

長方形水槽のスロッシングインパクト* (阪神大震災の水槽被害に関して)

箕 輪 親 宏^{*1}

Sloshing Impact of a Rectangular Water Tank (Water Tank Damage Caused by the Kobe Earthquake)

Chikahiro MINOWA

The 1995 Kobe Earthquake caused an enormous amount of damage to the Kobe area. Water tanks were heavily damaged, in particular. The tanks built in according to the old design code were broken by bulging, as shown in the 1978 Off Miyagi Earthquake. The new design code tanks, which have steel beam reinforced walls, suffered damage to their roofs as a result by sloshing. Bulging type damage was previously explained⁽¹⁾. In order to investigate the roof damage caused by sloshing a shaking table test of an actual water tank was conducted, and the sloshing impact was discussed using nonlinear theories.

Key Words: Sloshing, Shock, Seismic Motion, Nonlinear Vibration, Potential Flow, Reinforced Plastics

1. 結 言

阪神大震災において建物に設置されている長方形水槽が大きな被害を受けた。地震時の長方形水槽の被害については1978年6月の宮城県沖地震で数多く発生した。このときの被害は側壁剛性の不足、水槽固定ボルト数の不足等に起因するものが多かった。その後の技術開発により水槽側壁の剛性が向上するとともに、耐震設計基準が強化された。その後の日本海中部地震、三陸はるか沖地震においても水槽の被害が見られたが、基準改正前の古いタイプ的水槽に於けるものであり、予想された被害形状であった。阪神大震災では、古いタイプ的水槽に被害が生じたのは言うまでもないが、新しい基準で設計された水槽にも被害が発生した。それは、従来見られた側壁の被害ではなく、Fig.1に示すような天井板が抜ける被害であった。この被害は震源域で震動が強かった神戸近辺だけでなく、震源域からかなり離れた関西国際空港でも生じていた。本研究に於いては、阪神大震災で起こった水槽の天井被害を再現すべく、振動台実験を行い、その結果を検討し、さら

にねじれモードを含む非線形スロッシング解析と運動量解析からスロッシングインパクト量を求め、これを検討した。

長方形水槽の研究については、バルジングに関し鬼頭博士の一連の研究⁽²⁾があり、この研究を発展させたものとして、振動方向に平行な壁の剪断変形とバルジングとスロッシングを同時に考慮し、水平地震動に対する応答を求めたもの⁽¹⁾がある。長方形タンクの非線形スロッシングについてはFaltinsen⁽³⁾、模型タンクの

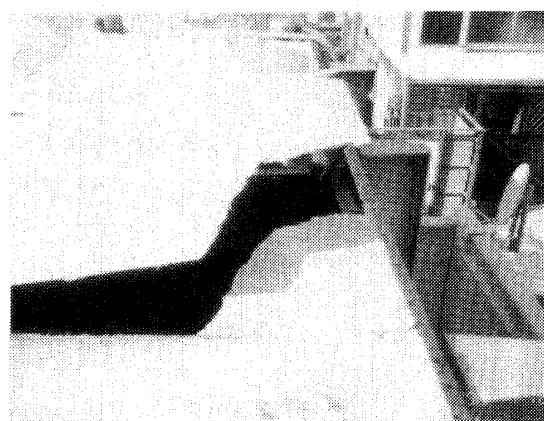


Fig.1 Roof Damage of Tank in Kobe

* 原稿受付 1996 年 9 月 24 日.

^{*1} 正員, 防災科学技術研究所 (〒305 つくば市天王台 3-1).

3次元振動台試験⁽⁴⁾，スロッシング制振に重きを置いた金子の研究⁽⁵⁾，回転入力に関した木村の研究⁽⁶⁾がある。さらにスロッシングインパクトについては小林⁽⁷⁾，栗原⁽⁸⁾，Uras⁽⁹⁾の研究がすでにある。

2. 水槽天井振動台破壊実験

阪神大震災では建物屋上に設置された高架水槽だけではなく，地下あるいは地表に設置してある受水槽の天井も被害を受けた。この中で地震波⁽¹⁰⁾が記録された所にあったものに関西国際空港の水槽がある。この水槽は正方形の受水槽で10m角，高さ2.5mのFRPパネル製であり，天井の四隅が被害を受けた。この地震が早朝に起こったことから水位は満水とされる2.3mと考えられる。この水槽の計算1次スロッシング振動数は0.22Hzであり，Fig.2のレスポンススペクトルのピークとほぼ一致する。この地震波を用い天井被害を振動台で再現することを試みた。

