場の相似則

Quantity	Symbol	Units	Scale
length	L	L	$N^{-1}$
volume	v	$L^3$	$N^{-3}$
mass	M	M	1
gravity	g	$LT^{-2}$	$N^{-3}$
force	F	$MLT^{-1}$	$N^{-2}$
stress	$\sigma$	$ML^{-2}T^{-1}$	1
modulus	E	$ML^{-1}T^{-1}$	1
strength	s	$ML^{-1}T^{-1}$	1
acceleration	a	$LT^{-2}$	N
time(dynamic)	t	T	$N^{-1}$
frequency	f	$T^{-1}$	N
time(diffusion)	tdi f	T	$N^{-2}$

これらの報告は全て 1G場において実施された透水試験の結果に基づく報告である。筆者らは遠心力場における粘性流体の透水挙動を把握するために、タンクの液状化実験に先立ち 1G場と遠心力場において水とシリコンオイルの透水試験を実施した。その結果、1G場においては文献<sup>6)</sup>のように $n$  cStのシリコンオイルの透水係数： $k_{o1}$ は水の透水係数： $k_1$ の $1/n$ にならなかった ( $k_{o1} \geq n \cdot k_1$ ) が、1G場における水の透水係数： $k_1$ に相当する  $n$  Gの遠心力場における  $n$  cStのシリコンオイルの透水係数： $k_{on}$  との間には、

$$k_1 \doteq k_{on} \quad (1)$$

の関係が成立することが確認された<sup>7)・8)</sup>。

図一には、一連の透水試験結果から得られた透水係数を温度と粘性について補正し、遠心力をパラメーターにとって比較したものを示した。図一によると、実物と同一の地盤材料を用いたとき間隙流体の粘性を $\nu$  (cSt) で表わすと、1G場の水の透水係数に相当する透水速度  $V = k \cdot i$  を  $n$  G場で得るためには、 $\nu = n$  cStの流体を用いて飽和地盤模型を作成することで原型と模型との透水係数の相似則を合わせられることが確認できる。したがって、後述するタンクの液状化実験は 50 Gの遠心力場で実施するものであるから、筆者らは 50 cStのシリコンオイルを用いて模型地盤を作成した。

尚、実験で用いた遠心力場に於ける動的実験の相似則を表一に示す。

表-2 遠心力載荷装置と振動台の緒元

effective radius	(m)	2.65
max. size of container	(mm)	L1,000 × B900 × H1,000
max. revolution	(r.p.m.)	260
max. acceleration	(G)	static : 200 dynamic : 50
max. payload	(kg)	s : 400 ; d : 180
max. capacity	(G-ton)	80
main motor	(KW)	300
frequency	(Hz)	30 - 300
max. displacement	(mm)	± 2.0
max. channel	(ch.s)	32

