

研究展望

液体貯槽の耐震設計研究に関する現状と課題

STUDIES ON SEISMIC DESIGN OF LIQUID STORAGE TANKS—PRESENT AND FUTURE

坂井 藤一*

By Fujikazu SAKAI

1. まえがき

貯槽 (tank) あるいは容器 (container) とよばれるものは、世の中にいろいろあるが、通常は流体、中でも液体を内部に保有する構造物を指す。広い意味では、気体あるいは粒状体などを保有するものも含むことがあるが、これらはそれぞれガスホルダー (ガスタンク) あるいはサイロとよんで区別する。ここでは特に耐震安全性が問題とされるような、比較的大規模であり、また危険物を内蔵する石油タンク、水タンク、原子炉容器などを対象として、以後これらを貯槽と総称することにする。

一般に液体貯槽を分類すれば、Table 1 のようになる。これらの中で最も大型でかつ数の多いのが、円筒縦型貯槽 (円筒平底貯槽) である。次に大型なのは球形貯槽である。その他の貯槽については、従来は小型のものが多く、最近では地上式のみならず、地中 (下) 式、海上式、海中式などの新しい貯槽形式も出現しているので、今後は大型のものもかなり建設される可能性はある。

本論文では、以上のような点から、円筒縦型貯槽を中心として、その耐震設計研究の現状と問題について述べ、その他の貯槽には簡単に触れることにしたい。さらに、議論の範囲を地上式貯槽に限定しておきたい。地中 (下) 式、海上式、海中式などの貯槽においては、土質・岩盤問題や海洋構造物としての問題など、液体貯蔵に伴う貯槽固有の問題以外に一般的な問題が必須であり、それらの問題は本論と別のところで論じられるのが適切である。

貯槽の耐震安全性は、近年の Alaska 地震 (1964 年 3

月)、新潟地震 (1964 年 6 月)、San Fernando 地震 (1971 年 2 月)、宮城県沖地震 (1978 年 7 月)、日本海中部地震 (1983 年 5 月) などにおける顕著な被害の経験から重視されるに至っている。これらの地震によって貯槽に惹起される全体的ないしは局部的な破損のモードとその推定原因の主なものは、Table 2 のようになるであろう。これをみると、破損の原因は大別して、地震荷重の増大、液面動揺あるいは基礎・支持構造の破壊であると推定される。基礎との関連性は、基礎の破壊ばかりでなく、地震荷重そのものに対しても重要であることは論を待たない。しかしながら、一般構造物におけるのと同様、貯槽本体 (上部構造) と基礎 (下部構造) との相関挙動はきわめて複雑な問題となる。したがって、ここでは主として貯槽本体の問題を取り上げることとし、貯槽特有の基礎との関連性の問題も必要に応じて言及することにした。

なお、以下の記述のため、ここで記号の定義をしておく (Fig. 1)。

Table 1 Types of Liquid Storage Tank.

角型貯槽 (平底、角錐底)		
円筒横置型貯槽 (平積、皿積、半格円体積、半球形積)		
円筒縦型貯槽	固定屋根 式貯槽	円錐屋根貯槽 (自立型、柱支持型) 円屋根貯槽 (一重殻、二重殻) 傘屋根貯槽
	浮屋根式貯槽 (シングルデッキ、ダブルデッキ、 ポットン式)	
	昇降屋根式貯槽 (インナーフロート式)	
球形貯槽 (一重殻、二重殻)		
特殊型貯槽 (スヘロイド型、セミスヘロイド型、マルチ スヘアー、マルチシリンドラー、高架水槽)		

* 正会員 工博 川崎重工業㈱鉄構・機器事業部開発設計部
課長 (〒136 江東区南砂 2-4-25)

Table 2 Damage Pattern due to Earthquakes.

破損モード	原因
側板破断	・動液圧によるフープ応力
側板座屈(ダイヤモンド型)	・転倒モーメントの軸圧縮力
側板の象の足型変形 (Elephant foot bulge)	{ 転倒モーメントの軸圧縮力 { 動液圧によるフープ応力
アンギュラー板の隅角部亀裂	{ 転倒モーメントの軸引張力 { 動液圧 (浮き上がり) ・基礎の不等沈下
底板亀裂	・基礎の不等沈下
横ずれ	・水平力
転倒(浮き上がり)	・転倒モーメント
アンカー破損	・転倒モーメントの軸引張力
全体沈下・傾斜	・基礎の液状化 ・支持構造の破壊
浮屋根作動不良	・基礎の不等沈下
溢流	・液面動揺
浮屋根および付属物の破損	・液面動揺
屋根固定部の破損	・液面上昇時衝撃力
屋根および支柱の破損	・鉛直力 ・基礎の不等沈下
引火	・浮屋根と側板の衝突

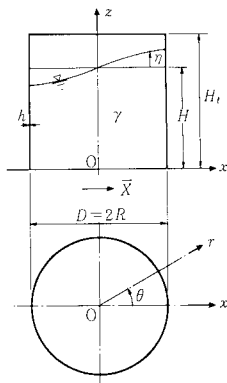


Fig. 1 Notations.

2. 貯槽の振動挙動に関する研究

剛体容器内液体の地震時の運動については、すでに速度ポテンシャル理論解が論じられていたが^{1),2)}、歴史的に著名な研究は G. W. Housner のものである³⁾。彼の研究は、本来速度ポテンシャル理論で記述されるべき液体運動を簡略な近似式で表現し、液面動揺についても地震応答を速度応答スペクトルを用いて算定する方法を与えたものであり、自由液質量と固定液質量による液体の質点モデル (Fig. 2) は、地震応答解析を簡易化するのに非常に有効なので、永年にわたって広い分野で用いられた⁴⁾。同時期にわが国でも高架水槽についての先駆的な研究がある^{5),6)}。

一方、ロケットなどの液体燃料タンクの振動性状に関

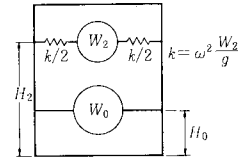


Fig. 2 Mechanical Model.

して、一連の莫大な研究成果が集積されており、その代表的な文献が H. N. Abramson 編集のものである⁷⁾。

新潟地震は、地震時の液面動揺の重要性を認識させた。山本⁸⁾は、数基の貯槽の被害を液面動揺 (スロッシング) によるものと断定し、速度ポテンシャル理論による検討を行っている。柴田・曾我部らは、その後一連の研究において^{9),10)}、スロッシングの重要性を喚起し、模型タンクの実験や実測を通じて、液面上昇量の算定法として n 波共振法を提案した¹¹⁾。その後 API 基準 (案) では Housner 式を用いてスロッシングの検討が行われ¹²⁾、また速度ポテンシャル理論による速度応答スペクトルを用いたスロッシング算定法が検討されている^{13),14)}。

以上はいずれも剛体貯槽を前提とした解析であり、最近では計算機の発達もあって、少々複雑でもより厳密な速度ポテンシャル理論の方が好まれる傾向にあり、Housner の近似式の有効性もやや薄れつつある。

貯槽の弾性変形の影響は、Housner 式を水槽の固有周期算定に応用した研究にも考慮され始めているが¹⁵⁾、電子計算機の発展とともに固有振動解析に関する研究¹⁶⁾⁻¹⁸⁾に続いて、地震応答解析¹⁹⁾がなされ、しだいに本格化するに至った。A. S. Veletsos²⁰⁾や白木ら²¹⁾ははり状の貯槽と内部液体の連成振動を扱い、W. A. Nash ら²²⁾や著者ら^{23),24)}は有限要素法を用いて、シェル-液体の流力弾性振動解析を実施した。後者は、有限要素法の詳細な解析から、スロッシングとシェル変形は低次モードではほとんど連成しないことを示し、流力弾性振動挙動が耐震検討上非常に重要なことを指摘して、この挙動をバルジング (bulging) とよんだ。その後この種の流力弾性振動解析については、数多くの研究が行われて、底部完全固定の貯槽に関する挙動は、かなり明らかになりつつある²⁵⁾⁻³¹⁾。