2.1 試験水槽 実験に用いた長方形水槽はFRPパネルで組み立てられた長さ6m，幅4m，高さ2.5mのものである。Fig.3に示す通り，側壁はパネルの縦リブに沿い補強鉄柱がボルト固定されており剛性は高い。天井は1m×1mの周囲に高さ7cmのリブが付いたパネルを，約15cmピッチでボルト接合され作られている。天井を支えるためにL型鋼(50×50×6)の簡単な梁がパネルリブに沿って組まれており，4m方向の中央梁は剛性の高いC型鋼が使われている。水槽中央に

は直径50mmの鉄パイプの支柱が立っている。天井パネルと側壁パネルはボルト接合されているが，この天井梁と天井パネルは接合されておらず，単に天井梁の上に天井パネルが置かれているだけである。

強度について関西国際空港の水槽（ここでは被害水槽と仮に呼ぶ）と試験水槽を検討する。天井パネルのリブを梁とみなした場合，この梁に生じる曲げモーメントが破壊強度を越えると天井が壊れると見なせる。曲げモーメント M_x は天井に作用する衝撃圧 p_0 とX，Y方向の長さ l_x ， l_y と係数 k_e を用いると $M_x = k_e p_0 l_x^2 l_y$ と書けるが，被害水槽も試験水槽も同じ1m角パネルから組立られているので，両水槽の梁は同じ荷重幅を取ると見なせる。このため，荷重幅に対応する梁直角方向の長さは両水槽とも同じ値を取る。同じ衝撃圧が作用するとすれば試験水槽のX方向の梁の曲げモーメントは0.36倍，Y方向で0.16倍となる。被害水槽と同等の曲げモーメントを試験水槽に生じさせるには3倍から6倍の衝撃圧が必要となる。

この実験では阪神大震災の水槽天井被害が4隅に集中したこと，実験装置が水平1方向の振動台であること等から，試験水槽を振動台加振方向に対し，斜めに設置した（6mの長辺軸（X軸）が加振軸と33.7度の角度を成す）。計測は天井の衝撃圧，波高に主眼を置いて行った。なお，振動台は15m×14.5mの大きさで出力 360×10^4 N，速度75cm/sec，変位±23cmの電気油圧式である。

2.2 振動台入力波 試験水槽の水位2.3mの理論計算上の1次スロッシング振動数は長辺方向（6m方向）0.33Hz，短辺方向（4m方向）0.43Hzであり，被害を受けた10m角水槽の0.22Hzとの比を取ると長辺方向については0.65，短辺方向は0.5である。共振を目的と考えると，Time Scaleはこの比となる。Time

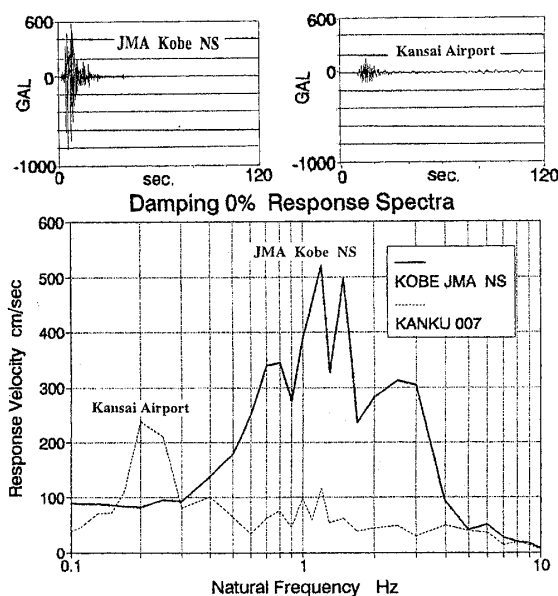


Fig.2 Kansai Airport JMA Kobe NS Response Sp.

