

地上タンクの滑動・剥離に関する実験的研究

メタデータ	言語: jpn
	出版者:
	公開日: 2013-11-13
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 宮脇, 幸治郎
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00007956

地上式タンクの滑動・剥離に関する実験的研究

宮 脇 幸治郎*

Experimental Study with Respect to the Slide and Lift for Tanks on the Ground During Earthquake

Kohjiro MIYAWAKI*

ABSTRACT

This paper is an experimental study with respect to the sliding and uplifting of the liquid storage tank under earthquake and gives a dynamic property in quality.

That is, we carry out the static slope test in which an equivalent seismic force acts the liquid tank. In addition, the dynamic steady sinsoidal wave excitation tests are searched the frequency properties of the sway and separeate of the bottom plate.

Tha results are shown as tollows. (1) From the slope tests, the smaller a ratio of radious to liquid height, the easier a separate of slab plate. (2) The separating shape of slab is a slice arc at the annular plate. This shape receives the influence of the side wall. (3) From the steady dynamic tests, an uplift of slab has a tendency to be frequency down which the behaviour occures at the high water level. (4) A slide of slab also has a same tendency. Then the sway mode has two types. One mode is a parallel movement along the input direction, and the anothes is a rotational movement.

KYE WORD : uplift, slide, storage tank.

1. はじめに

従来原油タンクのような大型液体貯蔵タンクに対する 耐震的検討は、理論的実験的研究が新潟地震以来精力的 に実施され、ある程度の成果を得ている。しかし現在、 まだ地上式タンクにおいて検討すべき課題は側板直下に おける浮き上がり(剥離)や底板の滑り(滑動)に対す る動的挙動ならびに、これらに伴う側板および底板(ア ニュラープレート)の応力の評価である。タンク底板部 での滑動・剥離という現象は、非線形な動的挙動である ため解析的な取り扱いが非常に複雑になる。そこでまず 定性的な現象を把握するため実験的研究が多く行われて おり、つぎのようなものがある。

山口,秋山,小林,佐々木¹⁾は、剛地盤上のフレキシ ブルタンクについて模型実験を行い、浮き上がり現象を 調べている。このときの加振振動数は1次スロッシング 共振付近を対象にして、浮き上がり条件、浮き上がり後 の挙動、浮き上がり時接触圧分布を検討している。

昭和61年4月10日受理

鬼束,磯江,秋山,坂井²⁾は、浮き上がり挙動を静的 実験により試みている。底板の浮き上がり部分は、三日 月状になり、偶角部近傍の局部的な問題として考えられ ず、側板の円筒の剛性が重要な役割を演じていると考察 を加えている。

山口,秋山³⁾は、地上タンクの地震時浮き上がりに関 する基礎的研究として、フレキシブルタンク模型を用い、 剛地盤に設置して水平振動台加振実験を行い、浮き上が り挙動を解明している。

頭井,新家⁴⁾は、底板の大たわみ効果と浮き上がり、 すべりを考慮した、CELL COLLOCATION METHOD による解析が、傾斜実験の結果とよい一致を与えている。

D.P. CLOUGH⁵⁾は、円筒タンクに関する大規模な模型実験を実施し、浮き上がりの変形と基礎からの反力分布に簡単な仮定を設け、浮き上がり範囲や側板軸圧縮力の計算手法までを提案している。

本研究は、地上式タンクの地震時の動的挙動として底 板の滑りと浮き上がりの現象に注目して実験的に調べて みた。その結果静的傾斜実験により底板の浮き上がり形 状は従来の実験結果と同様の挙動を示した。また、動的 正弦波加振実験により加振振動数、液深、加振レベルに

^{*} 土木工学科(Department of Civil Engineering)

よる底板の滑動および剥離が定性的に把握できた。すな わち液体ータンク系の1次の周有振動数付近に共振振動 を生じ、また自由液面の比較的低次のスロッシングによ り滑動剥離の形態が左右されていた。

2. 実験概要

2.1 模型に対する相似率

模型の挙動から実物のそれを推定するには、模型と実 物との間で相似則が成立しなければならない。そのため にはすべての次元において相似率を満足させなければな らないが、実際の実験においては模型の製作ならびに実 験装置の性能上よりひずみモデルとなる。ここでは一応 本実験における相似率はつぎのようになる。

まず長さの比Lr は、

$$Lr = \left(\frac{Lm}{Lp}\right) \tag{1}$$

ここに、添字mは模型、添字pは原型を表す。つぎに 時間の比を求めるために、貯蔵液体のスロッシング振動 数を表す式を用いる。すなわち、

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{R} \varepsilon} \tanh\left(\varepsilon \frac{H}{R}\right)$$
(2)

