

タンク内容液高をパラメータとした地震リスク評価のための フラジリティーに関する研究

A Study on Fragility Estimation to 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, 佐藤一郎², 福島誠一郎³
Masami OSHIMA¹, Takashi KASE¹, Ken-ichi FUJITA¹, Harumi YASHIRO²
Ichiro Sato² and Sei'ichiro FUKUSHIMA³

¹千代田アドバンスト・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

Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co. Ltd.

³東電設計株式会社

Tokyo Electric Power Services Co. Ltd.

Tanks in petroleum or petrochemical plant facilities have possibilities to make catastrophic disaster against environment when contents in the tanks are leaked out due to earthquake, because large amount of dangerous articles are contained in the tanks. So, development of procedure of seismic risk management of tanks is required to minimize damages and loss in the facilities due to earthquake disaster. In this study, as the position on the fundamental study of the seismic risk control of tanks by adjusting liquid height, relation between liquid height and seismic fragility of tanks is investigated. The seismic fragility of tanks is estimated by a Monte Carlo simulation. Emphasis is placed on the variation of the median and the logarithmic standard deviation of fragility curves due to liquid height.

Key Words : Seismic risk assessment, Flat bottomed cylindrical storage tanks, Damage modes, Liquid height, Fragility curves, Monte Carlo simulation

1. はじめに

石油あるいは石油化学プラント施設における貯槽類はプラント設備内の一地域に集中的に設置され、複数の同型の貯槽類が隣接して建設されることが多い。また、貯槽類は環境に対して影響の大きい内容物を大量に保有している。地震により貯槽類に損傷を生じ内容物が漏洩すると、大規模な環境被害や大火災となることが十分に予想される。このため、地震災害による大規模な被害、および損失を具体化し、これらを最小限に抑えるための方策を立案して実行するためにも、プラント施設における地震リスクマネジメント手法の整備が求められている。

プラント施設における貯槽類の地震による被害は、隣接する同型の貯槽類が同様な損傷を被るわけではなく、大きな損傷の発生は一部の貯槽類に限られている。この原因の一つとして、内容物の液高が貯槽類の耐震性能や損傷の発生に大きく影響していると考えられ、著者らの一部により、液高調整を行うことで損傷の発生を抑止することが可能であることが示されている^{1),2)}。

本研究では、貯槽類の内容物の液高調整による地震リスクコントロール手法の開発を目的とした基礎的研究として、液高調整による貯槽類の損傷度評価を実施し、液高と損傷の発生について検討する。消防法の対象となる2種類の平底円筒貯槽（以下、タンク）について、液高と損傷が発生するときの地表面限界震度の関係を検討する。つぎに、モンテカルロシミュレーションによりタン

クの損傷度曲線を作成し、液高変化による地表面震度の中央値と対数標準偏差について検討する。

2. タンクモデルと損傷モード

2.1 タンクモデル

本研究で対象とするタンクの概要を図1に示す。109,000kl級と43,000kl級タンクを設定し、両タンクの地震による損傷モードの発生に関して、液高と地表面限界震度の関係、および液高と損傷発生確率の関係を検討する。両タンクの諸元を表1に示す。