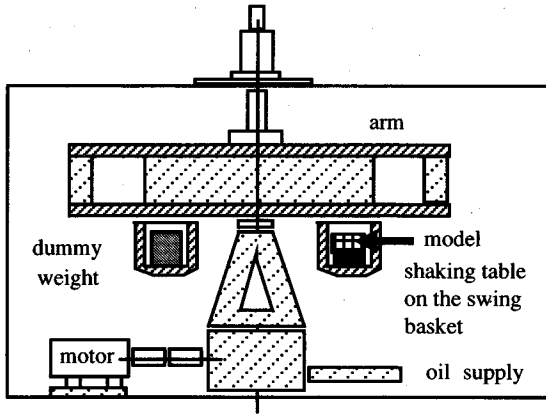


図-2 遠心力載荷装置概略図

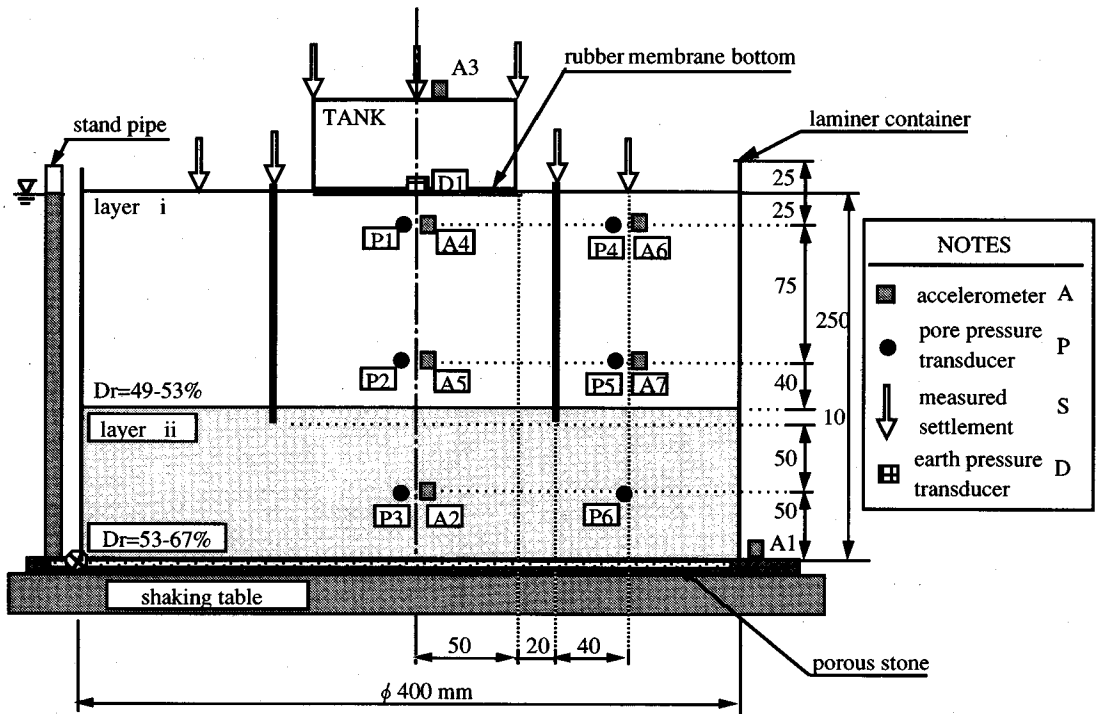


図-3 実験土槽のタンク及び鋼矢板模型と計器配置

表-3 実験ケース一覧

Case No.	Relative Density at 1G (%)	Relative Density at 50G (%)	Tank Load (kPa) *	Input Level (Gal)	Comments
R-1	i) 53 / ii) 80	_____	_____	15	ground model
S-1	i) 53 / ii) 80	i) 53 / ii) 80	36.9 S-load	_____	sheet pile wall
S-2	i) 53 / ii) 80	i) 54 / ii) 80	130.0 L-load	_____	sheet pile wall
D-1	i) 49 / ii) 80	i) 53 / ii) 80	22.0 S-load	90	without sheet pile wall
D-2	i) 53 / ii) 80	i) 63 / ii) 80	22.0 S-load	115	sheet pile wall
D-3	i) 53 / ii) 80	i) 65 / ii) 80	39.0 S-load	115	sheet pile wall
D-4	i) 53 / ii) 80	i) 67 / ii) 80	22.0 S-load	120	without sheet pile wall
D-5	i) 53 / ii) 80	i) 67 / ii) 80	_____	200	ground model
D-6	i) 49 / ii) 80	i) 56 / ii) 80	130.0 L-load	100	sheet pile wall
D-7	i) 53 / ii) 80	i) 67 / ii) 80	22.0 S-load	115	partial sheet pile wall
D-8	i) 53 / ii) 80	i) 66 / ii) 80	130.0 L-load	112	partial sheet pile wall
D-9	i) 56 / ii) 80	i) 67 / ii) 80	110.0 L-load	98	without sheet pile wall

Case No.; R : resonant test, S : static loading tests, D : dynamic tests . \*) : prototype scale  
Relative density ; i) : upper sand layer, ii) : lower sand layer(compactd).

### 3. 実験装置及び模型材料

実験に用いた遠心力载荷装置を図-2 に、振動台を含む装置の諸元を表-2 に各々示す。剛体土槽の模型地盤に構造物模型を設置する場合、一般には土槽の幅を模型幅の5倍以上とすることで境界の影響を少なくできるものと考えられているが、今回の場合、装置には表-2 に示した寸法上の制約があり、小さな土槽に比較的大きな模型を用いるため、境界条件の影響を受けにくくする目的でせん断土槽 ( $\phi$  400mm×H270mm) を使用した。模型タンクの直径は、せん断土槽の直径の1/3とした。せん断土槽は高さ $\phi$ の比 ( $H/\phi$ ) が大きくなるとロッキングが心配されるが、今回は高さを直径の2/3程度とすることで対処した。実験の結果、顕著なロッキングは見られなかった。

