

タンクの内溶液高をパラメータとした 地震リスク評価のための基礎研究

Fundamental Study on Seismic Risk Assessment of Tanks Considering Liquid Height as Variable

○大嶋昌巳¹, 加瀬隆¹, 藤田謙一¹, 矢代晴実², 福島誠一郎³
Masami OSHIMA¹, Takashi KASE¹, Ken-ichi FUJITA¹
Harumi YASHIRO² and Sei'ichiro FUKUSHIMA³

¹千代田アドバンスド・ソリューションズ株式会社

Chiyoda Advanced Solutions Corporation

²東京海上日動リスクコンサルティング株式会社

The Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co. Ltd.

³東電設計株式会社

Tokyo Electric Power Services Co. Ltd.

The tank fires of Tokachioki earthquake in 2003 made the people attending aware of seismic performance of tanks. And it reminded people that tanks have possibilities to make catastrophic disaster against environment because of their large volume, once their contents are leaked out. So development of procedure for seismic risk management of tanks is required. Authors have already pointed out the fact that the responses of tanks at seismic events are affected by their volume of contents. This study is positioned as fundamental study of the seismic risk control by adjusting liquid height. Damage modes of the cylindrical storage tanks with floating roofs are extracted. The effect of occurrence of the damage modes of tanks by variation of liquid height are discussed.

Key Words : Seismic risk assessment, Storage tanks with floating roofs, Damage modes, Liquid height, Seismic performance

1. はじめに

十勝沖地震（2003年）で発生した浮屋根式平底円筒形貯槽（以下、タンク）の火災を契機に、消防法においてタンクの耐震設計に対して見直しが行われるなど、タンクの耐震性能が注目されるようになってきた。

タンクの被害は日本では新潟地震（1964年）、米国ではその直後のアラスカ地震（1964年）で俄かにクローズアップされるようになった。それ以前にも被害例はあり、日本では関東地震（1923年）、米国ではロングビーチ地震（1933年）の際に被害記録が残されている。このように地震によるタンクの被害事例は多い。

石油・石油化学プラントにおけるタンクの被害の特徴は、地震により液状化しやすい臨海工業地帯の地盤の軟弱な埋立地に立地している場合が多いため、地震動による被害以外にも主要動後の地盤変状による被害が多く見受けられることである。そして、タンクは大量の内容液を保有しているため、地震による損傷で一度内容液が漏洩すると、大規模な環境被害や大火災に発展する可能性が高い。

以上のように、プラント施設は多数のタンクに大量に内容液を備蓄しているため、建設地の立地条件などにより、地震時には大規模な災害となることが十分に予想され、タンクの地震リスクマネジメント手法の整備が求められている。

また、タンクはプラント設備内の一地域に集中的に設置され、複数の同型タンクが隣り合って建設されることが多い。しかしながら、これらすべての隣接する同型のタンクが同一地震により同様な損傷を被るわけではなく、大きな損傷は一部のタンクに限られている。すでに著者

ら¹⁾は、隣接する同型のタンクでも損傷の程度が明らかに違う原因の一つとして、タンク内溶液の液高が地震時の損傷モードの発生に大きく影響することを指摘している。

本研究では、タンク内溶液の液高が地震時の損傷モードの発生に影響することに着目し、内溶液の液高調整によるタンクのリスクコントロールを行うために、液高がタンクの損傷モードの発生に及ぼす影響を検討する。具体的には浮屋根式平底円筒形貯槽を対象に、地震によるタンクの損傷モードを抽出し、内溶液の液高が損傷モードの発生に及ぼす影響について、タンクの許容値比、地表面限界震度、および耐震性能向上率を用いて検討する。

