

施設の運用に着目したリスクコントロール手法の提案

A PROPOSAL ON RISK CONTROL METHOD FOCUSED ON
OPERATION OF PLANT FACILITIES

大嶋昌巳*, 加瀬 隆*, 藤田謙一**, 矢代晴実***, 福島 誠一郎****

*Masami OSHIMA, Takashi KASE, Ken-ichi FUJITA,
Harumi YASHIRO and Sei'ichiro FUKUSHIMA*

Damages in plant facilities caused by natural disaster such as big earthquake could leads to catastrophic disaster such as fire or leakage of hazardous substances, which might have serious impacts on neighboring residents and society, and impair significantly the credibility of the plant owner. From the viewpoint of CSR (Corporate Social Responsibility), the implementation of seismic countermeasures for seismic upgrading of the plant facilities increases rapidly in number. However, if the level of seismic upgrading of facilities exceeds a critical limit, in such cases, it is sometimes difficult to propose the countermeasures using original structures and existing spaces around them. In this study, the procedure of seismic risk mitigation focused on operation of facility under control of volume of contents is proposed. Then a flat-bottomed cylindrical tank of a refinery is selected as a sample, and the proposed framework of this procedure that combines the method of seismic upgrading and control of volume of contents is applied to the tank to show its usefulness of this procedure.

Keywords: *Seismic risk management, Plant facilities, Life cycle cost, Liquid height control, Seismic upgrading*
地震リスクマネジメント, プラント設備, ライフサイクルコスト, 液高制御, 耐震補強

1. はじめに

日本におけるプラント設備（石油、石油化学、電力およびガス等のプラント設備を総称する）は、都市近郊の沿岸部に建設されている場合が多い。そこで地震などの自然災害や、火災などの事故災害によるプラント施設での火災、爆発、内容物の漏洩などの災害は、近隣住民に影響を及ぼす大災害に繋がることも十分に予想される。

地震によるプラント設備の大規模な被害には、新潟地震（1964年）における製油所での塔槽類の大破および平底円筒形貯槽（以下、タンク）の大火災、宮城県沖地震（1978年）では製油所でのタンクの油の漏洩、兵庫県南部地震（1995年）では油槽所でのタンク元弁からのLPガスの漏洩、ならびに十勝沖地震（2003年）では原油およびナフサタンクの火災などがある。このようにプラント設備の大規模な地震災害にはタンクの被害によるものが多い。

日本においてプラント設備の耐震設計方法を規定する代表的な法規には、原油タンク等に適用される消防法の耐震設計に関する告示¹⁾（消防法告示）と、高圧ガス設備に適用される高圧ガス保安法の耐震設計基準²⁾（高圧ガス告示）がある。

これらの耐震設計法規は、新たな地震被害を経験するたびにそれら被害の再発防止のため改正されている。改正後には、消防法告示では既設の設備にも改正された最新法規が適用されるが、高圧ガス

告示では既設の設備には適用されない。

このような経緯から、プラント設備には異なる耐震設計が適用された新旧設備が混在しており、ひとたび地震で古い設備だけでも損傷を受ければ、操業は停止し、製品供給に対する責任を果たせず、企業としての信用の喪失に繋がる。この対応として、古い法規が適用されている既設のプラント設備の耐震診断を行い、耐震対策³⁾として耐震補強を実施する事例が増加している。現在、このような流れを受けて、高圧ガス保安協会で高圧ガス告示の適用設備を対象とする既設設備の耐震対策方法に関する検討が始められている³⁾。

ところが、耐震補強を実施する場合、目指す強度向上レベルがある閾値を超えると、経済的または技術的な観点から現実的な対策を立案することが難しい事例が多くある。また、著者らの一部は、既往研究^{4)~6)}により、プラント設備の耐震補強による地震リスクの低減には限界があることを示唆している。

ここでは、タンク等の既設のプラント設備を対象とし、耐震補強のみの耐震対策の限界を取り除くために、内容物の液高を制御する方法（以下、液高制御）を新たな耐震対策として採用し、同方法により、地震リスクの低減^{3) 2)}を図る手法を考える。耐震補強と液高制御の組み合わせを対策案の候補とし、それらの中から適切なもの

* 千代田アドバンスド・ソリューションズ㈱ 工修

** 千代田アドバンスド・ソリューションズ㈱ 博士(工学)

*** 東京海上日動リスクコンサルティング㈱ 博士(工学)

**** 東電設計㈱ 博士(工学)

Chiyoda Advanced Solutions Corporation, M. Eng.

Chiyoda Advanced Solutions Corporation, Dr. Eng.

Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co., Ltd., Dr. Eng.

Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., Dr. Eng.

を選択・実施することにより、耐震設計法規上で要求されている最低限の耐震性能を確保しながら、目標とするレベルまで地震リスクを低減することが可能となる。

本研究では、タンク等の既設の設備を対象とし、耐震対策として従来の耐震補強に液高制御も加え、これらの組み合わせにより地震リスクの合理的な低減が可能となるリスクコントロール^{注3)}手法の枠組みを提案する。そして、この枠組みにライフサイクルコスト(LCC)最小化^{注4)}の考え方を適用し、経営者の観点で複数の対策候補の中から対策を選択できることを目指す。

また、既存のタンクを対象として、本枠組みの適用可能性について検討を行う。

2. LCC を取り入れたリスクコントロール手法

一般的な建築物に関しては、地震リスクを考慮したLCCを最小にする地震リスクマネジメント手法が建築研究所資料⁷⁾に提案されている。しかし、タンクを含むプラント設備を対象としたこのような手法は研究段階にあり、具体的には提案されていない。