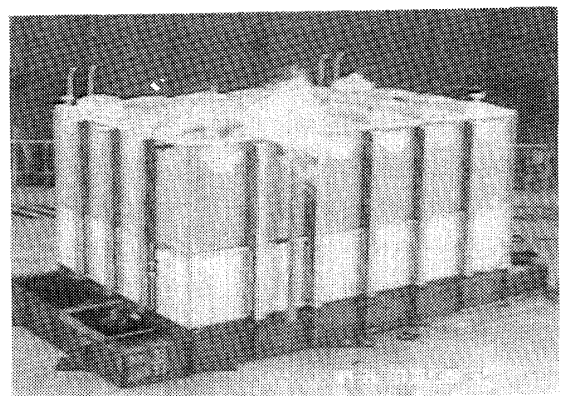


Fig.3 Damage Test in a Shaking Table

Scale 約0.5, 0.65 とし時間軸を縮め, 加振変位を原波形と同じとすると加速度は約4倍, 2.3倍, 速度は約2倍, 1.5倍になる。

阪神大震災の地震波はFig.2のように1 Hz以下の振動数が主であり, 振動台にとっては変位制御領域である。特に, この関西国際空港の記録は神戸海洋気象台の記録に比べ長周期成分が強い。従って, 従来から振動台で行われていたハイパスフィルターを掛け, 長周期成分を除去する方向を使いたくない。

関西国際空港の記録は速度で記録されたものであり, これを一回積分し変位に変換すると, Fig.4のように1 m以上の変位を示す。本実験では1回微分して得られた加速度波形に数個の目立たないパルスを加え, この変位ドリフト成分を除去する方法を取った。この方法で最大変位と速度を求めると関西国際空港滑走路方向は約18cm, 22kineとなる⁽¹²⁾。この時間軸を縮めた入力波の振幅を増加し, 試験水槽天井を破壊するには, 試験装置の最大変位±23cmでは難しいことが考えられるので, 最終的には計測された長辺方向の1次スロッシング振動数0.32Hzの正弦波で破壊させた。

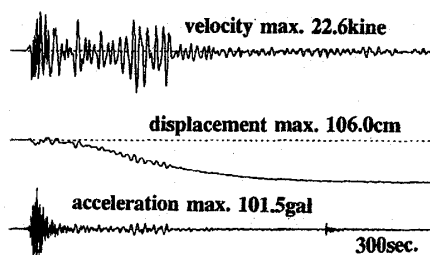


Fig.4 No Base Correction Data

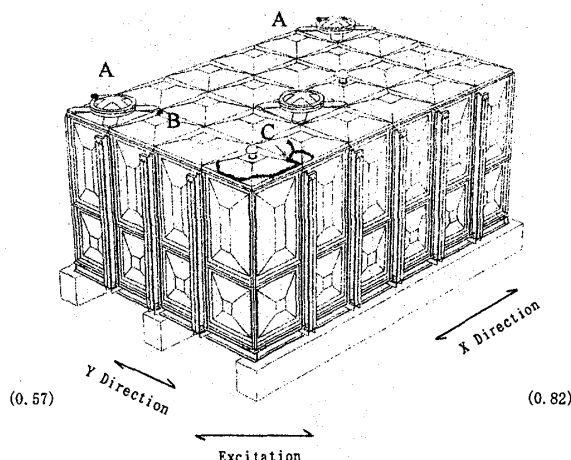


Fig.5 Damage Sketch of Test Tank

2.3 実験結果概略 まず関西国際空港滑走路方向 Time Scale0.65で加振した。天井の亀裂のスケッチが示されているFig.5のA印の通り, 両隅のマンホールの固定鍵がスロッシングで引きちぎられ, 蓋が開き, 水が飛び出した。固定鍵をボルトに換え, 関西国際空港滑走路直角方向 Time Scale0.5で行ったが, マンホール蓋隙間から水が飛び出した。マンホール蓋をボルト16本で堅く固定し, 神戸海洋気象台 NS(70kine)で加振したが異状無かった。次に関西国際空港滑走路直角方向 Time Scale0.5 振幅18cmで加振したところ, 加振軸にあるマンホールのそばのパネルの隅部に長さ15cm程度 (Fig.5のB印) の亀裂が生じた。この時の波形をFig.6に示す。センサーの位置はFig.5に示されている。なお波高計は, 浮き方式のため測定部である浮きが波に潜ってしまう場合があり, 参考データとしてしか見ることが出来ないが, この波高データを微分し, 波高