2. 損傷の発生要因と損傷モード

本研究で対象とするタンクの概要を図1に示す。タンクの浮屋根はシングルデッキ型で、浮力を受持つポンツーン部とデッキ部で構成されている。

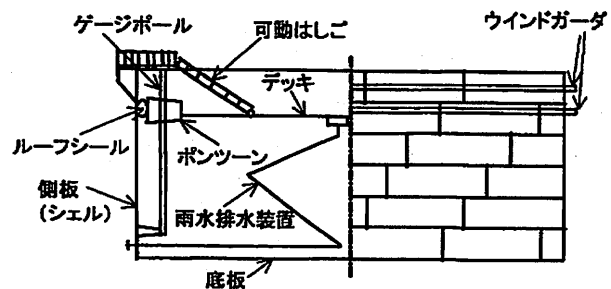


図1 浮屋根式平底円筒形貯槽の概要図

表1 タンクの各損傷モードに対する地表面震度の評価式³⁾

損傷モード		地表面震度の評価式	損傷モード	地表面震度の評価式	
バルジング	最下段側板降伏 ⁶⁾	$K_{H1-ZLD} = \frac{\frac{\sigma_y}{(p_0 D / 2t_s)} - 1}{\sqrt{C_{plh}^2 + 0.25C_{plv}^2}}$	スロッシング	ポンツーン部耐震強度超過 ⁴⁾	$K_{H2-\sigma_{max}} = \frac{0.15v_1 \sqrt{\sigma_{b1}^2 + (\sigma_{b2} + \sigma_{c2})^2}}{\sigma_y}$
	最下段側板ダイヤモンド座屈 ⁶⁾	$K_{H1-DB} = \frac{1}{\sqrt{C_{v1h}^2 + 0.25C_{v1v}^2}} \left\{ \frac{0.4Et_s}{S_f} \left(\frac{t_s}{D} \right) - V_0 \right\}$		1次モードの自由液面許容最高高さ超過 ⁴⁾	$K_{H2-H_{max1}} = \frac{0.15v_1 \eta_{max}^{(1)} + H}{H_a}$
	最下段側板象の脚型座屈 ⁶⁾	$K_{H1-EFB} = \frac{[0.96Et_s \left(\frac{t_s}{D} \right) (1 - \frac{p_0 D}{2t_s \sigma_y}) - V_0]}{\sqrt{C_{v1h}^2 + 0.25C_{v1v}^2 + 0.96 \frac{Et_s}{\sigma_y} \left(\frac{t_s}{D} \right) \frac{p_0 D}{2t_s} \sqrt{C_{plh}^2 + 0.25C_{plv}^2}}}$		2次モードの自由液面許容最高高さ超過 ⁴⁾	$K_{H2-H_{max2}} = \frac{0.15v_1 \eta_{max}^{(2)} + H}{H_a}$
	底板の横滑り ⁶⁾	$K_{H1-SLD} = \frac{\mu(W + W_D)}{\{(W_0 - W_1) / v_3 + W_1 + W_D\} + 0.5\mu(W + W_D)}$			
レベル2	隅角部アニュラ板の保有水平耐力超過 ⁶⁾	$K_{H1-Q} = \frac{2\pi R^2 q_y}{0.44HD_s W_0 v_3}$			
記号	<p>D: 貯槽直径, R: 貯槽半径, H: 液高, t_s: 最下段の側板厚, E: 鋼材のヤング係数, σ_y: 鋼材の降伏応力度, p_0: 側板下端における静液圧, q_y: アニュラ板の浮き上がり抵抗力, v_3: 応答倍率, V_0: 自重による側板下端の軸圧縮力, D_s: 構造特性係数, H_a: 自由表面許容最高高さ, S_f: 座屈安全率, W, W_D: それぞれ、液重量およびタンク重量, W_0, W_1: それぞれ、固定水の有効液重量および自由水の有効液重量, σ_{b1}, σ_{b2}: それぞれポンツーンの内周方向および水平方向の面外曲げ応力度, σ_{c2}: ポンツーンの内周方向圧縮応力度, $\eta_{max}^{(1)}, \eta_{max}^{(2)}$: それぞれ、1次および2次モードにおける液面動揺高さ, $C_{plh}, C_{plv}, C_{v1h}, C_{v1v}$: 係数</p>				