図-3 に模型土槽の概要を、表-3 には実験ケースを示す。対策工の対象とするタンクの規模は容量で1000kl~3000klクラスであるが、前述のように装置の制約上、模型は直径12cm、高さ10cmとし、実物では140kl程度のタンクを模型化したもの(表-3 に示すS-load) に相当する。タンク底版に作用する鉛直荷重(接地圧)が地盤の液状化に影響するので、荷重のみを3000klクラスのレベルに大きくしたもの(L-load)も実験ケースに加えた。

尚、表中のシートパイルは平面矢板(F型)で、

表-4 鋼矢板の諸元

items	model	proto type
diameter	16 cm	8 m
length	15 cm	7.5 m
thickness	0.3 mm	9.5 mm
material	bronze	steel
Young's modulus $\times 10^6$	117.72 kN/m <sup>2</sup>	206.01 kN/m <sup>2</sup>

打設形状は2種類設定した。すなわち、一つは筒状に連結しフープテンションを期待したもので、もう一つは筒状の矢板の一部に欠損部(歯抜け)を設けたものでフープテンションは期待しない。後者はタンクに配管類がある場合に矢板数枚が打設できない状況を想定したもので、表-3 中ではパーシャル・ウォール(欠損矢板)と表記した。用いた矢板模型の緒元を表-4 に、打設形状を図-4 に各々示す。

地盤材料にはタンク地盤埋立材料の千葉県産の山砂(以下浅間山砂と呼ぶ)をふるったものを使用した。実験に用いた浅間山砂の物理特性を表-5 に、相対密度別の液状化強度曲線を図-5 に示す。

一方、間隙流体としては動粘性係数50cStのシリ

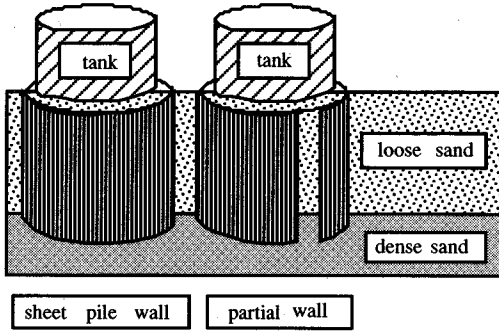


図-4 鋼矢板工法の種類

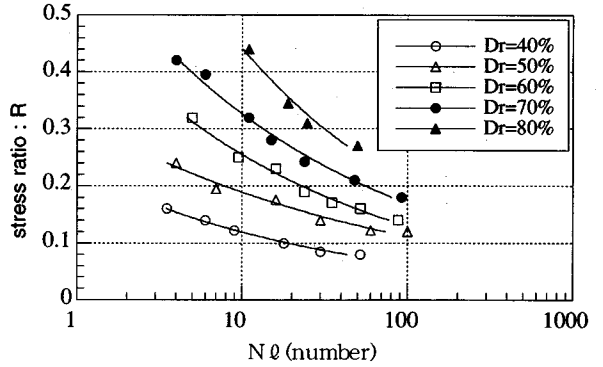


図-5 実験に用いた浅間山砂の液状化曲線

表-5 浅間山砂の物理的性質

specific gravity		2.683
max. grain size	(mm)	4.75
mean grain size	(mm)	0.26
fine gravel content	(%)	0.8
coarse sand content	(%)	18.4
fine sand content	(%)	75.2
silt content	(%)	5.6
min. dry density	(g/cm <sup>3</sup> )	1.320
max. dry density	(g/cm <sup>3</sup> )	1.680

表-6 実験に用いた間隙流体の性質  
(silicone oil KF-96: T=25° C)

pore fluid	density $\rho$	dynamic coeff. of viscosity $\nu$ cSt	coefficient of viscosity $\eta$ cP	surface tension $\mu$ N/cm
KF96-10	0.935	10	9.35	201
KF96-30	0.955	30	28.7	208
KF96-50	0.960	50	48.0	208
water	0.997	0.90	0.90	721

$$cP = \rho \cdot cSt$$

コンオイル（信越化学㈱社製：CF-96:50cs）を用いた。シリコンオイルの物理特性を表-6に示す。

本実験での相似則は $n=50$ とし、表-1の關係を用いて模型を作成した。タンク模型の底板はアルミ製の剛なものと同様にゴムメンブレン製の柔なもの2つを用意したが、事前検討の結果、後者を本実験に使用した。すなわちタンク直下の応力分布が過剰間隙水圧の発生状況に影響することが確認されたため、タンク荷重が実物と同様の等分布荷重となるよう配慮したものである。鋼矢板模型はりん青銅で製作した。りん青銅は表-4のように、ヤング率： $E=117.72 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 、厚さ： $t=0.3\text{mm}$ である。

