浮屋根式貯蔵タンクのスロッシング減衰対策 - φ 4000 タンクモデルの振動実験-

井田剛史1・坂東 譲2・平野廣和3・佐藤尚次4

 ¹正会員 (株) +川ゴム 研究開発部 (〒599-8244 大阪府堺市中区上之516番地) E-mail:tsuyoshi-ida@togawa.co.jp
 ² (株) +川ゴム 徳島工場 (〒771-1706 徳島県阿波市阿波町東川原29番地) E-mail:awa@togawa.co.jp
 ³正会員 中央大学教授 総合政策学部 (〒192-0393 東京都八王子市東中野 742-1) E-mail:hrsk@fps.chuo-u.ac.jp
 ⁴正会員 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27) E-mail: sato@civil.chuo-u.ac.jp

Key Words : sloshing, vibration control, oil storage tank, sinking of floating roof, long-period ground motion

1. はじめに

2003 年9月に発生した北海道十勝沖地震(M8.0)での やや長周期地震動の影響により,震源から200km以上離 れた苫小牧地区において石油貯蔵タンクの浮屋根が沈没, 石油タンクの全面火災にまで拡がり,大きな社会的関心 を集めた^{1)~3)}.これらの被害の原因としては,石油タン クのスロッシング(液面揺動の励起)の発生により浮屋 根が損傷し,浮力の低下によって沈没して油面が大気に さらされたことによると考えられている.

これまでにも地震による貯蔵液のスロッシングを防ぐ ために様々な制振方法が研究されてきた.特に1983年の 日本海中部地震を契機に総務省消防庁で長周期地震動と スロッシングに関する調査検討会⁴⁾が設置され,スロッ シングの制振方法が多数検討された.また,2005年には, 土木学会においてもミニシンポジウム⁵⁾が開催され,い くつかの制振方法が発表されている.しかし,いずれも アイディアの段階であり,実用化には時間を要するのが 現状である.

これを受けて著者らは、直径 600%(苫小牧で被害の あったタンクの1/66 スケールレベル)と64.0007 (同1/10 スケールレベル)の浮屋根付きの貯槽タンクモデルを用 いて1次モードでのスロッシング現象の把握とスロッシ ング発生時の浮屋根挙動の把握を行ってきた.その結果, 1次スロッシングモードが支配的である場合でも、浮屋 根式タンクの内容液は複雑な非線形挙動を示し、回転運 動や液面中心部の凹凸発生による高調波成分の増幅をも たらすことを明らかにした. さらに、1次スロッシング モードによってもたらされた高調波成分による内容液面 の凹凸は、浮屋根のデッキ部に面外変形をもたらす可能 性があることも示した. 次の段階として、スロッシング 発生時における浮屋根の制振方法の検討を行った. まず ¢600のモデルにおいて、浮屋根の外周部にゴム製の制振 材(以下バッファー)を設置することによってスロッシ ングの抑制かつ浮屋根破壊防止の概念を示すことができ たの

よって、本論文は、 $\phi600 タンクモデルで示した概念を$ $スケールアップした <math>\phi4,000 タンクモデルに適用し、1 次$ モードでのスロッシング発生時における浮屋根の制振効 果と破壊防止に関しての定性的な把握を行うことを目的 としている.具体的には、バッファーとして合成ゴムを 用い、適用するゴムの剛性や粘弾性特性等がスロッシン グの減衰効果に及ぼす影響に関して、大型振動台での振 動試験を行い、そのメカニズムを検討した.これにより、 提案する制振方法が貯蔵タンクでのやや長周期の地震動 対策において、有用な工法としてバッファーの構造を最 適設計するための所見を得たので、ここで報告する.

2. バッファーによるスロッシング対策

(1) スロッシングの固有周期と地震被害

一般に円筒タンクのスロッシング固有周波数fは、タンク半径Rと液面高hの関係から求めることができ、式(1)で表わすことができる⁸.

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

ここで ε_i は $J_1'(\varepsilon_i)=0$ のi番目の正根, J_1 は第1種ベッセル関数である. ε_i は1次モードでは1.841,2次モードでは5.33,3次モードでは8.54である.

苫小牧において火災被害が発生した 3 万 kl タンクは, 直径 40m 級タンクに貯蔵液の高さ 20m であるので,こ の諸元を代入して 1 次固有周期を計算すると約 7.0 秒と なる. 苫小牧で観測された地震動は,7 秒から 8 秒が主 であるので,スロッシングによる浮屋根沈没事実と一致 する²⁾. このやや長周期地震動とタンク貯蔵液の持つ固 有周波数が一致することにより,液面が動揺し,このエ ネルギーが蓄積され大きな波高をもたらすと考えられて いる.

