第　2　回　定　期　研　究　会

平成 20 年度 SGST 第 2 回定期研究会　議事録

日時　：平成 20 年 6 月 18 日(水)　16：00～17：30
場所　：愛知工業大学 本山キャンパス　２階　多目的室 A，B
出席者：久保（名城）鈴木（愛工大），北根（名大），佐藤（中日本 C）．原田（創建），鷲見（八千代Ｅ），藤澤（新三重），加藤，森谷（海洋架橋），中川（瀧上），古田土（トピー），山田，神頭，水野，高橋（日車）

15 名(敬称略)

定期研究会（鈴木研究会担当幹事）

講演題目 「浮屋根式タンクのスロッシング減衰対策とその減衰挙動に関する研究」
講演者　株式会社十川ゴム 研究開発部係長 井田剛史
講演内容

2003 年 9 月の北海道十勝沖地震でのやや長周期地震動により石油タンクにスロッシング現象（液面揺動）が発生し，浮屋根が損傷し油面が大気に触れ大規模な火災が発生した．その後の法令の改訂もあり，具体的かつ実用的なスロッシング対策が求められている．

対策として，浮屋根の外周部に高減衰ゴム製の減衰材（バッファー）を設置し，スロッシングの抑制と浮屋根損傷防止をする方法を提案し，その検討を行った．

バッファーとして使用するゴムには，それに適した特性（高減衰性，弾性率変化が小さい，耐油性，耐候性）が求められ，いくつかあるゴムのうち EPDM（エチレンプロピレンゴム）が最も適していると判断されることからこれを使用することとする．

実験は愛知工業大学でのφ4m タンクを使用した実験と実際のタンクを使用した実験が行われた．φ4m での実験では，バッファーによりスロッシング減衰，浮屋根の回転・損傷防止効果が期待できることが分かった．実タンク実験では実際にバッファーの設計を行い，その有用性の確認を行うことができた．

浮屋根の補強，或いは貯蔵液の高さ制限といった従来の方法はコスト面への影響が高く，新技術の提案が必要ではあるが，今回の制振装置には評価基準がまだない．基準が厳しくなり，また，安全面からも早急に対策が必要なことから，今後産官学の英知を集約した防災プロジェクトが進んでいくことが期待される．

会員の普段の業務が橋梁を中心としているため，なじみのない分野の話であったが，ゴムを用いたエネルギー吸収による振動の抑制，新しい補強手段といった話に対する参加者の関心も高く，活発な質疑が行われた．

以上//

題名：浮屋根式タンクのスロッシング減衰対策とその減衰挙動に関する研究

【発表者】

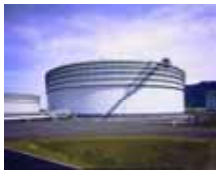
株式会社十川ゴム　研究開発部係長　井田剛史

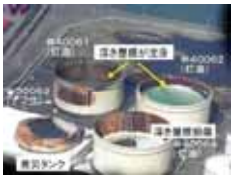
【要旨】

2003 年 9 月に発生した北海道十勝沖地震でのやや長周期地震動により，石油貯蔵タンクにスロッシング現象が生じ，浮屋根式タンクに被害の生じた事例が報告されている．これらの被害調査やスロッシング挙動把握に関して，坂井などによって多くの調査研究がなされてきているが，具体的かつ実用性のある対策提案が未だなされていないのが現状である．そこで地震による浮屋根破壊を防ぐために，高減衰性を有するゴムを浮屋根に設置し，浮屋根とタンク側板の衝突を緩和し，さらにスロッシングを減衰させることを考案した．本研究では，スロッシング制振装置として浮屋根の外周部等に設置するゴム製減衰材（以下，バッファーとする．）の設計最適化を行うため，モデル実験にてバッファーのスロッシング制振効果を検証した．そして，モデル実験で得られた知見を基に実タンク用バッファーを検討し，実タンク実験でその制振効果を実証する．

平成20年度6月度　東海構造研究グループ定期研究会

浮屋根式タンクのスロッシング減衰対策と
その減衰挙動に関する研究





株式会社十川ゴム
井田剛史

1.はじめに

2003年9月北海道十勝沖地震発生

原因：やや長周期地震動の影響

石油タンクにスロッシング現象（液面揺動）が発生し、
浮屋根の損傷・沈没から、油面が大気にさらされた。

2. 浮屋根式タンクの被害と課題

浮屋根式タンクにおけるスロッシング現象とは・・・・・

やや長周期地震動（周期2s～20s程度）を浮屋根式タンクが受ける

↓

浮屋根式タンク内貯蔵液の固有周期

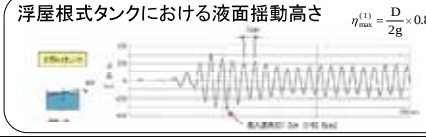
$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{D}{3.68g}\coth\left(\frac{3.68h}{D}\right)}$$