模型地盤は上下2層とし、上層を相対密度： $Dr=50\%$ 、下層で $Dr=80\%$ を目標とした。地盤の作成は水中落下とし、深さ5cm毎に投入するシリコンオイルと砂の重量を予め計り、液面からの投入高さを一定とした。下部砂層は所定の量の砂とオイルを上記の方法で投入した後に電動小型バイブレーターで所定の深さになるまで締固めた。尚、計器類は締固めにより沈下や傾斜が生じないように配慮した。

間隙水圧計は設置前にシリコンオイル中にてフィルター内部をオイルで満たし、フィルター内の気泡を除去して用いた。鋼矢板模型は先端を非液状化層である下部砂層に1cm根入れした。

加速度計及び間隙水圧計は大きさや重量が液状化地盤に影響を及ぼさないように超小型機器（6mm $\phi$ 又は6mm角）を使用し、コード類についても $\phi 2\text{mm}$ の細いものを使用した。特にコードの配線は加振時の水みちとならないように同一箇所から取り出さず、それぞれ一旦水平にはわせ、別々の場所から地盤面に取り出した。

実験に先立ち鋼矢板に作用する応力を確認し、模型土槽の共振実験を行った。実験のパラメーターには、鋼矢板の有無、矢板欠損部の有無をとり、タンク荷重は表-3に示した大小2タイプ（L-load、S-load）とした。入力加速度は1G場換算での地表面加速度が200Gal前後になるように、片振幅で100~115Galの1.0Hzの正弦波とし、波数は20波とした。正弦波の場合、地震波の最大振幅の1/3程度で地震波と同等のエネルギーに相当すると言われている。

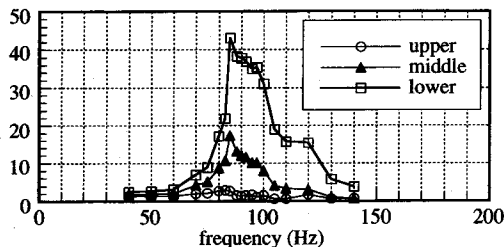


図-6 模型地盤の遠心力場での共振曲線

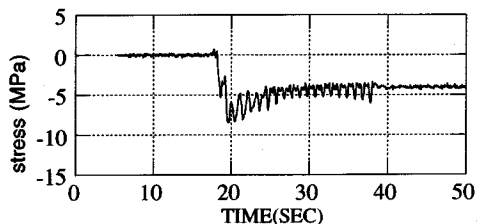


図-7 加振中の鋼矢板最大引張り応力

#### 4. 実験結果及び考察

##### (1) 模型地盤の固有振動数と矢板に作用する応力

模型地盤（1層： $D_r=50\%$ ）の共振実験における固有振動数は85Hzであった（図-6参照）。層厚25cmの模型地盤を1質点としてせん断波速度( $V_s$ )を算定すると、 $V_s=85$  m/sec.となる。

矢板模型にはひずみゲージを円周方向に3段、曲げをキャンセルするように貼付した。タンクのない状態で遠心加速度を1Gから50Gまで上昇させた時に矢板に生じたひずみは $20\mu$ 、S-load及びL-loadを載荷したときの最大ひずみは $60\mu$ となり、リン青銅の弾性係数から矢板の応力を求めると7.06MPaとなる。また、加振時に矢板に作用する引張応力は最大でも8.24MPaと小さい。加振時の矢板応力の時刻歴を図-7に示した。

##### (2) 応答加速度波形

地盤中の応答加速度波形では、S-loadでは矢板の有無・種別によらずタンク直下及び周辺地盤共に加振途中で加速度が減衰し（図-8:D-2,D-4）長周期化とせん断抵抗の低下が見られ、これらの設置地盤は液状化したものと想定される。一方、L-loadではタンク直下で加速度波形が若干乱れ、矢板外側では加振の途中から液状化が起こっている（図-8:D-9のA5,A7）。この理由として矢板が、①過剰間隙水圧の消散を妨げていること、②タンク荷重の矢板外