2.2 損傷モードと評価式

液高と損傷モード発生の関係は、タンク側板の座屈とアニュラ板の保有水平耐力超過について検討する。座屈

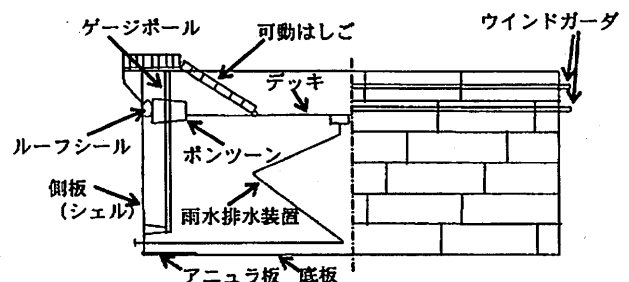


図1 浮き屋根式平底円筒形貯槽の概念図

表1 タンクの諸元

項目	記号	109,000kl級	43,000kl級	単位
公称容量	VOL	109,900	43,872	kl
貯槽内径	D	78,200	49,400	mm
貯槽(側板)高さ	H _f	24,500	24,390	mm
最下段側板厚	t ₁	32	22	mm
最高液高さの1/3における側板厚	t _{1/3}	19	14	mm
アニュラ板厚	t _a	22	16	mm
鋼材の降伏応力	σ _y	325	325	N/mm ²
鋼材のヤング係数	E	205,800	205,800	N/mm ²
鋼材のポアソン比	ν	0.3	0.3	-
最高液高さ	H	21,482	21,490	mm
液比重	γ	0.73	0.73	-
地域別補正係数	v ₁	1	1	-
地盤別補正係数	v ₂	2	2	-
応答倍率	v ₃	1.727	1.696	-
設計水平震度	K _{h1}	0.5181	0.5087	-
設計鉛直震度	K _{v1}	0.2590	0.2543	-
塑性設計係数	v _e	1.5	1.5	-
バルジング固有周期(満液時)	T _b	0.4503	0.3707	sec

に関する損傷として、側板最下段の象の脚座屈、側板最下段のダイヤモンド座屈、および側板最下段の降伏を考える。これら損傷モードの発生を判定する評価式^{3,4)}は、それぞれ以下で与えられる。なお、座屈関連の評価式は応答水平震度で表し、アニュラ板の保有水平耐力超過は耐力式で表している。

・象の脚座屈に関する応答水平震度: K_{h1_EFB}

$$K_{h1_EFB} = \frac{0.96Et_s \left(\frac{t_s}{D} \right) \left(1 - \frac{p_0 D}{2t_s \sigma_y} \right) - V_0}{C_V + 0.96 \frac{Et_s \left(\frac{t_s}{D} \right) p_0 D}{\sigma_y C_P}} \quad (1)$$

・ダイヤモンド座屈に関する応答水平震度: K_{h1_DB}

$$K_{h1_DB} = \frac{1}{C_V} \left\{ \frac{0.4Et_s \left(\frac{t_s}{D} \right) - V_0}{S_f} \right\} \quad (2)$$

・側板最下段の降伏に関する応答水平震度: K_{h1_YLD}

$$K_{h1_YLD} = \frac{1}{C_P} \left\{ \frac{\sigma_y}{(p_0 D / 2t_s)} - 1 \right\} \quad (3)$$

・アニュラ板の保有水平耐力超過: Q_y

$$Q_y = \frac{2\pi R^2 q_y}{0.44H} \quad (4)$$

ここに、

C_P: 水平方向および鉛直方向の地震による側板下端の動液圧に関する係数、

C_V: 水平方向および鉛直方向の地震による側板下端の鉛直力に関する係数、

D: 貯槽内径、

E: ヤング係数、

H: 液高、

R (=D/2): 貯槽半径、

S_f (=1.5): 座屈安全率、

V₀: 自重による側板下端の軸圧縮力、

p₀: 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、

t_s: タンク最下段の側板厚さ、

v₃: 応答倍率、

q_y: 鋼材の降伏点。

なお、タンクの設計において、本研究で示す座屈関連はレベル1地震動に対して検討される。また、アニュラ板の保有水平耐力超過に関してはレベル2地震動に対して検討される。

以下の検討で用いる地表面限界震度は、座屈関連のモードでは、式(1)~式(3)を消防法⁴⁾で定められた設計水平震度 K_{h1} で除したものに地表面水平震度 K_h を乗じて求めることができる。また、アニュラ板の保有水平耐力超過に関する地表面限界震度は、式(4)を消防法⁴⁾で定められたアニュラ板の必要保有水平耐力 Q_{dw} で除したものに、地表面水平震度 K_{hp} を乗じて求めることができる。K_{h1}, K_h, Q_{dw} および K_{hp} は、それぞれ以下で与えられる。

$$K_{h1} = 0.15v_1v_2v_3 \quad (5)$$

$$K_h = 0.15v_1v_2 \quad (6)$$

$$Q_{dw} = 0.15v_1v_2v_3v_p D_s W_0 \quad (7)$$

$$K_{hp} = 0.15v_1v_2v_3v_p \quad (8)$$

ここに、

D_s: 構造特性係数⁵⁾、

W₀: 有効液重量⁶⁾、

v₁, v₂, v_p: 地域別補正係数、地盤別補正係数、および塑性設計係数。

2.3 損傷度評価

両タンクの各損傷モードの発生はモンテカルロシミュレーションにより評価する。タンクの各損傷モードの発生は性能関数 Z を用いて定義することができる⁷⁾。Z は座屈関連の損傷モードでは、式(1)~(3)の応答水平震度と式(5)の K_{h1} の差、アニュラ板の保有耐力超過では、式(4)の耐力式と式(8)の K_{hp} との差として、それぞれ以下で表すことができる。