このような振動挙動研究の結果は基準にも反映されるようになり、1979 年の API 基準¹²⁾には初めて次のような考え方が採用された³²⁾。すなわち、地震荷重の算定には、従来の貯槽全体を剛とする仮定より進んで、貯槽の振動性状をより忠実に考慮する、というものである。貯槽の振動性状 (地震応答性状) には、次の 2 種類がある。

- 1) 貯槽本体と内部液体が一体となって運動する短周期的応答
- 2) 主として内部液体の運動が卓越する長周期的応答

言い換えるならば、前者は流力弾性振動（バルジング）、後者は液面動揺（スロッシング）を指している。

わが国においても、独自に基準の検討が続けられていたが、まず高圧ガス関係の基準³³⁾、次に石油タンク関係の基準³⁴⁾において、ほぼ以上述べたのと同様の考え方が採用されるに至っている。次章では、これらの基準において基本となる貯槽特有の応答を概略説明する。

3. 貯槽の地震応答性状

(1) 短周期的応答（バルジング応答）

一般的な流力弾性振動問題は、微小変位振動と非粘性・非圧縮性・渦なしの流れの仮定のもとに、次のようなマトリックス方程式で書くことができる^{35)~37)}。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_e + \mathbf{S}_1 \mathbf{H}^{-1} \mathbf{S}_1^T & \mathbf{S}_1 \mathbf{H}^{-1} \mathbf{S}_2^T \\ \text{sym} & \mathbf{S}_2 \mathbf{H}^{-1} \mathbf{S}_2^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta \\ \eta \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_e & \mathbf{0} \\ \text{sym} & \mathbf{K}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta \\ \eta \end{Bmatrix} = -\ddot{\mathbf{X}} \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_1 \\ \mathbf{F}_2 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、記述を簡単にするため減衰項は省略されており、 δ および η はそれぞれ弾性体および液面の変位、 \mathbf{M}_e は弾性体の質量、 \mathbf{K}_e および \mathbf{K}_f はそれぞれ弾性体振動および液面波動の剛性である。右辺の項は、一般振動問題と同じく、強制変位 $\ddot{\mathbf{X}}$ に伴って生ずる外力項を表わす。 $\mathbf{S}_1 \mathbf{H}^{-1} \mathbf{S}_1^T$ および $\mathbf{S}_2 \mathbf{H}^{-1} \mathbf{S}_2^T$ は弾性体および液面の変位に伴って生ずる液体の質量効果を表わす。特に前者は、弾性体への液体の質量効果であるから、付加質量（仮想質量、有効質量）とよばれる。 $\mathbf{S}_1 \mathbf{H}^{-1} \mathbf{S}_2^T$ は弾性体変位と液面変位の連成を意味する項であるが、通常の貯槽では、低次モードにおいてはこの連成効果は非常に小さいので、この項は無視されることができる。結果として、バルジングとスロッシングの連成は考えなくてよいことになる^{23),24)}。

式(1)の第1式と第2式をそれぞれモーダルアナリシスによって解けば、それぞれのモードの一般変位 A_i と B_j ($i, j=1, 2, \dots$) についての応答が求まる。これより地震荷重としての動圧力、水平力、転倒モーメントなどが次のように求められる。

$$P(z, t) = P_0(z) \cdot \ddot{\mathbf{X}} + \sum_{i=1}^{\infty} P_{1i}(z) \cdot \ddot{A}_i + \sum_{j=1}^{\infty} P_{2j}(z) \cdot (\ddot{\mathbf{X}} + \ddot{B}_j) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、第1項は慣性圧、第2項は変形圧、第3項は波動圧とよぶ²⁸⁾（Housnerは、第1項を impulsive pressure、第3項を convective pressure とよんだ³¹⁾。

$$Q(t) = \frac{W_0}{g} \ddot{\mathbf{X}} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{W_{1i}}{g} \ddot{A}_i + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{W_{2j}}{g} (\ddot{\mathbf{X}} + \ddot{B}_j) \dots\dots\dots (3)$$

$$M(t) = \frac{W_0}{g} H_0 \ddot{\mathbf{X}} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{W_{1i}}{g} H_{1i} \ddot{A}_i$$

$$\cdot \sum_{j=1}^{\infty} \frac{W_{2j}}{g} H_{2j} (\ddot{\mathbf{X}} + \ddot{B}_j) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 W_0 は固定液重量、 W_{1i} および W_{2j} は各モードに対する有効液重量であり、 H_0, H_{1i}, H_{2j} はそれぞれ対応する液重心高さである。

スロッシングの固有周期はきわめて長いので、短周期成分の卓越する加速度計強震記録などでは、第3項の影響は小さい。したがって、重要な第1項と第2項を合わせて、短周期的応答という。

Fig. 3 は、75 000 kL LNG 地上式貯槽（アルミニウム製）の十勝沖地震（1968年）八戸港記録波に対する応答解析例であるが²⁴⁾、これを見ると、剛体としての慣性圧に比し、変形圧のオーダーは大きく、したがって全動圧は慣性圧の数倍のオーダーの増幅を考えなければならぬ、ことがわかる。

このように側板弾性変形の効果は顕著である。この流力弾性振動の特徴は、Fig. 4 の固有振動解析の結果にみられるとおりであり、この解析の妥当性は実験的にも確認されている（Fig. 5）。実際の貯槽の固有周期については、わが国の石油貯槽について計算された結果があり（Fig. 6）、軟鋼製の小・中型のもので、0.15~0.3秒程度、高張力鋼製の中・大型のもので0.25~0.5秒程度となっている²⁸⁾。

実用的な設計法としては、最も影響の大きい一次モードのみ考慮して、式(2)、(3)、(4)を次のように書き替える。

$$P(z, t) = P_0(z) \cdot \ddot{\mathbf{X}} + P_{11}(z) \cdot \ddot{A}_1 + P_{21}(z) \cdot (\ddot{\mathbf{X}} + \ddot{B}_1) \dots\dots\dots (5)$$

$$Q(t) = \frac{W_0}{g} \ddot{\mathbf{X}} + \frac{W_{11}}{g} \ddot{A}_1 + \frac{W_{21}}{g} (\ddot{\mathbf{X}} + \ddot{B}_1) \dots\dots\dots (6)$$

$$M(t) = \frac{W_0}{g} H_0 \ddot{\mathbf{X}} + \frac{W_{11}}{g} H_{11} \ddot{A}_1 + \frac{W_{21}}{g} H_{21} (\ddot{\mathbf{X}} + \ddot{B}_1) \dots\dots\dots (7)$$

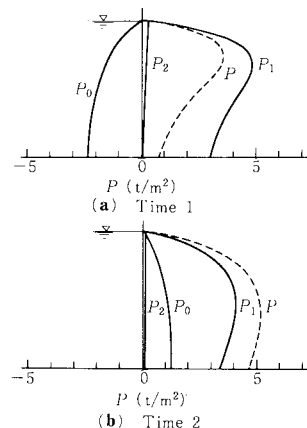


Fig. 3 Example of Pressure Response of 75 000 kL LNG Tank to the Tokachioki Earthquake.