で与えられる。ここに、日は液高、Rはタンク半径、g は重力加速度、 ϵ はベッセル関数 $J'_1(\epsilon) = 0$ の根であ る。したがって、模型と原型の固有振動数は、

$$fm = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{Rm}} \varepsilon \quad \tanh\left(\varepsilon \frac{Hm}{Rm}\right)$$
(3)

および、

$$f p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{Rp}} \varepsilon \quad tanh\left(\varepsilon \frac{Hp}{Rp}\right)$$
 (4)

となり、重力加速度比を1と考えると、固有振動数比 frは、幾何学的相似すると仮定すると

$$f r = \sqrt{\frac{Rp}{Rm}} = \sqrt{\left(\frac{Lp}{Lm}\right)} = Lr^{-\frac{1}{2}}$$
(5)

となる。すなわち、時間比Trは、

$$Tr = Lr^{\frac{1}{2}}$$
(6)

で表せる。また、加速度比αrは、

$$\alpha_{\rm r} = \frac{\alpha_{\rm m}}{\alpha_{\rm p}} = \left(\frac{\rm Lm/Tm^2}{\rm Lp/Tp^2}\right) = \rm Lr \ Tr^{-2}$$
(7)

であるので、式(6)より、

 $\alpha_{\rm f} = {\rm Lr} {\rm Lr}^{-1}$

となる。以上の式に本実験の模型の諸元を代入した結果 は、表1のようになる。ただし、原型となるタンクは種 々の大きさのものがあるが、原油タンクのような大型地 上式浮き屋根形式のタンクの場合タンク高さは、約20m であるので、これを幾何学比の値とした。

表1 模型タンクに対する相似率

	Lr	Tr	αr
銅製モデル	0.015	0. 122	1
フィルム製モデル	0.0025 ~0.01	0.05 ~0.1	1

2.2 実験装置および測定機器

(1) 静的傾斜実験に対する装置

静的傾斜実験に対して用いた実験装置は図1に示すよ うなものである。モデル地盤は傾斜台の板に15㎜厚のゴ ムマットを敷き、これを固定する。この上にモデルタン クを設置し、傾斜台をリフトで傾斜させる。

モデルタンクは、銅(厚さ 0.2mm)、 OHP 用フイルム (厚さ107µ)の材質で製作した。

(2) 動的水平加振実験に対する実験装置および測定機器 動的加振実験に用いた主な実験装置は、振動試験装置 (IMV製 VS-3202C)、モデル地盤(ゴム盤50cm×50cm



図1 静的傾斜実験に対する実験装置







図5 模型タンク傾斜時の概要図

(8)

×1cm)、モデルタンク(銅製)である。 振動台の上にモ デル地盤を固定し、その上にモデルタンクを設置してこ れを加振する。(図2参照)

また測定に用いた計測機器は、加速度計(新興通信工 業製、BA-2L,5L)、圧力計(共和電業製、PS-2KS)、 動ひずみ計(新興通信工業製 6001F,三栄測器製6M91)、 ミニライター(渡辺測器製WTR751)、ビデオカメラ(ナ ショナル製マックロードM3)である。

3. 静的傾斜実験による剥離に関する挙動

3.1 実験方法

本実験はつぎの手順に従って行う。

i)まずモデルタンクを水平に保った傾斜台の中心に 設置する。このとき剥離現象を明確にするためフイルム 製のモデルタンクは、その底面とゴムマットの間に水を 敷き、剥離が始まればその間に空気が入り込み、剥離の 状態を目で観察できるようにしておく。

I) つぎにモデルタンクに、所定の水深まで水を注入 する。この状態から傾斜台をパワーリフトで持ち上げ、剥 離が生じるまで静かに傾斜を増加させていく。剥離の生 じた傾斜角を記録し、写真でその剥離の状態を記録する。

ii) さらに、傾斜角を増加させ、底面の剥離状態が拡大 していくのを写真撮影する。この作業はモデルタンクが滑 動、転倒、あるいは貯蔵液体のオーバーフローするまで行う。

iv) 上述の手順をモデルタンクのタイプを代えて繰り返し行う。

3.2 実験結果

フイルム製モデルタンクに対する傾斜実験から得られ



図3 現象の起こった傾斜角とH/Rの関係(フィルム製)