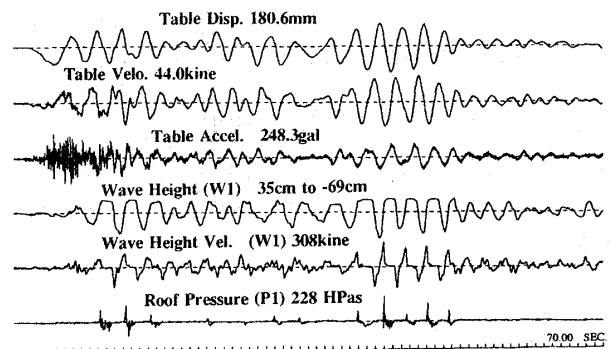


Fig.6 Kansai Airport Recorded Response Waves

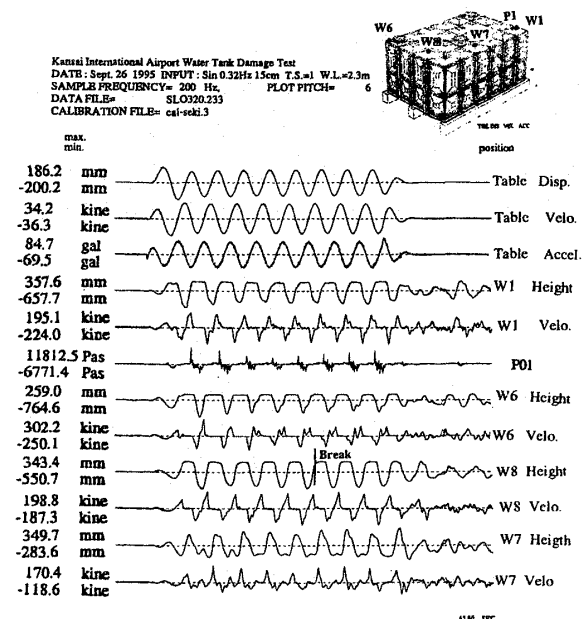


Fig.7 Sin 0.32Hz Recorded Response Waves

速度を出すと 300kine を越える波高速度が得られる。波高計 W1 とほぼ同じ位置に取り付けられていた圧力計 P1 の波形を見ると、波高速度が増加しているところで衝撃圧が発生しているのが判る。様々な形状をした衝撃圧が見られるが、波が衝突した瞬間から負の圧力が見られる記録もある。同波形で振幅を 21.3cm に増やし、加振したが亀裂は進展しなかった。次に試験水槽の長辺方向の 1 次スロッシング振動数 0.32Hz, 15cm で加振した。この時の波形を Fig.7 に示す。天井パネルリブ線の交叉部から 2 波目で水が飛び出した。だが予想に反し、非加振軸の角の天井パネル (Fig.5 の C 印) が 6 波目で Fig.3 のように破損し水が飛び出、7 波、8 波で大きくめくれ上がり、大量の水が飛び出た。破損した位置の近くに付いていた波高計は W8 であり、このときの無被害のコーナーに付いていた P1 の衝撃圧は 120Hpas 程度であった。なおビデオ観察から破壊はパネルリブの亀裂から進展していったのが分かる。

3. 水平 2 次元非線形スロッシング応答解析

金子⁽⁵⁾、木村の研究⁽⁶⁾を参考し、解析を行う。非圧縮非粘性の理想流体を仮定。Bernoulli の式、Dynamic Boundary Condition から基本式を導く。Bernoulli の定理は

$$\int \frac{dp}{\rho} = -\frac{\partial \phi}{\partial t} - \Omega - \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) + F(t) \quad \dots (1)$$

である。Ω: 外力ポテンシャル、 u, v, w : x, y, z 方向の速度。外力による効果を速度ポテンシャル ϕ の項に含んで考えると、外力ポテンシャルを省いてよい。 $F(t)$: 積分定数。この式を自由表面で検討する。ここで、 $F(t)$ を無視する。圧力 p は波高 η に密度 ρ と重力加速度 g を乗じたものに等しいと考えられ、 $p = -\rho \times g \times \eta$ とし、 u, v, w を速度ポテンシャルで表し

$$g \times \eta = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right) \dots (2)$$

dynamic boundary condition は

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \dots (3)$$

(2) 式を (3) 式に代入する。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} + 2 \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial t} + 2 \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y \partial t} \\ & + \frac{\partial \phi}{\partial z} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z \partial t} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \\ & + 2 \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} \frac{\partial \phi}{\partial z} \\ & + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y \partial z} \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \dots (4) \end{aligned}$$

ここで速度ポテンシャルはラプラスの方程式を満たし、側壁面と底面で、面直角方向の動きが側壁と底板のそれと等しくなるとし、次のように仮定する。

$$\begin{aligned} \phi = & \sum_{L=(m,n)} \alpha_{mn}(t) \cos \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{n\pi}{b} y \\ & \times \cosh \pi \sqrt{\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2} z - (u_g + \theta_x(H_x \\ & + z))(x - \frac{a}{2}) - (v_g + \theta_y(H_y + z)) \\ & \times (y - \frac{b}{2}) - (z - h)w_g \dots (5) \end{aligned}$$