(2) バッファーの設計概念

著者らはこのスロッシング現象を抑制するための対策 として、スロッシングを止めるのではなく、地震時に浮 屋根がスロッシングで揺れることは許すが、これを素早 く抑えて揺れを最小限にする方向に導くことを目的とし てバッファーを検討した.

バッファー設計の基本は、具体的には浮屋根に減衰装 置を付けて周方向の圧縮応力を低減させ、かつ減衰を付 加して、揺れても直ぐに揺れが収まる方法を考案するこ とである.ここで、著者の一人である坂東が、地震によ る浮屋根破壊を防ぐために合成ゴム製の緩衝材を火力発 電所の直径 90m クラスの大型貯水タンク^ので開発した経 緯があり、これを既存の技術の延長として応用できる可



能性が考えられる.しかし,これまでの緩衝材は,バネ 要素としての設計であり,スロッシングを抑えるための 制振材料としての目的では検討していない.そこで,既 存技術の応用として緩衝材に減衰を付与することにより, 制振材であるバッファーを創り出すことが可能と考えて いる.よって本研究では,一つの方法として浮屋根の外 周部に減衰性の高い合成ゴム製を設置することでバッフ ァーとし,これによりスロッシングの減衰対策を行い, かつ浮屋根の破壊を防ぐことを提案する.

バッファーの概念は、地震動により液面が動き出した際に、液面上に浮いている浮屋根の水平方向の運動エネルギーをバッファーの変形によるポテンシャルエネルギーで吸収し、減衰させることにある. 図-1 に示す火力発電所の直径90mクラスの大型貯水タンク^のでの緩衝材の設置例のように、バッファーを浮屋根のアウターリム等へ取付けることを基本とする.ここでの浮屋根の運動エネルギーとバッファーのポテンシャルエネルギーは、次のように対応させることができる.

地震動によるスロッシングで浮屋根が動き出す時は, 液面の上下および水平動に応じて,図-1に示すように浮 屋根のバッファーが水平方向にタンク側板へ衝突する. この時の運動エネルギーE₁は,式(2)で表わすことができ る.

$$E_1 = \frac{1}{2} M V^2$$
 (2)

ここで, *M* は浮屋根の質量(kg), *V* は浮屋根のタンク側板への水平方向衝突速度(m/s)をそれぞれ表す.

このエネルギーに対し、バッファーはバネ力で受ける ことになるので、バッファーのバネ定数を*K*とした時の バッファーのポテンシャルエネルギー*E*₂は式(3)で表わ すことができる.

$$E_2 = \frac{1}{2}KX^2 \tag{3}$$

ここで, *K*はバッファーのバネ定数(N/m), *X*はバッファ ーの変形量(m)である.また,式(3)のバネ定数 *K*からバ ッファーが受ける荷重 *P*,すなわち浮屋根がタンク側板 に衝突する際に生じる衝撃力を求めることができる.こ の時の荷重*P*とその時のバッファー変形量*X*で囲まれた 面積がバッファーのポテンシャルエネルギーである. つ まり,この時の荷重*P*でバッファーが変形することによ って生じるポテンシャルエネルギーで一時的に受け止め, 浮屋根の損傷を防ぐことを基本としている.

(3) ゴム材料の選定

本研究の目的は、バッファーの変形により生じるゴム の粘性減衰の効果(ヒステリシスロス)により、その運 動エネルギーを減衰させることを期待する.そこで、ス ロッシングによる浮屋根の運動エネルギーを減衰させる ための最適なバッファー用合成ゴム材料の選定を行う. その選定条件としては、浮屋根式タンクへの設置環境を 想定する必要があり、次の条件を設定する.

- 温度 (0℃~80℃) によるゴムの弾性率変化が少なく, 高い損失係数を保持すること.
- ② 浮屋根へのバッファー取付位置が喫水線よりも下部の場合,耐油性を有し、上部の場合,耐体性を有すること。

条件①については、温度変化にも対応して安定したゴム 弾性を保持し、さらに高い減衰効果を有するゴムである ことを意味する.条件②は取付位置でゴム材料への化学 的な要求仕様が異なることを意味する.