以下では、タンク等のプラント設備を対象に、LCC最小化を用いる地震リスクのリスクコントロール手法の枠組みを示す。

2.1 LCC 評価の枠組み

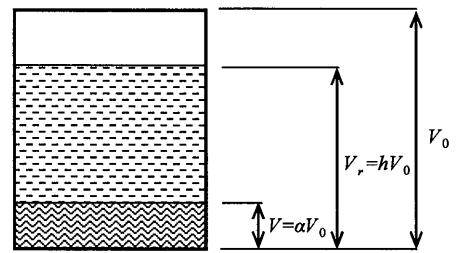
本枠組みのLCCの評価においては、既設タンク等の残存供用期間中にかかるコストを判断基準とした耐震対策の選定のための評価手法を提案する。そこで、初期建設費用等は費用項目に含めず、今後供用期間中に発生する耐震補強費用、液高制御にかかわる運転費用、および地震リスクを費用項目として取り扱う。これにより、LCC $LCC(x, h, t)$ は、耐震補強に対する費用 $C_{ret}(x)$ 、運転費用 $C_{ope}(h, t)$ 、および地震リスク $R(x, h, t)$ の和として次式で表す。

$$LCC(x, h, t) = C_{ret}(x) + C_{ope}(h, t) + R(x, h, t) \quad (1)$$

ここに、 x は対象設備の耐震設計震度、 h は図1に示すようにリスクコントロールのために低減された内容物の保有量 V_r と耐震設計上の最大保有量 V_0 との比 (以下、保有量比)、 t は残存供用期間(年)である。なお、残存供用期間中には運転費用 $C_{ope}(h, t)$ および地震リスク $R(x, h, t)$ とともに費用の変動が考えられるが、ここでは、その変動を考慮しなくとも本研究の本質は損なわれないと判断し、変動を考慮しないものとする。

2.2 耐震補強費用の評価

対象設備に対する現状の耐震設計震度を x_0 とし、補強後の目標とする耐震設計震度を x とする。このとき、補強に対する費用は次のように仮定する。ある耐震補強にかかる一回当りの工事費用で、例えば仮設工事などで耐震補強の程度にかかわらず一定にかかる費用を固定工事費 C_{ret}^F とする。また、耐震補強の程度により変動する部分の費用を変動工事費 $((x-x_0)/x_0) \cdot C_{ret}^V$ とする。なお、この変動工事費と、補強により向上する耐震設計震度とは線形の関係であるとしている。これは以下の理由による。消防法告示および JIS⁸⁾ の設計式から、タンクでは、側板最下部やアニュラ板が耐震補強の必要な部位となる。それらの部位において耐震設計震度と板厚はほぼ線形の関係にあると仮定でき⁹⁾、工事の工数および材料費の増減に関連する板厚の増分と変動工事費の増分も線形であると工事費の実績から



V_0 : 耐震設計上の最大保有量 (m^3)

h : リスクコントロールで低減された保有量 V_r と V_0 の比

α : 運転時に在庫として確保する最低保有量 V と V_0 の比

図1 設備の内容物の保有量に関する係数の定義

仮定できるからである。また、 C_{ret}^V は耐震設計震度を2倍するときの構造上の耐震対策費用における変動分とする。

以上により、耐震補強に対する費用 $C_{ret}(x)$ を次式で表す。

$$C_{ret}(x) = C_{ret}^F + \frac{x-x_0}{x_0} C_{ret}^V \quad (2)$$

2.3 運転費用の評価

残存供用期間における運転費用のうち、内容物の運送費用が大部分を占めるところでは仮定し、運転費用を運送費用とする。対象とする設備の内容物の保有量を図1に示すように区分して、運送費用を以下のように設定する。なお、ここでの1回当たりの運送費用は、実際の企業の実績データから想定している。

保有量のうち常に在庫として最低限確保しておく量 V と耐震設計上の最大保有量 V_0 との比を α とする。これにより、一回で運送する必要のある最大量は $(h-\alpha)V_0$ となる。

ここで、一回の輸送にかかる費用は、陸上輸送または海上輸送による場合でも、人件費およびタンカーなどの輸送手段の使用料等で運送量の大小にかかわらず変わらない固定費部分があると仮定する。残存供用期間中の輸送費用に関する固定費を $C_{ope}^F(h, t)$ とし、輸送費のうち固定費分を除いた費用(変動費)を $C_{ope}^V(h, \alpha, t)$ とし、残存期間中の運搬費用 $C_{ope}(h, t)$ は以下の式で表す。

$$C_{ope}(h, t) = C_{ope}^F(h, t) + C_{ope}^V(h, \alpha, t) \quad (3)$$

式(3)の $C_{ope}^F(h, t)$ と $C_{ope}^V(h, \alpha, t)$ は、それぞれ以下の式で表す。

$$C_{ope}^F(h, t) = C^F n(h) t \quad (4)$$

$$C_{ope}^V(h, \alpha, t) = (h-\alpha) C^V n(h) t \quad (5)$$

ここに、 C^F は運送費の固定費分としての一回当りの単価、 C^V は運送費の変動費分で耐震設計上の最大保有量 V_0 を運送する一回当りの単価とする。 $n(h)$ は年間の運送回数とし、次式で設定する。

$$n(h) = \frac{(1-\alpha)}{(h-\alpha)} n_0 \quad (6)$$

ここに、 n_0 は $(1-\alpha)V_0$ の内容物を運送するときの年間の運送回数である。

2.4 地震リスクの評価

地震リスク $R(x, h, t)$ は、耐震設計震度 x 、内容物の保有量比 h 、および残存する供用期間 t の関数として式(7)で表す¹⁰⁾。式(7)により、最大保有時の耐震性能の目標である耐震設計震度 x まで耐震補強し、さらに保有量比 h に液高制御した設備に対して、残存する供用期間

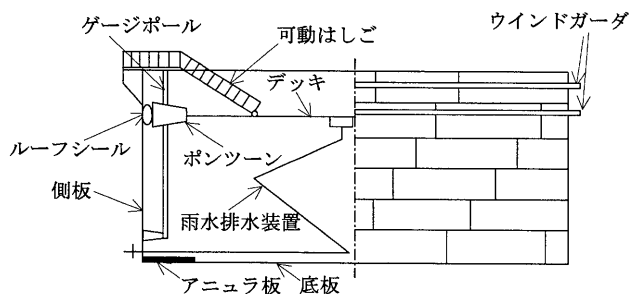


図2 タンクの概要図

表1 タンクの諸元

項目	記号	数値	単位
公称容量	VOL	109,900	kl
貯槽内径	D	78,200	mm
貯槽(側板)高さ	H _t	24,500	mm
鋼材の降伏応力度(側板)	σ _{ys}	325	N/mm ²
鋼材の降伏応力度(アニュラ板)	σ _{ya}	235	N/mm ²
鋼材の引張強度(アニュラ板)	σ _{ua}	400	N/mm ²
鋼材のヤング係数	E	205,800	N/mm ²
鋼材のポアソン比	ν	0.3	-
最高液高さ	H	22,000	mm
液比重	γ	0.73	-

表2 耐震設計震度別に設定したタンクの板厚

タンク板厚	記号	耐震設計震度x		
		0.2	0.3	0.4
側板最下段	t _s	25	27	29
最高液高さ1/3での側板	t _{1/3}	15	15	15
アニュラ板	t _a	6	9	12