ここで原点をタンク底、左手前角とし、 u_g, v_g, w_g : x, y, z 方向の入力速度、 a, b : x, y 方向のタンク長さ、 h : タンク水位、 π : 円周率、 m, n : x, y 方向の SLOSHING MODE 数 (0, 1, 2, 3, 4, ...), $L: (m, n)$, m_L, n_L : x, y 方向の線形 SLOSHING MODE 数 (1, 3, ...), θ_x, θ_y : y, x 軸まわりの回転角速度、 H_x, H_y : θ_x, θ_y の回転中心の位置から原点までの z 方向の距離、 $x - a/2, y - b/2$ を $-a/2 \sim a/2, -b/2 \sim b/2$ で Fourier Cos 展開する。

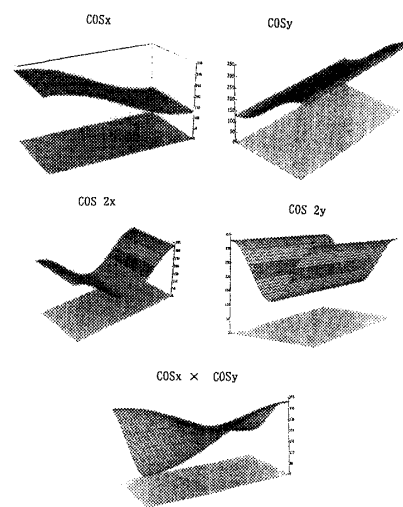


Fig.8 Assumed Sloshing Modes

ここで、 $L = (m, n)$ として、初歩的ケースとして Fig.8 のように $(0,1), (0,2), (1,0), (2,0), (1,1)$ を想定する。この想定のもとに (4) 式に (5) 式を代入する。 $(0,0)$ のケースでは $(0,0)$ の項は $\ddot{\alpha}_{00}$ であり、代入した式の中で $\ddot{\alpha}_{00}$ は A_{00} と同じであると出来、当然のこととして $m=n=0$ のモードは起こらない。

$$\begin{aligned} &(\ddot{\alpha}_{00} - A_{00}) + A_{10} \times \cos \frac{\pi}{a} x + A_{20} \times \cos \frac{2\pi}{a} x \\ &+ A_{11} \times \cos \frac{\pi}{a} x \times \cos \frac{\pi}{b} y \\ &+ A_{01} \times \cos \frac{\pi}{b} y + A_{02} \times \cos \frac{2\pi}{b} y = 0 \cdots (6) \end{aligned}$$

この式の係数が 0 であれば、上式は常に満たされる。すなわち

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha}_{00} - A_{00} = 0, \quad A_{10} = 0, \quad A_{20} = 0, \quad A_{11} = 0, \\ A_{01} = 0, \quad A_{02} = 0 \cdots \cdots (7) \end{aligned}$$