二つの条件を満足するゴム材料の選択方法としては、 まず候補となる数種のゴム材料を選定し、ゴム材料の Ogdenモデル⁹を用いて構造解析を行い、バッファーの等 価剛性を求め、式(3)からポテンシャルエネルギーの想 定を行う.なお、各種ゴム材料の記号と名称は、**表-1**に 示す.さらに各種ゴム材料の粘弾性計測を行い、得られ る弾性率の温度依存性と損失係数を比較し、最も浮屋根 式タンクへの設置に適した材料を決定する.なお、粘弾 性計測は、タンクモデルで想定される固有周波数レベル に設定し、0.5Hzとした.

具体的な比較選定方法としては、図-2に同形状・同等 ゴム硬さ(JIS-A70)でのEPDMおよびIIRゴムのゴム高さ を20%圧縮させた場合の応力解析結果例を示す.図-2よ り、同圧縮率であっても、IIRの最大応力が3.3MPaである のに対し、EPDMは1.8MPaとなり、ゴム材質によって発 生応力が大きく異なることがわかる.この差は各ゴム材 料での粘弾性特性の違いによるものである.ここで注意 すべきことは、ゴム材料が一般に他の材料と比較して温 度依存性が高いことから、適切に材料を精査して選択す ることである.

本研究において石油貯漕タンクのバッファー材料候補 として挙げられるゴム材料は、耐油性の高いFKM、NBR、 耐候性の高いEPDM、減衰性の高いIIR、VAM、そして過 去に緩衝材用として使用しゴム弾性の優れたNR/SBRな どである.ここで候補として挙げた各ゴム材料の粘弾性

表-1 各種ゴム材料の名称

記号	名称	
IIR	ブチルゴム	
NR/SBR	天然ゴム・スチレンブタジエンゴム	
FKM	フッ素ゴム	
NBR	ニトリルゴム	
VAM	エチレン - アクリルゴム	
EPDM	エチレンプロピレンゴム	



図-2 EPMD 及び IIR の応力解析例



図-3 各種ゴム材料の貯蔵弾性率変化(対20℃比)



図-4 各種ゴム材料の損失係数(tan δ)

特性を測定した結果を図-3および図-4に示す. 高減衰性 ではIIR, VAMが優れているが,弾性率変化が大きく安定 した剛性を得ることが難しい. それに対してEPDMや NBRは,弾性率変化が小さく剛性設定が容易である. さ らに条件②として,喫水線よりも上部へ取付けることを 想定し、耐候性の優れる条件を満たすことを考慮する必要があり、耐候性および減衰性の低いNBRを除外した. よって、耐候性が非常に優れ、減衰性も中庸に有する EPDMを最適材料として選定した.なお、本実験では緩 衝材として使用したNR/SBRとの比較評価も行う.

3. 浮屋根式タンクのモデル化と相似則

(1) 浮屋根式タンクのモデル化とバッファーの考え方

バッファーによるスロッシングの減衰効果を実験的に 検証するため、著者らは、まず�600の模型タンクを製作 して模型実験[®]を実施し、ここで得られた知見を基に �4,000タンク(1/10縮尺モデル)にスケールアップして相 似則に関しても同様に検討を行う.この場合、式(2)およ び式(3)で考えられるエネルギーに関して、模型に働く速 度分布や応力分布の状態が実物と力学的に相似であるこ とが重要である.スロッシングでは、慣性力と重力が最 も寄与する現象であると仮定し、1/10縮尺モデルに対して フルード相似則を適用する.

地震動により液面が動き出した際に,液面上に浮いて いる浮屋根は,まず水平方向に動き,タンク側壁と衝突 し,ポンツーンの変形・破損が生じることなどで浮屋根 が本来有する浮力を失うと言われている.その対策とし て図-1に示すようにバッファーを設置し,スロッシング による浮屋根運動エネルギーをゴム変形によるポテンシ ャルエネルギーで十分に吸収する容量を有し,さらに高 減衰化したゴムの粘性減衰やタンク側板との摩擦減衰な どにより運動エネルギーの減衰を期待する.

(2) フルード相似則による加振条件の設定

模型タンクに与える加振条件を設定する. 技術基準の 告示¹⁰に基づき, 速度応答スペクトルを 200cm/s として, 式(4)に示すフルード数 *Fr*の相似より (1/10)¹²の 63cm/s とすることができる.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{L \cdot g}} \tag{4}$$

ここで、Vは流速(m/s)、Lは代表長さ(m)、gは重力加速 度(m/s²)である.