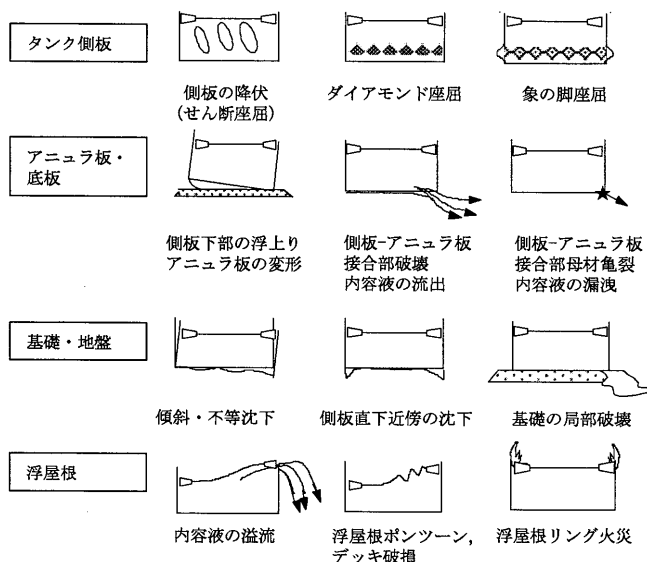


図3 タンクの代表的な損傷モード

t 年間に保有する地震リスクが求められる。ここで、右辺の積分項は、年間の損失期待値を表す。

$$R(x, h, t) = t \cdot \int_0^{\infty} L(x, h, z) f_A(z) dz \quad (7)$$

ここに、L(x, h, z) は耐震設計震度 x で設計したタンクの保有量比を h としたときの地表面震度 z の場合の条件付損失であり、式(8)で表わされる。

$$L(x, h, z) = \sum_i L_i(x, h, z) \quad (8)$$

ここに、L_i(x, h, z) は被害程度 i において発生する損傷モードの損失期待値であり、被害程度 i = 1~4 は、中村ら¹¹⁾を参照とし、それぞれ小破、中破、大破および崩壊とし、被害率を併せ以下に定義する。また、f_A(z) は地表面震度 z のときの年間地震リスク密度関数であり、次式で表わされる。

$$f_A(z) = -\frac{dH(z)}{dz} \quad (9)$$

ここに、H(z) は、地表面震度 z のときの年超過確率である。

被害率は、対象設備の再調達価格に対する損失の比と定義し、被害程度ごとに小破を 5%、中破を 10%、大破を 30%、崩壊を 100% と仮定する。なお、タンクの被害については、兵庫県南部地震での損傷事例等¹²⁾が報告されている。タンク側板の座屈に関してはほぼ満液状態で確認されているが、満液であったタンクの総数が不明

である。また、過去の地震におけるタンクの損傷事例もほとんど公表されていない。以上により、タンクの被害率を推定することは困難であるため、建物の定義を用いることとした。

本研究ではタンクでの各被害程度は次のように想定している。小破はタンク底部のアニュラ板に第一塑性関節が発生するまでのアニュラ板の浮上りとした。この場合、アニュラ板の浮上り後の落下時に、基礎の側板下部に沈下等の損傷が発生する。中破は、アニュラ板に第一塑性関節が発生し、浮上り側と反対側の側板が圧縮される部分に象の脚座屈が発生するまでとした。大破は、象の脚座屈が発生した反対側の浮上り部のアニュラ板が保有耐力に達するまでとし、アニュラ板に第二塑性関節が発生する直前の状態まで変形が進行し漏洩の危険性が高くなる時点とした。崩壊については、第二塑性関節が発生するアニュラ板の保有耐力の超過と定義した。ここでは、消防法告示の 1 次設計と 2 次設計がそれぞれ、大破と崩壊を避ける設計に相当する。

3. 提案手法の検討

本研究で提案するリスクコントロール手法が、プラント設備に適用可能であることを以下で検討する。

3.1 モデルタンクの設定

本研究で対象とする設備は、シングルデッキの浮屋根を持つタンク(平底円筒形貯槽)とする。図2にタンクの概要図を示す。また、表1に対象設備の諸元を、表2に対象設備で耐震設計震度別に消防法告示の設計手法に基づき設定した側板とアニュラ板の板厚を示す。表2において、耐震設計震度 x は 1 次設計の設計水平震度に相当し、2 次設計の保有水平耐力の計算に用いる震度は 1.5 x とする。

当該タンクは、東京湾沿岸の京浜工業地域に立地し、精製用の原油の受け入れ用タンクと想定する。再調達価格としては、この大きさのタンクの一般的な建設費用を考慮して 10 億円と仮定する。

検討モデルは、図3に示すタンクの代表的な損傷モード¹³⁾を想定し、それらの損傷モードの発生順位を検討して設定した。著者ら

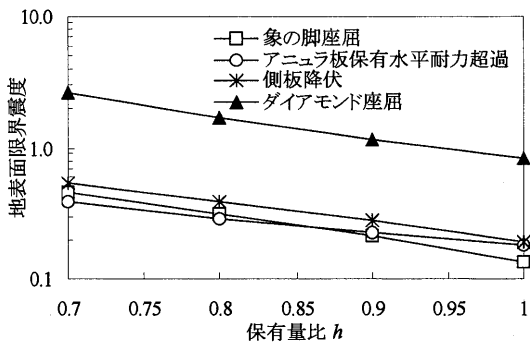


図4 損傷モードに関する地表面限界震度と保有量比 h の関係 (耐震設計震度 $x=0.2$)

