

プラント設備の運転継続に着目した損傷レベルに基づく耐震対策の評価手法

The Assessment Procedure of Seismic Strengthening based on Damage Levels focused on the Operating Continuity for the Plant Facilities

○加瀬 隆¹, 里田 啓¹, 大嶋 昌巳¹
Takashi KASE¹, Akira SATODA¹ and Masami OSHIMA¹

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, Yokohma, Japan

Seismic strengthening of existing plant facilities have been performed by means of a procedure of the seismic design code of high-pressure gas facilities in Japan. Main purpose of these seismic design codes is to ensure public safety at seismic events. From the viewpoints of seismic risk of corporate management, “Social responsibility of product supply” and “Maintaining the function of facilities and minimizing of damage cost” are also important for seismic assessment. In this paper, authors proposed an assessment method considering those items to select appropriate countermeasures for seismic strengthening, and this method is based on fault tree analysis at allowable damage levels. And a calculation result of a typical example is presented.

Keywords : Plant facilities, estimated term of shutdown, necessity of repair, damage levels, fault tree, seismic assessment method

1. はじめに

一般的に既設プラント設備の耐震診断および耐震対策を実施する場合、高圧ガス設備等耐震設計基準¹⁾等に準拠して「プラント周辺への安全性の確保」を目標とした耐震重要度を設定し、コードの要求に従い耐震性能を確保する。改造などにより法的に規制されている場合は、まず、第一に法的要求を満足する必要がある。

しかし、プラント経営への影響の大きい他の重要な地震リスクである「製品供給の社会的責任」および「設備の維持および被害額の制御」を達成するために耐震対策を実施するのであれば、別の方法で地震リスクを評価する必要がある。

本研究においては、「製品供給の社会的責任」および「設備の維持および被害額の制御」の地震リスクを対象とするという観点から、地震後のプラント設備の休業期間および補修要否に着目し、これらを判断基準とした損傷レベルに基づく地震リスク評価方法の提供を目指して検討を行っている。

本稿では、耐震対策費用を設定し、許容し得る損傷レベルを選ぶことにより、これらに基づく耐震性能の向上率を判断できる情報を提供できる評価手法を提案し、この評価手法を適用した評価事例を示す。

2. 評価手法

本研究で提案する評価手法は、設備の耐震対策の投資額、および地震発生後の被害のレベルを想定することにより、対策の必要な箇所と補強の程度が設定できるものである。

この評価手法を図1のフローに示し、手順を以下に述べる。まず、経営への影響の大きい地震発生後の休業期間および補修要否に着目して、地震による被害について損傷程度の階級分け（以下、損傷レベル）を仮定する。

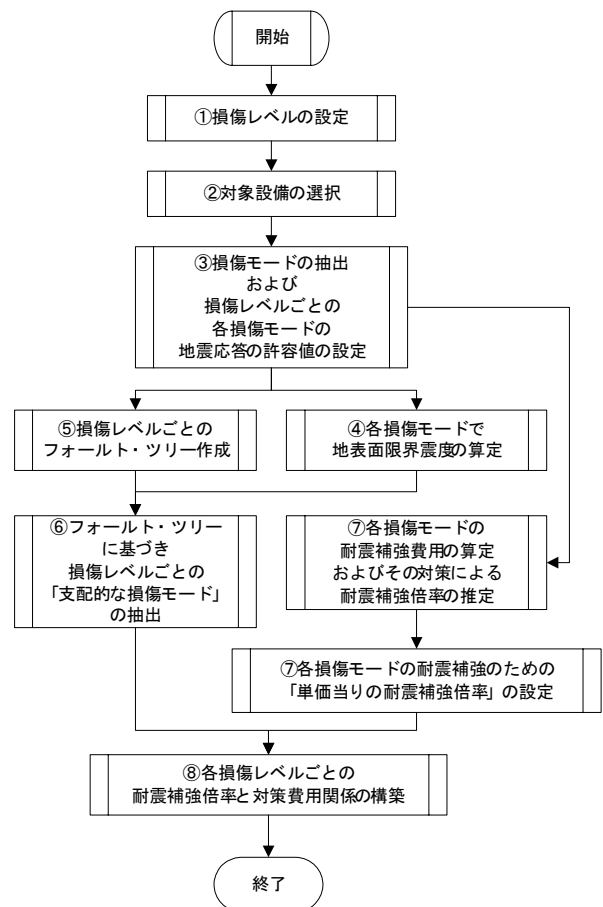


図1 評価手法のフロー

次に仮定した損傷レベルごとのフォールト・ツリー（以

下, FT) を, 設備の部材に生じる設備の性能を損なう要因 (以下, 損傷モード) を基本事象として作成する^{2), 3)}. さらに損傷モードに対応する耐震補強対策の費用を概算し, これを用いてFT全体の対策費用を算定する. 最終的には, 損傷レベルごとの地震の地表面における震度に対する対策費用の関係および耐震性能が向上する割合 (耐震補強倍率) に対する対策費用の関係を明らかにし, 耐震対策の評価に適用する.

