

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

Strategy for Seismic Upgrading of Chemical Plant

Taking Productivity as Criterion of Judgement

○大嶋 昌巳¹, 加瀬隆¹, 矢代晴実², 福島誠一郎³

Masami OSHIMA¹, Takashi KASE¹, 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 工修

Chiyoda Advanced Solutions Corporation, M. Eng.

²東京海上リスクコンサルティング株式会社 博士(工学)

The Tokio Marine Risk Consulting Co. Ltd., Dr. Eng.

³東電設計株式会社 博士(工学)

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

Pre-earthquake upgrading and modification of existing chemical plant facilities have been performed by mean of a procedure of the Seismic Design Code and Guidelines of High-pressure Gas Facilities in Japan. Main purpose of this seismic design code is to ensure public safety at seismic events. From the view points of seismic risk of corporate management, CSR (corporate Social Responsibility) and productivity of the plants are also important for seismic assessment. In this paper, authors proposed strategy for seismic assessment to select appropriate pre-earthquake upgrading and modification considering productivity of plants based on fault tree analysis. This assessment will enable to select weak damage modes and to allocate countermeasure cost appropriately to the selected damage modes.

Key Words : Seismic risk assessment, Chemical plant facilities, Damage level, Fault tree, Productivity of plants

1. はじめに

現在の化学プラントの耐震設計は、主に高圧ガス設備等耐震設計基準(通産省改正告示143号)の設計方法に準拠して行われている。同告示においては、「プラントの損傷あるいは機能喪失によるプラント外の被害を最小限にとどめる」ことを目標に、「供用期間中に発生する確率の高い地震動」および「供用期間中に発生する確率が低い直下型、海溝型の巨大地震による高いレベルの地震動」の2レベルの地震動について保有すべき耐震性能が規定されている。同告示の耐震目標は、公衆の安全を確保することにある。

企業の社会的責任が問われる今、公衆の安全確保は最重要課題であるが、「製品供給の確保」、「設備の維持および被害の抑止」といった企業活動の持続性も求められている。今後は、耐震設計に関して、従来の「安全性の確保」に加え、「運転性能の確保」が企業に求められるようになると思われる。

運転性能の確保のための施策には、地震被害を抑止する「リスクコントロール」と、被災後の運転資金を補填する「リスクファイナンス」とがあり、これらを組み合わせることが実際的であるが、リスクファイナンスの負荷を軽減するためにも、まずリスクコントロールを実施することが重要である。なお、リスクコントロールの具体策としては、新規物件であれば設計地震動レベルの引き上げ、既存物件であれば耐震補強が挙げられる。

ところで、安全性の確保に関しては冒頭で述べたように、通産省改正告示143号で規定されているのに対し、運転性能の確保については明確な性能規定はない。したがって、安全性を確保するという条件を満たすならば、運転性能の確保については企業経営者の判断により性能規定を行う必要がある。性能規定の方法としては、例えば、ライフサイクルコストを最小化するような耐震性能

評価が近年では注目されており、費用と便益の観点から性能の妥当性が検討されるようになってきた。

しかし、プラント構造物は、その機能の複雑さにより、耐震施策と耐震性能の向上との関係が明確ではない。そのため、耐震投資額と耐震性能向上とを関連付ける必要があり、さらに、最適な耐震施策でなくてはならない。ここで、「最適な耐震施策」とは費用対効果が最大となる施策を示し、株主への説明責任という観点からも重要なものである。

本研究では、運転性能の確保に着目して化学プラントの最適耐震投資を実現するために、その前提となる最適耐震施策の策定方法を提案・検討する。

2. 評価方法の枠組み

本研究で提案する評価方法は、設備の耐震対策の投資額、および地震時の運転性能のレベル(地震後の再運転までの期間または補修の要否など)を仮定することにより、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。

この評価は次のような手順で行う。まず地震による被害を運転性能の観点から考慮した損傷程度の階級分け(以下、損傷レベル)を仮定する。仮定した損傷レベルごとのフォールト・ツリーを、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。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、これを用いてフォールト・ツリー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向上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。