➡ 3万KLタンク（直径40m、液高20m）とすると・・・周期7秒程度

↓

浮屋根式タンクにおける液面揺動高さ

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



引用
土木学会委員会資料

2. 浮屋根式タンクの被害と課題

■1964年新潟地震、1983年日本海中部地震等でもスロッシングによる貯蔵液の漏洩とタンクヤード火災

↓

・被害発生機構の解明
・安全確保の技術確立

↓

・過去の被害調査から浮屋根の破壊メカニズムを究明
・スロッシング浮屋根挙動の力学的特性を検証

具体的かつ実用的なスロッシング対策が課題！

2. 浮屋根式タンクの被害と課題

■平成17年4月1日　浮屋根式タンクに関わる省令等が施行
- 特定屋外貯蔵タンクについて、一枚板構造のものは、液面揺動によって損傷を生じない構造を有するもの
- 浮屋根の外周浮き部分に生じる応力を許容応力以下とする
- 地域特性と固有周期に応じ、速度応答スペクトル200cm/s設定

↓

平成19年度までに浮屋根構造・設備の実態調査および
工事計画を提出すれば、平成29年度までは旧基準で良い。

2. 浮屋根式タンクの被害と課題

今後30年での主な地震発生確率

地震名	30年発生確率	マグニチュード	備考
宮城県沖地震	99%	M7.5前後	前回1978年 平均間隔37.1年
東海地震	87%	M8.0前後	前回150年前 平均間隔118.8年
東南海地震	60～70%程度	M8.1前後	前回1944年 平均間隔86.4年
南海地震	50%程度	M8.4前後	前回1946年 平均間隔90.1年

3. 研究目的

■スロッシングによる浮屋根破壊の原因を究明し、具体的かつ実用的な対策手法を確立すること。

【原因】
・1次スロッシングモードによる浮屋根の揺動
・浮屋根の回転等による衝突

3. 研究目的

～外周ポンツーンの応力評価手順～

1次モードの影響	2次モードの影響
液面揺動高さの算定 $\eta_{max}^{(1)} = \frac{D}{2g} \times 0.837 \times \left(\frac{2\pi}{T_1}\right) \cdot S_v$	液面揺動高さの算定 $\eta_{max}^{(2)} = \frac{D}{2g} \times 0.073 \times \left(\frac{2\pi}{T_2}\right) \cdot S_v$
係数 $\beta_1 = \frac{k}{\left(\frac{16EI_\theta}{R_m^4} + k\right)}$	係数 $\beta_2 = \alpha_1^2 \alpha_2$, $\alpha_1 = \exp(-14500 \times \frac{A}{R_m^2})$, $\alpha_2 = 0.082 \times R_m$
断面力算定 $M_\theta = 0.36 \cdot \beta_1 \cdot \frac{EI_\theta}{R_m} \cdot \left(\frac{\eta_{max}^{(1)}}{R_m}\right)$	断面力算定 $M_x = 6.25 \times \beta_2 \cdot \frac{EI}{R_m} \cdot \left(\frac{\eta_{max}^{(2)}}{R_m}\right)^2$, $N_\theta = 2.08 \times \beta_2 \cdot EA \cdot \left(\frac{\eta_{max}^{(2)}}{R_m}\right)^2$

4. 研究目的

～外周ポンツーンの応力評価手順～

1次モードの影響	2次モードの影響
応力算定 $\sigma_{b1} = \frac{M_\theta}{(Z_\theta)_{eff}}$	応力算定 $\sigma_{b2} = \frac{M_x}{(Z_x)_{eff}}$ $\sigma_{c2} = \frac{N_\theta}{A_{eff}}$

合成応力

$$\sigma_{max}^{(0)} = \sqrt{\left(\sigma_{b2}^{(0)} + \sigma_{c2}^{(0)}\right)^2 + \sigma_{b1}^{(0)2}}$$

$$\sigma_{max}^{(1)} = \sqrt{\left(\sigma_{b2}^{(1)} + \sigma_{c2}^{(1)}\right)^2 + \sigma_{b1}^{(0)2}}$$

断面力の低減あるいは断面補強が必要

3. 研究目的

～外周ポンツーンの応力評価手順～

応力算定 $\sigma_{b1} = \frac{M_\theta}{(Z_\theta)_{eff}}$	応力算定 $\sigma_{b2} = \frac{M_x}{(Z_x)_{eff}}$ $\sigma_{c2} = \frac{N_\theta}{A_{eff}}$