ここで, 耐震補強倍率および対策費用と耐震補強倍率との関係の算定式を示す.

1) 支配的な損傷モードに対する耐震対策による耐震補強倍率

損傷モードごとに耐震性能を向上させるための耐震対策を設定して, その耐震対策によって耐震性能が向上する割合を耐震補強倍率 ${}_n F_{ri}$ とし, 以下の式で定義する.

$${}_n F_{ri} = \frac{K_r}{{}_n K_{0i}} - 1, \quad (K_r > {}_n K_{0i}) \quad (1)$$

$${}_n F_{ri} = 0, \quad (K_r \leq {}_n K_{0i})$$

ここで,

${}_n F_{ri}$: 損傷レベル n で支配的な損傷モード i に対する耐震対策による耐震補強倍率

K_r : 耐震対策の目標とする対象設備の地表面の耐震設計震度

${}_n K_{0i}$: 損傷レベル n で支配的な損傷モード i の地表面限界震度

上式は, 目標とする対象設備の耐震設計震度が支配的な損傷モードの持つ地表面限界震度を越えた場合に, その支配的な損傷モードに耐震補強倍率が設定されることを意味する.

2) 設備全体としての耐震補強倍率

設備全体としての耐震補強倍率 ${}_n F$ は次式で定義する.

$${}_n F = \frac{K_r}{{}_n K_{Omin}} - 1 \quad (2)$$

ここで,

${}_n F$: 損傷レベル n での耐震対策の目標となる設備全体の耐震補強倍率

${}_n K_{Omin}$: 損傷レベル n で最も小さい地表面限界震度を持つ支配的な損傷モードの地表面限界震度

3) 損傷モードごとの単価当り耐震補強倍率

支配的な損傷モードごとの単価当りの耐震補強倍率 ${}_n R_{0i}$ を以下の式で定義する.

$${}_n R_{0i} = \frac{{}_n F_i}{{}_n C_i} \quad (3)$$

ここで,

${}_n R_{0i}$: 損傷レベル n で支配的な損傷モード i での単価当りの耐震補強倍率 (/円)

${}_n C_i$: 損傷レベル n で支配的な損傷モード i の耐震対策にかかる費用の概算値 (円)

${}_n F_i$: ${}_n C_i$ の費用をかけた対策による“推定される耐震補強倍率”

4) 全体の対策費用と目標とする耐震補強倍率との関係

FTに基づき, 損傷レベルごとに支配的な損傷モードと単価当りの耐震補強倍率から, 耐震設計震度に対する損傷レベルごとの対策費用の関係および耐震補強倍率に対する損傷レベルごとの対策費用の関係を算定し, 関係図を作成する.

対象設備としての全体の対策費用 ${}_n C_T$ と目標とする耐震補強倍率 ${}_n F_{ri}$ との関係は次式で表される.

$${}_n C_T = \sum_{i=1}^k \frac{{}_n F_{ri}}{{}_n R_{0i}} \quad (4)$$

ここで,

${}_n C_T$: 損傷レベル n において, 目標とする耐震補強倍率 ${}_n F_{ri}$ を満たす耐震性能を保有するために必要な耐震対策費用

${}_n F_{ri} / {}_n R_{0i}$: 損傷レベル n における支配的な損傷モード i で耐震対策の目標とする地耐震設計震度 K_r に耐震性能を向上させるための対策にかかる費用の概算値 (円)

k : 損傷レベル n で支配的な損傷モードの総数

関係図作成に当たっては, まず, 耐震対策の目標とする耐震設計震度 K_r を仮定する. 次に損傷レベルごとに支配的な損傷モードが目標とする耐震設計震度を下回っている損傷モードを抽出する. さらにその損傷モードの地表面限界震度が対策の目標値となるために対策にかかる費用 ${}_n F_{ri} / {}_n R_{0i}$ を算定し, これらの総和から設備の耐震対策にかかる費用を求める. また, (2)式により設備としての耐震補強倍率も求める. この手順により損傷レベルごとに多数の点を求め, 関係図を作成する.