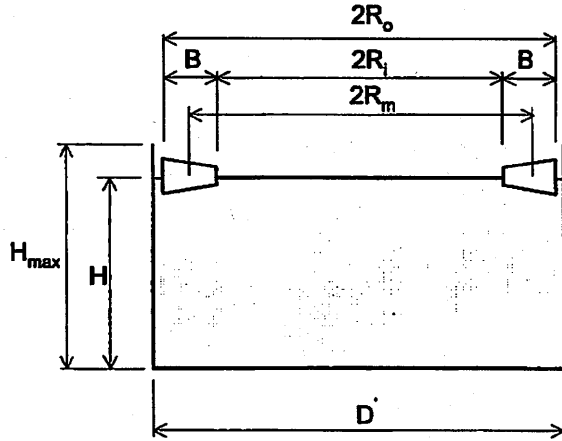


図2 タンク形状

タンクの損傷モードの発生要因は、地震動の周期成分別に分けると短周期地震動（周期0.1~0.5秒）によるタンク本体と一部内溶液のバルジング、およびやや長周期地震動（周期2~10数秒）による内溶液のスロッシングが主である²⁾。その他に、基礎の変形により発生する損傷モードがある。

本研究ではタンク内容液の液高に大きく関与するバルジングおよびスロッシングにより発生する損傷モードを抽出することとした。バルジングおよびスロッシングの概要を以下に示す。

(1) タンク本体と一部内溶液のバルジング

バルジングはタンクと内容液の連成振動であり、地震時に加速度擬共振現象を引き起こす。その応答が大き

表2 タンクの諸元

項目	記号	数値	単位
貯槽容量	Vol	19,000	kl
貯槽直径	D	45,000	mm
貯槽高さ	H _{max}	16,000	mm
ポンツーン外リム取付半径	R ₀	22,460	mm
ポンツーン内リム取付半径	R ₁	21,860	mm
ポンツーン半径	R _m	22,160	mm
ポンツーン幅	B	600	mm
最高液面高さ	H	12,000	mm
自由液面許容最高高さ	H _a	15,000	mm
液比重	ρ	0.730	g/mm ³
鋼材のヤング率	E	2.058 × 10 ⁵	N/mm ²
鋼材の降伏応力度	σ _y	235	N/mm ²
地盤のばね係数	k _b	0.294	N/mm ³
最下段の側板厚	t _s	28	mm
H/3での側板厚	t _{1/3}	19	mm
アニュラ板厚	t _a	8	mm

なると、タンクに過大な応力が生じ損傷にいたる。

(2) 内溶液のスロッシング

スロッシングは内容液の自由液面振動であり、地震時に変位共振現象を引き起こす。その応答が大きくなると、タンク側壁の板継手の破損、内溶液の溢流や浮屋根の破損・沈没にいたる。

本研究で対象とするのは、短周期地震動とやや長周期地震動により発生するタンクの損傷モードとし、それらの限界となる地表面震度についての評価式を表1に示す。表中の式は消防法の関連法規^{4),5)}およびJIS⁶⁾に基づき整理した評価式であり、バルジングに対しては損傷モードが発生する限界となる地表面震度を示す。また、スロッシ

ングに対してはボンツーン部の損傷モードが発生する限界となる地表面震度、および自由液面最高位置が許容液面高さに達する限界となる地表面震度を示す。

表3 現行消防法に基づく入力地震動と諸係数

項目		記号	数値
地域別補正係数		ν_1	1.0
地盤別補正係数		ν_2	2.0
塑性係数		ν_p	1.5
地表面震度	短周期地震動	水平	K_{1H}
		鉛直	K_{1V}
	やや長周期地震動	K_{2h}	L1:0.3/L2:0.45 L1:0.15