外周ポンツーンの応力低減

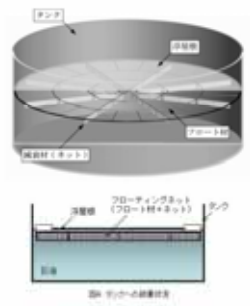
$$\sigma = \frac{M \text{ or } N}{Z}$$

断面力の低減
→液面揺動の抑制（エネルギーの増幅を抑える）

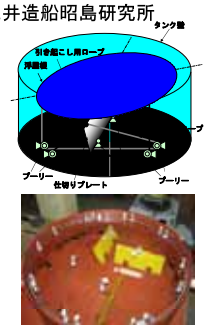
断面補強
→外周ポンツーンの適切な箇所に補剛リブ

4. 既往の研究

【フローティングネット制振工法】
三井住友建設

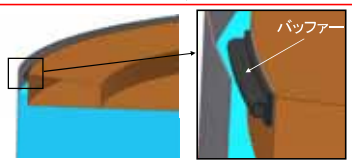


【仕切りプレート式減揺装置 】
三井造船昭島研究所



5.浮屋根式タンクのスロッシング対策

①スロッシングモードの減衰（波高の低減）
②スロッシングによるタンク側板と浮屋根等の衝突による衝撃を吸収



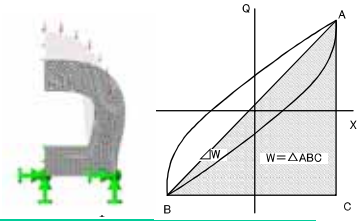
浮屋根の外周部に高減衰ゴム製の減衰材（バッファー）を設置し、スロッシングの抑制・浮屋根損傷防止を期待する

5.浮屋根式タンクのスロッシング対策

【バッファーによるスロッシングの制振】

$$E_1 = \frac{1}{2}MV^2$$

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



浮屋根の運動エネルギーをバッファー(変形)によりエネルギーを吸収・逸散させる！

6.本研究の流れ

スロッシング減衰対策手法の確立

- スロッシング基礎実験
- ⇩
- バッファー用最適材料検討
- ⇩
- Φ4mタンク実験でのバッファー制振効果検証
- ⇩
- 実タンク用バッファーの設計検討
- ⇩
- 1600KL実タンク実験でのバッファー制振効果の実証

7. スロッシング基礎実験

【概要】

Φ600mmタンクモデルでのスロッシング実験

(苫小牧被害タンクの1/66モデル)

・浮屋根にバッファーを取付ることによるスロッシング減衰効果の可能性を振動実験で確認.

・模型実験の予備的検討として

Φ600タンクモデル

7. スロッシング基礎実験

【実験モデル】

タンクモデル
高さ500mm
φ600mm
塩化ビニル製

浮屋根モデル
φ590mm×1t
塩化ビニル製

【実験条件】

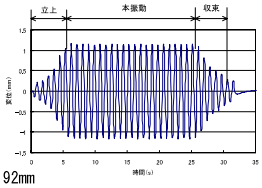
・起振周波数：1.1Hz

・起振振動：正弦波

立上5秒 - 本振動10秒 - 収束5秒

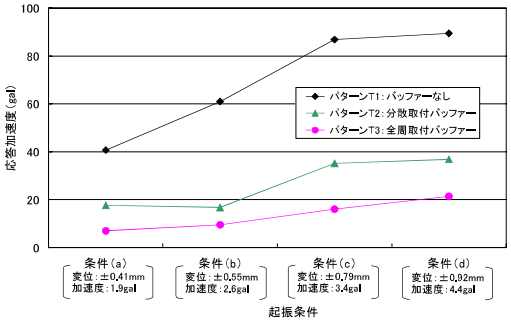
(スロースタート・ストップ方式)

・起振振幅：±0.41、0.55、0.79、0.92mm



7. スロッシング基礎実験

～起振加速度と応答加速度～

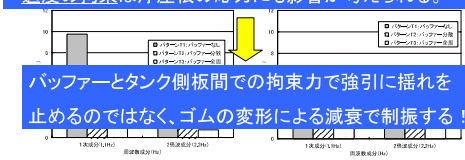


7. スロッシング基礎実験

～液面揺動高さ(波高)～

・バッファーによるエネルギー吸収及び減衰力により、スロッシング増幅(波高)を抑える可能性が示唆された。

・バッファー取付による浮屋根への歪み発生は小さいが、(バッファーによる発生応力約0.5MPa)過度の拘束は浮屋根の応力にも影響が考えられる。



バッファーとタンク側板間での拘束力で強引に揺れを止めるのではなく、ゴムの変形による減衰で制振する！

浮屋根端部　　浮屋根中心部

8. バッファー最適材料の検討

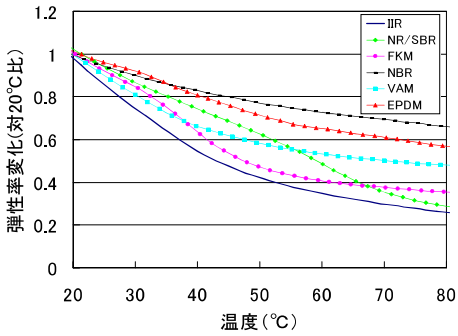
バッファーに最適なゴム材料の検討を行う

～バッファー（制振）用材料に求められる特性～
①高減衰性（高tanδ）
⇒ゴムの内部減衰で減衰させるため
②弾性率変化が小さいこと
⇒バッファーの剛性設計（ポテンシャル）を安定させる