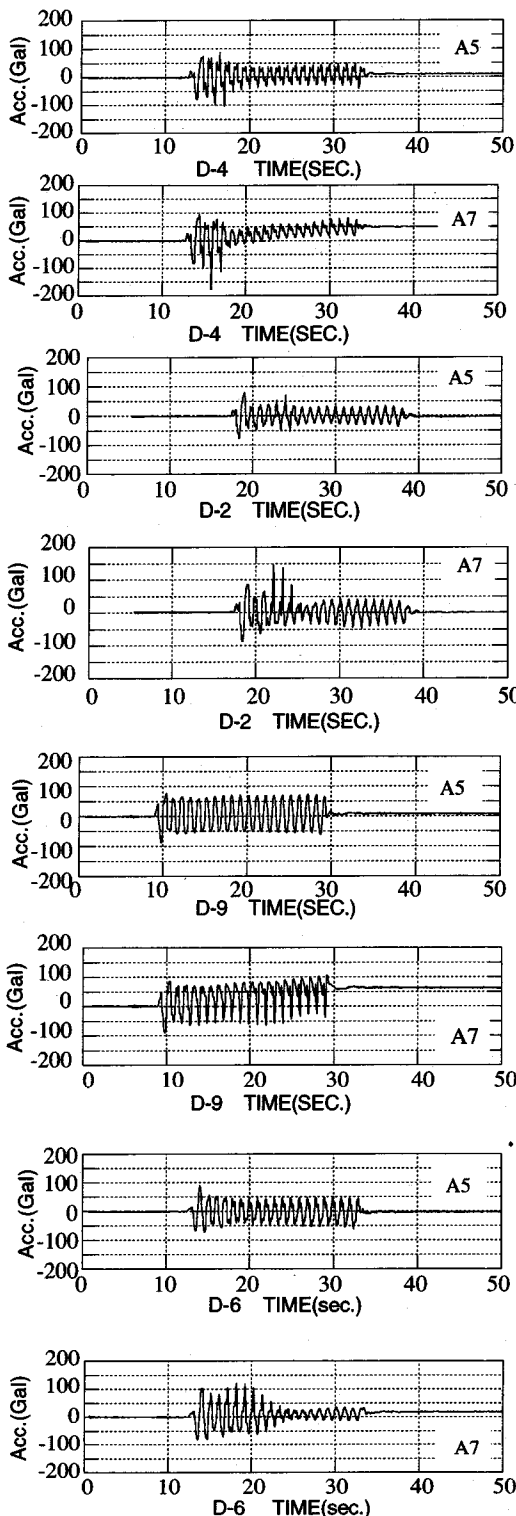


図-8 加速度波形 (A-5, A-7)

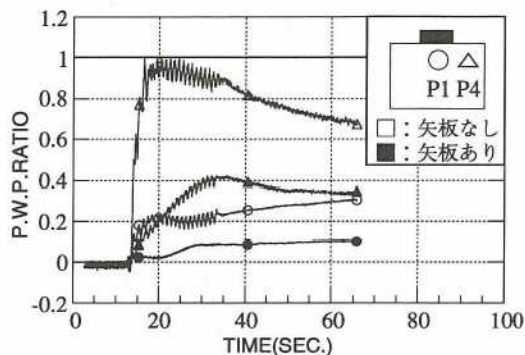


図-9 S荷重ケースの過剰間隙水圧比

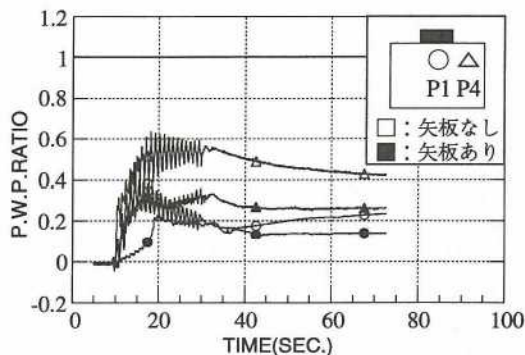


図-10 L荷重ケースの過剰間隙水圧比

側への伝達を制限していることが考えられる。尚、欠損部を有する矢板の場合は両者の中間的な波形となっていることから、上記の理由が理解される。

### (3) 過剰間隙水圧比

図-9にはS-loadの過剰間隙水圧比を示した。タンク直下と自由地盤下では、前者の方が値が小さい。また、矢板のある場合はP1、P4の最大値が矢板のない場合に比べて5割程度小さくなり、矢板が過剰間隙水圧の上昇を抑制したことが考えられる。