ところで、本実験の目的は、基本的な応答を知ること であるので、正弦波入力で加振を行う.一般に入力波を 正弦波にして固有値成分で与えると、発生する波高が地 震に対する速度応答スペクトルの場合よりも大きくなる ことが知られている.このため波高が大きくなり、バッ ファーの評価を行うことが不可能となる可能性が高い. そこで、実験の相似則を損なわないレベルでかつ実験可 能な入力波条件を検討する必要がある.その入力波条件 の妥当性は、速度応答スペクトルから求められる液面揺 動高さを比較することで確認できる.したがって、バッ ファーの減衰効果についての評価は、この入力波の妥当 性を確認した上で行う必要がある.

液面揺動高さは、浮屋根がある場合のスロッシング1 次モードに対して、この速度応答スペクトル*Sv*を用いて 次式から算定することが可能である¹¹⁾.

$$\eta_{\max}^{(1)} = \frac{D}{2g} \times 0.837 \times \left(\frac{2\pi}{T_1}\right) \cdot S_V \tag{5}$$

ここにDはタンク直径,gは重量加速度, T_1 は1次モードの固有周期である.

式(5)より \$4,000 タンクで想定される液面揺動高さ を算定すると、1/10 縮尺モデルでフルード相似則に対応 させた速度応答スペクトル 63cm/s とした場合、31.8cm と算定できる. つまり、実験時の液面揺動高さがこのレ ベルになる入力波条件にて実験を実施すれば、相似則を 損なうことなく評価が可能と判断する.

なお、実際には液面揺動高さは、有限波高(非線形性) を伴う液面増分が考えられ、これは高次モードで浮屋根 の面外変形に影響するとされている¹¹⁾.しかし本浮屋 根実験では前述のように1次モードを主体とした定性的 な実験であるので、報告書¹¹⁾に準じて有限波高(非線 形性)の影響は考慮しないこととする.

(3) *ϕ*4,000 タンクモデルとバッファー

浮屋根の構造に関しては、幾何的に相似であることが 望ましい.ここでの模型タンクが 1/10 縮尺相当である場 合、タンク直径 40m,液高さ 20m に対応している.しか し、浮屋根に関してはポリカーボネート樹脂製の中空シ ートを採用して軽量化することで質量比を合わせたが、 実物のデッキ厚みが 4.5mm と非常に薄いのに対し、本実 験では、厚みが 4.5mm(中空樹脂のため、実質換算厚で 3.1mm)と幾何的相似としては約 7 倍の厚みのものを使 用した.この場合の浮屋根の剛性を考えると、浮屋根の 曲げ剛性 D は、式(6)で表される.

$$D = \frac{Et^{3}}{12(1-v^{2})}$$
(6)

ここでDは浮屋根の曲げ剛性 (Nm), Eは浮屋根材の 弾性率 (N/m²), tは浮屋根の厚み(m), vはポアソン比 である. さらに実物の浮屋根と比較するため, 無次元化 曲げ剛性Dを式 (7) により求める.

$$\bar{D} = \frac{D}{\rho g R^4} \tag{7}$$

ここで *ρ* は内容液の密度, *R* はタンクの半径である. 本実験の浮屋根モデルの無次元曲げ剛性を求めると 2.6×10⁵となる.これに対し、坂井らの研究^{12)~14)}で示さ れたシングルデッキで 10⁶, ダブルデッキで 10⁻³である ことを考えると、シングルデッキよりは曲げ剛性が高く なるが大きく乖離したものではない. また、同研究 12>~14) では、無次元曲げ剛性が104以下の場合、3次モードま で固有周波数にも大きく影響しないとされている. つま り、高次のスロッシングモードで発生するデッキの面外 変形は、浮屋根の膜力の影響で抑制され、また1次スロ ッシングモードに対する減衰定数も浮屋根の剛性で高く なることが考えられる.よって、本実験がスロッシング 1 次モードを主体とした浮屋根の挙動を把握することで あり、本実験で得られた浮屋根モデルでの減衰定数が実 物の減衰定数と乖離したものでなければシングルデッキ 相当の実験として扱うことができると判断する. なお, 浮屋根の減衰定数に関しては後述する.