～石油タンクに設置するために求められる材料特性～
①耐油性（貯蔵液と接触する場合）
②耐候性（浮屋根上に設置する場合）

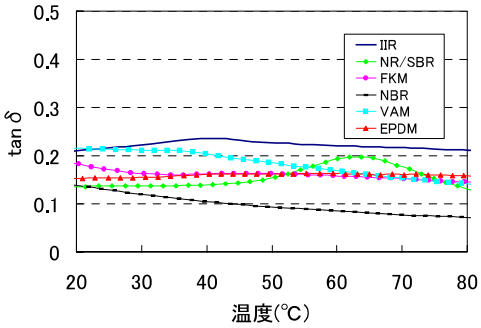
8. バッファー最適材料の検討

～高減衰・低弾性率変化材料の検討～



8. バッファー最適材料の検討

～高減衰・低弾性率変化材料の検討～



8. バッファー最適材料の検討

～高減衰・低弾性率変化材料の検討～

	弾性率変化	高減衰性
優	NBR	IIR
	EPDM	VAM
	NR/SBR	EPDM・FKM
	VAM	NR/SBR
	FKM	NBR
劣	IIR	

EPDMがバランスに優れる

9. Φ4mタンク実験でのバッファー制振効果検証

φ4mタンクでのスロッシング実験

（苫小牧被害タンクの1/10モデル）

・タンク模型をスケールアップし、浮屋根の挙動を詳細に把握.
⇒スロッシングによる浮屋根の減衰挙動は？

・バッファーの材料・剛性特性によるスロッシング減衰効果（減衰機構）への影響確認.

Φ4000タンクモデル

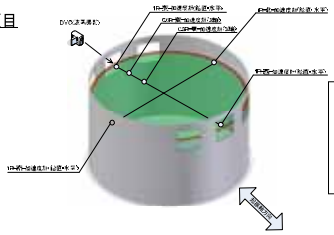
9. Φ4mタンク実験でのバッファー制振効果検証

【実験モデル及び計測項目】

・タンクモデル
高さ2500mm
φ4000-鋼製
水位2000mm

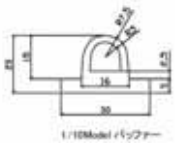
・浮屋根モデル
φ3950
中空樹脂板

・計測項目



～測定項目～
①浮屋根加速度
②浮屋根の歪み
③ DVCでの撮影

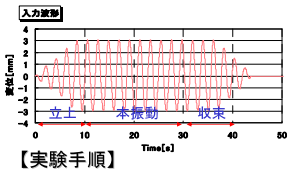
9．Φ4mタンク実験でのバッファー制振効果検証
～バッファーモデル～



タイプ	摩擦係数	損失係数	ゴム硬さ
TYPE-A 高摩擦・低減衰・高剛性	0.95	0.13	A80
TYPE-B 低摩擦・高減衰・低剛性	0.56	0.16	A70

9．Φ4mタンク実験でのバッファー制振効果検証

【起振条件】



1次固有周波数0.47Hz

立上振動10秒，本振動20秒，収束振動10秒

本振動振幅　±3mm

【実験手順】

スロッシングによる自由液面および浮屋根挙動の把握

⇩

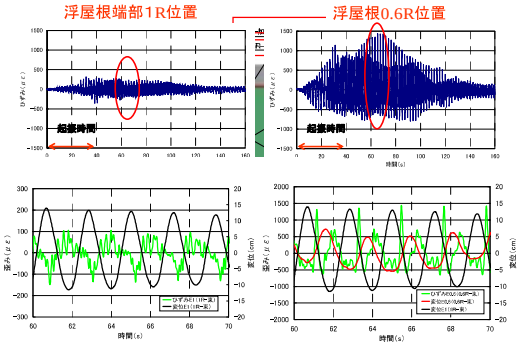
バッファーによるスロッシング減衰効果の検証と浮屋根挙動

～スロッシングによる自由液面及び浮屋根の挙動～

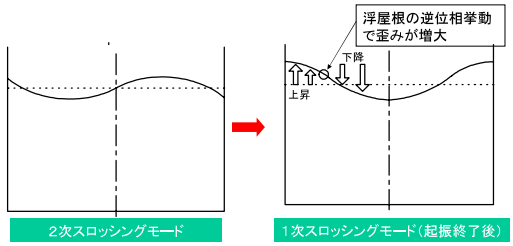
液面の凹凸挙動	浮屋根の回転
起振中	起振前
起振終了後（2倍波*1）	起振終了後