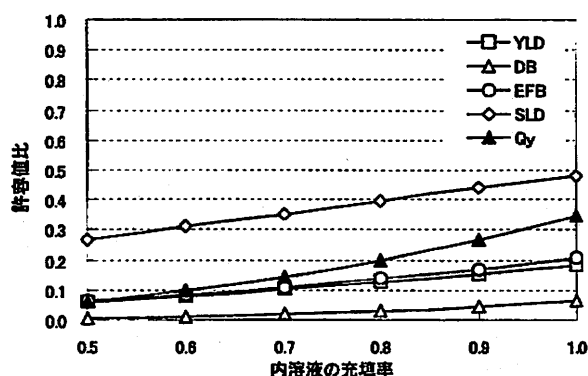


図3 液高と許容値比の関係 (バルジング)

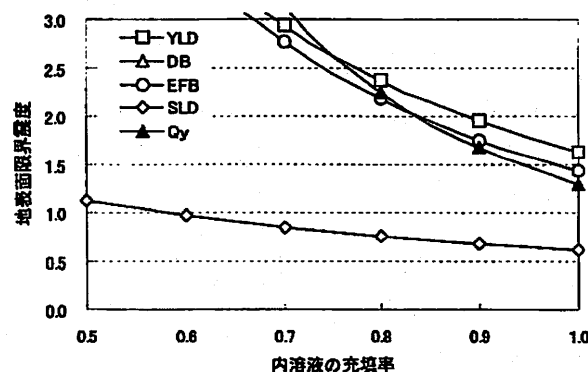


図4 液高と地表面限界震度の関係 (バルジング)

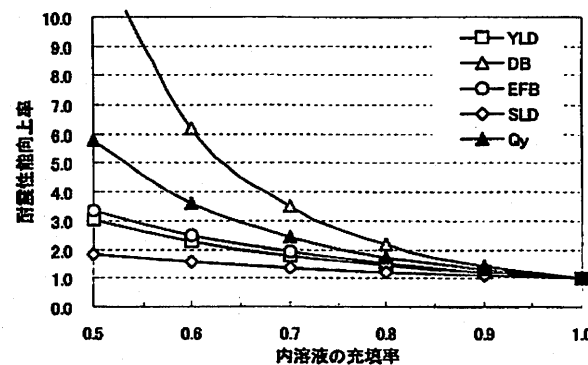


図5 液高と耐震性能向上率の関係 (バルジング)

3. タンク内の液高変化による損傷モードの発生

3.1 タンクの諸元

タンク容量 19,000kl の浮屋根式タンクを対象に、タンクの液高変化が損傷モードの発生に及ぼす影響を、許容値比、地表面限界震度、および耐震性能向上率の3項目について検討する。入力は消防法で定められた地震荷重とした。

検討は短周期地震動に対してはタンクと内溶液のバルジングに起因するタンク本体の損傷モード、やや長周期地震動に対しては内溶液のスロッシングに起因する浮屋根ボンツーン部および液高に関する損傷モードについて行う。

図2に対象とするタンクの形状、表2にタンクの諸元

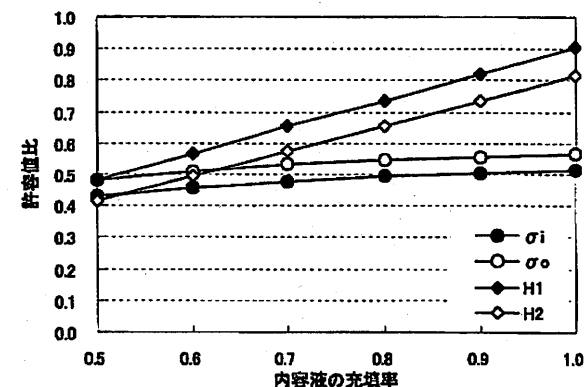


図6 液高と許容値比の関係 (スロッシング)