た結果は、次のように分類された。底面に剥離の生じる 現象(現象Aと呼ぶ)、底面全体に滑動の生じる現象(現 象Bと呼ぶ)、貯蔵液体が側板上端よりオーバーフローす るまで傾斜させたが滑動、転倒の生じなかった現象(現 象Cと呼ぶ)などの3種類となる。また液深Hをタンク半 径Rで基準化し、現象A, Bの始まる傾斜角θとの関係 は図3のようになった。

銅製のモデルタンクは底面の剥離の状態が観察できないので、底面の滑動し始める傾斜角を測定した。この結 果より、底面の滑動し始める傾斜角を測定した。この結 となった。さらにこの場合に生じる力と傾斜角との関係 は図4に示すようになった。

3.3 結果に対する考察

(1) 考察のための基本量の算定

まず、震度法的な地震力の取扱は、いま対象としてい る液体貯蔵タンクに対してできない。しかし、ここでは 図5のもとの水面(破線)に示すように、貯蔵液体が剛 体と仮定されるならば、通常の地震力の評価ができる。



図6 貯蔵液体の変形による転倒モーメントの影響

- 49 -

すなわち、水平地震動αにより構造物は地盤と一緒に、

 $\theta = \tan^{1}(\alpha/g)$

だけ傾斜する。タンク内の液体が、図-5の水平面(実線)に示すように変化する場合、液体部の重心は、移動 する。すなわち液体を剛体とみなしたときの重心をG、 流体とみなしてθ角傾けた場合の重心をGとすれば、Z 方向、x方向の重心の移動量は、それぞれつぎのように なる。

$$Zg = \frac{H}{2} + \frac{R^2 \tan \theta}{8H}$$
(0)

$$Xg = \frac{R^2 \tan \theta}{4H}$$
(11)

さらに、液体の質量をmと考えると、 タンク底面中 心において、剛体と考えた場合の水平地震力mαによる 転倒モーメントは、

 $M1 = (H/2) m\alpha$

となり、一方重心移動後の転倒モーメントは、

$$M2 = zg \cdot m\alpha + xg \cdot m\alpha$$

より求められる。すなわち重心が移動したことにより転 倒モーメントは、

$$M2 - M1 = \frac{R^2 t an\theta}{8H} m\alpha + \frac{R^2 t an\theta}{4H} mg \qquad (12)$$

が増加することになり、この増加量を考慮する必要がある。この影響をみるために (M2-M1)/M1 と θ との関係を図6 に示す。図中のパラメーターは、H/Rの比である。

(2) 剥離・滑動に対する検討

フイルム製のモデルタンクの場合は底面の三日月状の 剥離が滑動より最初に発生し易い。すなわち、作用する 静液圧が側板にフープテンションを発生させ、基盤の傾 斜により、静的な地震力が作用することになる。このと き静的地震力は、円筒側板を曲げあるいはせん断変形さ せるよりは、断面のオーバリング変形として作用してい る。これに伴って底板の変形が液深の浅いほうに剥離と なって現れる。このことは底面全体が滑るより側板の変 形による底板の変形のほうが生じ易く、しかも剥離の領 域が一瞬のうちに相当広範囲に広がる。

銅製のモデルタンクの場合は、底面の剛性がフイルム 製に比べて相当大きく外観から観察できないので滑動現 象のみ考える。図5よりタンク内の液深が増すと滑動に 対する抵抗が少し増している。言い替えると摩擦係数が 液深の増加によって増加している。このことは液体の変 形による転倒モーメントの増加率は、液深の増加により 減少する図7に対応する。さらに、液深の増加による垂 直力の増加が底面のモデル地盤への沈下を生じ、接触面 での摩擦係数の増加となって現れている。

静的傾斜実験から液体貯蔵タンクは、約0.3~0.7程度 の相当大きな震度により剥離・滑動が生じる。しかし、 実際の地震動においてのスロッシング振動のような非常 に振動数の低い場合以外自由液面は、傾斜実験のような 液面の変形とならず、定常な高い振動数の場合液体が剛 体のような挙動と考えられる。



図7 底板剥離時の変形模式図

4.動的水平加振実験による滑動・剥離に関する挙動 4.1 実験方法

実験はつぎの手順に従って行う。

I) モデルタンクには加速度計、圧力計などのセンサーを取り付ける。さらに増幅計および記録計に接続する。 さらに加振方向と一致する内側のタンク母線方向に1mm 目盛りのスケールを貼り付ける。

ii) モデル地盤とモデルタンクとに基準となる線をつける。タンクと地盤はつけた印が一致するように設置する。 さらにモデル地盤には1mm目盛のスケールを貼り付ける。

ii) 振動台は加振振動数を設定し、最初の5秒まで加速度振幅を漸増させ、所定の振幅に設定し、その後10~ 15秒間定常な正弦波加振し記録する。タンク底面の滑動が認められる場合は、ビデオカメラで撮影記録する。