＊1：1次スロッシングモードの2倍の周波数

～液面凹凸挙動による浮屋根への影響～

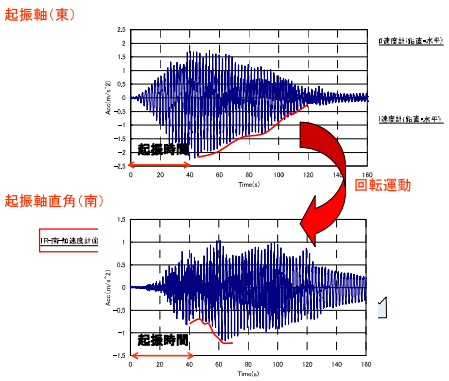


～液面凹凸挙動による浮屋根への影響～



2次スロッシングモードとは明らかに異なる挙動

～浮屋根の回転挙動～



9．Φ4mタンク実験でのバッファー制振効果検証

スロッシング対策のポイント

①スロッシングモードの減衰
- 1次スロッシングモードを抑制
  →浮屋根の歪みを発生させる根源

②スロッシングによる回転モードの防止
- 起振後の液面の回転
  →回転止めポールの変形・損傷

9．Φ4mタンク実験でのバッファー制振効果検証
～バッファー有無でのスロッシング現象比較～

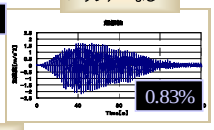
スロッシング低減・減衰及び浮屋根の回転防止

タイプ	最大波高[cm]
バッファーなし	21.3
TYPE-A	11.3
TYPE-B	13.3

～バッファー各タイプでの減衰定数の比較～

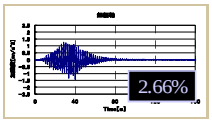
減衰定数

バッファーなし



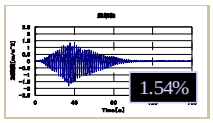
TYPE-A

高摩擦・低減衰・高剛性



TYPE-B

低摩擦・高減衰・低剛性



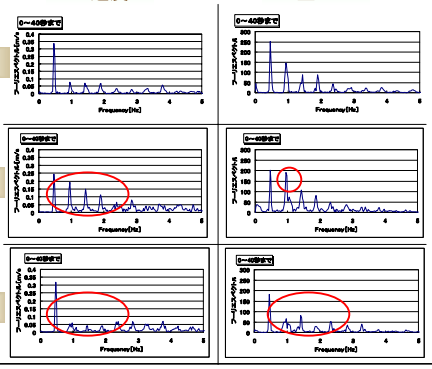
～バッファー各タイプでのフーリエスペクトル～

加速度　歪み

バッファーなし

TYPE-A

TYPE-B



～φ4mタンクでのスロッシング実験のまとめ～

- スロッシングにより浮屋根には複雑な挙動が生じる。
- バッファーによってスロッシング減衰や浮屋根の回転・損傷防止効果が期待できる。
- バッファーの剛性、摩擦係数及び損失係数の違いでスロッシング減衰効果が異なる。
  - ゴム剛性大・摩擦係数 大 ⇒ 浮屋根外周部拘束力による減衰
  - ゴム剛性小・損失係数 大 ⇒ ゴム変形による内部減衰

⇩

実用化に向け、実タンク用バッファーを設計し、
実タンクでのスロッシング実験によって、
バッファーによるスロッシング減衰効果を実証する。

10．実タンク用バッファーの設計検討

バッファーの実用化に向けた設計の検討

【設計対象タンク】
- タンク：インナーフロートタンク
  （1600KL　直径15.5m、高さ10.7m）
  ⇒1次固有周波数0.16Hz（液高2m）

【設計検証項目】
- 実タンク浮屋根の運動エネルギーを想定し、それを吸収できるバッファーのポテンシャルエネルギー（剛性）を設定
- バッファーの変形によって得られる減衰を確認

10．実タンク用バッファーの設計検討
～実タンクに適用するバッファーの剛性設計～

$$E_1 = \frac{1}{2}MV^2$$

$V = 2\pi fH$

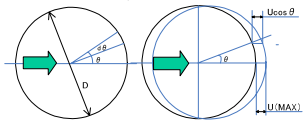
f：スロッシング周波数（Hz）
H：液面揺動高さ（m）

M:浮屋根質量（10500kg）

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

$$Q = 2\int_0^{\pi/2}(Kr \cdot U\cos\theta)\left(\frac{D}{2}\right) \cdot \cos\theta \cdot d\theta$$
$$= 2Kr \cdot U \cdot \frac{D}{2} \cdot \int_0^{\pi/2}\cos^2\theta d\theta$$
$$= \frac{1}{4}\pi \cdot Kr \cdot U \cdot D$$

Q：地震による水平力
D：タンクの直径
Θ：水平軸からの角度を（θ＝0の変位をUとする）



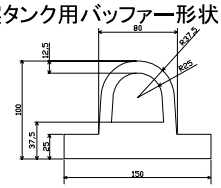
10．実タンク用バッファーの設計検討
～実タンクに適用するバッファーの剛性設計～