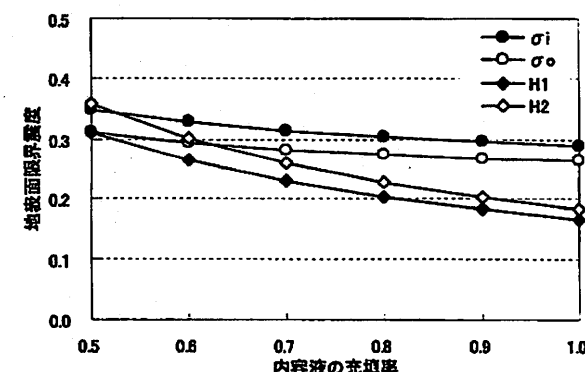


図7 液高と地表面限界震度の関係 (スロッシング)

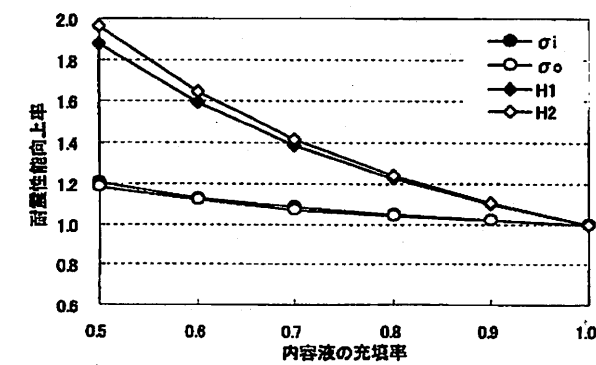


図8 液高と耐震性能向上率の関係 (スロッシング)

を示す。表 3 に現行消防法に基づく地震動を示す。なお、表 3 の L1 および L2 は、それぞれレベル 1 およびレベル 2 地震動を表す。

解析変数は内溶液の液高とし、満液に対する比率で 1.0 から 0.5 まで 0.1 刻みで設定した。

本研究の検討項目に関する計算方法を以下に示す。

- 1) 応答値：消防法の関連法規⁴⁾ならびに JIS⁹⁾の計算式および考え方に基づく柔基礎上（弾性一様分布ばね支持）におけるタンクの応力算式等を用いて、消防法で定められた地震荷重に対する応答値を算定する。
- 2) 許容値比：損傷モードごとに、各液高に対する応答値を許容値で除した値を許容値比とする。許容値比は内溶液の液高の変化に伴い、振動モードの固有周期およびタンクの応答倍率も変化するため、液高の関数として表される。
- 3) 地表面限界震度：地表面震度を許容値比で除した値を地表面限界震度とした。評価式を表 1 に示す。
- 4) 耐震性能向上率：各液高に対する地表面限界震度を満液時の地表面限界震度で除した値を耐震性能向上率とした。

3. 2 バルジングに対する液高と損傷モードの発生の関係

図 3 にバルジングに対するタンクの許容値比を示す。図中の凡例記号は、各損傷モードを表し、YLD は最下段側板降伏、DB は最下段側板のダイヤモンド降伏、EFB は最下段側板象の脚型座屈、SLD は底板の横滑り、Qy は隅角部アニュラ板の保有水平耐力超過を表す。各損傷モードの許容値比は満液状態でも 1.0 未満となり、許容値に対して余裕がある。各損傷モードとも液高を下げると応答値の余裕が増える。Qy に対してはその効果が大きくなるが、SLD に関しては液高を下げても効果は比較的小さい。

図 4 にバルジングに対するタンクの液高と地表面限界震度の関係を示す。座屈に関する損傷モード（YLD、DB、EFB）および Qy に関しては、地表面限界震度が 1.3 以上にならないと発生しない。満液状態において、損傷モードは、SLD、Qy、ELB、YLD の順に発生する。液高を下げるとどの損傷モードに対しても地表面限界震度は高くなる。地表面限界震度の向上は Qy に対して顕著となり、液高が下がるにつれ、発生順位は上位から下位へ移る。