3. 評価事例

代表設備による評価事例を以下に示す.

3. 1. 損傷レベルの設定

プラント設備を対象に地震時に受ける被害として, 休業期間および補修要否の二つの項目に着目した損傷レベルの設定を行う. 設定の結果を表1に示す.

3. 2. 対象モデル (対象設備の選択)

プラントにおいて対象とする設備および範囲を選択する. プラント設備の代表としてスカートを有する自立式の塔類 (以下, スカート支持塔) を事例として扱う. 図2にスカート支持塔の概要を示す.

表 1 損傷レベルの定義¹⁾

設定項目	損傷レベル			
	1	2	3	4
運転状況	シャットダウンは不要	短期のシャットダウンが必要	長期のシャットダウンが必要	再運転不能
	運転継続	部分補修で再運転可能	すべての補修が済むまで再運転は不可能	
補修の要否	補修なしで使用可能	補修して使用可能	3ヶ月程度かかる補修が必要	補修では対応困難
休業期間	休業なし	早期に再開可能	早期には再開不可能	
技術的要求	応急対応不要	早急な補修は不要	早急に補修要	再設置が必要
経済的な要求	保守費用不要	補修費用は小	補修費用は大	再調達価格要

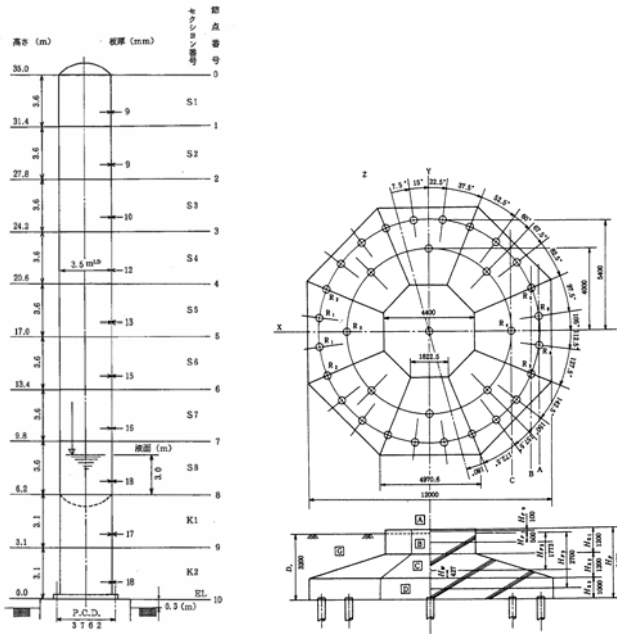


図2 対象設備（スカート支持塔）の概要³⁾

3. 3. 損傷モードと地表面震度

対象とする設備において、損傷レベルに合わせた損傷モードを抽出し、それらの損傷モードごとにその閾値として設備の地震応答の許容値（許容塑性率）を設定する³⁾。各損傷モードの損傷レベルごとの許容塑性率を表2に示す。また、各損傷モードと地表面震度の関係を表3に示す。

表2 各損傷モードの損傷モードごとの許容塑性率

項目	損傷度	損傷レベル				
		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	
告示143号の許容塑性率 (許容塑性率)	塔の損傷モード	胴の引張降伏に係る降伏(C=2)	1.2 (0.06)	1.6 (0.20)	2.5 (0.66)	3.0 (1.00)
		胴の圧縮座屈に係る降伏(C=2)	1.1 (0.03)	1.3 (0.09)	1.6 (0.20)	1.9 (0.35)
		スカートの圧縮座屈に係る降伏(C=2)	1.1 (0.03)	1.3 (0.09)	1.6 (0.20)	1.9 (0.35)
		基礎ボルトの引張降伏に係る降伏(C=1)	1.2 (0.11)	1.6 (0.39)	2.0 (0.75)	2.9 (1.80)
		ベースプレートの曲げ降伏に係る降伏(C=2)	1.1 (0.03)	1.3 (0.09)	1.6 (0.20)	1.9 (0.35)
	基礎の損傷モード	杭の押込み反力(C=2)	1.1 (0.03)	1.3 (0.09)	1.6 (0.20)	2.0 (0.38)
		杭の引抜き反力(C=2)	1.1 (0.03)	1.3 (0.09)	1.6 (0.20)	2.0 (0.38)
		杭体の圧縮線応力度(C=2)	1.1 (0.03)	1.3 (0.09)	1.6 (0.20)	2.0 (0.38)
		杭体の引張線応力度(C=2)	1.1 (0.03)	1.3 (0.09)	1.6 (0.20)	2.0 (0.38)
		フーチング下部のせん断応力(C=2)	1.1 (0.03)	1.3 (0.09)	1.6 (0.20)	2.0 (0.38)
フーチング上部の必要鉄筋量(C=2)	1.1 (0.03)	1.3 (0.09)	1.6 (0.20)	2.0 (0.38)		
基礎ボルトの引抜き力(C=2)	1.1 (0.03)	1.3 (0.09)	1.6 (0.20)	2.0 (0.38)		