Ⅳ) 振動数、液深などを変化させて、繰り返し実験を 行う。

v) 滑動時の挙動は、撮影されたものをビデオディス プレー上に再生し、2点の加振方向と加振直角方向の成 分の移動量を画面上で読み取る。なお時間の経過は撮影 時にデジタルストップウオッチの時刻を記録させておく。

vi) 自由水面の変動量もまた、ビデオカメラによる撮 影記録の再生より測定する。 vi)加速度および圧力はミニライターあるいはデター レコーダーよりADコンバーターされた記録を各量に換 算する。

4.2 実験結果

実験により得られた測定結果は、つぎのようになった。 (1) 図8は、モデルタンクの側板直下付近に設置され た圧力センサーによる圧力EOを入力加速度HOで規準 化した値と加振振動数fとの関係で示したものである。 パラメーターは、液深Hで与えている。

(2) 図9は、タンク頂部H2と底部H1との水平加速 度比を加振振動数との関係で示したものである。パラメ ーターは、Hで与えている。

(3) 図10は、位相差を考慮せずに正弦波加速度応答値 よりモデルタンクの回転角を評価し、加振振動数との関 係で示している。パラメーターは、Hで与えている。

(4) 図11は、液深H=22.5cmのときの側板頂部V2と底 部V1との鉛直加速度比を加振振動数との関係で示して いる。パラメーターは、入力加速度レベルに与えている。

(5) 図12~13は、液深22.5cmの1000galの加振による タンク底面の移動量を加振方向Xと加振直角方向Yの成 分で表し、振動数との関係で与えている。さらに、入力 加速度レベル、液深を変化させたときの結果も得ている。 結果より、モデルタンク内に液体の無い場合には20~40 Hzの領域にわたり底面の滑動が生じている。一方、液体 がモデルタンク内に有すると10~20Hzの振動数の低い 領域に滑動が生じている。また液深の大きくなるほどそ の滑動する振動数の値は低くなっている。

(6) 図14は、タンク底面の平面的移動量を時間経過と ともに図示したものである。さらに入力加速度レベル、 液深を変化させたときの結果も得ている。

4.3 結果に対する考察

(1) 考察のための基本量の算定

まず対象としている液体貯蔵タンク系の動的基本量は、 固有振動数であるので、これを求めておく。

貯蔵液体の固有振動数いわゆるスロッシング振動数は、 式(2)より図15のように求められる。

さらに、液体-タンク系の固有振動数は、タンクシェ ルの変形を考慮した場合の液体の固有振動数と、液体の 変動あるいは圧力によるタンクシェルの固有振動数(バ ルジング振動数)とがある。前者はBalendra ら⁶⁾の理 論結果があり、この方法を用いて求める。その結果は表 2のように求められる。後者はHaroun, Ellaithyら⁷⁾ の理論や満水時での小川・坂井⁸⁾、Veletosos⁹⁾などの理 論があり、これらの方法を用いて求める。その結果は、



図8 E0/H0-fとの実験結果



図9 H2/H1-fの実験結果



図10 θ-fの実験結果



表2 側板変形を考慮した液体の固有振動数

×	f (Hz)								
	7.5(m)	15.0(cm)	22. 5(cm)						
1	1.428	3.213	5.117						
2	2.240	5.593	10.440						

表3 貯蔵液体のある場合のタンクシェルの固有振動数

推集式		f(Rz),R=15ca				
Veletosos		11.90				
小川,坂井	#= 7.5cm	23.45				
	15.0cs	13.92				
	22.5cm	9.49				
laroun	II= 7.5cm	49.64				
Ellaitay	15.0cm	26.19				
	22.5cm	15.42				

表3のように求められる。

なお、タンク底面での剥離および滑動の現象をモデル 化するため、図16に示すように底面スラブと地盤との間 にジョイント要素を挿入し、図17のようなモードが得ら れる。