タンクモデル

浮屋根モデル

写真-2 実験モデル

タンクモデル		浮屋根 モ デル		
材料	鋼製	材料	中空 PC 樹脂	
板厚	4.5mm	厚さ(換算厚)	4.5mm(3.1mm)	
直径	4000mm	直径	3950mm	
高さ	2500mm	質量	25kg	
水深	2000mm	弾性率	2300MPa	
		ポアソン比	0.37	
タン2側面			<u>中空PC樹脂)</u>	

表-2 模型諸元 ※房相エデ ==

図-5 浮屋根モデル概略図

内容液

/	起振条件	周波数	振幅	浮屋根	備考
Ф 4000	正弦波	理論値 (0.47Hz)	±3mm	有り/無し	立上振動10秒 -本振動20秒 -収束振動10秒

4. 04.000 タンクモデルの振動実験

(1) 浮屋根式タンクモデル

実験に用いたタンクモデルは写真-2 に示すような外径 4000mm, 高さ2500mmの鋼製で, 振動台にボルトで固定し, 水を2000mmまで満たした. 浮屋根モデルは図-5に示すよ うに外径 3950mm, 厚さ 4.5mm の中空樹脂を用い, 外周に L40 アングルを設置し、浮屋根式タンクをモデル化した. 模 型諸元を表-2に示す。

(2) バッファーモデル

バッファーは、**図-6**のモデルを製作し、**図-7**に示すよ うにL40アングルの外周部(浮屋根モデル外周部)に取 付けた.本実験では、TYPE-Aを過去に緩衝材用として使 用した NR/SBR とし, TYPE-B を最適材料として選定した EPDM として、ゴム材質2種類を比較評価する.表-3に本 実験パターン,表-4にバッファーの諸元を示す.ここで, 表-4 に示す TYPE-A は高剛性・高摩擦・低減衰, TYPE-B は低剛性・低摩擦・高減衰として区別することができる.

(3) 入力条件および計測項目

振動台は愛知工業大学所有の大型振動台(台寸法: 6m×10m, 搭載重量:1500kN, 最大変位:±20mm, 振動



図-6 バッファーの形状



図-7 バッファーの取付図

表-4 バッファーの諸元

タイプ	摩擦係数	損失係数	ゴム硬さ
TYPE-A	0. 95	0. 13	A80
TYPE-B	0. 56	0. 16	A70



数範囲: DC~50Hz)を用いる. 起振条件として,式(1) より求まる1次スロッシング固有周波数(0.47Hz)の正弦 波を入力する変位制御で行う. 起振時間は,図-8に示す ように立上振動10秒,本振動20秒,収束振動10秒で 行った. また,本振動の振幅は±3mmとした. この振幅 条件での応答波高は21cmであり,相似則を考慮した速 度応答スペクトルより想定される液面揺動高さ(38cm) に比べると低いが,浮屋根上に設置した実験計器上の問 題や安全面を考慮し,本条件を振幅条件として決定する.

計測方法は、加速度計および歪みゲージを図-9に示す とおりに配置し、浮屋根の加速度(速度・変位)応答計 測およびタンク内水面挙動(波高等)をデジタルビデオ カメラ (DVC) にて撮影する. なお、浮屋根の各部位に 取付た加速度計, 歪みゲージおよび DVC の位置および 計測方向を表-5 に示す. ここで、加速度計は KYOWA の AS-5TG, AS-1TG, 歪みゲージは防水性の KFW-5-120-C1-11L10M3R を用いている.

バッファーの減衰効果の評価としては、バッファー有 無による浮屋根上の加速度やひずみの応答とその減衰挙 動、さらに液面揺動高さを比較評価する.

5. 実験結果

(1) 浮屋根モデル各部位の加速度減衰波形の比較

スロッシングによって生じる浮屋根各部位(E1, E0.6, E0.3 およびS1)の鉛直方向の応答加速度時刻暦減衰波形 についてバッファー有無で比較した結果を図-10 に示す.

図-10 より,バッファーなしの場合は,バッファーあ りの場合に比べて応答加速度が大きく,減衰も小さいこ とが減衰波形から確認できる.ここで E1 の加速度波形 から減衰定数を算出し,また DVC の撮影データから液 面揺動高さを求めた結果を表-6 に示す.表-6 より,バッ ファーを設置することで,スロッシングにより生じる液 面揺動高さを TYPE-A で 47%, TYPE-B で 38%低減して いる.次に減衰定数を比較すると,バッファーなしの場 合は 0.8%である.それに対し, TYPE-A では 2.7% となり,



