

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3 液面高さと地表面限界震度の関係

正会員 ○大嶋昌巳*¹ 同 加瀬 隆*¹
同 藤田謙一*¹ 同 矢代晴実*²
同 佐藤一郎*² 同 福島誠一郎*³

地震リスク評価 平底円筒形貯槽 内容液高
損傷モード 地表面限界震度

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、大量の内容物を保有している。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に発展する可能性が高い。

著者らの一部は、これまでに消防法の対象となる平底円筒形貯槽（以下、タンク）を対象に、経営の観点から見た地震リスクマネジメントのための基礎的研究¹⁾を行ってきた。前報（その1，その2）では、地震によるタンクの損傷モードを分析し、損傷モード相互間の関係を検討した。また、タンク内容液の液高と耐震性能を検討し、タンクの内容液の液高がタンクの損傷の発生に大きく影響することを明らかにしている。

本研究では、タンク内容液の液高調整による地震時のリスクコントロールを行うことを目的に、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し、液高変化によるタンクの損傷度評価を行う。本報では、タンクモデルおよび地震時の損傷モードを設定し、内容物の液高と地表面限界震度の関係を検討する。（その4）では、損傷モードの損傷度曲線をモンテカルロシミュレーションにより求め、地表面震度の中央値と対数標準偏差を検討する。

2. タンクモデルと損傷モード

本研究で対象とするタンクの概要を図1に示す。本研究では、109,000kl級と43,000kl級タンクを対象とする。両タンクの諸元を表1に示す。

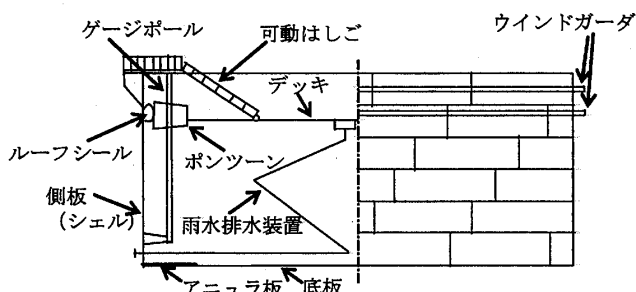


図1 浮屋根式平底円筒形貯槽の概要図

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 _t	24,500	24,390	mm
最下段側板厚	t _s	32	22	mm
最高液高の1/3における側板厚	t _{1/3}	19	14	mm
アニュラ板厚	t _b	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 _p	1.5	1.5	-
バルジング固有周期(満液時)	T _b	0.4503	0.3707	sec

液高変化と損傷モードの発生の関係は、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。座屈に関する損傷としては、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は、それぞれ以下で与えられる²⁾。なお、座屈関連モードに関する評価式は応答水平震度で表し、保有水平耐力超過に関しては耐力式で表している。

・側板の象の脚座屈に関する応答水平震度: K_{hl-EFB}

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

・側板のダイヤモンド座屈に関する応答水平震度: K_{hl-DB}

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

・側板の降伏に関する応答水平震度: K_{hl-YLD}

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

Fundamental study on seismic risk management for cylindrical storage tanks

Part 3 Relation between liquid level and occurrence of damage modes

Masami OSHIMA*¹, Takashi KASE*¹, Ken-ichi FUJITA*¹
Harumi YASHIRO*², Ichiro SATO*², Sei'ichiro FUKUSHIMA*³

表2 記号一覧

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_y : 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 : 貯槽半径, $S_f (=1.5)$: 座屈安全率, V_0 : 自重による側板下端の軸圧縮力, 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, t_s : タンク最下段の側板厚さ, v_3 : 応答倍率, σ_y : 鋼材の降伏点
--

・アニュラ板の保有水平耐力超過: Q_y

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

式(1)~式(4)の記号は、表2に示す通りである。なお、タンクの設計においては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、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³⁾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³⁾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。