表3 各損傷モードと地表面震度

損傷モード	計算値	地表面震度				
		損傷レベル1	損傷レベル2	損傷レベル3	損傷レベル4	
塔の損傷モード	胴の引張降伏に係る降伏	0.69	0.92	1.42	1.71	
	胴の圧縮座屈に係る降伏	0.49	0.58	0.61	0.86	
	スカートの圧縮座屈に係る降伏	0.46	0.56	0.67	0.82	
	基礎ボルトの引張降伏に係る降伏	0.62	0.83	1.03	1.48	
	ベースプレートの曲げ降伏に係る降伏	0.45	0.53	0.65	0.78	
基礎の損傷モード	杭の押込み反力	0.62	0.79	1.03	1.34	
	杭の引抜き反力	0.46	0.49	0.55	0.62	
	杭体の圧縮線応力度	1.54	1.91	2.40以上	2.40以上	
	杭体の引張線応力度	0.78	0.82	0.87	0.95	
	フーチング下部のせん断応力	内側杭断面(基礎C断面)	0.34	0.51	0.70	0.94
		第二杭断面(基礎B断面)	0.94	1.16	1.49	1.91
		外側杭断面(基礎A断面)	1.74	2.08	2.40以上	2.40以上
		柱面(基礎柱面)	0.66	0.83	1.09	1.42
	フーチング上部の必要鉄筋量	0.32	0.35	0.40	0.47	
	基礎ボルトの引抜き力	0.32	0.37	0.44	0.54	

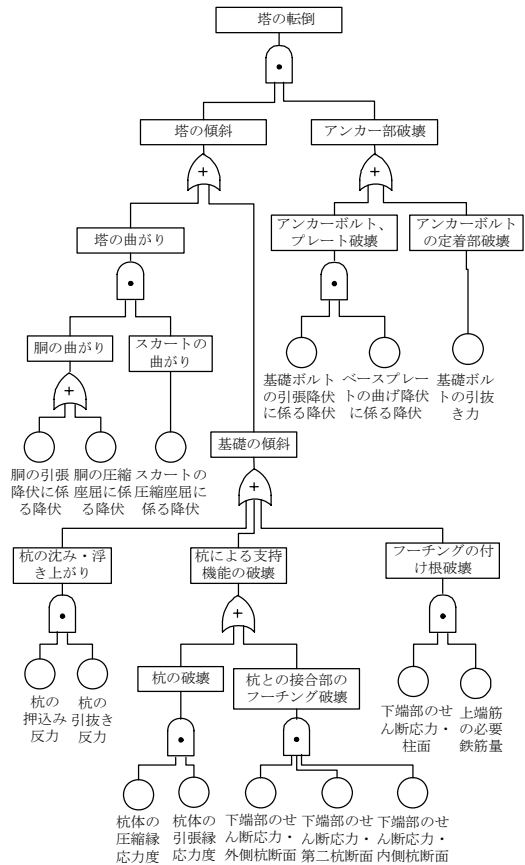


図3 損傷レベル4のスカート支持塔のFT³⁾

3. 4. フォールト・ツリー (FT) を用いた地震損傷度の評価

地震動が原因で生じるプラント設備の損傷について損傷レベルごとにFTを作成した³⁾。例として損傷レベル4に対応したFTを図3に示す。

3. 5. 支配的な損傷モードの抽出および対策費用と耐震補強倍率の設定

スカート支持塔用に作成された損傷レベルごとのFTを用いて、対象とする設備がその損傷レベルになることを決定する要因となる支配的な損傷モードの抽出を行う。その結果を表4に示す。同表には、支配的な損傷モードごとの地表面限界震度（損傷モードが発生する限界となる地表面での水平震度）も表示し、地表面限界震度の小さい順に順位を付けた。