\ddot{A}_1, \ddot{B}_1 は相対加速度であり、この代わりに絶対加速度を用い、これに応答震度 K_1, K_2 を対応させるならば、

$$p_{\max} = \gamma H [p_0(z) K_0 + p_1(z) (K_1 - K_0)] \cos \theta \dots (8)$$

$$Q_{\max} = W_0 K_0 + W_{11} (K_1 - K_0) \dots (9)$$

$$M_{\max} = W_0 H_0 K_0 + W_{11} H_{11} (K_1 - K_0) \dots (10)$$

ただし、 K_0 は地表震度である。あるいは、

$$Q_{\max} = \sqrt{(W_0 - W_{11})^2 K_0^2 + W_{11}^2 K_1^2 + W_{21}^2 K_2^2} \dots (11)$$

$$M_{\max} = \sqrt{(W_0 - W_{11})^2 H_0^2 K_0^2 + W_{11}^2 H_{11}^2 K_1^2 + W_{21}^2 H_{21}^2 K_2^2} \dots (12)$$

または、

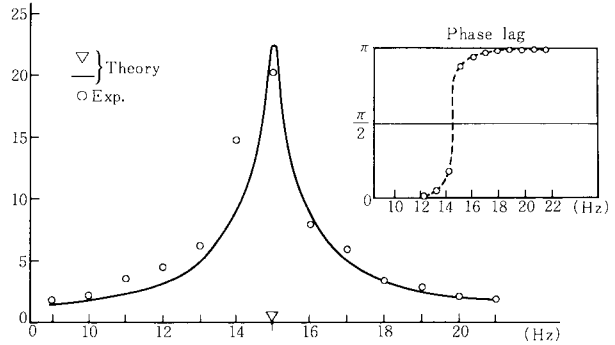
$$M_{\max} = W_0 H_0 K_0 + W_{21} H_{21} K_2 \dots (13)$$

などの修正震度法の式が導かれる。式(8)~(10)は著者ら²⁸⁾によって導かれたものであり、短周期的応答としては第3項を無視している。式(11)、(12)はHousnerら³⁰⁾によって与えられたものであり、第3項を無視すれば、式(9)、(10)の結果とほぼ同様の値を算出する。式(13)はAPI基準の式であるが、 $W_{11} H_{11} \approx W_0 H_0$ が仮定されてい

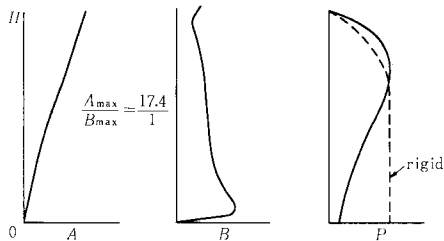
る。ここで、 $p_0(z), p_1(z), W_0, W_{11}, H_0, H_{11}$ などに関しては、具体的な値が与えられている。

修正震度を求めるための基本固有周期については、次のような式が著者ら²⁸⁾によって提案されている。

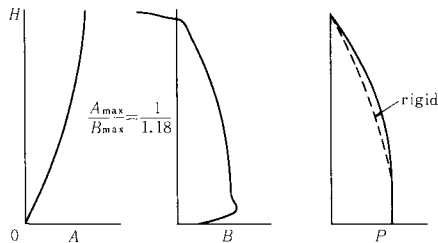
$$T_b = \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{W}{\pi g E h_{1/3}}} \dots (14)$$



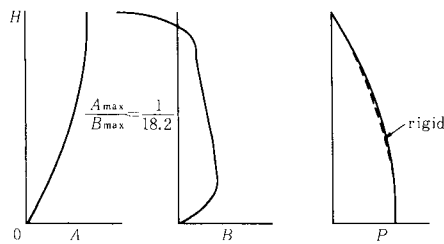
(a) Top to base amplification factor



(a) $H/D=2.0$



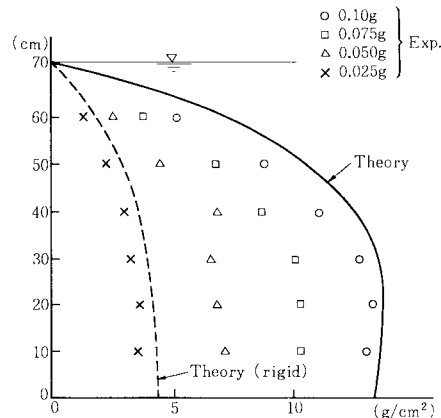
(b) $H/D=0.5$



(c) $H/D=0.17$

A : lateral deflection P : pressure
B : cross-sectional deformation

Fig. 4 Natural Mode of Fluid-Elastic Vibration.



(b) Dynamic pressure

Fig. 5 Comparison between Analysis and Experiment.

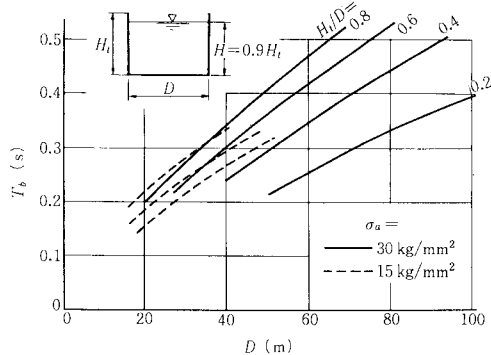


Fig. 6 Fundamental Natural Period of Fluid-Elastic Vibration for Oil Storage Tanks.

ここで、 $\lambda=0.067(H/D)^2-0.30(H/D)+0.46$

ただし、 $0.15 \leq H/D \leq 2.0$

また、 W は液の全重量、 E はシェル材料のヤング率、 $h_{1/3}$ は底面から $1/3 H$ の位置における側板の板厚である。本式は、一様板厚とシェル質量無視の仮定のもとに有限要素法の解析結果から求められた近似値であるが、任意の液体・構造材料の場合に適用し得る一般式である。

以上のような簡略式は、その後の Housner ら³⁰⁾や清水ら³¹⁾の解析結果からもその妥当性が確かめられているので、最近わが国で制定された LNG・LPG 用貯槽などに関する高圧ガス設備耐震基準（通産省）³³⁾や石油用貯槽に関する危険物技術基準（自治省消防庁）³⁴⁾にて採用されている。

(2) 長周期的応答（スロッシング応答）

前述したように、通常スロッシングと側板の弾性振動との連成は考えなくてよいので、スロッシングは剛体貯槽の理論により記述される。

剛体円筒容器の水平変位 \bar{X} に対する内部液体の速度ポテンシャル解は次のようになる¹⁴⁾。

$$\phi(r, \theta, z, t) = \frac{D}{2} \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} \beta_i \phi_i(r, z) \dot{B}_i(t) + \frac{2r}{D} \dot{\bar{X}}(t) \cos \theta \right\} \dots\dots\dots(15)$$

ここで、 ϕ_i 、 β_i および B_i は次のように与えられる。

$$\phi_i = J_i \left(\epsilon_i \frac{2r}{D} \right) \cosh \left(\epsilon_i \frac{2z}{D} \right) \cos \theta \quad (i=1, 2, \dots) \dots\dots\dots(16)$$

$$\beta_i = \frac{2}{(\epsilon_i^2 - 1) J_i(\epsilon_i) \cosh \left(\epsilon_i \frac{2H}{D} \right)} \dots\dots\dots(17)$$

$$\ddot{B}_i + 2h_i \omega_i \dot{B}_i + \omega_i^2 B_i = -\ddot{\bar{X}} \dots\dots\dots(18)$$

ただし、 ω_i は i 次の固有円振動数である。

$$\omega_i = \sqrt{\frac{g}{D} 3.682 \tanh \left(\frac{3.682H}{D} \right)} \dots\dots\dots(19)$$

これより、側壁における液面上昇量 η は、

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \eta_i(t) \dots\dots\dots(20)$$