(2) 剥離に対する考察

まず側板直下の底板に貼り付けられた圧力計の応答波 形は、モデル地盤に接触している場合中立軸を中心にし て対称な振幅を呈することになる(y/yo=1:yoは限界 振幅)。ところが剥離が生じている場合には、非対称な応 答波形となり、 y/yo >1となる。このときの yo は、モデ ルタンクが空の状態から液体を注入していきそのときの 液深と圧力より定められる。しかし、実際の動的時にタ ンク底面は側板直下部と中央部とで剛性が異なり、また モデル地盤の地盤反力分布が一様とならない。したがっ て、y/y₀=1より剥離の判定ができることになるが、実 験データにはタンク底面のロッキング状態とスウエー状 態が同時に記録され、 y/y₀=1で剥離状態にない。 そこ でミニライターの波形記録ならびにビデオ記録により明 らかに浮き上がりが生じているとみなされる y/yoは 1.7 となっていたのでこれを判定基準とした。このようにし て求めたタンク底板の浮き上がり時の最小圧力 EO は表 4に示したような値となった。

つぎに圧力波形の記録はつぎの3タイプが現れていた。





表4 剥離時の限界圧力

CASE	1	2	3	4	5	8	7	8	10	11	12
80 (g)	37.3	38.5	180	228	147	139	120	132	116	31.4	38.9
HO (gal)	150	500	500	1000	500	1000	500	1000	500	150	500
E0/W0 (g/gal)	0.25	0.07	0.36	0.23	0.29	0.14	0.24	0.13	0.23	0.21	0.07

すなわち、Aタイプ:中立軸に対して左右対称な振幅記 録を呈するもの、Bタイプ:中立軸に対して左右非対称 で2ケ所で波形の乱れが現れているもの、Cタイプ:中 立軸に対して左右非対称で1ケ所で波形の乱れが現れて いるものに大別できた。これらのタイプは実験中の現象 より、Aタイプは剥離ならびに滑動も発生せず、タンク 底面は地盤に接触して振動している。Bタイプは、スウ エー振動の影響が小さくロッキング振動による剥離が発 生して振動している。Cタイプは、ロッキングとスウエ ーの両方が作用し、ロッキングとスウエーとの位相のず れおよび剥離が生じて、振動している。

図10のロッキング応答曲線から上述のことを検討する と、8Hz付近に鋭いピークを持っているのがわかるが、 これは内液の自由表面の高次のモードのスロッシングが 現れたものである。つぎに液深22.5cmでの応答では16Hz 付近にピークが現れている。これは、タンクのバルジン グ振動の1次の共振が現れたものと思われる。さらに、 本実験では20Hz以上の振動数であまり大きな応答は現 れていない。すなわち、20Hzを越える振動数では液体の 入ったタンクは、自由表面ならびにロッキングの振動の 影響が少なくスウエーの振動が卓越することになると考 えられる。

(3) 清動に対する考察

図12~13の結果からわかるように、空タンクと内液が 少しでも入ったタンクとでは滑動する振動数領域が大き





図14 タンク底面の時間的経過に伴う移動量

くかわる。すなわち空のタンクの場合タンクの固有振動 数が非常に高い領域にあるが、液体貯蔵されたタンクの 振動数は非常に下がるためである。液深が側板高の1/4, 2/4,3/4と高くすると、滑る振動数は15~20Hzから10 ~15Hzへ低下していく。また、入力レベルが500galが ら1000galに増大すると同じ振動数領域で滑りが生じそ の移動量は非常に増大する。

ところで、この振動数領域での表面液のスロッシング 振動数は10次以上の高次モードに相当し、水面の動揺が 大きくなっている。さらに図10のロッキングの回転角は、 7~20Hz付近に大きな応答を示している。したがって、 滑動は貯蔵された液体の動揺とタンク本体のロッキング との相互作用によって助長されていると考えられる。

つぎに、滑動のモードは、液深22.5cm で入力加速度 1000 gal での結果を図14に示しているが、大別するとつ ぎの2種類になる。タイプAは、タンク底面が回転しな がら加振方向と少しずれ一方へ移動していくものであり、 タイプBは、タンク底面が加振方向へ平行移動していく ものである。タイプAは空タンクで30Hz以上の高振動数 とか、貯蔵液体が有り滑動している振動数領域の高い部 分での振動数で生じている。タイプBは貯蔵液体が多い 場合で滑動している振動数域の低い部分での振動数で生 じている。