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

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

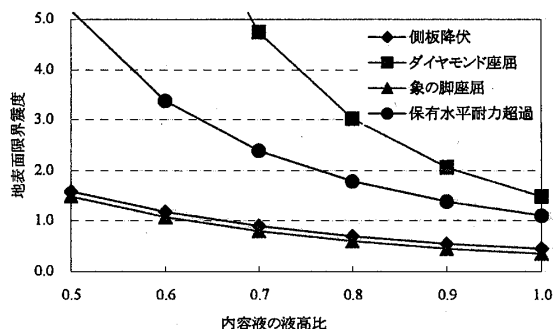
$$Q_{dw} = 0.15v_1v_2v_3v_pD_sW_0 \quad (7)$$

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

式(5)~式(8)の記号は、 D_s は構造特性係数、 W_0 は有効液重量、 v_1 は地域別補正係数、 v_2 は地域別補正係数、 v_p は塑性設計係数である。なお、 D_s と W_0 は液高の関数として与えられる。

3. 内容液高と損傷モード発生の関係

各損傷モードに関して、表1に示す両タンクの液高の満液に対する比率（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。



(a) 109,000kl 級タンク

109,000kl 級タンクでは、満液状態のとき、損傷モードは側板最下段の象の脚座屈、側板最下段の側板降伏、アニュラ板の保有水平耐力超過、側板最下段のダイヤモンド座屈の順に発生し、そのときの地表面限界震度は、それぞれ 0.34, 0.45, 1.11, および 1.483 である。アニュラ板の保有水平耐力超過と側板最下段のダイヤモンド座屈に関しては、1.1 以上の地表面震度が生じないと損傷が発生しない。損傷モードの発生順序は液高比 0.5 まで変化しないが、損傷モードが発生する地表面限界震度は大きくなり、アニュラ板の保有水平耐力超過およびダイヤモンド座屈で顕著である。

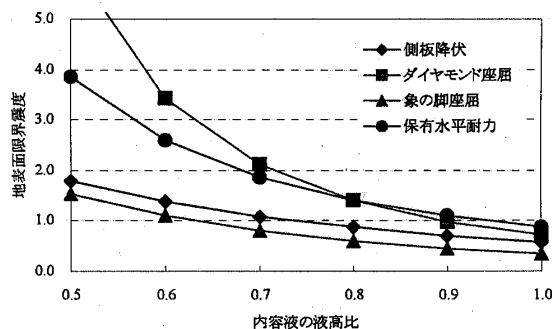
43,000kl 級タンクでは、満液状態のとき、損傷モードは側板最下段の象の脚座屈、側板最下段の側板降伏、側板最下段のダイヤモンド座屈、アニュラ板の保有水平耐力超過の順に発生し、そのときの地表面限界震度は、それぞれ 0.34, 0.59, 0.73, および 0.90 である。損傷モードは液高比 0.8 以下になると、アニュラ板の保有水平耐力超過が側板最下段のダイヤモンド座屈よりも先に発生するようになる。しかし、両損傷モードの発生は、液高が低いときには極めて稀であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、109,000kl 級タンクと 43,000kl 級タンクを対象に液高と損傷モードの発生を判断する地表面限界震度の関係を検討した。タンクの損傷モードは液高が高いと発生しやすく、液高を下げるほど発生しにくくなる。本研究で対象とした形状寸法を持つようなタンクの場合、液高が低いときは、アニュラ板の保有水平耐力超過および側板最下段のダイヤモンド座屈による損傷の発生は極めて稀であると考えられる。

参考文献

- 1) 大嶋昌巳他：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) 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
- 3) 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



(b) 43,000kl 級タンク

図2 液高と地表面震度の関係

*1 千代田アドバンスド・ソリューションズ

*2 東京海上日動リスクコンサルティング

*3 東電設計

*1 Chiyoda Advanced Solutions Corporation

*2 Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co., Ltd.

*3 Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.