ただし、 η_i は i 次モードの液面上昇量であり、

$$\eta_i(t) = \frac{D}{2g} \cdot \frac{2}{\epsilon_i^2 - 1} (\ddot{\bar{X}} + \ddot{B}_i) \dots\dots\dots(21)$$

として求められる。

スロッシングの液面応答においては、一次モードが卓越するので、一次モードのみ考えるならば、式 (21) より次の近似式が得られる。

$$\eta \approx \eta_1 = \frac{D}{2g} 0.837 (\ddot{\bar{X}} + \ddot{B}_1) \dots\dots\dots(22)$$

したがって、応答スペクトル S_A あるいは S_V を用いて

$$\eta_{\max} \approx \frac{D}{2g} 0.837 S_A \approx \frac{D}{2g} 0.837 \omega_1 S_V \dots\dots\dots(23)$$

と書いてもよい。

式 (19) より求められるスロッシングの基本固有周期は、実際の貯槽で Fig. 7 のようになる。このように、スロッシングの固有周期はきわめて長周期であり、液面上昇量あるいはそれに比例する地震荷重は絶対応答加速度より求められるので、結局スロッシングの応答を知るためには、長周期帯域での絶対応答加速度など地震動特性の把握が重要になる。

柴田らは^{9),10)}、一連の研究において、スロッシングの応答計算法として n 波共振法なる簡便法を提案している。すなわち、

$$S_A = \omega_i^2 |\bar{X}|_{\max} S(n) \dots\dots\dots(24)$$

ただし、 $S(n)$ は正弦 n 波入力に対する加速度応答倍率である（普通 $n=3$ ）。

一方最近に至りこのような長周期帯域の地震動特性の研究もかなり進展がみられるようになり⁴¹⁾、森岡³⁹⁾の関東大地震ユーイング記録計の復元記録や田中ら⁴⁰⁾の気象

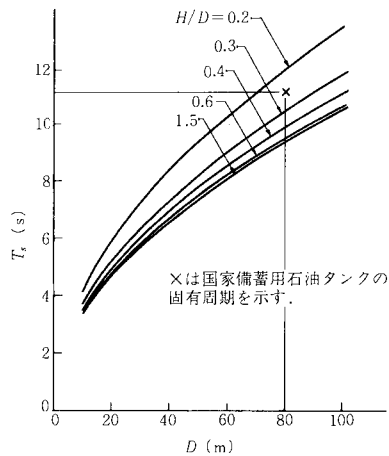


Fig. 7 Fundamental Natural Period of Sloshing.

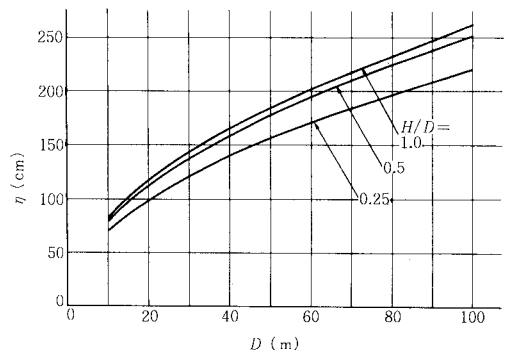


Fig. 8 Elevation Change for $S_V=100$ cm/s.

庁1倍強震計の変位記録などの利用を始めとして⁴²⁾、設計用応答スペクトルの提案も行われるようになっていく。いずれにしても、数秒から十数秒という長周期帯域については、まだデータが十分でなく(大地震、近距離の完全なデータはほとんどない)、われわれの知見が豊富な短周期領域とは事情が異なるので、今後の調査に待たれるところが多い。

Fig. 8は $S_v=100$ cm/sとしたときの液面上昇量の推定チャートである⁴⁴⁾。

4. 各種形状の貯槽について

(1) 球形貯槽

各種形状を有する貯槽の内容液の振動については、文献7)に集大成されているが、球形貯槽の耐震設計研究としては、科学技術庁の総合研究⁴³⁾があり、その後柴田ら^{44), 45)}により継続研究が行われている。一方、解析に基づく設計式の提案⁴⁶⁾や実機における地震観測⁴⁷⁾がなされている。球形シェルの弾性変形効果(流力弾性振動)も解析されているが、球形シェルは剛性が非常に高いので、球形シェル自体は剛体と考え、支持構造の弾性効果を考慮するのが普通である。支持構造については、球形シェルと支持部材の結合部応力や支持部材の耐荷性状が問題となるが、現在では認定プログラムも存在し⁴⁸⁾、かなり標準設計が可能となっている。

(2) 高架水槽

高架水槽に用いられる貯槽の形状はさまざまである。その耐震研究はかなり古くからなされているが、1952年のKern County地震の被害以降、いろいろの研究報告がなされている。すなわち、角槽・円筒槽・円錐槽の有効質量を実験的に求めた武藤ら⁴⁹⁾の研究を始め、世界地震工学会議でいくつか報告があり⁵⁰⁾、土木学会の動的解析テキスト⁵¹⁾や建築学会の基準⁵²⁾に反映されている。

その後も角型水槽やFRP水槽の研究があり⁵³⁾、弾性変形効果(バルジング)の影響も考慮されている。また、最近新形式の構造物としての卵形消化槽の耐震研究も実施されている⁵⁴⁾。

5. 今後の課題

(1) 実験と実測

貯槽は、構造物と流体そして基礎・地盤と相互に結合された振動システムを構成しており、したがって貯槽の耐震問題は一般構造物の場合よりも複雑である。また、大型の円筒平底貯槽などでは、直径100mというような、広大な面積(野球場と同じ)に10万tにも及ぶ重量物が存在していることになり、この点からも他の構造物にみられない多くの問題が含まれる。したがって、貯槽の耐震安全性検討のためには、単なる理論解析だけで

なく、十分に吟味された実験と実機での振動計測・地震観測が是非とも必要である。しかしながら、この問題に関して、貯槽は他の構造物の場合よりも条件が悪い。

実験により、実際の貯槽に起こるであろう現象を忠実にシミュレーションしようとする場合、まず第一に考えなければならないのは相似則である。ところが、構造物のみならず流体も考慮に入れるとなると、實際上モデルの作成に非常な制約を受け、通常の規模の実験では相似律を完全に満足することは、きわめて困難である⁷⁹⁾。次に実測についても、貯槽の多くは危険物を内蔵するものであり、長期間の自由な計測ということがまた大変に難しいのである。しかし最近では、この点の理解も進み、特に実機での測定がしだいに多くなされるようになった。

実測については、早期の久保ら⁵⁵⁾、横田ら⁵⁶⁾の地震観測があるが、特に後者は貯槽のロッキング動が顕著であることを指摘している。また、PC貯水タンクについて、バルジングや基礎との関連が調査された例⁵⁷⁾があり、Housnerら⁵⁸⁾は3体の貯水タンクについて詳細な振動実験を行い、周方向 $\cos k\theta$ モードの卓越を報告している。また、Cambra⁵⁹⁾は実際の石油タンクについて、静液時のシェル側板たわみ計測を行い、初期たわみのオーダーを推定している。

実験研究の中で著名なのは、California大学(Berkeley)のClough教授グループ^{60)~64)}の一連の実験である。これらは振動実験と傾斜実験に分けられるが、後述するような周方向高次モード・浮き上がり・座屈などのいくつかの問題を調べたものである。しかしながら、彼らの研究においても、用いた模型寸法の限界から(直径3.6mが最大)、大型タンクに対する相似性は、必ずしも完全でなく、解析との照合を含めて定量化にまでは至っていない。