損傷モードごとに一般的な耐震補強対策を設定し、その対策費用（直工事費）の積算を行った。その結果を表5に示す。また、この対策により期待される耐震補強倍率を概算により推定し、これらの結果から損傷モードごとに(3)式を用いて、単価当りの耐震補強倍率を算定し、表5に示した。

3. 6. 費用対効果

(2)式より、損傷レベルごとに設備全体としての耐震補強倍率を求め、支配的な損傷モードごとの単価当りの耐震補強倍率から、(4)式により設備全体の耐震対策費用を算定する。

これらから、設計目標とする地表面震度に対する損傷モードごとの対策費用の関係および耐震補強倍率に対す

表4 各損傷レベルの支配する損傷モードと地表面限界震度

部位	NO.	損傷モード	支配的な損傷モードの限界震度とその順位 (順位:地表面の限界震度の小さい順序、 (数字):地表面の限界震度)			
			損傷レベル			
			1	2	3	4
塔	1	胴の引張り降伏に係る降伏	11 (0.69)	9 (0.92)	6 (1.42)	4 (1.71)
	2	胴の圧縮座屈に係る降伏	7 (0.49)	5 (0.58)	3 (0.71)	1 (0.86)
	3	スカート圧縮座屈に係る降伏	5 (0.46)	4 (0.56)	2 (0.67)	-
アンカー	4	基礎ボルトの引張り降伏に係る降伏	8 (0.62)	7 (0.83)	-	-
	5	ベースプレート曲げ降伏に係る降伏	4 (0.45)	3 (0.53)	-	-
基礎	6	基礎ボルトの引抜き力	8 (0.62)	8 (0.79)	4 (1.03)	2 (1.33)
	7	杭の押込み反力	5 (0.46)	2 (0.49)	1 (0.55)	-
	8	杭の引抜き反力	14 (1.54)	10 (1.91)	-	-
	9	杭体の圧縮線応力度	12 (0.78)	-	-	-
	10	杭体の引張り線応力度	3 (0.34)	-	-	-
	11	フーチング下部のせん断応力	-	-	-	-
	12	外側杭断面(基礎A断面)	13 (0.94)	-	-	-
	13	第二杭断面(基礎B断面)	15 (1.74)	11 (2.08)	-	-
	14	内側杭断面(基礎C断面)	10 (0.66)	7 (0.83)	5 (1.09)	3 (1.42)
	15	柱面(基礎柱面)	1 (0.32)	-	-	-
		フーチング上部筋の必要鉄筋量	1 (0.32)	1 (0.37)	-	-

表5 各損傷レベルの耐震補強方法, 補強費用, および向上率の概要

部位	NO.	損傷モード	補強対策		耐震性能向上率	採用予定費用(万円)	単価当りの耐震性能向上率(%/万円)
			補強方法	補強概要			
塔	1	胴の引張り降伏に係る降伏	胴板の厚さを増す	最下段6mm+(3.6H)	30.0%	300	0.100
	2	胴の圧縮座屈に係る降伏	胴板の厚さを増す	最下段6mm+(3.6H)	30.0%	300	0.100
	3	スカートの圧縮座屈に係る降伏	スカート板の厚さを増す 横リブを入れ、直交材でリブを補強	1段6mm+(3.1H)	30.0%	150	0.200
アンカー	4	基礎ボルトの引張り降伏に係る降伏	基礎ボルトを増す(立上りをふかす)	ボルト16本増し、立上り片側200mmふかす	57.0%	500	0.114
	5	ベースプレートの曲げ降伏に係る降伏	基礎ボルトを増す、プレートのリブを増す	立上りをふかし16本増す ボルトそのまま	25.0%	500	0.050
	6	基礎ボルトの引抜き力	基礎ボルトを増す(立上りをふかす)	16本増す	70.0%	200	0.350
基礎	7	杭の押込み反力	杭を増打ち	8本増打ち	24.0%	1,200	-
	8	杭の引抜き反力	杭を増打ち	24本増打ち 8本増打ち 24本増打ち	72.0% 24.0% 72.0%	1,500 1,200 1,500	0.048 - 0.048
	9	杭体の圧縮線応力度	杭を増打ち	基礎重量を増す フーチング200mm+	24.0% 72.0%	1,200 1,500	0.048 0.048
	10	杭体の引張り線応力度	杭を増打ち、基礎重量を増す	8本増打ち 24本増打ち フーチング200mm+	24.0% 72.0%	1,200 1,500	0.048 0.048
	11	フーチング下部のせん断応力					
	12	外側杭断面(基礎A断面)	基礎厚みを増やす	スロープ部一律1400mm	17.0%	320	0.053
	13	第二杭断面(基礎B断面)	基礎厚みを増やす	スロープ部一律1400mm	15.0%	230	0.065
	14	内側杭断面(基礎C断面)	基礎厚みを増やす	スロープ部一律1400mm	13.0%	160	0.081
	15	柱面(基礎柱面)	基礎厚みを増やす	スロープ部一律1400mm	9.0%	60	0.150
			フーチング上部筋の必要鉄筋量	基礎厚みを増やし、鉄筋量を増やす	スロープ部200mm+	40.0% (MAX.)	250