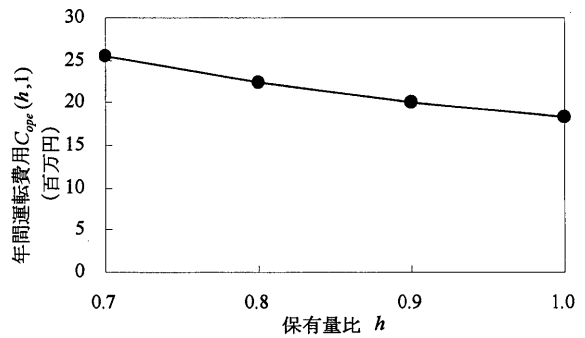


図7 保有量比 h と年間運転費用 $C_{ope}(h,1)$ との関係

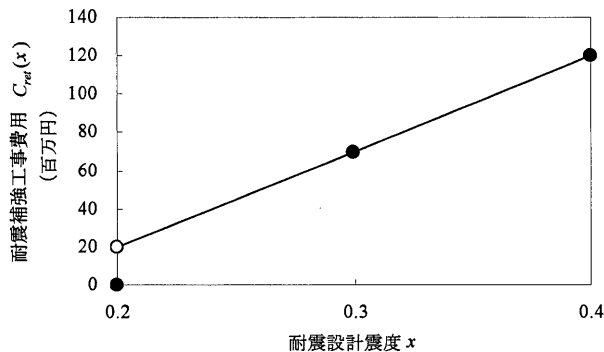


図5 耐震補強工事費と耐震設計震度比との関係

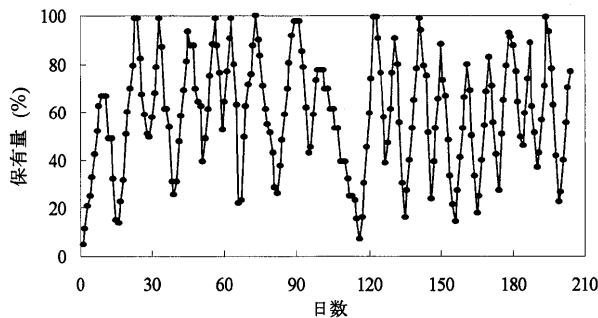


図6 受け入れタンクの日ごとと保有量変化¹⁵⁾

が提案する検討方法¹⁴⁾に基づき、耐震設計震度 0.2 の場合に損傷モードごとの地表面限界震度と保有量比 h の関係を算定した結果を図 4 に示す。

なお、タンクの損傷モードは、バルジング応答によるものと、スロッシング応答によるものがあるが、本研究ではリスク管理の観点から大きな被害となる可能性の高いバルジング応答による損傷モードに絞った。

1 次設計において対象となる損傷モードは、象の脚座屈、側板の降伏、およびダイヤモンド座屈となる。このうち、最も小さな地表面震度で限界震度となる損傷モードは、側板最下段の象の脚座屈であることが判明した。以上から、本検討モデルにおいては 1 次設計を決める損傷モードを側板最下段の象の脚座屈とし、これにより側板の板厚を決定した。2 次設計を決める損傷モードは、アニュラ板の保有耐力が必要保有耐力を超過することにより発生する損傷モードとなるため、これによりアニュラ板の板厚を決定した。

3.2 耐震補強費用の算定

耐震補強費用の算定においては、耐震設計震度 $x=0.2$ の場合と比較して強度を 1.5 倍 (耐震設計震度 $x=0.3$) および 2.0 倍 (耐震設計震度 $x=0.4$) に補強する場合を想定する。検討対象タンクの規模では、アニュラ板を取替える工事で 1 億円程度の補強工事費が必要とされている。また、想定される補強工事では、タンク全体をジャッキアップする必要があり、耐震設計震度の大きさと関係なく工事に含まれる。これにより、一定の固定費が発生することを想定して、耐震補強工事にかかる以下のコストを仮定する。

- ・ 固定工事費: $C_{ret}^F = 20$ 百万円/工事
- ・ 変動工事費: $C_{ret}^V = 100$ 百万円/工事 (本工事費は耐震設計震度を 2 倍 (+100%) に向上させるのに必要な工事費とする。)

図 5 に以上の仮定から算定された耐震補強工事費 $C_{ret}(x)$ と耐震設計震度との関係を示す。補強目標とする耐震設計震度が 0.2 のときは補強の必要がないため耐震補強費用は 0 円となるが、耐震設計震度を向上させるには、最低 20 百万円以上の工事費が発生することになる。

3.3 運転費用の算定

30 万 kl の原油の運送費用は約 500 万円/回となるため、単位立方メートル当りの原油輸送費用は約 17 円程度となる。また、図 6 に示すようにタンク内の原油は製造に使用しているために、常に変動している。文献¹⁵⁾・¹⁶⁾によるとその平均的な受け入れ回数は 9~16 回/年程度とされている。以上の情報をもとに、以下のように運転費用算定のための諸条件を仮定する。

- ・ 耐震設計上の最大保有量: $V_0 = 100,000$ kl
- ・ 在庫として最低限確保しておく保有量 V と V_0 との比: $\alpha = 0.2$
- ・ 内容物の保有量比: $h = 0.7, 0.8, 0.9, \text{ or } 1.0$
- ・ 残存供用期間 (年): $t = 10, 20, 40$ 年
- ・ 運送費の固定費分の単価: $C^F = 1.00$ 百万円/回
- ・ 運送費の変動費分で V_0 分を運ぶ単価: $C^V = 0.667$ 百万円/回
- ・ 年間の運送回数: $n_0 = 12$ 回 (最大保有量の使用時)

表 3 に保有量比 h と運転費用に関する算定結果を示す。また、図 7 に保有量比 h と年間の運転費用 $C_{ope}(h,1)$ の関係を示す。 h が小さくなるほど、年間の運転費用は多くなる。

3.4 地震リスクの算定

(1) 地震ハザード

表3 保有量比 h と運転費用のまとめ

項目	保有量比 h			
	1.0	0.9	0.8	0.7
年間運送回数 $n(h)$	12.0	13.7	16.0	19.2
一回当たりの運用コスト (百万円)	1.53	1.46	1.40	1.33
年間運送コスト (百万円)	18.3	20.1	22.3	25.5

表4 損傷度評価における確率変数

	記号	単位	平均値	標準偏差	適用
鋼材の降伏点 ¹⁹⁾	σ_{ys}	N/mm ²	367.0	33.9	側板
	σ_{ya}	N/mm ²	299.8	37.2	アニュラ板
鋼材の引張強度 ¹⁹⁾	σ_{ua}	N/mm ²	447.4	30.2	アニュラ板
応答倍率 ²⁰⁾	v_3	-	応答倍率 v_3	0.40 v_3	-

地震ハザード曲線⁵⁾は、対象地盤での地震動強度としての地表面加速度とその年超過確率との関係と定義され、本研究では横浜市の臨海工業地帯を想定し、福島・矢代¹⁷⁾により作成した。図8に地震ハザード曲線を示す。

(2) 損傷度曲線

対象タンクの各損傷モードの発生確率の評価はモンテカルロシミュレーションにより評価した¹⁸⁾。モンテカルロシミュレーションにおいては、表4に示す鋼材の材料強度¹⁹⁾および設計応答倍率²⁰⁾を確率変数として与えた。