・象の脚座屈: Z_{EFB}

$$Z_{EFB} = K_{h1_EFB} - K_{h1} \quad (9)$$

・ダイヤモンド座屈: Z_{DB}

$$Z_{DB} = K_{h1_DB} - K_{h1} \quad (10)$$

・側板の降伏: Z_{YLD}

$$Z_{YLD} = K_{h1_YLD} - K_{h1} \quad (11)$$

・アニュラ板の保有水平耐力超過: Z_Q

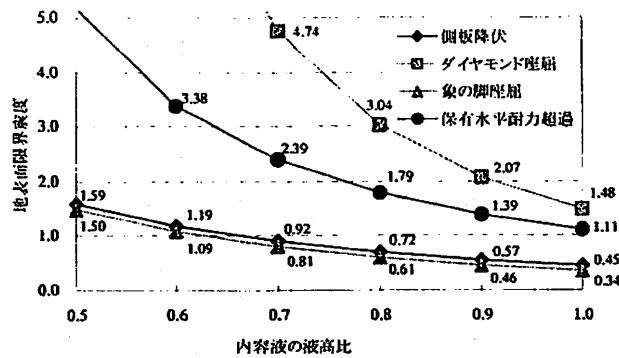
$$Z_Q = Q_y - Q_{dw} \quad (12)$$

式(9)~式(12)は、Z ≤ 0 のとき損傷モードが発生、Z > 0 のとき損傷モードが発生しないとする。

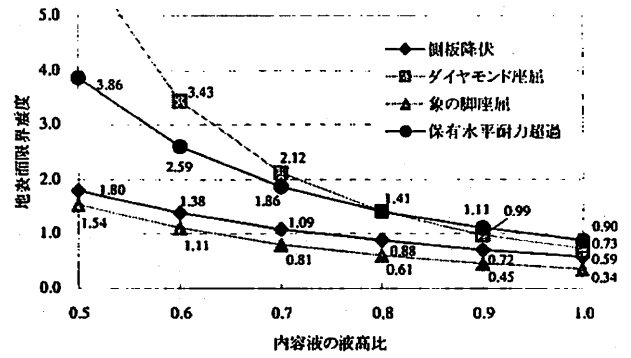
3. 液高と地表面限界震度の関係

各損傷モードに関して、両タンクの満液時の液高に対する内容液高の比(以下、液高比)を1.0~0.5まで変化させたときの液高と地表面限界震度の関係を図2に示す。

109,000kl級タンクでは、満液状態のとき、損傷モードは象の脚座屈、側板の降伏、アニュラ板の保有水平耐力超過、ダイヤモンド座屈の順に発生する。また、損傷モ



(a) 109,000kl 級タンク



(b) 43,000kl 級タンク

図2 液高比と地表面限界震度の関係

ードが発生するときの地表面限界震度は、それぞれ 0.34, 0.45, 1.11, および 1.48 である。液高を下げると各損傷モードの地表面限界震度はさらに大きくなる。これはタンクの耐震性能に余裕を増すことを示している。

43,000kl 級タンクでは、満液状態のとき、損傷モードは象の脚座屈、側板の降伏、ダイヤモンド座屈、アニュラ板の保有水平耐力超過の順に発生する。また、損傷モードが生起するときの地表面限界震度は、それぞれ 0.34, 0.59, 0.73, および 0.90 である。液高を下げることで、109,000kl 級タンクと同様に、タンクの耐震性能の余裕を増すことができる。