が成立すれば良い。(7) 式は α 等の 3 次式である。簡単のため 2 次項まで取る。各式の係数を $c_{11} \sim c_{59}$ とする。

$$\begin{aligned} A_{10} &= c_{11} \ddot{\alpha}_{10} + c_{12} \alpha_{10} + c_{13} (\ddot{u}_g + \ddot{\theta}_x (H_x + h) \\ &+ g \theta_x) + c_{14} (\alpha_{10} \dot{\alpha}_{20} + \dot{\alpha}_{10} \alpha_{20}) + c_{15} (\alpha_{01} \dot{\alpha}_{11} \\ &+ \dot{\alpha}_{01} \alpha_{11}) + c_{16} (\dot{\alpha}_{20} \theta_x + \alpha_{20} \dot{\theta}_x) + c_{17} (\dot{\alpha}_{11} \theta_y \\ &+ \alpha_{11} \dot{\theta}_y) - c_{18} (\dot{\alpha}_{10} w_g + \alpha_{10} \dot{w}_g), \\ A_{01} &= c_{21} \ddot{\alpha}_{01} + c_{22} \alpha_{01} + c_{23} (\ddot{v}_g + \ddot{\theta}_y (H_y + h) \\ &+ g \theta_y) + c_{24} (\alpha_{01} \dot{\alpha}_{02} + \dot{\alpha}_{01} \alpha_{02}) + c_{25} (\alpha_{10} \dot{\alpha}_{11} \\ &+ \dot{\alpha}_{10} \alpha_{11}) + c_{26} (\dot{\alpha}_{02} \theta_y + \alpha_{02} \dot{\theta}_y) + c_{27} (\dot{\alpha}_{11} \theta_x \\ &+ \alpha_{11} \dot{\theta}_x) - c_{28} (\dot{\alpha}_{01} w_g + \alpha_{01} \dot{w}_g), \\ A_{20} &= c_{31} \ddot{\alpha}_{20} + c_{32} \alpha_{20} + c_{33} \alpha_{10} \dot{\alpha}_{10} \\ &+ c_{34} \alpha_{11} \dot{\alpha}_{11} - c_{35} (\dot{\alpha}_{20} w_g + \alpha_{20} \dot{w}_g) \\ &+ c_{36} (\alpha_{10} \dot{\theta}_x + \dot{\alpha}_{10} \theta_x) + c_{37} \dot{\theta}_x \theta_x, \\ A_{02} &= c_{41} \ddot{\alpha}_{02} + c_{42} \alpha_{02} + c_{43} \alpha_{01} \dot{\alpha}_{01} \\ &+ c_{44} \alpha_{11} \dot{\alpha}_{11} - c_{45} (\dot{\alpha}_{02} w_g + \alpha_{02} \dot{w}_g) \\ &+ c_{46} (\alpha_{01} \dot{\theta}_y + \dot{\alpha}_{01} \theta_y) + c_{47} \dot{\theta}_y \theta_y, \\ A_{11} &= c_{51} \ddot{\alpha}_{11} + c_{52} \alpha_{11} + c_{53} (\alpha_{10} \dot{\alpha}_{01} + \dot{\alpha}_{10} \alpha_{01}) \\ &+ c_{54} (\alpha_{11} \dot{\alpha}_{20} + \dot{\alpha}_{11} \alpha_{20}) + c_{55} (\alpha_{11} \dot{\alpha}_{02} \\ &+ \dot{\alpha}_{11} \alpha_{02}) + c_{56} (\theta_x \dot{\theta}_y + \dot{\theta}_x \theta_y) + c_{57} (\theta_y \dot{\alpha}_{10} \\ &+ \dot{\theta}_y \alpha_{10}) - c_{58} (\dot{\alpha}_{11} w_g + \alpha_{11} \dot{w}_g) + c_{59} (\theta_x \dot{\alpha}_{01} \\ &+ \dot{\theta}_x \alpha_{01}), \\ &\cdots \cdots \cdots (8) \end{aligned}$$

近似値を求めることを目的とし、まず、 $A_{10} = 0$, $A_{01} = 0$ については 1 次項のみを取り α_{10}, α_{01} を求め、次にこれを入力とし $A_{20} = 0$, $A_{02} = 0$, $A_{11} = 0$ の式から $\alpha_{20}, \alpha_{02}, \alpha_{11}$ を求め、次に元の 2 次式に戻り、収束するまで繰り返し、これらを求める。これは簡易な perturbation method である。減衰項はパラメトリックに入れる。波高 η については、(2) 式から求める。この式を検討すると、 x, y , 1 方向に加振された場合、 $L = (1, 1)$ のスロッシングモードは生じない。発生するには、加振方向に対し斜めに置くか、水平 2 方向加振が必要である。ここで、 $L = (1, 1)$ の効果を見るために、加振軸に対し単軸角になる点（天井の裂けた所に対応）と、長軸角になる点について、実験で天井が裂けた正弦波の加振について波高を計算した。この計算波形を Fig.9 に示す。減衰は $L = (1, 0)$, $L = (0, 1)$ のモードに対し 5%, $L = (2, 0), L = (0, 2), L = (1, 1)$ に対し 0.1% とした。計算値は長軸角の方が大きい $L = (1, 1)$ のモードを考慮すると、単軸角の値が若干増加する。

4. スロッシングインパクトの計算

スロッシングインパクトの性質については小林⁽⁷⁾が既に示しており、栗原⁽⁸⁾は付加質量の観点から推定式を理論的に導いた。また一方、Uras⁽⁹⁾は圧縮性粘性流体の有限要素法解析からスロッシングインパクトを求めている。ここでは、栗原の考えを参考に推定式を求めた。