一方、図-10にはL-loadの過剰間隙水圧比を示した。S-loadの場合と比べて全体に過剰間隙水圧比が小さい。タンク直下の方が自由地盤より若干小さく、S-loadの場合と同様に矢板による過剰間隙水圧低減効果が見られ、その程度は3~4割である。

これらは各水圧計で記録された過剰間隙水圧をタンク荷重を含めた各計器位置での有効上載荷重で除して基準化したものである。尚、荷重の応力分布は有限要素モデルによる解析で求めた(図-11は矢板がある場合の応力分布を示す)。

### (4) 沈下測定結果

図-12、図-13には加振後に1G場で計測したタンクと地盤の沈下測定結果について原型換算した値を示した。図-12のS-loadでは、矢板のない場合(○印)の沈下量が15~35cm、矢板を有するケース(●印)で15~20cmと、矢板のある場合は沈下がほぼ均等であることがわかる。欠損矢板(△印)では15cmの不等沈下を生じた。

一方、L-loadの沈下を示した図-13では沈下が顕著で、特に矢板のない場合(○印)でタンクの沈

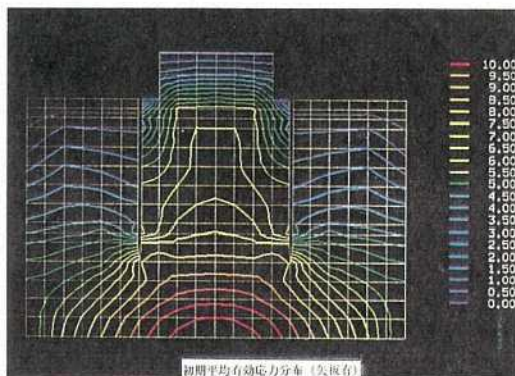


図-11 鋼矢板打設時のタンク荷重分布

下が10~75cm生じており、不等沈下が激しい。欠損矢板(△印)でも同程度の最大沈下が生じたが、タンク部分のみ一様に大きく沈下したことが特徴的である。これに対し、矢板を打設したケース(●印)では沈下量が20~30cmと、他のケースより小さく、しかも均等であることがわかる。

貯油タンクの管理規準<sup>9)</sup>では、30cmの絶対沈下と直径の1/100以上の不等沈下が生じた場合に修正工事が義務付けられている。今回の実験模型では直径を原型に換算すると6mに相当するので、不等沈下の許容値は6cmとなる。実験結果では、鋼矢板を有するS-loadタンクでは許容値にあり接地圧のみ6倍にしたL-loadタンク(D-6)でも10cm程度の不等沈下となっていることから、鋼矢板縮切工法により地震時のタンク不等沈下を抑制し得ることが期待できる。

## 5. 結論

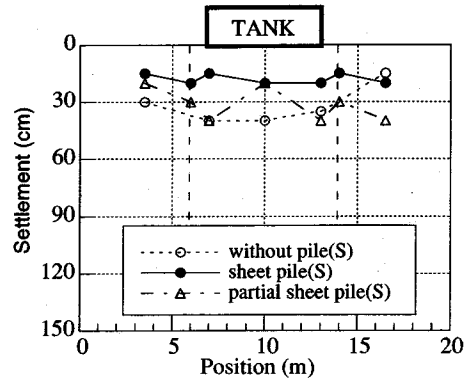
遠心力载荷装置による既設タンク模型の液状化対策実験から、沈下に関して次のことが確認された。