項目	想定値
衝突速度（m/s）	0.65
浮屋根の運動エネルギー（N・m）	2218
バッファー想定変形量（m）	0.05
バッファー想定剛性（N/m）	1.8×10^6
バッファー想定吸収エネルギー（N・m）	2250
バッファー設置本数（1本=1m）	32
バッファーに必要な単体剛性（N/m/本）	2.3×10^5

バッファー単体剛性が上記を満たすことを確認する

10. 実タンク用バッファーの設計検討
～実タンク用バッファーの剛性確認～

【実タンク用バッファー形状および材質】



材質:EPDM
ゴム硬さ:A70
長さ:1m

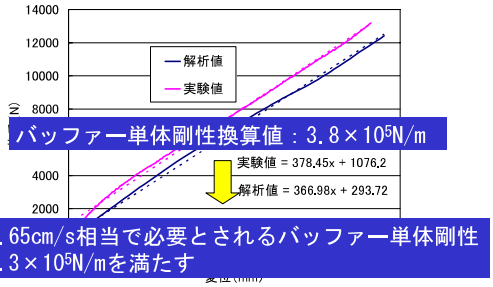
【剛性確認方法】

①3Dソリッドモデルによる構造解析（FEM）

②試作品での圧縮試験

ただし、試験機性能上、ゴム長さ100mmにて確認

10. 実タンク用バッファーの設計検討
～実タンク用バッファーの剛性確認結果～



バッファー単体剛性換算値：3.8×10^5N/m

0.65cm/s相当で必要とされるバッファー単体剛性 2.3×10^5N/mを満たす

10. 実タンク用バッファーの設計検討
～実タンクに適用するバッファーの減衰設計～

【バッファーの減衰性確認方法】

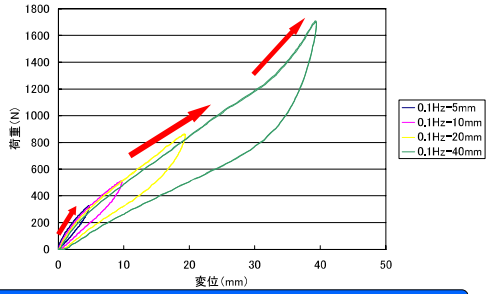
・実タンク用バッファーを動的圧縮載荷し、
　等価減衰定数を確認する.

【載荷条件】

・起振周波数(Hz):0.1、0.15、0.2、0.5、1.0

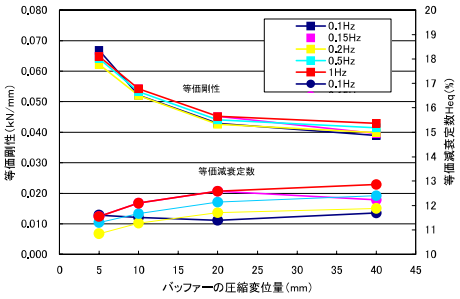
・圧縮量(mm):5、10、20、40

10. 実タンク用バッファーの設計検討
～実タンクに適用するバッファーの減衰性確認結果～



履歴曲線より等価減衰定数を算出

10. 実タンク用バッファーの設計検討
～実タンクに適用するバッファーの減衰性確認結果～



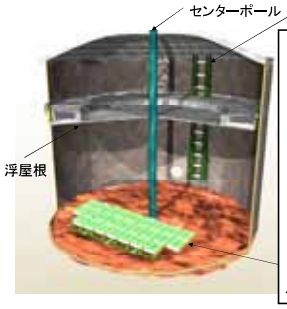
11. 1600KL実タンク実験でのバッファー制振効果の実証

1600KL実タンク(直径15.5m)でのスロッシング制振効果実証実験

- 実タンクに造波装置を設置し、スロッシングを再現
- バッファーのスロッシング制振効果を実タンクに設置して実証。

1600KLタンク(直径15.5m)

～実験モデル(概念図)～



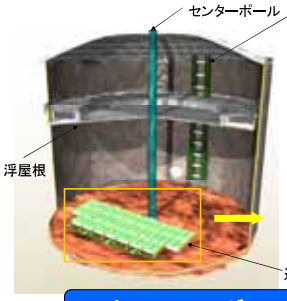
スロッシング実験条件

- タンク容量:1600KL
- タンク形式:インナーフロートタンク
- タンク寸法:直径15.5m、高さ10m
- 水深:2m
- 1次スロッシング固有周波数:0.16Hz

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

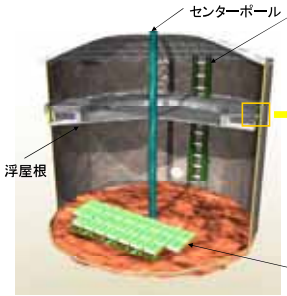
ここでεiはJ1'(εi)=0のi番目の正根，J1は第1種ベッセル関数である．εiは1次モードでは1.841である．