図-9 各種計測機器取付位置

表−5 計測項目

計測	計測位置記号	計測位置	計測方向	
加速度	E1	1R-東	鉛直・水平(起振軸方向)	
	E0.6	0.6R-東	鉛直·水平(起振軸方向、起振軸直角)	
	E0.3	0.3R-東	鉛直·水平(起振軸方向、起振軸直角)	
	W1	1R-西	鉛直·水平(起振軸方向)	
	N1	1R-北	鉛直·水平(起振軸方向)	
	S1	1R-南	鉛直·水平(起振軸方向)	
	E1	1R-東	円周・円周直角	
	E0.6	0.6R-東	円周·円周直角	
歪み	E0.3	0.3R-東	こ 円周・円周直角	
	W1	1R-西	円周・円周直角	
	N1	1R-北	円周·円周直角	
	S1	1R-南	円周·円周直角	
DVC	C1	タンク側面観察窓	鉛直	

バッファーなしの 3.2 倍, TYPE-B では 1.5% とバッファ ーなしの 1.9 倍に増加している. この結果からもスロッ シング減衰効果が認められる. ところで, この減衰定数に 関して, バッファーなしの場合 0.8%であったが, これは 一般にシングルデッキ浮屋根の 1 次スロッシングモード の減衰定数が 0.5%~1%であること^{12,13,15,16}から,本実 験に用いた浮屋根モデルが実タンクのシングルデッキ浮 屋根相当の 1 次スロッシングモードを再現できているも のと判断する.

次に E0.6, E0.3 および S1 の位置におけるバッファー 有無での加速度応答を比較する. バッファーなしの場合 では、起振終了後(40秒後)に加速度が増幅する傾向が 見られる、これは、浮屋根が液面の凹凸挙動や回転挙動 の影響を受けているものと考えられる. 特に S1 では, 起振中よりも起振終了後の応答加速度が大きくなってい ることから、液面回転運動の影響が大きく寄与している ものと考えられる.実際にDVCで撮影した映像からも浮 屋根の回転運動を確認している. それに対し, バッファー ありの場合は、TYPE-A、B に関わらず、応答加速度は 起振終了後に増幅することなく速やかに減衰している. 特に TYPE-A ではその減衰効果の大きいことがわかる. しかしながら、図-11 に示す浮屋根各部位における最大 応答加速度を見ると、浮屋根端部のE1(鉛直方向)では 先にも述べたとおり、TYPE-A が最も加速度低減効果が 大きいが, 浮屋根中心部に近い E0.6, E0.3 では逆に





図-10 浮屋根各部位での応答加速度時刻暦波形(鉛直方向)

タイプ	液面揺動高さ(cm)	減衰定数
バッファーなし	21. 3	0. 0083
TYPE-A	11. 3	0. 0266
TYPE-B	13. 3	0. 0154

表-6 最大波高·減衰定数

TYPE-Bの方が加速度低減効果は大きくなっている. さらに水平方向の加速度でも,**TYPE-B**の方が,加速度低減効果は大きくなっている.これは,**TYPE-A**と**TYPE-B**

のスロッシング減衰機構の違いによるものである.まず 高剛性高摩擦の TYPE-A では、バッファーがスロッシン グによってタンク側面に接触した際に、TYPE-B に比べ て変形量が小さく、浮屋根の運動を摩擦によって強制的 に拘束することでスロッシングを減衰している.これに 対し、低剛性低摩擦の TYPE-B では、バッファーがタン ク側面と接触した際の摩擦による拘束力は小さく、ゴム がタンク側面との接触により変形する.この際、材料特 性上 TYPE-A よりも損失係数が大きいため、ゴム変形に よる粘性減衰が生じてスロッシングを減衰させる.した がって、TYPE-B では特に水平方向での加速度低減効果 が現れたものである.これより、TYPE-A は TYPE-B に 比べて,優れた減衰効果があるようにと思われるが、タ ンク側面との拘束力が大きいために、浮屋根に過度の変 形を与える可能性が高い.これらを検証するために、浮屋 根各部位に生じる歪みを確認する必要がある.



図-11 浮屋根各部位における最大応答加速度

(2) バッファーによる歪みの影響について

バッファーを設置することによってスロッシングによ る浮屋根の揺動を抑制する効果が認められた.次に浮屋 根モデル上に設置した歪みゲージからバッファーによっ て生じる歪みの変化を確認する.バッファーなしの場合 の歪み応答については、浮屋根端部の E1 (円周直角方向) では最大で 300µε 程度であるが、E0.6 (円周直角方向) および E0.3 (円周直角方向)では歪みが増大し、最大で E1 (円周直角方向)の約5倍の1400µε 程度生じ、液面 凹凸挙動の影響を受けて増大することを確認している⁷.