- ① 接地圧20.0kPa～40.0kPaのタンクの場合、加速度記録から判断すると矢板の有無に依らず振幅が低下しており、矢板の効果は明確でない。しかし矢板の連続打設により過剰間隙水圧比の上昇が抑えられ、不等沈下量も未対策の場合の1/5程度に低減された。
- ② 接地圧のみ110.0kPa～130.0kPaとした場合、荷重の効果によりタンクの下では有効応力が増し液状化抵抗が上がるが、矢板を設置することで矢板内側の過剰間隙水圧が消散しにくくなることも考えられたが、実験では過剰間隙水圧の上昇が抑えられた。これは矢板が地盤のせん断変形を拘束したものと考えられる。矢板打設による矢板内側での沈下防止効果は非常に大きい。
- ③ 欠損部を有する鋼矢板で矢板内側の沈下が大きいのは、矢板がタンク直下の地盤を拘束できず矢板が膨らむこと、また、欠損部からの砂が流出することなどが理由として考えられ、欠損矢板の沈下防止効果は小さい。しかし、矢板のない未対策の場合と比較すると不等沈下は小さい。
- ④ 今回の実験から、直接基礎形式のタンク周囲に鋼矢板を打設することで地震時の不等沈下を抑制できることがわかった。矢板の沈下防止効果を確実にするためには、矢板をタンク周囲に連続打設するか、他工法を併用するなど地中配管部等でも矢板の欠損部を作らないことが大切である。

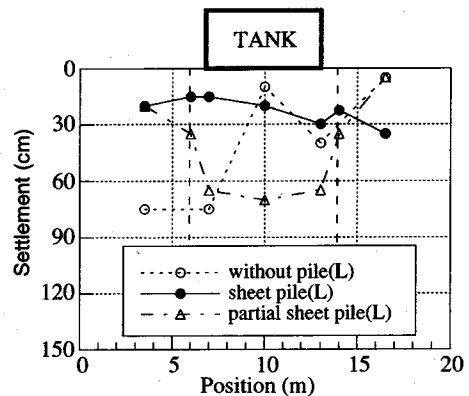
謝辞：末筆ですが、本研究の模型地盤の振動実験に関する議論で東京都立大学の岩楯教授にお世話頂いたことを記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) K.H.K.土木審査部：地盤の液状化とその対策；K.H.K.たよりNo.27, pp.16-19, Sept., 1990.
- 2) Kutter,B.L.:Dynamic Centrifuge Modeling of Geotechnical Structures, *Transportation Research Record 1336*, pp.24-30,1992.
- 3) Schofield,A.N.:Dynamic and Earthquake Geotechnical Centrifuge Modeling, *International Conference of Recent Advanced Geotechnical Earthquake Engineering of Soil Dynamics*, Vol.3, pp.1081- 1100,1981.
- 4) T.S.Tan & R.F.Scott: Centrifuge Scaling Considerations for fluid-particle systems,



図一 1 2 S荷重の加振後の沈下状況



図一 1 3 L荷重の加振後の沈下状況

*Geotechnique*, Vol.35, No.4, pp.461-470,1985.

- 5) 北勝利, 八嶋厚, 柴田徹, 上田孝行：遠心場における動的実験システムの開発；京都大学防災研究所年報, 第32号B-2, 1989.
- 6) 柴田徹, 上田孝行：遠心力場における飽和砂地盤の液状化実験；第26回土質工学研究発表会, pp.1045-1048, 1991.
- 7) 田中満, 樋口雄一, 酒見卓也, 川崎宏二, 名倉克博：遠心力载荷装置による液状化模型実験手法の基礎的研究；大成建設(株)技術研究所報, 第27号, 1994.
- 8) T.Sakemi,M.Tanaka,Y.Higuchi,K.Kawasaki and K. Nagura : Permeability of Pore Fluids in the Centrifugal Field , *10th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1995.
- 9) 消防庁：「屋外タンク貯蔵所の保安点検に関する規準について」；通達（消防予第52号），昭和50年5月20日，1975.

(1995. 7. 31 受付)



## SETTLEMENTS OF OIL STORAGE TANK DURING LIQUEFACTION

Takuya SAKEMI, Mituru TANAKA and Yoshichika YUASA

The settlement of the oil storage tank during liquefaction, is the most serious problem for the engineers and company owners. In this paper, one of liquefaction-resistant methods which constrain the soil under the oil tank by a sheet pile wall is used. Some series of model tests using centrifuge are carried out to evaluate the liquefaction-resistant method from a settlement point of view. The effects of the sheet pile wall and mass of an oil tank are tested, respectively. The results show that the settlements of the oil tank depend on the mass of the oil tank, and on the type of sheet pile wall, and also show that the closed type wall is more useful against liquefaction than the open type wall.