以上のように、液高調整はタンクの地震リスクマネージメントの施策として有用な方法となる可能性がある。

4. 液高と損傷度の関係

タンク内容液の液高調整による地震リスクコントロール手法構築の第一段階として、ここでは液高変化によるタンクの損傷度曲線を作成し、液高と損傷の発生について検討する。

4.1 確率変数の設定

モンテカルロシミュレーションによる両タンクの液高変化による損傷度評価においては、表2に示すパラメータを確率変数とした。

確率変数は、対数正規分布に従い、互いに独立とする。なお、表中の数値は平均値と標準偏差で表している。

鋼材の降伏点および引張強度の平均値と標準偏差は、鋼材の機械的性質に関する統計資料⁶⁾を用いた。内径、液高および許容液高の標準偏差は、液面変動や内径に関するデータが確認できないため仮定した値とした。

地震による損傷度評価において、設計応答倍率を確率変数として用いることがあるが、本研究ではタンク内容液の液高に着目しているため、消防法の設計応答倍率 v_3 から求められる値をそのまま使用した。

4.2 損傷度曲線

損傷度曲線の作成は、式(5)の設計水平震度 K_{h1} および式(7)のアニュラ板の必要保有水平耐力 Q_{dw} における基盤水平震度0.15を変数に置き換え、この変数を0.01から3.0まで0.01刻みで変化させて求めた。モンテカルロシミュ

表2 確率変数の平均値と標準偏差

項目	記号	単位	平均値	標準偏差	適用
内径	DあるいはR/2	mm	78200.0	400	109,000kl級タンク
			49400.0	400	43,000kl級タンク
液高	H	mm	内容液高	400	両タンク
鋼材の降伏点	σ_y	N/mm ²	366.96	33.93	両タンクの側壁
		N/mm ²	336.96	33.93	両タンクのアニュラ板
鋼材の引張強度	σ_u	N/mm ²	531.13	23.14	両タンクのアニュラ板

レーションにおける試行回数は20,000回とした。

モンテカルロシミュレーションにより求めた両タンクの損傷度曲線をそれぞれ図3に示す。なお、図中の実線は109,000kl級タンク、破線は43,000kl級タンクの損傷度曲線を示す。

損傷度曲線は、両タンクとも液高比が小さくなると地表面震度の高レベル側に移動する。液高ごとの損傷の発生順序は両タンクとも図2に示した発生順序と同じである。両タンクともダイヤモンド座屈とアニュラ板の保有耐力超過に関しては、液高比が小さいときには、高レベルの地震動が発生しないと損傷が発生しない。また、満液状態では損傷度曲線は勾配が急であるが、液高比が小さくなると勾配が緩くなる。

両タンクの損傷度曲線から求めた、地表面震度の中央値と対数標準偏差を表3に示す。

両タンクの地表面震度の中央値に関しては、象の脚座屈の損傷モードでは液高比にかかわらず両タンクの中央値は近い数値を示している。それ以外の損傷モードに関しては、ダイヤモンド座屈とアニュラ板の保有水平耐力超過でその差が大きい。

対数標準偏差に関しては、両タンクとも、象の脚座屈、および側板の降伏に関する損傷モードでは、液高が低くなると対数標準偏差も低くなるが、それ以外の損傷モードではその逆に高くなっている。しかし、液高比ごとに両タンクの損傷モードの対数標準偏差を比べると、地表面震度の中央値が異なる値となるにもかかわらず、両タンクともほぼ一致した値を示している。アニュラ板の保有水平耐力超過に関しては、液高比1.0~0.5の範囲では、対数標準偏差はほぼ一致した値を示している。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