耐震設計震度の異なるモデルごとに内容物の保有量比を変化させた解析を行い、結果として求めた値を1%超過確率値として、損傷度曲線の中央値を算定した。損傷度曲線の中央値と対数標準偏差を表5に示す。

解析結果の一例として、耐震設計震度 $x=0.2$ の場合の剛基礎浮上りの損傷モードおよび側板の象の脚座屈による損傷モードの損傷度曲線を図9に示す。

(3) 被災時の損失の設定

タンクの場合、本研究で崩壊と定義したアニュラ板の保有耐力超過により、アニュラ板から内容物の漏洩が発生することも考えられる。原油であれば満液の場合、内容物の流出だけで最大約30億円の損失となる。これに加え、タンク本体の再調達価格分の費用、周辺環境への損害に対する費用のほか、操業停止による間接的な損失等多くのコストが想定される。

被災時の損失の設定においては、本来これらの損失を考慮する必

表5 各損傷モードの設計値の中央値と対数標準偏差

損傷モード	保有量比	耐震設計震度0.2		耐震設計震度0.3		耐震設計震度0.4	
		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
剛基礎浮上り	0.7	0.21	0.36	0.27	0.37	0.32	0.37
	0.8	0.16	0.36	0.21	0.36	0.25	0.36
	0.9	0.13	0.36	0.17	0.36	0.21	0.36
	1.0	0.11	0.36	0.15	0.36	0.18	0.36
第1塑性関節発生	0.7	0.45	0.38	0.64	0.38	0.82	0.38
	0.8	0.32	0.37	0.47	0.37	0.60	0.37
	0.9	0.24	0.37	0.35	0.37	0.46	0.38
	1.0	0.19	0.37	0.28	0.38	0.37	0.38
象の脚座屈	0.7	1.30	0.40	1.51	0.40	1.72	0.40
	0.8	0.95	0.41	1.13	0.41	1.30	0.40
	0.9	0.70	0.42	0.84	0.42	1.00	0.41
	1.0	0.51	0.44	0.64	0.43	0.77	0.42
アニュラ板保有水平耐力超過	0.7	1.12	0.37	1.68	0.37	2.23	0.37
	0.8	0.84	0.37	1.26	0.37	1.68	0.37
	0.9	0.67	0.37	1.00	0.37	1.33	0.37
	1.0	0.55	0.37	0.82	0.38	1.09	0.38

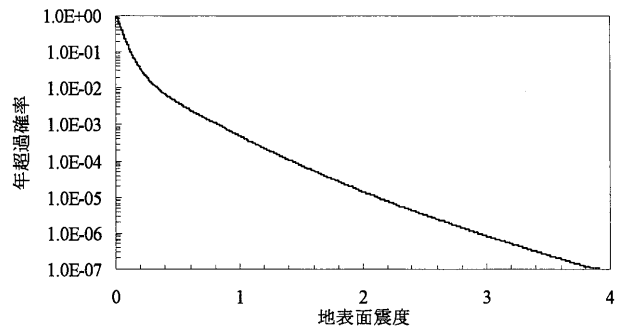


図8 地震ハザード曲線

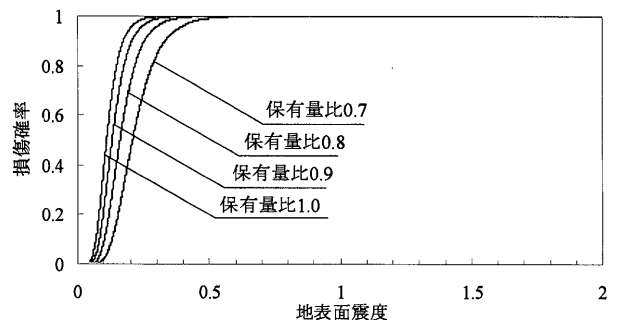
要があるが、実際には、タンク本体に亀裂が発生する漏洩被害は、石油タンクでは、宮城県沖地震の被害事例以外には稀である。また、操業停止期間についても、極一部の被害であれば、他のタンクで代替にして操業を継続することが可能である。これらのことより本研究では、タンク本体に発生する直接的な損失のみを扱うこととする。また、前述のような仮定を置いたとしても、本研究の本質は損なわれないものとする。

(4) 地震リスク

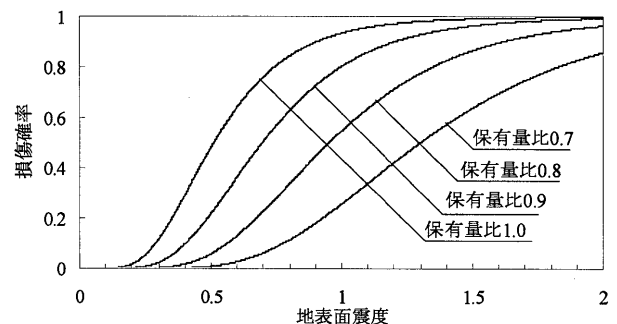
各損傷モードの損傷度曲線と被害率を用いて、地震ロス関数を算定する。図10に耐震設計震度 $x=0.2$ の場合における保有量比ごとの損失額を示す。

次に、地震ハザード曲線と地震ロス関数⁶⁾から、地震リスク曲線⁷⁾を算定する。図11に耐震設計震度 $x=0.2$ の場合における保有量比ごとの年間リスク超過確率と被害率の関係である地震リスク曲線を示す。

耐震設計震度ごとおよび保有量比ごとの地震リスク曲線を積分して求めた値を年間の期待損失とする。算定結果を表6に示す。



(a) 剛基礎浮き上がり



(b) 象の脚座屈

図9 損傷度曲線(耐震設計震度 $x=0.2$)

表 6 各貯槽に関する年間期待損失 (百万円)

保有量比	耐震設計震度 x		
	0.2	0.3	0.4
0.7	3.4	1.7	1.1
0.8	6.5	3.2	2.0
0.9	10.9	5.5	3.5
1.0	16.9	8.7	5.4

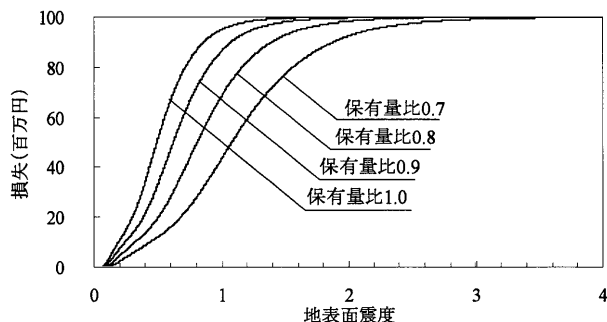


図 10 地震ロス関数(耐震設計震度 $x=0.2$)