る損傷モードごとの対策費用の関係を算定し、それぞれ図4および図5に示す。これらの図の具体的な活用例を以下に示す。

- 1) 設備の期待する損傷レベルおよび設計目標とする地表面震度を決定すると対策費用が概算できる。
- 2) 対策費用が決まっている場合、どの損傷レベルを選択するかにより、どの程度耐震性能が向上するか解る。
- 3) 対策費用と損傷レベルを決定すると、その設備が期待された損傷レベルとなる地表面限界震度が推定できる。

4. まとめ

本手法を用いると、耐震対策費用として一定の金額を費やす場合、どの損傷レベルでプラントを維持するかを選ぶことにより、休業期間および補修要否に着目した耐震性能がどの程度向上するかを判断できる情報を提供することが可能であることが示せた。

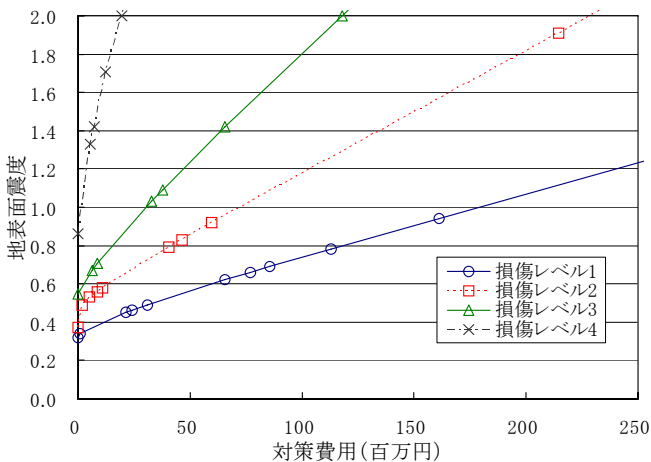


図4 耐震性能向上のための対策費用と地表面設計震度

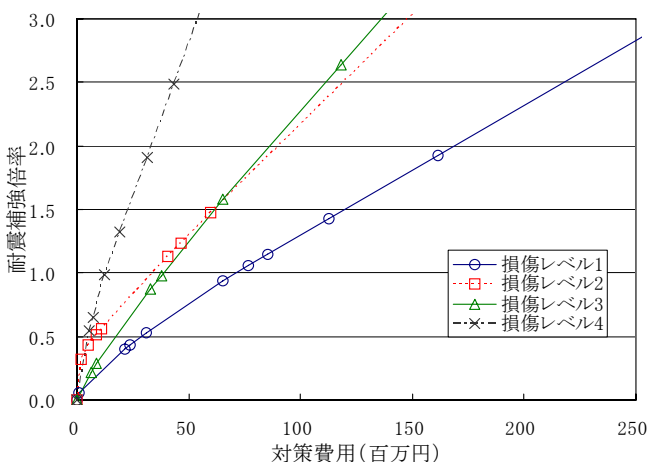


図5 耐震性能向上のための対策費用と耐震補強倍率

また、本手法では、フォールト・ツリー (FT) を用いて分析を行い、設備の損傷を支配的な損傷モードの選択とそれらの複数の損傷モードに対する対策費の適正な配分が実施可能なため、例えば、損傷レベルおよび地表面震度を選択することにより対策の対象となる支配的な損傷モードの明示も可能であることが確認できた。

今後は、多種の設備に対しこの評価法を適用し、設備としての特徴を把握することを目指す。

“参考文献”

- 1) 高圧ガス保安法 高圧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)
- 2) 大嶋昌巳, 他: “化学プラントの地震リスク評価に関する研究 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. 261-264, 2004
- 3) 大嶋昌巳, 他: “化学プラントの運転性能を判断基準とした耐震対策戦略”, 地域安全学会梗概集, No. 15, pp. 133-136, 2004