～加振方法(造波方法)～

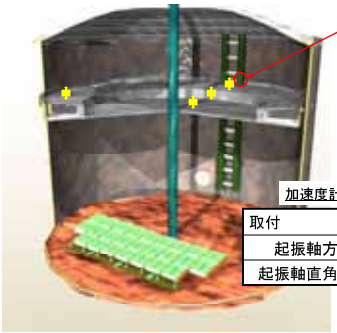


1次スロッシングに同調させて造波板稼動！

～バッファーの設置方法～



～実タンクにおける計測箇所～

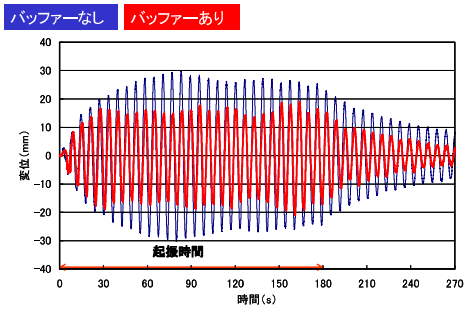


変位計(波高)
ポンツーン端部
(起振軸上)

加速度計・歪みゲージ取付位置(✚)

取付	取付位置
起振軸方向	0.3R毎(0.3、0.6、0.9R)
起振軸直角方向	0.9Rのみ

～浮屋根の応答変位～



変位を30～40%低減！

～浮屋根の減衰定数～

パターン	減衰定数	
	波高レベル5cm	波高レベル20cm
バッファーなし	0.0081	0.0195
バッファーあり	0.0160	0.0172

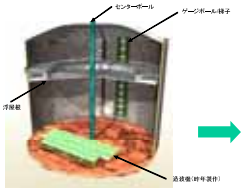
ポール（梯子）等との接触

ポール（梯子）等との接触しない

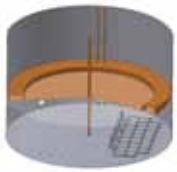
12.実タンク実験での課題と対策

■波高が10cm以上になると、梯子等に接触することで、減衰定数が高くなり、バッファー有無での比較評価が難しくなる。

☆造波装置の設置位置を90°回転し、障害となる梯子がない方向に起振軸を変更。



H18年度のタンク実験概略図



H19年度のタンク実験概略図

12.実タンク実験での課題と対策

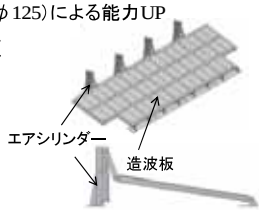
■造波装置の出力不足により、片振幅10cm以上の振幅が得られない。

☆エアシリンダーの増設（2本→4本）

☆シリンダー径UP（φ100→φ125）による能力UP

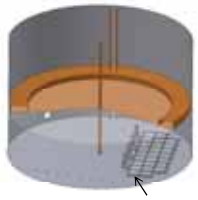
☆シリンダーを直動型に変更

エアシリンダー水平駆動方式での造波

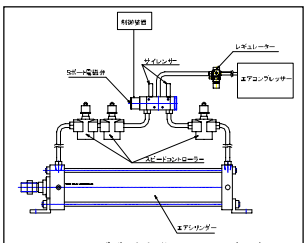


エアシリンダー直動型方式での造波
→エアシリンダーで直接造波板を上下動

～加振方法（造波方法）～



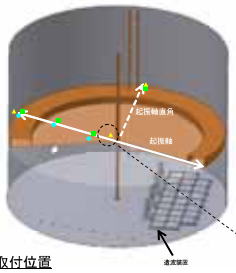
造波装置



スロッシング造波制御システム概略図

1次スロッシング（周期4.82s）に同調させて造波板稼動
→電磁弁、スピードコントローラーでシリンダー制御し、造波板を稼動

～計測方法～



計測記号
■：加速度計
●：ひずみゲージ
▲：変位計

計測機器取付位置

取付方向	取付位置
起振軸方向	0.3R毎（0.3、0.6、0.9R）
起振軸直角方向	0.9Rのみ

～起振条件～

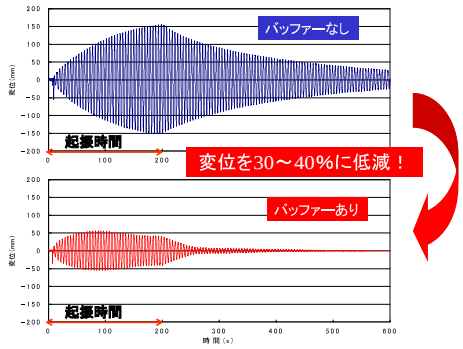
起振周波数（周期）

1次スロッシングモード　0.21Hz（4.82s）

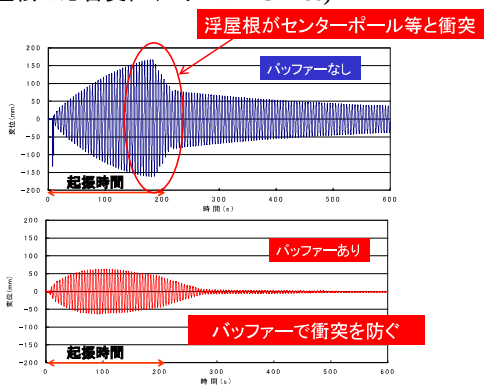
起振パターン

パターン	造波回数（回）	回転軸バッファー
T-1	40	あり
T-2	60	
T-3	40	なし