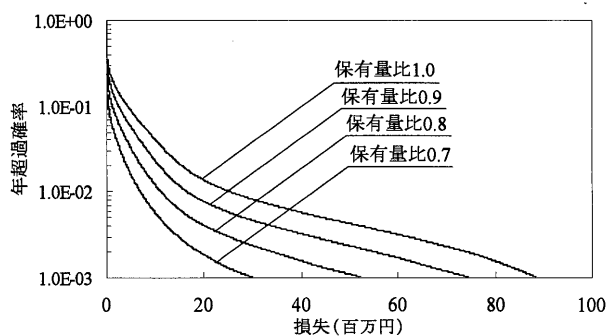


図 11 地震リスク曲線(耐震設計震度 $x=0.2$)

図 12, 図 13 に, それぞれ保有量比 h および耐震設計震度 x と地震リスクの期待損失 $R(x, h, 10)$ の関係を示す。これらの図より, 以下の傾向がわかる。

- ① 保有量比 h が 0.9, 0.8, 0.7 になると, $h=1.0$ のときと比べて, 期待損失 $R(x, h, 10)$ は, それぞれ 0.65 倍, 0.40 倍, 0.21 倍と低くなる。
- ② 耐震設計震度 x が 0.3, 0.4 になると, $x=0.2$ のときと比べて, 期待損失 $R(x, h, 10)$ は, それぞれ 0.52 倍, 0.33 倍となる。
- ③ 残存供用年数 t が増えると, それに比例して期待損失 $R(x, h, t)$ は大きくなる。

3.5 LCC の算定と考察

モデルタンクの残存する供用期間における LCC を求めると共に, 諸変数 x , h , および t が $LCC(x, h, t)$ に与える影響を考察する。

図 14 および 15 に残存供用期間 $t=10, 20$, および 40 年の場合の LCC, 保有量比 h , および耐震設計震度 x の関係をそれぞれ示す。

LCC と保有量比 h との関係については, 図 14(a)~(c) に示すように, 残存供用期間 t が短い場合は, 耐震補強を実施せず保有量比を低下させた方が経済的な対策であり, 期間 t が長い場合は, 耐震補強を実施して耐震設計震度を大きくした方が経済的な対策である。また, それぞれの耐震設計震度での折れ線の傾向は, 耐震設計震度

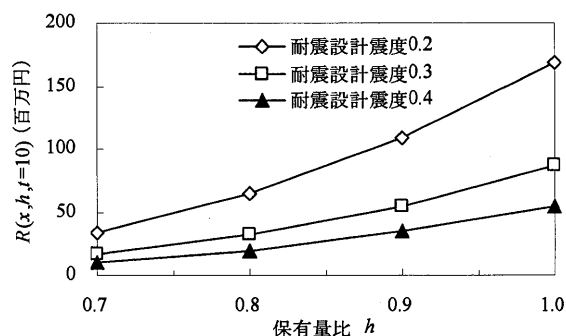


図 12 保有量比と地震リスクの期待損失 $R(x, h, 10)$ の関係

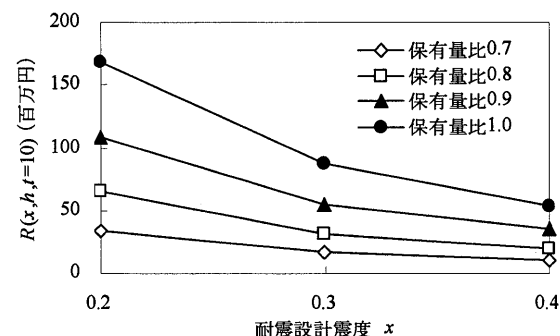


図 13 耐震設計震度と地震リスクの期待損失 $R(x, h, 10)$ の関係

が大きいくほど, LCC を最小とする保有量比の値が大きくなる。

$t=20$ 年の場合, 図 14(b) に示すように, LCC は保有量比が 1.0 のときには, 耐震設計震度が大きいほど小さくなり, 保有量比が 0.7 のときは, 耐震設計震度が小さいほど小さくなる傾向がある。

LCC と耐震設計震度 x の関係においては, 図 15(a)~(c) に示すように, 供用期間が 10 年と短い場合は, 保有量比が 1.0 のときを除いて, 耐震設計震度が小さいほど LCC が小さくなる。供用期間が 40 年の場合は, 保有量比が 0.7 のときを除いて, 耐震設計震度が大きいほど LCC が小さくなる傾向にある。

$t=20$ 年の場合, 図 15(b) に示すように, LCC は耐震設計震度 0.2 のとき保有量比が小さいほど小さくなり, 耐震設計震度 0.4 のときは保有量比が大きいほど小さくなる傾向にある。

例えば, 図 15(c) の場合, 保有量比 1.0 で今後 40 年間の使用を前提とすると, 耐震設計震度 $x=0.4$ までの耐震補強した方が, 耐震補強をしない $x=0.2$ のときよりも, LCC として約 300 百万円低減できることになり, 年間 10 百万円弱の節約になる。

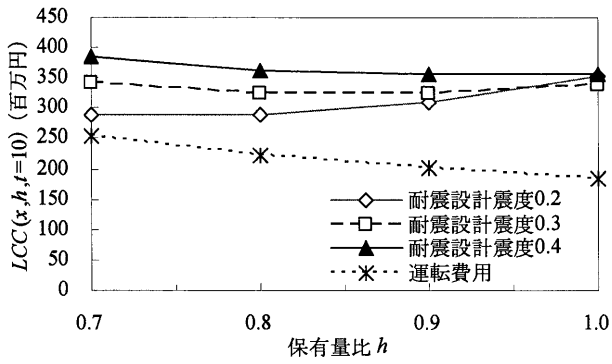
このような結果から, 本研究で求められる LCC は, 十分に対策選定の判断材料となる。

4. 液高制御によるリスクコントロールの実現性

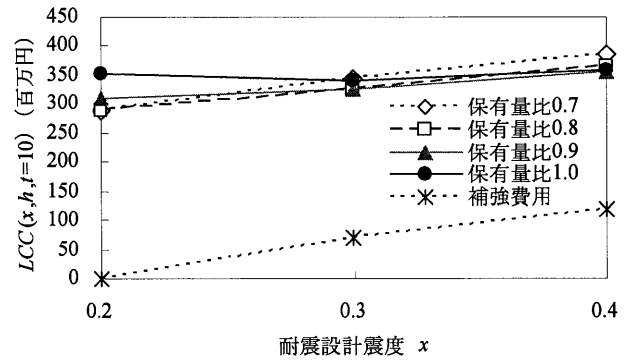
リスクコントロールを実現するために, 従来の耐震対策である耐震補強に, 液高制御を耐震対策として加えることにより, 図 12 に示すように耐震補強だけでは限界のあった地震リスクのコントロールが一層容易になった。さらに, 以下に示すように LCC として評価することにより, 地震対策の組み合わせを経営者が判断するための LCC の傾向が把握できる。