しかしながら、まことに興味深い災害例が1983年Coalinger地震の石油タンクの場合にみられている。その被災タンクは直径11.7m、液高さ5.5mでCalifornia大学の直径3.6mの模型タンクとちょうど相似関係がほぼ成り立つような諸寸を有していたのである。Manosらは⁶⁵⁾、早速両者の比較を通じて、破損モードとしての座屈の可能性を論じている。

この種の模型実験の相似性においては、Buckinghamの π 定理に関するすべての無次元パラメーターの中でも、幾何寸法比と液圧力・タンク材料弾性係数比($\gamma H/E$)が最も重要である。幾何寸法比は、模型材料を念頭に選択することにより何とか保持することができても、 $\gamma H/E$ までも合わせて保持しようとする、非常に難しい問題となるのである。近年タンクの模型実験はかなり数多く行われているけれども、ほとんどは $\gamma H/E$

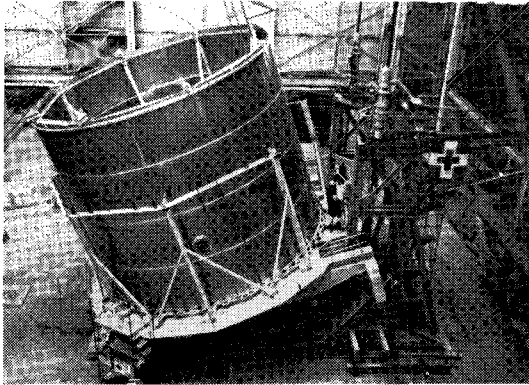


Photo 1 Static Tilt Test with a Full-Sized Model to the Similitude Law ($D=9.6\text{ m}$).

を所定の値に保持できず、大方は実物よりも剛なモデルになっていることに注意せねばならない。

このような点から、貯槽の実験では大型の模型が必要になってくる。最近高圧ガス保安協会の下で実施された多度津原子力工学試験センターにおける振動実験では⁶⁶⁾、直径 10 m、液高さ 6.9 m というような鋼製モデルが使用されたが、エレファント・フット・バルジ（象の足型変形）などの破損モードが現出し、非常に興味深いデータを提供している。

著者らは⁶⁷⁾、大型貯槽の完全相似モデルによる実験を目指して、現在直径 9.6 m、液高さ 4.6~5.5 m のアルミニウム製モデルによる静的傾斜実験を遂行中である。傾斜実験というのは、タンクを傾斜させることにより、地震力と同様の力を作用させて、タンク挙動を調査しようとするものであるが、本実験は直径 60 m 程度の LNG タンク、直径 50 m 程度の LPG タンク、直径 40 m 程度の石油タンクと相似性を十分に保持するように計画しており、大型タンクとの相似を実現させたものとして、高圧ガス保安協会の実験とともに世界的にも顕著な例といえるであろう。Photo 1 はその実験の様子を示すものである。

(2) 設計地震動

前述したように、貯槽の基本固有周期は、バルジングモードで 0.15~0.5 秒、スロッシングモードで 3~12 秒程度であり、特に後者についてどのような設計地震動を考えるべきか、ということが問題となる。これについては最近の土木学会の調査報告⁶⁸⁾などにもあるように、周期 5 秒程度までなら加速度計強震記録に基づく従来の知見⁶⁹⁾が適用できそうであるが、それ以上は記録データの誤差によって従来のデータをそのまま適用するのは無理があるようである⁷⁰⁾。そのため断層モデル解析の援用⁷¹⁾や深い地盤構造の調査など新しい視点からの地震動のと

らえ方も必要になってきている。

1983 年 5 月の日本海中部地震はスロッシングによる被害が顕著に現われ、スロッシングと長周期地震動を考えるうえできわめて重要な意味をもつものとなった。たとえば 300 km 以上も震源地から離れた新潟において速度応答スペクトルで 200~300 m/s というような現行基準を大きく上回るような値が現実を経験され⁷²⁾、それに伴うスロッシング液高も 4~5 m のオーダーで生じており、浮屋根ポンツーンの座屈破壊などいくつかの破損例がみられているからである^{73), 74)}。この地震については、実際の地震記録の分析と実タンクでのスロッシング液高（タンク側壁についた跡やオーバーフローの状態から推定）との照応などから、新潟、秋田などにおける長周期地震波性状がしだいに明らかになってきており、今後その成果が待たれるところである。

(3) 地盤・基礎との連成

地盤・基礎との連成振動の問題は、土木学会の調査報告書⁷⁵⁾でも取り上げられたが、貯槽問題としては二重の意味で重要である。この場合、1 つは一般構造物と同じような意味での連成振動問題であるが⁷⁶⁾、もう 1 つは貯槽本体が非常に柔性に富んでいることによる浮き上がりロッキング振動問題である。後者においては、基礎と本体との微妙な構造関係が問題になるところであり、複雑な非線形振動現象を生むことになる。

このような地盤・基礎との連成振動研究は、杭基礎形式の場合よりも直接基礎形式の場合に問題になるといわれているが、地盤系をばね-質点系で扱おうとする立場と三次元弾性体系で扱おうとする立場がある。たとえば、前者では著者ら⁷⁷⁾が 2 種類のロッキングモデルを示したり、後者では梅林ら⁷⁸⁾による逸散減衰評価を含む解析の提示などがある。

(4) 初期不整の影響

3. で述べたのは、貯槽が理想的な円筒の場合であり、実機では種々の条件により $\cos \theta$ モードのみならず、 $\cos k\theta$ モード ($k \geq 2$) が混入してくる。これらはトータルの地震力には影響を与えないが、局部応力等にはかなりの影響を与えるものと予想される。実際固有振動数に関しては、 $\cos \theta$ の一次モードよりも $\cos k\theta$ で $k \gg 1$ のモードの方がずっと低いのが普通である。このような高次モードの影響は、Kana⁷⁹⁾を始め、いくつかの研究で論じられ、特に初期フープ力および初期不整との関連で検討されている⁸⁰⁾。また模型実験や現場測定などではしばしば観測されるものである⁸¹⁾。

ただし、精度のよい模型などではそれほど顕著でなく²⁸⁾、模型タンクの初期不整が現実のものより強調されすぎるきらいがあり⁵⁹⁾、現実のタンクでどれくらいの重要性があるかはよく検討される必要がある。

(5) 鉛直地震動

鉛直地震動に対しても、前述した短周期的・長周期的両方の応答形態が考えられる。短周期的の応答に関しては、流力弾性振動の存在が予見されるが、著者らなどにより水平入力の場合と同様の簡易解が示されるに至っている⁸¹⁾。ただし、この場合非線形振動としてのパラメトリック励振現象が生ずることがあるといわれている。

長周期的の応答（スロッシング）としては、刺激係数からいって水平入力の場合ほど影響は大きくないが、大振幅になるにつれ、非線形振動現象としての分数調和共振を生ずることが、早くから Taylor などによりいわれている^{83), 84)}。

(6) 浮屋根貯槽のスロッシング

スロッシングについて前述したことは、浮屋根のない自由表面の場合に相当しているが、浮屋根のある場合のスロッシングについては著者らを始めとする研究がある^{85)~87)}。これらの結果ではスロッシングの固有周期については、浮屋根のない場合とあまり変わらず、波高については浮屋根の存在が有利に働く可能性があるが、浮屋根の応力については日本海中部地震の例からもチェックの必要性を述べている⁷⁴⁾。

(7) 非線形スロッシングと固定屋根に働く衝撃波力

スロッシング波高がしだいに成長すると、微小振幅波から有限振幅波の領域に入るが、問題は非線形になり⁸⁸⁾、水平加振にもかかわらず波面の回転運動を生ずるようなこともある。木村ら⁸⁹⁾はこれを変分原理によって解析している。波高が大きくなり、固定屋根に衝突すると、屋根に衝撃力を生ずる。