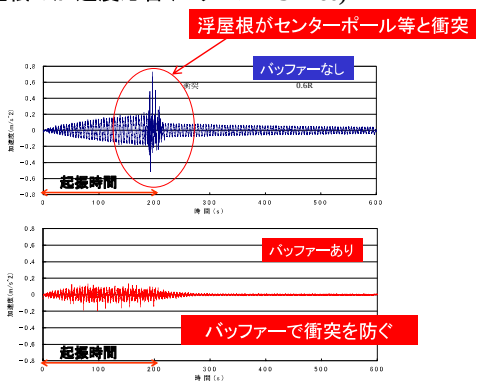
～浮屋根の応答変位（パターンT-1: N40)～



～浮屋根の応答変位（パターンT-3: N60) ～



～浮屋根の加速度応答（パターンT-3: N60) ～



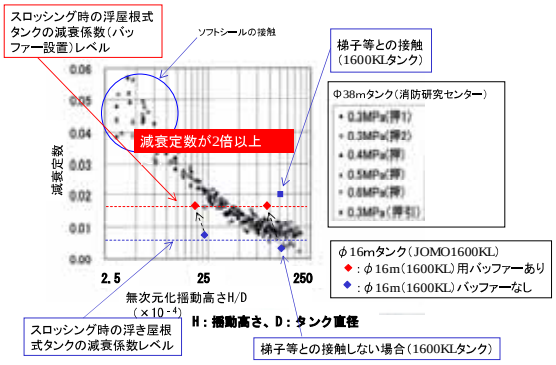
～浮屋根の減衰定数～

ゲージポール（梯子）等との接触

パターン	減衰定数	
	波高レベル5cm	波高レベル20cm
バッファーなし	0.0081	0.0195（改良前）
		0.0037（改良後）
バッファーあり	0.0160	0.0172（改良前）
		0.0174（改良後）

ゲージポール（梯子）等との接触しない

～各浮屋根式タンクの減衰定数とバッファーによる減衰効果～



～実タンク実験のまとめ～

① φ15.5mタンクでのスロッシング減衰の傾向

・揺動高が高くなり、浮屋根に付属する構造物（梯子等）に衝突すると、強制的に揺動高が制限され減衰が大きくなる。

→浮屋根に付属する構造物に依存し、本タンク特有の傾向である。

・梯子等に接触させずに造波させた場合、減衰定数は揺動高5cmで0.8%、揺動高20cmレベルで0.4%となることが確認できた。

→揺動高が高くなるにつれて、減衰定数が低下する傾向にある。

～実タンク実験のまとめ～

② φ15.5mタンクでのバッファーによるスロッシング減衰効果

・バッファーによって減衰定数が約2倍以上、揺動高を30～40%に低減する。

・バッファーありでは、揺動高に依存せずに高い減衰が得られる。

→バッファーでの減衰効果は高減衰ゴムの変形によるもので、揺動高が高くなると相対的にバッファーの変形も大きくなり、その結果エネルギー吸収による減衰が大きくなる。

13. 統括

①スロッシング現象による浮屋根式タンクの挙動を確認し、その対策のポイントを示した。

②バッファーの設計方法を提案し、実タンクを含む3STEPの実験でスロッシング減衰効果を確認した。

③バッファーに必要とされる材料を検討し、その減衰機構の違いを示した。

↓

液面揺動高さを低減⇔断面力の低減効果

タンク側板、ポール等の衝突防止、浮屋根回転防止

⇔構造物の損傷防止機能

１４. 浮屋根式タンクの安全性確保技術への提言

浮屋根式タンクにおける安全性確保の方法
①ポンツーンの補強
②貯蔵液の液高の制限
③スロッシング制振装置の設置

↓

課題
①補修・補強工事費用が数億円！？
②タンク1基あたりの貯蔵量が減少し、固定費比率が上昇する
③補強工事の1/10程度のコストで実施可能
しかし、現状では評価基準がない・・・

１４. 浮屋根式タンクの安全性確保技術への提言

千葉（市原）・大阪（堺）・名古屋などの大都市近郊で
やや長周期地震動による石油タンク被害が予想される

↓

既存大型貯精タンクへの制振装置設置
方向・工事費の算定

・エンドユーザのニーズの確認
（石油連盟等）

↓

平成20年度以降に**産官学の英知を集約**した
やや長周期地震動対策のための**防災プロジェクト作り**

ご静聴ありがとうございました！