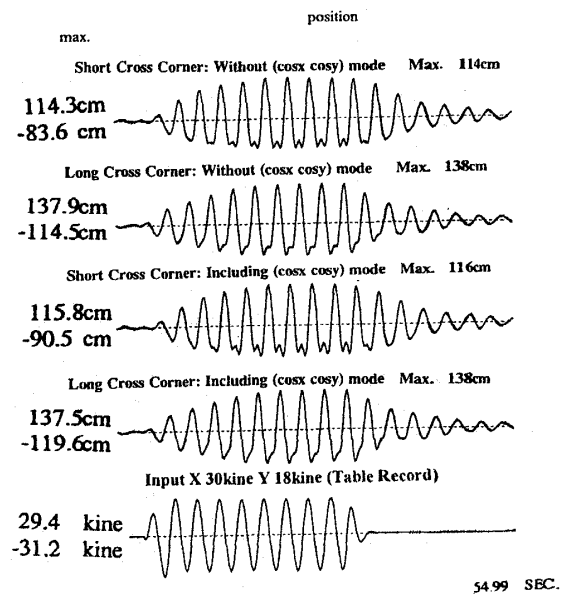


Fig.9 Calculated Wave Heights at Corners

Lamb¹¹⁾によれば, Z方向の運動量の時間に対する変化率は, 水を非圧縮非粘性とすると,

$$\begin{aligned} & \rho \iiint \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) dx dy dz \\ &= \rho \left(\iiint \dot{w} dx dy dz + \iint uw dy dz \right. \\ & \quad \left. + \iint vw dx dz + \iint w^2 dx dy \right) \cdots \cdots (9) \end{aligned}$$

長方形水槽の天井に衝突する部分の運動量の時間に対する変化率, すなわち作用する力は上式で与えられる. x方向加振の線形スロッシングを考えると上式は

$$\begin{aligned} & \rho \left(\iiint \dot{w} dx dy dz \right. \\ & \quad \left. + \iint w^2 dx dy + \iint uw dy dz \right) \cdots \cdots (10) \end{aligned}$$

衝突の瞬間では $u = 0$ と見なせる. 初歩的段階として z の積分範囲を $0 \sim h$ とする. 単純なスロッシングでは, w_0 を壁面位置自由表面の上下方向の速度とすると

$$w = w_0 \cos \frac{\pi}{a} x \frac{\sinh \frac{\pi}{a} z}{\sinh \frac{\pi}{a} h} \cdots \cdots (11)$$

と書ける. これを上式に代入し, 空隙部 H も満たされるので, この部分は自由表面と同じ動きとし, この段階で天井位置 x での衝撃圧 p が導かれる (この衝撃圧を面積分したのが衝撃力である).

$$\begin{aligned} p = \rho \left(\left(\frac{a \cosh \frac{\pi}{a} h - 1}{\pi \sinh \frac{\pi}{a} h} + H \right) \cos \frac{\pi}{a} x \cdot \dot{w}_0 \right. \\ \left. + \cos^2 \frac{\pi}{a} x \cdot w_0^2 \right) \cdots \cdots (12) \end{aligned}$$

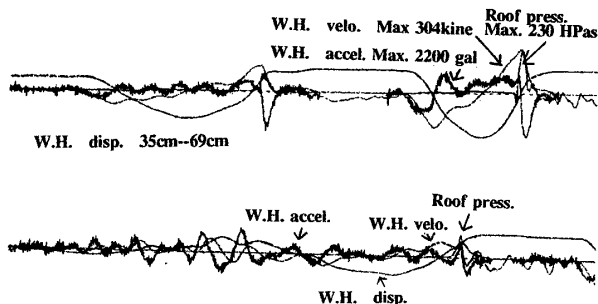


Fig.10 Measured Sloshing Velo., Accel. & Roof Pres

Table 1 Estimated Roof Impact Pressure

Shock Number	No. 1	No. 2	No. 3
Wave H. Accel. (gal)	100	1000	712
Wave H. Velo. (kine)	177	304	102
Meas. R. Pres. (HPas)	78	230	113
Calc. R. Pres. (HPas)	150	254	126

2方向と1方向の違いがあるが, 本実験で計測した Fig.6の波高計W1, 圧力計P1の記録を拡大し, 波高を微分し得た速度をさらに微分した加速度を含め Fig.10に示す. この図には3回, 波が天井に当たっている. この3回の衝突の寸前, すなわち波高計の記録がフラットになる1ステップ前の波高速度 (Wave H. Velo.), 波高加速度 (Wave H. Accel.) を読み取った値と, この値から (12) 式を使い算出した計算衝撃圧 (Calc. R. Pres.) を Table 1 に示す. Meas. R. Pres. は計測天井衝撃圧を示す. すでに述べた通り, 波高計の浮きの追従性が完全で無いため, これら値は参考値の域を出ないが, 計算衝撃圧の値は計測値とオーダー的に一致していることが出来る.