(4) 加速度応答に対する考察

図9は、タンク模型の頂部と底部との加振水平方向の 加速度比H2/H1と振動数との関係を現しているが、液深 22.5 cmの場合には、タンクのバルジング振動の固有値付 近(15.4 Hz)にピークを有する。また液深が小さい場合に はそれぞれのバルジング振動数付近にあまり明瞭なピー クは認められない。図9のH2/H1での液深22.5 cmのみ の結果と、図13のV2/V1の結果と比較するとつぎのよ うなことが分かる。すなわち、モデルタンクは水平加振 されてロッキング振動を生じる場合はその回転中心は、 タンク底面付近に有することがわかる。

5. あとがき

本研究は、地上式液体貯蔵タンクの地震時におけるタ ンク底板の滑動および剥離現象を、模型実験により定性 的に把握しようとしたものである。実験は、静的傾斜実 験ならびに動的水平加振実験の2種類実施し、ある程度 の現象の把握ができた。

まず、静的傾斜実験により、 次の事項がわかった。

(1) タンクの半径が小さくなるほど、液深が大きくなるほど剥離の起こる傾斜角は大きくなる。これは、傾斜したときの貯蔵液体の重心の移動による影響である。

(2) 剥離の形状は、側板直下の隅角部で三日月状にな り、その領域は相当広い範囲に一瞬に広がる。この形状 は、側板に作用する液圧による側板の変形が底板隅角部 に影響している。

つぎに、動的水平加振実験により、次の事項がわかっ た。

(1) 剥離は、側板直下の底板に貼り付けられた圧力センサーの波形から明瞭に読み取れなかったが、液深が増すと剥離は低振動数領域で生じている。これは、液体ータンクが地盤の反力によって構成される非線形ばねをもった系として考えられるので、質量が増すとその共振振動数は下がっているものと考えられる。

(2) タンクのロッキング運動は、貯蔵液体の高次のス ロッシング振動とタンクのバルジング振動に影響されて いる。

(3) ロッキングのモードは、回転の中心をタンク底面 付近にもち回転モードを加振方向と逆位相になったもの になっている。

(4) タンクの滑動は、タンクのロッキングとスウエー の振動を同時に受け、液深の増加により共振振動数は下 がる。

(5) 滑動のモードは、大別して2種類に分けられる。 ひとつは、底面が回転しながら移動するもの、他のひと つは底面が加振方向に並進して移動するものである。

以上の様な実験結果に対する現象は、すでにある程度 発表されている。今後の課題として解析的なモデルをた て、数値シミュレーションによる検討が、必要となる。 とくにタンク底面と地盤との非線形的なばね特性のモデ ル化が重要であり、さらに、実際の設計におけるアプロ ーチがぜひとも必要となる。

本研究を行うにあたり、模型・装置の製作、実験の実 施、データの整理等に協力してくれた元本校学生遠藤洋一 君、土井智史君に深く感謝の意を表します。なお、本研 究は昭和60年度自然災害特別研究費(研究代表者金沢大 学工学部北浦勝)の一部費用によって実施した実験であ る。

参考文献

- 1) 山口広樹,秋山成興,小林宏光、佐々木秀敏: ^{*}フ レキシブルタンクの地震時浮き上がりに関する基礎的 研究",第39回年次講演概要集1,1984, p.689~690.
- 2) 鬼束博文,磯江暁,秋山成興,坂井藤一:"地震時 における平板円筒タンクの浮き上がり挙動に関する研 究(その一)",第39回年次講演概要集Ⅰ,1984,pp. 691~692.
- 山口広樹,秋山成興: "地上タンクの地震時浮き上がり挙動に関する基礎的研究",構造工学論文集Vol. 31 A, 1985, pp. 529~536.
- 4) 頭井洋,新家徹: "壁面に初期不整を有する円筒タンクの地震応答解析";,第38回年次講演概要集I, 1983, pp. 759~760.
- 5) Clough, D.P: "Experimental evaluation of seismic design methods for braods cylindrical tanks", University of California, EERC-77/10, 1977.
- 6) Balendra, T. P. Paramasiviam, L. Lee: "Seismic desin of flexibile cylindrical liquid storage tanks", EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, Vol. 10, 1982, pp. 478~482.
- 7) Madhat A. Haroun, Hamdy M. Ellaith:
 "Model for flexible tanks under going rocking", ASCE Vol. EM111, No 2, pp. 144~151.
- 小川浩,坂井藤一: "円筒形液体タンク地震荷重の 近似計算式について"第38回年次講演概要集 I,1983, pp. 557~558.
- 9) A.S. Veletosos, J.Y. Yang: "Dynamic of fixed-base liquid-storage tanks", U. S.-Japan Seminer for Earthquake Engineering Research with Emphasis on Lifeline Systems, 1976, pp. 12~13.