この問題は新潟地震の災害例についての山本の指摘⁸¹⁾以来論じられてきたが、このような水面衝撃問題はそもそも飛行艇の着水問題から端を発しており⁹⁰⁾、棧橋波力や船底衝撃圧の問題とも同種のものであるが、厳密な理論解明がまだ十分でないので実験的研究が主として行われている。

(8) 滑動と浮き上がり

前述したように、貯槽は大きな広がりと重さを有するきわめて柔な構造物であるので、アンカーをとることは一般に難しい。したがって、大地震においてはしばしば滑動や浮き上がりロッキングが生じ、それによる破損も起きている⁹¹⁾。

滑動についての研究例はあまりないが、滑動による永久変位がある許容値以下ならば、地震力は軽減する方向になるので、付帯設備をそれに伴うようなものにして、滑動を許容するようなことも、耐震設計の1つの方向になるであろう⁹²⁾。

浮き上がりロッキング現象については、California 大学の一連の振動実験研究によりかなりのことが明らかに

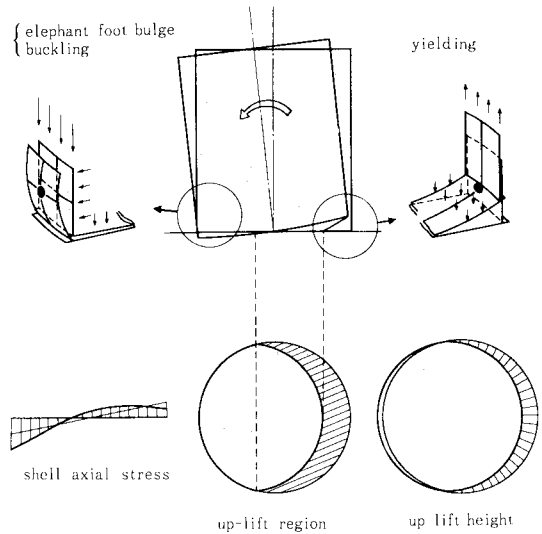


Fig. 9 Up-Lift Problems.

されたが^{60)~64)}、その後も引き続き現象の理論的解明と定量化に向けて研究がなされつつある^{93)~95)}。このような浮き上がりを生ずると、Fig. 9 に示すように、浮き上がり側は底板の支持を失って隅角部に大きな応力が発生し、破断に至ることもある。この結果が1978年の宮城県沖地震の東北石油の事故であるといわれている⁹⁶⁾。一方、圧縮側には、浮き上がりのない状態よりも大きな集中的軸圧縮力が発生し、シェルの座屈あるいは象の足型変形とよばれる不安定現象を誘発する。

アニュラー板-側板隅角部の強度問題は、静液圧状態でもアニュラー板の一部が浮き上がることによる応力が問題となるのであるが⁹⁷⁾、地震時の応力状態を論じたものとして側板の浮き上がりを考慮しない仮定に基づいたもの⁹⁸⁾や浮き上がりを考慮したものがあるが⁹⁹⁾、いずれも理論上あるいは実験上でかなりの仮定に基づいた展開が行われており、頭井らの行った方程式の厳密解析や著者らの実物相似実験がその意味で重要な意味をもつものと思われる^{100), 67)}。

APIの基準では^{12), 32)}、Cloughらの研究結果を参考に、アニュラー板とシェル側板を一連のラーメン構造とみて、アニュラー板を塑性崩壊解析するという大胆な計算法により、浮き上がり転倒に対するチェックを行うことにしているが、隅角部の塑性ひずみ状態などに対する配慮はなく、日本で多くみられる大型タンクに適用可能かどうか疑問がある。

(9) 座屈 (buckling) と象の足型変形 (elephant foot bulge)

円筒シェルの座屈タイプとしてよく知られているのは、ダイヤモンド型座屈であるが、この破損モード例に

は1980年Greenville地震におけるワインタンクの事例がある⁶³⁾。現在の貯槽に関する基準では、側板圧縮部のチェックとして、円筒シェルの軸圧縮許容応力に、線形座屈値に実験低減率を考慮した次の限界式

$$\sigma_{cr}=0.2 \frac{Eh}{R} \dots\dots\dots(25)$$

を標準として用いるが、これにさらに余裕度を見込んだり、初期フープ力の存在が座屈限界力を高めることを考慮したりして、基準によって許容応力の考え方はまちまちである。

先に述べたように、浮き上がりが生ずると、軸圧縮力に集中が生ずるので、底部固定の場合の軸圧縮力よりも大きな値となる。この集中度が問題であるが、ある場合には4倍くらいになるという結果が出ている^{61), 66)}。このような状態では、大きなフープ応力と軸圧縮力の組合せによってシェル側板に弾塑性・大変形現象が現われ、これがSan Fernando地震などでみられた象の足型変形である、というのが最近の定説である。

いずれにしても軸圧縮力の集中とダイヤモンド座屈あるいは象の足型変形の現われ方との関係は、まだ未解明の問題であり、前記著者らの傾斜実験など現在各方面で研究がなされているところである。

6. おわりに

以上、円筒平底貯槽を中心にその耐震設計上特徴と思われる問題を取り上げ、従来の研究成果と今後に残されている課題について概説した。問題が多岐にわたり、舌足らずに終わっている部分や触れ得なかった問題（たとえば、免震・制震装置の利用など）もいくつかある。参考にさせていただきながら、引用に至らなかった論文も多数あるが、ページ数の制限もあるので、お許し願いたい。

貯槽の耐震問題は、ここで述べたように地震・強度・土質・流体など多くの学問領域と流体-シェル-基礎連成振動や非線形振動など難解な問題が関係し、関連文献も土木分野のみならず航空・造船・機械・建築などの各分野から見出す必要がある。また、一口に貯槽といっても、水タンクからロケットの燃料タンク・原子炉容器まで用途はさまぎまである。その意味では非常に興味深い問題が数多く存在し、設計上未解決な問題も多い。著者がこの問題に携わって早くも10年以上になるが、この小論文が土木の構造・耐震・流体に関係する方々に少しでも参考になれば幸いと考える次第である。

参 考 文 献

1) Werner, P.W. and Sundquist, K.J. : On Hydrodynamic Earthquake Effects, Trans. Am. Geophys. Union, Vol.30, No.5, 1943.

2) Jacobsen, L.S. : Impulsive Hydrodynamics of Fluid inside a Cylindrical tank and of Fluid surrounding a Cylindrical Pier, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.39, No.3, 1949.

3) Housner, G.W. : Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.47, 1957.

4) Housner, G.W. : Dynamic Pressure on Fluid Containers, TID Rep. 7042, 1963.

5) Senda, K. and Nakagawa, K. : On the Vibration of an Elevated Water-Tank I. Tech. Rep. of Osaka Univ., Vol.4, No.117, 1954.

6) Nakagawa, K. : On the Vibration of an Elevated Tank II & III, Tech. Rep. of Osaka Univ., Vol.5, No.170, 1955 & Vol.6, No.193, 1956.

7) Abramson, H.N. (ed.) : The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers, NASA Rep. SP-106, Southwest Research Institute, 1966.

8) 山本善之 : 地震による石油タンクの液面の動揺と衝撃圧力, 高圧力, 第3巻, 第1号, 1965.

9) 曾我部潔・重田達也・柴田 碧 : 液体貯槽の耐震設計に関する基礎的研究, 東京大学生産技術研究所報告, 第26巻, 7号, 1977.