また, (8) 式に実験で記録した 0.32Hz の振動台加速度を入力し, 天井が無いとし波高を求め, 波高が H に達した時点から, H 以下になるまで (12) 式を適用し, 天井衝撃圧波形を計算したものを Fig.11 の Roof Pressure のところに示す. これは Fig.7 の中央段の P1 に対応するものである. この加振の衝撃値としての最大値は実験値が 2 割程度大きく, 水が天井から離れるときの負

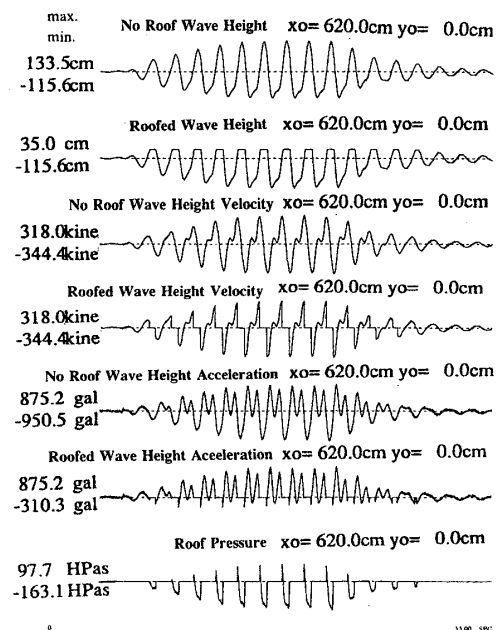


Fig.11 Calculated Roof Pressure Time History

圧は計算が実験の倍以上の値を示している。Fig.11の計算は、複雑な非線形現象であるスロッシング衝撃を簡易的に表せないかと試みたものである。この場合の計算のRoof Pressureは波高速度に大きく左右さる。Fig.11が前項の非線形スロッシング応答により波高を計算しているのに対し、Table 1は計測を基にした波高を使い(12)式から1波1波の衝撃圧を計算しており、これがTable 1の良い結果を生んだものと思われる。これから検討結果はスロッシング現象を推定できれば天井衝撃圧を、(10)式で z の積分範囲の問題が残るにしても、ほぼ推定できることを示すものと考えられる。

5. 結 論

阪神大震災で天井板が被害を受けた長方形水槽の地震応答現象を、剛体水槽のスロッシング応答の観点から検討し、スロッシングインパクトについて簡易推定式を与えた。

天井に作用する衝撃圧には波高加速度、波高速度が関係する。これらを説明するには、線形スロッシング応答では難しく、非線形スロッシング応答を考慮する必要があると考えられる。

また水平2方向スロッシング応答ではねじれモード発生の可能性がある。

謝 辞

強震記録については関西国際空港株式会社から提供していただいた。深く感謝する次第である。実験については給水タンク工業会の協力を得た。実験実施は清住美氏(積水プラントシステム)に負う所が多い。横浜国立大学柴田碧教授には本実験研究を進めるにあたり御指導御助言を頂いた。心から感謝する次第である。

文 献

- (1) C.Minowa, PVP-43,(1980), pp.135-142, ASME
- (2) F.Kito, Principle of Hydro-Elasticity,(1970), pp.93-121, Yokendo
- (3) O M Faltinsen, J.of Ship Res., Vol.18 No.4,Dec., (1974), pp.224-241
- (4) 箕輪他, 防災科学技術研究資料 No67, (1981), pp.71-109
- (5) S.Kaneko, et., PVP-Vol.272, (1994), pp.31-42
- (6) 木村他, No.940-30, (1994-8), pp147-149
- (7) N.Kobayashi, Proc. of 7WCEE, Vol.5,(1980), pp.315-322
- (8) C.Kurihara, PVP-Vol.232, (1992), pp.19-24
- (9) R.A.Uras, "Sloshing Impact in Rooted Tanks", 1996 PVP Conference Proceeding
- (10) 白石他, 土と基礎 1996年2月号, (1996), pp.19-24
- (11) Lamb, Hydrodynamics 6th edn, Cambridge, pp.10
- (12) 箕輪, 松田, 柴田, D&D 96 Conference, No.96-5(I), pp.1-4