① 耐震設計震度 x を設定した場合

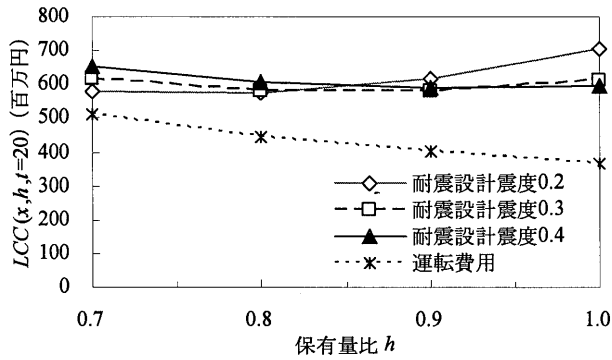
耐震設計震度 $x=0.2$ のとき, 残存供用期間 $t=10$ かつ保有量



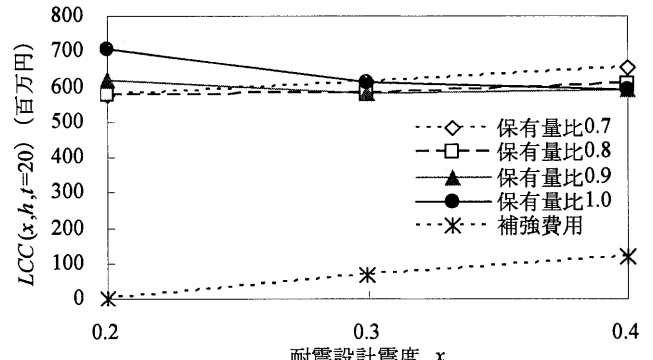
(a) 10年



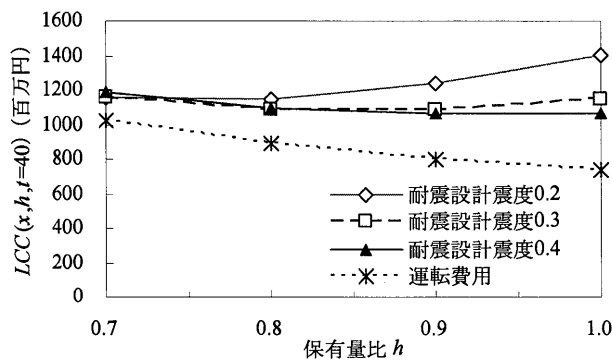
(a) 10年



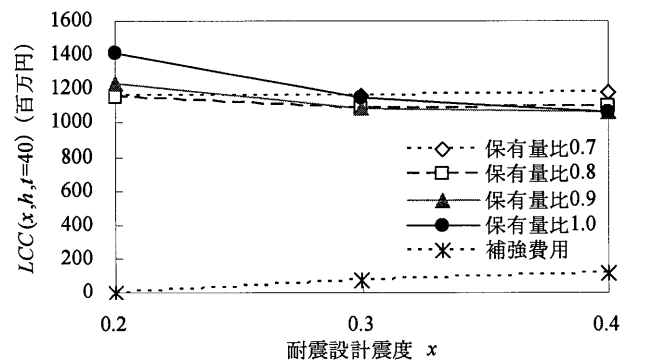
(b) 20年



(b) 20年



(c) 40年



(c) 40年

図 14 LCC と保有量比の関係

図 15 LCC と耐震設計震度の関係

比 $h=0.7$ (図 14(a)) で LCC が最も小さくなり、耐震設計震度 $x=0.4$ のとき、残存供用期間 $t=40$ かつ保有量比 $h=1.0$ (図 14(c)) で LCC が最も小さくなる。

② 保有量比 h を設定した場合

保有量比 $h=0.7$ のとき、耐震設計震度 $x=0.2$ かつ残存供用期間 $t=10$ (図 15(a)) で LCC が最も小さくなり、保有量比 $h=1.0$ のとき、耐震設計震度 $x=0.4$ かつ残存供用期間 $t=40$ (図 15(c)) で LCC が最も小さくなる。

③ 残存供用期間 t を設定した場合

残存供用期間 $t=10$ のとき、上記①項の耐震設計震度 $x=0.2$ のケースになり、残存供用期間 $t=40$ のとき、耐震設計震度 $x=0.4$ のケースになる。

以上から、地震リスクの低減の観点から見ると、従来の耐震補強は、構造物の加速度耐力を大きくし、地震リスクを低減するものである。この方法では、補強の難しい構造形式であったり、補強のた

めの空間の確保が難しかったりすることがあるため、耐震性能の向上には技術的にも経済的にも限界があった。

本研究で提案する液高制御による耐震対策も含めたリスクコントロール手法を適用すると、運転方法の変更を考慮し、設備内の内容物の保有量を調整することにより、耐震補強だけに頼らない地震リスクの低減対策が提案可能である。

さらに、地震リスクの低減の程度は同等でも、耐震補強と液高制御は組み合わせにより複数の対策が可能であるため、さらに LCC 評価の考え方を導入することにより、対策の程度および組み合わせを経営者として選択する判断材料が提供可能となる。

例えば、図 13 で地震リスクが同等 ($R \approx 60$ 百万円) の対策を考えると、耐震設計震度 $x=0.2$ で耐震補強を行わず、保有量比 $h=0.8$ まで液高制限をする場合と、保有量比 $h=1.0$ を確保し、耐震設計震度 $x=0.4$ まで耐震補強する場合がこの同等の対策になる。この 2 ケースを図 15(a) の LCC ($t=10$ 年) で比較すると、耐震補強しない場

合 ($x=0.2$)の方が耐震補強する場合 ($x=0.4$)と比較して約50百万円安くなる。しかし、液高のみを制御するか対策費用が発生する耐震補強を先に実施するかは、経営判断となる。