10) Shibata, H. and Sogabe, K. : Design Criteria for Oil and Liquefied Gas Storages, Proc. ECEE, 1978-9.

11) 山本鎮男 : 貯槽類(円筒)の耐震設計, コンビナート保安防災技術指針, 高圧ガス保安協会, 1974.

12) American Petroleum Institute : Seismic Design of Oil Storage Tanks, API Std. 650 (Welded Steel Tanks for Oil Storage), App.E, 1979.

13) 清水信行, ほか : 速度応答スペクトルを用いた液体のスロッシング波高解析, 日本機械学会講演会論文集, 1980-4.

14) 坂井藤一 : 円筒形液体タンクの耐震設計法に関する二, 三の提案, 圧力技術, Vol.8, 1980-7.

15) 飯島延恵・萩原敏雄 : 円筒シェル水槽の耐震計算について, 土木学会誌, 44巻, 10号, 1959-10.

16) Baron, M.L. and Skalak, R. : Free Vibrations of Fluid-filled Cylindrical Shells, Proc. ASCE, Vol.88, EM3, 1962-6.

17) Ayra, A.S., Thakkar, S.K. and Goyal, A.C. : Vibration Analysis of Thin Cylindrical Containers, Proc. ASCE, Vol.97, EM 2, 1971-4.

18) 柴田 碧・曾我部潔 : 流体・弾性系の固有値解析に対する一提案, JSSCマトリックス構造解析法シンポジウム論文集, 1971-6.

19) Edwards, N.W. : A Procedure for the Dynamic Analysis of Thin-walled Cylindrical Liquid Storage Tanks subjected to Lateral Ground Motions, U.S. Gov. Res. Literatures, Contact No.4504, 1969.

20) Veletsos, A.S. : Seismic Effects in Flexible Liquid Storage Tanks, Proc. 5 WCEE, Rome, 1973.

21) 白木万博・藤田勝久 : 液体を含む自立形薄肉円筒タンクの地震応答解析, 三菱重工技報, 12巻, 3号, 1975-5.

22) Wu, C.I., et al. : Response of Ground Supported

- Liquid Storage Tanks to Seismic Excitation, Proc. U. S. Nat. Conf. on Earthq. Engrg., 1975-6.
- 23) 坂井藤一・迫田治行：大型液体タンクの地震応答に関する研究，第4回日本地震工学シンポジウム論文集，1975-11.
 - 24) 岡田統夫・坂井藤一・迫田治行：有限要素法による大型液体タンクの地震応答解析，川崎重工技報，No. 59，1975-12 および No. 61，1976-8.
 - 25) 奥村敏恵・秋山成興・小川 浩：たわみ性を有する円筒貯槽タンクの振動性状について，埼玉大学工学部建設基礎工学科研究報告，第7巻，1977.
 - 26) Veletsos, A. S. and Yang, J. Y. : Earthquake Response of Liquid Storage Tanks, *Advances in Civil Engrg. Through Engineering Mechanics*, Proc. 2nd Engrg. Mech. Div. Spec. Conf., ASCE, 1977-5.
 - 27) 坂井藤一・小川 浩：円筒形液体タンクの簡易な振動解析法について，マトリックス構造解析法シンポジウム論文集，日本鋼構造協会，1979-6.
 - 28) 坂井藤一・迫田治行・小川 浩：石油タンクの耐震設計法—API改訂案に関連して，川崎重工技報，No. 71，1979-7.
 - 29) Sakai, F., Nishimura, M. and Sakoda, H. : Studies on Earthquake-Resistance of Liquefied Natural Gas Storage Tanks, 6th Intn. Conf. & Exhib., Kyoto, 1980-4.
 - 30) Haroun, M. A. and Housner, G. W. : Seismic Design of Liquid Storage Tanks, Proc. ASCE, Vol. 107, No. TC 1, 1981-4.
 - 31) 清水信行・山本鎮男・河野和間：円筒タンクの耐震設計法に関する研究（その1，その2），日本機械学会論文集，第425号および第426号，1982-2 および 3.
 - 32) Wozniak, R. S. and Mitckell, W. W. : Basis of Seismic Design Provisions for Welded Steel Oil Storage Tanks, API Refining Dept. 43rd Midyear Meeting, Toronto, 1978-5.
 - 33) 通産省：高圧ガス取締法，告示515号，1981-10.
 - 34) 自治省：消防法，告示119号，1983-4.
 - 35) Zienkiewicz, O. C. and Newton, R. E. : Coupled Vibrations of a Structure submerged in a Compressible Fluid, Int. Symp. Finite Element Tech., Univ. of Stuttgart, 1969.
 - 36) Sakai, F. : Vibration Analysis of Fluid-Solid Systems, Proc. U. S. -Japan Seminar on Interdisciplinary Finite Element Analysis, Cornell Univ., 1978.
 - 37) 坂井藤一：水による振動1. 静水に接する構造物の振動，土木技術者のための振動便覧 第11章，1985.
 - 38) Sakai, F. and Ogawa, H. : Seismic Resistant Design of Liquid Storage Tanks in Japan, Sino-American Symp. on Bridge and Str. Engrg., Beijing, 1982-9.
 - 39) 森岡敬樹：1923年関東大地震の地動，日本建築学会論文報告集，No. 289，1980-3.
 - 40) 田中貞二・吉沢静代・大沢 胖：やや長周期帯域における強震動の特性——長周期低倍率地震計記録の解析——，地震研究所彙報，Vol. 54，1979.
 - 41) 井合 進・土田 肇：広帯域入力地震動の合成方法の提案，港湾技術研究所報告，Vol. 19, No. 1，1980-3.
 - 42) 井上涼介：やや長周期領域の実記録を用いた石油タンクの応答スペクトルの計算，第27回応用力学連合講演会，1977-10.
 - 43) 科学技術庁研究調整局：球形タンクの耐震性に関する総合研究，昭和47年～48年度特別研究，1975-3.
 - 44) 曾我部潔：軸対称液体貯槽の液面動揺の固有周期計算法に対する一提案，生産研究，26巻，7号，1974-7.
 - 45) Sogabe, K. and Shibata, H. : On the Response of Sloshing of Liquid in Cylindrical and Spherical Storages, 第4回日本地震工学シンポジウム論文集，1975-11.
 - 46) 迫田治行・坂井藤一：球形タンク内容液の振動効果に関する研究，圧力技術，Vol. 16, No. 3，1978-5.
 - 47) 安藤絃三・下坂 茂：球形タンクの地震観測とその解析，石川島播磨技報，第19巻，第5号，1979-9.
 - 48) 高圧ガス保安協会：SEISMIT-SP 1980 取扱説明書，1982-2.
 - 49) 武藤 清・村田義男：高架水槽の主要振動に関する実験的研究，日本建築学会論文報告集，第60号，1958-10.
 - 50) Shepherd, R. : The Seismic Response of Elevated Water Tanks supported on Cross Braced Towers, Proc. 5 WCEE, Rome, 1973.
 - 51) 土木学会：地震応答解析と実例，1973-4.
 - 52) 日本建築学会：容器構造設計指針案・同解説，1984-10.
 - 53) 箕輪親宏：長方形水槽の振動解析，日本建築学会論文報告集，第285号，1979-11.
 - 54) 小坪清真・高西照彦，ほか：卵形消化槽中の内容液による地震時壁面衝撃圧の一解法，土木学会論文集，No. 356 / I-3，1985-4.
 - 55) 久保慶三郎・佐藤暢彦：35,000 kl 液化ガスタンクの地震観測，第25回土木学会年次学術講演，1970.
 - 56) 横田治彦・市之瀬紘一，ほか：軟弱地盤における地盤とタンクの地震観測，清水建設研究所報，第23号，1974-10.
 - 57) Nishihashi, S., et al. : Earthquake Observation and Coupled Vibrational Analysis of Cylindrical Water Storage Tank, Proc. 8WCEE, San Francisco, 1984-7.
 - 58) Housner, G. W. and Haroun, M. A. : Vibration Tests of Full-scale Liquid Storage Tanks, Proc. 2nd U. S. Nat. Conf. Earthq. Engrg., 1979-8.
 - 59) Cambra, F. J. : Earthquake Response Considerations of Broad Liquid Storage Tanks, Univ. of California, EERC Rep., No. UCB/EERC-82/25，1982-11.
 - 60) Clough, D. P. : Experimental Evaluation of Seismic Design Methods for Broad Cylindrical Tanks, Univ. of California, EERC Rep., No. UCB/EERC-77/10，1977-5.
 - 61) Niwa, A. : Seismic Behavior of Tall Liquid Storage Tanks, Univ. of California, EERC Rep., No. UCB/EERC-78/04，1978-2.
 - 62) Clough, R. W. and Niwa, A. : Static Tilt Tests of a Tall Cylindrical Liquid Storage Tank, Univ. of California, EERC Rep., No. UCB/EERC-79/06，1979-2.
 - 63) Niwa, A. and Clough, R. W. : Buckling of Cylindrical Liquid Storage Tanks Under Earthquake Loading, Jour.