したがって、本研究では、バッファーによって、浮屋 根上の歪みにどのような影響を及ぼすかを比較するため、 バッファーなしの場合で最大歪みの生じた E0.6 (円周直 角方向) における歪み計測データから、起振中(0~40 秒) および起振終了後(40秒~80秒)でのフーリエスペ クトルを求め、図-12 に示して比較する.

図-12 より, バッファーなしの場合, 起振中は高調波 成分が見られるものの, 1 次スロッシング固有周波数で ある 0.47Hz が卓越していることがわかる. しかしながら, 起振終了後では, 高調波成分である 0.93Hz の 2 倍波成分 に卓越周波数が変化している. この浮屋根上に生じた 2



図-12 E0.6 (円周直角方向) における歪み

倍波成分は、先にも述べたとおり、液面中心部の凹凸の影 響であり、この液面のモード変化が浮屋根に大きな歪み を与えている. 次にバッファーありの場合は, TYPE-A では1次スロッシングモードに伴う0.47Hzのピークは抑 制され、起振終了後には速やかに歪みが収束している. しかしながら、起振中において、2 倍波である 0.93Hz の ピークが、バッファーなしの場合よりも大きくなってい る. ここからも、TYPE-A では、スロッシングをタンク 側面との摩擦による拘束力で減衰させるために、浮屋根 中心部、つまりデッキ部の面外変形を生じさせる可能性 が示唆される. それに対し, TYPE-B の場合は, 減衰力 ではTYPE-Aに劣るが、高調波成分の発生を抑制し、デ ッキ部の面外変形を起こすことなくスロッシングを減衰 させている. よって,本結果より, TYPE-A のスロッシ ング減衰機構では、デッキ部の面外変形等を生じさせる 可能性があるため、TYPE-Bのように適度に剛性を抑え、 浮屋根の歪み増加を抑えつつ、ゴムの変形による粘性減 衰でスロッシングによる液面揺動を抑制する機構の方が 優れたスロッシング減衰対策であると判断する.

6. 結論および今後の課題

本研究では、苫小牧で被害を受けた浮屋根式タンクの 1/10 モデルを用いて振動実験を行い、スロッシング発生 時の浮屋根の1次モードに着目し、浮屋根の挙動(加速 度および歪み)からバッファーによるスロッシング減衰 対策について検討した.本研究をまとめると、以下のと おりである.

(1) バッファーによる制振効果

浮屋根に生じる運動エネルギーから最適な剛性を有す るバッファーを設計し、設置することにより、波高を最 大 30~50%低減し、1 次スロッシングモードの減衰定数 も2 倍以上に増大させる効果が期待できる. なお、バッ ファーは、ゴム材料の持つ粘弾性、特に弾性率の温度依 存性を事前に確認し、さらに設置する環境を考慮した上 で材料選択し、バッファー剛性を設定する必要がある.

(2) バッファーによる制振機構

浮屋根モデルにバッファーモデルを取付けることで, 発生するスロッシングを抑制できることが確認できた. バッファーのスロッシング制振機構は, TYPE-A のよう に高剛性・高摩擦を有するバッファーの場合は, タンク 側壁とバッファーとの接触による拘束力が大きく, タン ク側面との接触による摩擦が浮屋根の運動エネルギーの減 衰に寄与し, 液面揺動を抑制する効果が高くなる. しかし, 浮屋根上に発生する歪みを増加させる. これに対して TYPE-B は, TYPE-A に比べて低硬度で あるため変形しやすく, 摩擦係数も低いために摩擦による 減衰効果は小さい.しかし, バッファーの変形によって 粘性減衰効果を高め, ゴムの高分子鎖間での熱エネルギ ー損失を高めることで, スロッシングを抑制効果が期待 できる.

以上より、スロッシング減衰効果は TYPE-A に比べて 小さくなるが、浮屋根上に発生する歪みを抑制すること ができるので、TYPE-B が総合的には優れたスロッシン グ対策と判断する.

(3) 今後の課題

本実験では、浮屋根を完全にモデル化したとは言えず、 本研究で得た所見をより実際に近いモデルで浮屋根式タ ンクの制振装置としての妥当性を確認する必要がある. そこで著者らは、実タンクでのスロッシング実験を計画 実施し、バッファーの有効性の確認を行っている.実タ ンクはジャパンエナジー(株)船川事業所の協力により、 1,600KL(直径 15.7m)インナーフロートタンクを利用し た.さらに、消防大学校消防研究センターと連携して、 15,000KL(直径 38m) 実タンクでのスロッシング実験計 画を進め、さらに精度の高いデータを採取する予定であ る.これにより、実用的なスロッシング制振装置の完成 を目指している.