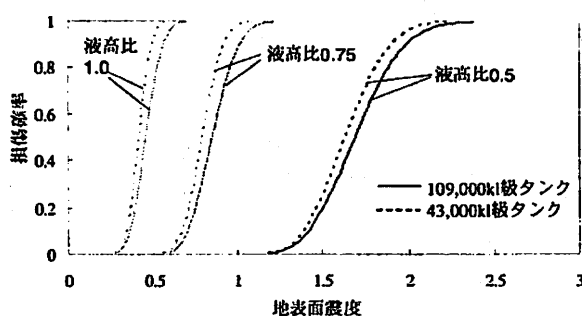
表3 両タンクの地表面震度の中央値と対数標準偏差

(a) 109,000kl 級タンク

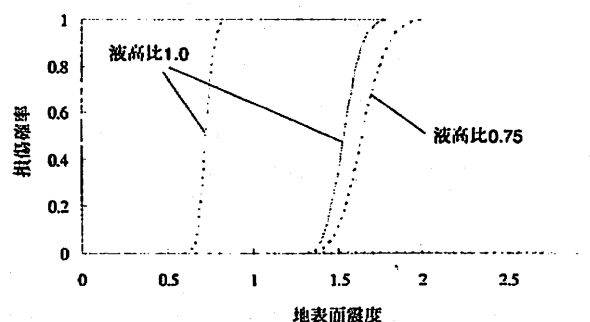
液高比	象の脚座屈		側板降伏		ダイヤモンド座屈		アニュラ板保有耐力超過	
	中央値	対数標準偏差	中央値	対数標準偏差	中央値	対数標準偏差	中央値	対数標準偏差
0.5	1.69	0.13	1.80	0.13	15.35	0.14	5.66	0.12
0.75	0.85	0.14	1.01	0.15	3.77	0.08	2.35	0.11
1.0	0.46	0.17	0.61	0.19	1.54	0.06	1.32	0.10

(b) 43,000kl 級タンク

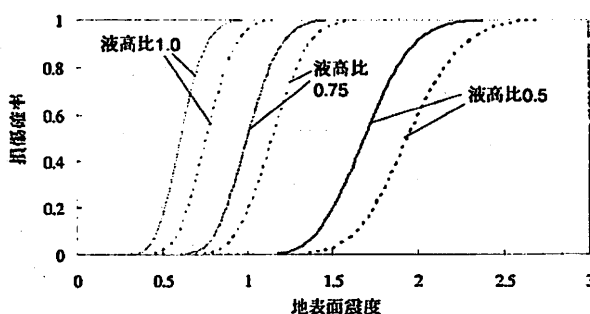
液高比	象の脚座屈		側板降伏		ダイヤモンド座屈		アニュラ板保有耐力超過	
	中央値	対数標準偏差	中央値	対数標準偏差	中央値	対数標準偏差	中央値	対数標準偏差
0.5	1.64	0.12	1.95	0.13	5.67	0.12	3.98	0.11
0.75	0.80	0.12	1.16	0.14	1.66	0.07	1.72	0.10
1.0	0.42	0.14	0.77	0.17	0.74	0.05	0.97	0.09



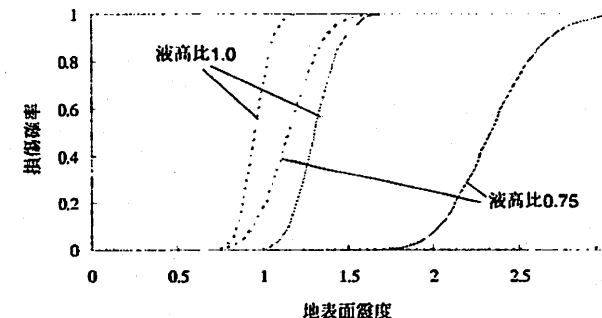
(a) 象の脚座屈



(c) 側板の降伏



(b) ダイヤモンド座屈



(d) アニュラ板の保有水平耐力超過

図3 両タンクの損傷度曲線

- 1) タンクの損傷モードは液高を下げるほど発生しにくくなり、タンクの耐震性能に余裕を増す。液高調整はタンクの地震リスクマネジメントの施策として実現可能な方法である。
- 2) 各損傷モードの損傷度曲線は、満液状態では勾配が急であるが、液高比が小さくなると勾配が緩くなる。
- 3) 対数標準偏差は、両タンクとも側板降伏、象の脚座屈の損傷モードで液位が低くなると小さくなる。それ以外では、液位が低くなると大きくなる。
- 4) 対数標準偏差は、同じ液高比の場合、タンクの規模や形状によらず同一の損傷モードで、ほぼ一致した値を示す。

なお、確率変数のうち液高および内径の標準偏差は、統計資料に基づく数値でないため今後の検討としたい。

参考文献

- 1) 大嶋昌巳ほか：タンクの内容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，地域安全学会梗概集，No.16, pp.101-104, 2005
- 2) 大嶋昌巳ほか：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
- 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・保全における調査・研究委員会報告書，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119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73号，1994
- 6) 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44号，1983
- 7) 星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿嶋出版会，1986
- 8) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計基準（案）・同解説，1990