- Earthq. Engrg. & Str. Dyn., Vol.10, 1982.
- 64) Manos, G.C. and Clough, R.W. : Further Study of the Earthquake Response of a Broad Cylindrical Liquid-Storage Tank Model, Univ. of California, EERC Rep., No. UCB/EERC-82/07, 1982-7.
- 65) Manos, G.C. and Clough, R.W. : Dynamic Response Correlation of Cylindrical Tanks, Proc. Nat. Conf. on Earthq. Engrg., 1984-6.
- 66) 高圧ガス保安協会：鋼製平底円筒形貯槽の耐震実験報告（第1回～第3回），高圧ガス，Vol.21，No.7～No.9，1984.
- 67) 面谷幸男・坂井藤一，ほか：大型相似模型によるアンカー・ストラップ付き平底円筒タンクの傾斜実験，土木学会第40回年次学術講演，1985-9.
- 68) 土木学会エネルギー土木委員会：屋外貯蔵タンクの耐震安全性検討のための入力地震液の変位特性に関する調査報告書，1982-12.
- 69) 片山恒雄・岩崎敏男・佐伯光昭：地震動加速度応答スペクトルの統計解析，土木学会論文報告集，No.275，1978-7.
- 70) 伯野元彦・松井芳彦・藤野陽三：強震記録による長周期構造物応答計算の精度，土木学会論文報告集，No.275，1978-7.
- 71) 井上涼介・藤野陽三，ほか：断層震源モデルを適用した周期10秒前後の地震動評価の試み，土木学会論文報告集，No.317，1982.
- 72) 工藤一嘉・坂上 実：1983年日本海中部地震による石油タンク被害と地震動の特徴について，東京大学地震研究所彙報，Vol.59，1984-10.
- 73) 東京消防庁：昭和58年日本海中部地震調査報告書，1983-8.
- 74) Sakai, F. : Some Considerations on Long-Period Waves in Earthquake Engineering, PRC-US-Japan Trilateral Symp./Work. on Engrg. for Multi. Nat. Hazard Mitigation, Beijing, 1985-1.
- 75) 土木学会エネルギー土木委員会：屋外貯蔵タンク本体と基礎を一体とした振動解析を用いたタンク本体の安全性等調査検討報告書，1982-11.
- 76) 大阿久聡・国生剛治：貯留液体一タンク一地盤の軸対称連成振動解析，第15回地震工学研究発表会，1979-7.
- 77) 坂井藤一・小川 浩：ロッキングを考慮した円筒形液体タンクのバルジング振動，第6回日本地震工学シンポジウム，1982-12.
- 78) 梅林澄夫，ほか：平底円筒貯槽の地下逸散減衰，圧力技術，Vol.21，No.1，1983-1.
- 79) Kana, D.D. : Seismic Response of Flexible Liquid Tanks, Nuclear Engrg. & Design, No.52, 1979-8.
- 80) 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，土木学会論文報告集，第350号，1984.
- 81) 坂井藤一・磯江 暁・小川 浩：円筒形液体タンクの鉛直加振によるバルジング振動の解析，第16回地震工学研究発表会，土木学会，1981-6.
- 82) 清水信行・山本鎮男・河野和間：円筒タンクの耐震設計法に関する研究（第3報，鉛直動に対する剛基礎上の円筒タンクの耐震設計法），日本機械学会論文集（C編），49巻440号，1983-4.
- 83) Taylor, Sir G. : An Experimental Study of Standing Waves, Proc. Roy. Soc. London, Series A, Vol.218, 1954.
- 84) 池田駿介・秋山成興，ほか：円筒タンク内の液体動揺に関する研究，土木学会論文報告集，第290号，1979-10.
- 85) 坂井藤一，ほか：浮屋根式貯槽スロッシングに関する一研究（解析と実験），圧力技術，15巻，1号，1977-1.
- 86) 坂井藤一・西村正弘・小川 浩：浮屋根式石油貯槽のスロッシング性状に関する研究，川崎重工技報，No.74，1980-4.
- 87) 清水作造，ほか：3次元地震シミュレータによる浮屋根式燃料タンクのスロッシング挙動に関する研究，石川島播磨技報，第24巻，第6号，1984-11.
- 88) Abramson, H.N., et al. : Some Studies of Nonlinear Lateral Sloshing in Rigid Containers, Jour. App. Mech., Trans. ASME, 1966-12.
- 89) 木村憲明・大橋弘隆：軸対称容器におけるスロッシングの非線形応答，日本機械学会論文集]（第1報，支配方程式の導出と解の性質）（第2報，数値計算及び実験との比較）（第3報，面内・回転混合運動の解析）
- 90) von Karman, T. and Wattendorf, F.L. : The Impact on Seaplane during Landing, NACA Tech. Note, No.321, 1929.
- 91) 柴田 碧：海外産業施設地震被害調査報告一球形タンクおよび円筒タンク，生産研究，26巻7号，1974-7.
- 92) 坂井藤一・竹村勝之，ほか：平底円筒液体貯槽の地震時滑動解析，土木学会第40回年次学術講演，1985-9.
- 93) 石田和雄・柴田 碧：液体貯槽の浮上り振動に関する実験的研究，日本機械学会講演論文集，1978-10.
- 94) 鬼束博文・坂井藤一，ほか：地震時における平底円筒タンクの浮上り挙動に関する研究（その1），土木学会第39回年次学術講演，1984-10. または，高圧力技術協会ST-1委員会，資料No.365，1985-6.
- 95) 山口宏樹・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.31A，1985-3.
- 96) Kawano K., et al. : Damage of Oil Storage Tanks for off-Miyagi Prefecture Earthquake of June 12, 1978, Proc. 7WCEE, Istanbul, 1982.
- 97) Denham, J.B., et al. : How to design 600,000 Bbl Tank, Hydrocarbon Processing, Vol.47, No.5, 1968-5.
- 98) 小林信之：タンク隅底部の応力解析，石川島播磨技報，第16巻，6号，1976.
- 99) 石田和雄，ほか：底板の浮上りを考慮した円筒タンクのロッキング応答計算法，石川島播磨技報，第24巻，第6号，1984-11.
- 100) 頭井 洋・新家 徹：底板の浮上り変形をともなう円筒タンクの地震時変形解析，構造工学論文集，Vol.31A，1985-3.