謝辞:本研究を行うに際し,中井商工(株)連重俊 博 士および丸田 光政氏から貴重な助言と協力を得た.また, 実験を行うに際しては,愛知工業大学工学部都市環境学 科ならびに中央大学理工学部土木工学科の学生諸君から 協力を得た.ここに記して感謝の意を表す.最後に,本 研究の一部は,総務省消防庁消防防災科学技術研究推進 制度,(独)日本学術振興会科学研究費・基盤研究(C) ならびに中央大学理工学研究所共同研究助成の給付,愛 知工業大学地域防災研究センターの協力を受けたことを 付記する.

参考文献

- 畑山健,座間新作,西晴樹,山田實,廣川幹浩,井上涼介:
 2003年十勝沖地震による石油タンク被害と長周期地震動, 海溝型巨大地震を考える-広帯域強震動の予測-,土木学 会・日本建築学会 巨大地震災害対応共同研究連絡会地震 動部会資料, pp.7-18, 2005.1.
- 平成 15 年十勝沖地震危険物施設の被害記録, 危険物保安 協会, 2004.12.
- 坂井藤一:2003年十勝沖地震における浮屋根式タンクの被害について、日本鋼構造協会、JSSC, No.52, 2004.4.
- 4) 屋外タンクのスロッシングに関する調査報告書,自治省消防庁,1990.3.

- 5) 大型タンクのスロッシングに関する耐震・制振・免震等技術のミニシンポジウム講演概要集,土木学会巨大地震災害への対応検討特別委員会耐震診断および耐震対策部会タンクワーキンググループ,2005.7.
- 6) 井田剛史,平野廣和,鈴木森晶,坂東譲,佐藤尚次:浮屋 根式貯蔵タンクのスロッシング減衰対策 - ф0.6m タンクモ デルの振動実験-,土木学会論文集 A 編, Vol. 63, No. 1, 2007.3
- 7) 井田剛史,平野廣和,有田新平,佐藤尚次,奥村哲夫:ス ロッシング発生時の貯槽浮屋根挙動の一考察 - \$4000 タン クモデルでの振動実験-,土木学会論文集 A 編, Vol. 63, No. 3, 2007.3
- 8) Housner, G.W. : Dynamic Pressure on Accelerated Fluid containers, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.47, 1957.
- (社)日本ゴム協会:ゴムの力学入門コース ゴム製品の ための有限要素解析 - , 1999.
- 10) 総務省消防庁通達, 危険物の規制に関する規則の一部を改 正する省令等の施行について, 消防危第14号, 2005.1.
- 11) 屋外タンク貯蔵所浮屋根審査基準検討会報告書, 危険物保 安技術協会, 2004.9.

- 坂井藤一,月岡康一,真砂昌和,酒井守雄:浮屋根式貯槽のスロッシングに関する一研究(解析と実験),圧力技術, Vol.15, No.1, 1977.1.
- 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,川崎重工業(株)技報,第74号, pp.60-66,1980.4.
- 14) Sakai, F., Nishimura, M. and Ogawa, H. : Sloshing Behavior of Floating-Roof Oil Storage Tanks, *Computers and Structures*, Vol.19, No.1-2, 1984.3.
- 15) 廣川幹浩,座間新作,山田實,西晴樹,畑山健:石油タン クのスロッシング減衰定数,消防研究所報告,第98号, pp.66-73,2004.9.
- 16) 廣川幹浩,座間新作,山田實,西晴樹,遠藤真:石油タン クのスロッシング減衰定数,大型タンクのスロッシングに 関する耐震・免震技術のミニシンポジウム論文集,土木学 会,pp.23-26,2005.7.

(2007.4.6 受付)

A DAMPING METHOD AGAINST THE FLOATING ROOF TANK SLOSHING A VIBRATION EXPERIMENT WITH \$4M TANK MODEL

Tsuyoshi IDA, Yuzuru BANDO, Hirokazu HIRANOand Naotsugu SATO

Liquid sloshing of oil storage tanks caused by Tokachi-Oki earthquake in 2003 gave severe damage to oil tanks in Tomakomai area. The purpose of our study is to establish damping method against liquid sloshing so that destruction and sink of floating roofs of the oil tanks can be prevented. In this paper, we propose the buffer using viscoelastic materials as anti-liquid sloshing measure and have confirmed liquid sloshing damping effect of the buffer by ϕ 4m tank model shaking table experiment. It is suggested that the buffer is an effective damping method for liquid sloshing.