図 5 にバルジングに対するタンクの液高と耐震性能向上率の関係を示す。耐震性能向上率は各損傷モードとも液高が下がるほど上昇する。耐震性能の向上は座屈に関するモードと Qy で顕著である。満液に対する液高を 50% 以下にすると各損傷モードとも耐震性能は約 2 倍以上に向上する。

3. 3 スロッシングに対する液高と損傷モードの発生の関係

図 6 にスロッシングに対するタンクの許容値比を示す。図中の凡例記号は、各損傷モードを表し、 σ_i と σ_o はそれぞれボンツーン内リムおよび外リムの耐震強度超過を表す。また、H1 と H2 はそれぞれスロッシングの 1 次モードおよび 2 次モードによる許容最高高さ超過を表す。浮屋根の許容値比はバルジングに対するタンク本体の許容値比よりも大きい。許容値比は各損傷モードとも液高を下げると小さくなる。その程度は、H1 と H2 で大きく液面レベルが 50% になると満液状態の約 1/2 となる。

図 7 にスロッシングに対するタンクの液高と地表面限界震度の関係を示す。スロッシングに対する地表面限界

震度はバルジングのときよりも大幅に低減する。満液状態において、損傷モードは、H1、H2、 σ_i 、 σ_o の順に生じる。H1 が発生するときの地表面限界震度は 0.17 である。なお、これらの地表面震度は 0.15 のとき、消防法で要求されている 105.7cm/sec の速度応答スペクトル値を採用したことに相当する。液高が満液時の 50% になると、H1 と σ_i が同時に発生した後、H2 と σ_o が同時に発生するようになる。さらに液面レベルを下げると σ_i と σ_o が先に発生するようになる。

図 8 にスロッシングに対するタンクの液高と耐震性能向上率の関係を示す。各損傷モードの耐震性能は液高を下げるにつれて向上するが、その程度はバルジングのときよりも低い。耐震性能は σ_i と σ_o に関しては液高を下げてもわずかに向上する程度であり、耐震性能向上の効果は小さいといえる。しかし、H1 と H2 に関しては液高を下げるほど耐震性能は向上し、地震発生時のスロッシング現象に伴う浮屋根の損傷低減を図ることが可能になると考えられる。

4. まとめ

浮屋根式タンクを対象に、タンク内溶液の液高が地震時の損傷モードの発生に影響することに着目し、内溶液の液高調整によるタンクのリスクコントロールを行うために、液高が損傷モードの発生に及ぼす影響を検討した。本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 液高を調整することにより、損傷モードの発生を抑え、耐震性能を向上させることができる。
- (2) 満液状態ではスロッシングによる浮屋根の損傷が生じやすくなる。しかし、液高を下げるほど許容値比の低下と耐震性能の向上が認められ、浮屋根の損傷低減を図ることが可能である。
- (3) バルジングに対するタンク本体の耐震性能は液高を下げるほど効果が高く、座屈に関する損傷モードの発生を抑制することが可能となる。
- (4) スロッシングに対する浮屋根ボンツーン部の耐震性能は液高を下げると向上するが、バルジングに対するタンク本体の耐震性能の向上ほどではない。

以上から、バルジングあるいはスロッシングによるタンクの地震リスク低減を図る方法の一つとして、タンク内溶液の液高調整によるリスクコントロールが効果的であることが示された。

参考文献

- 1) 大嶋昌巳、加瀬隆、福島誠一郎、矢代晴実：タンクの地震リスクマネジメントに関する基礎的研究 その 1、その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1 構造 I、pp.79-82、2005
- 2) 柴田碧編著：化学プラントの耐震設計、pp.249-257、丸善、1986
- 3) 日本高圧力技術協会：平成 14 年度経年劣化を考慮した長期備蓄タンクの診断・保全技術における調査・研究委員会報告書、3.2 章、2003
- 4) 危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示、自治省告示第 99 号、1983
- 5) 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
- 6) 鋼製石油貯槽の構造（全溶接製）、JIS B 8501-1995、日本工業規格、1995