なお、宮城県沖地震のときに石油タンク3基で底板の開口からのほぼ全量の油流出²¹⁾、および阪神淡路大震災での7基のタンクでの側版の座屈¹²⁾、²²⁾は、加速度耐力が低く、満液の状態に近いタンクに被害が集中している。よって、被害を受けたようなタンクを対象とすることにより、本リスクコントロール手法の活用が期待できる。

5. まとめ

本研究ではタンク等の既設プラント設備を対象として、耐震補強と液高制御の2手法を用いたリスクコントロール手法の枠組みを提案した。本手法の枠組みは、まず耐震補強および液高制御という二つの耐震対策の組み合わせによる地震リスクのコントロールを可能にする。さらに、残存する供用期間を考慮して耐震補強に対する費用、液高制御を考慮した運転費用および地震リスクを算定しその総和をLCCとし、LCCを用いて同等の地震リスクとなる耐震対策候補からひとつの対策を選択するために経営判断に必要な情報を提供する。

次に、対象設備としてタンクを選択し、本研究で提案したリスクコントロール手法の実現可能性を検討した。耐震補強と同様に液高制御により地震リスクの低減は可能であり、これらの組み合わせは有効であることがわかった。さらに、耐震補強の程度、液高制御の程度および残存する供用期間をパラメータとして評価すれば、LCCの増減の傾向が把握可能であり、経営者がどの対策方法を選定するか決定する際の判断情報として利用可能であることを示した。

本研究における今後の課題としては、以下のことが挙げられる。

タンク本体の再調達価格だけを地震による損傷費用として取り扱ったが、そのほかに内容物の流出に伴う内容物自体の損失費用等の直接的な損失費用のほか、間接的な操業停止による損失費用等も発生するため、今後これらなどについても考慮する必要がある。

また、損傷による直接的な損失を算定するためには、損傷モードと漏洩の関係を明確化する必要があるが、現時点では、タンクを含むプラント設備の損傷モードと漏洩に関する詳細な記録が少ないため、確率的に取り扱うことが難しい。今後の地震による損傷のデータの収集が必要とされる。

注

- 注 1) 耐震対策とは、加速度耐力を上昇させる施策一般を言う。本研究では、その具体策として、耐震補強と液高制御の2つを扱う。
- 注 2) 地震リスクとは、当該設備の残存供用年間中における地震による損失の期待値を言う。よって、地震リスクの低減とは、前出の耐震対策により損失の期待値が低減すること、あるいは、低減させる行為を言う。
- 注 3) リスクコントロールとは、リスクマネジメントにおけるリスクの処理の内、損失の直接的な抑止・軽減を図る施策を言う。前出の耐震対策はこれに含まれる。
- 注 4) ライフサイクルコスト (LCC) とは、一般的には当該設備の建設から撤去に至るまでの全費用の総和である。本研究でのLCCとは、既設の設備を対象とすることから、残存供用期間における耐震対策費用、耐震対策の結果発生する運用費用、地震リスク等の耐震関連費用の総和とする。LCCの最小化とは、LCCに影響のある関連パラメータを調整

することによりLCCを最小にすることである。

- 注 5) 地震ハザード曲線とは、対象地盤での地震動強度としての地表面震度とその年超過確率との関係を表す。
- 注 6) 地震ロス曲線とは、損傷レベルとしての損失(百万円)と、その年超過確率との関係を表す。
- 注 7) 地震リスク曲線とは、地震動強度としての地表面震度とその損傷レベルとしての損失(百万円)との関係を表す。

参考文献

- 1) 消防法 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, 1984
- 2) 高压ガス保安法 高压ガス設備等耐震設計基準, 通産省告示第515号(1981), 最終改正告示第134号(1997)
- 3) 高压ガス保安協会:平成17年度経済産業省委託 高压ガスプラント耐震化対策 高压ガス設備耐震対策推進委員会報告書, 2006.3
- 4) Oshima, M., et al.: Seismic Evaluation of Existing Structures Supporting Loading-arms in LNG Receiving Terminal, ASME, PVP-Vol. 445-1, Seismic Engineering-2002, Volume 1, PVP2002-1411, pp.163-170, 2002.8.
- 5) Oshima, M., et al.: Seismic Assessment of an Existing Equipment Structure in Refineries, 13th WCEE, Paper ID. 1159, 2004.8
- 6) Oshima, M., et al.: Strategy for Seismic Upgrading of Chemical Plant Taking Productivity as Criterion of Judgment, Proceedings of SMiRT-18, Paper No.M01_6, 2005.8
- 7) 独立行政法人建築研究所 地震リスク・マネジメント研究会:地震対策の普及を目的とした地震リスク・マネジメント手法の実用化, 建築研究資料, No.103, 2005
- 8) JIS B8501:鋼製石油貯槽の構造(全溶接), 参考 鋼製石油貯槽の耐震設計指針, pp.解55-71, 1995
- 9) 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3 液面高さと地表面限界震度の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 構造I, pp.77-78, 2006
- 10) 星谷勝 他:構造物の地震リスクマネジメント, 山海堂, 2002
- 11) 中村孝明, 中村敏治:ポートフォリオ地震予想最大損失(PML)評価, 日本リスク研究学会誌 12(2), pp.69-76, 2000
- 12) 自治省消防庁消防研究所:阪神・淡路大震災における石油タンクの座屈強度に関する調査研究報告書, 消防研究所技術資料第31号, pp.1-6, 1996
- 13) 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
- 14) 大嶋昌巳 他: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
- 15) Yamamoto, S., Kawano, K.: Investigation of cause for a tank accident, Bulletin of international association for shell and structures, n65, vol XVIII-3, pp.23-39, 1978.12
- 16) 日本LPガス協会:低温タンクの耐久性研究委員会報告書(解析編), 1978
- 17) 福島誠一郎, 矢代晴実:地震ハザードの相関を考慮した代替建物の配置, 日本建築学会環境系論文集, No.575, pp.91-98, 2004.1
- 18) 大嶋昌巳 他:タンク内容液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に関する研究, 地域安全学会梗概集, No.18, pp.89-92, 2006
- 19) 日本建築学会:鋼構造限界状態設計基準(案)・同解説, 1990
- 20) 日本建築学会:地震荷重—その現状と将来の展望, 1987
- 21) (社)プラントメンテナンス協会:役立つ工場の地震対策—石油精製・石油化学プラントを中心に—, 装置工業のPM委員会編, pp. 巻末200-203, 2001
- 22) 山瀬敏郎:石油コンビナートの防災アセスメント, 安全工学, Vol. 40, No. 1, pp.22-29, 2001

(2006年7月10日原稿受理, 2007年1月5日採用決定)