評価手順を図1の評価フローに、また評価フローの説明を以下の箇条書きに示す。

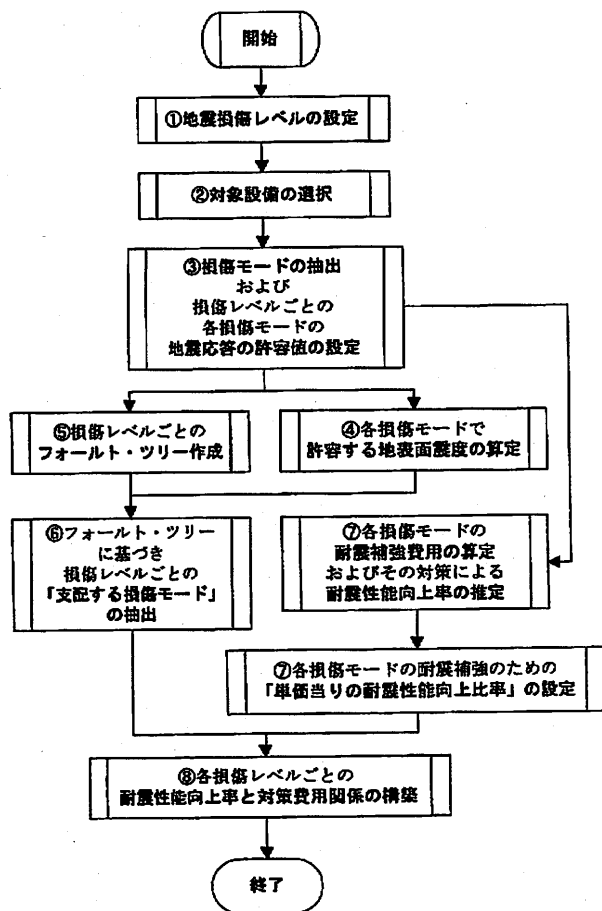


図1 評価フロー

- ① 地震損傷レベルの設定：プラント全体の地震による被害を運転性能の観点から耐震性能を評価するため、変形程度および損傷程度から判断して、運転状況および補修の要否を推定し、それらを尺度として、プラントの全体も含む対象設備に損傷レベルを設定する。
- ② 対象設備の選択：プラント全体の運転性能による損傷レベルを決定するときのプラントの運転に支配的な設備で、対策を実施する対象の範囲は、単独の設備から単一プロセスのまとまりとしてのユニット、さらにユニット集合体であるプラントの全設備までが考えられる。ここでは、評価対象とする設備および範囲を選択する。
- ③ 損傷モードの抽出：対象とする設備において、損傷モードを過去の震災事例、文献等から抽出する。それらの損傷モードは、地震応答の許容値で閾値を設定する。
- ④ 各損傷モードで許容する地表面震度の設定：対象とする設備の地震応答解析を行い、応答が許容値になる地震動の大きさの算定を行う。
この算定された地震動の大きさの指標として、地表面における震度（地表面面に算定された加速度を重力加速度で割ったもの。以下、地表面震度）を用いる。

⑤ 損傷レベルごとのフォールト・ツリー (FT) の作成：プラントのような多くの部材、部品で構成される構造物の損傷モードを抽出するため、因果関係・発生過程のような定性的な分析と確率計算による定量的な分析を両立する手段であるフォールト・ツリー（以下、FT）を用いる。本評価法では、基本事象としての損傷モードと、設備としての損傷事象との関連付けを行うため、AND ゲートまたは OR ゲートを活用して FT を作成する。

この FT は、対象設備並びに設備としての損傷事象（以下、設備の損傷事象）ごとに作成される。

⑥ 損傷レベルごとの「支配する損傷モード」の抽出：対象とする設備の損傷事象を決定している損傷モードを知るため、損傷レベルごとの FT を用いて、設備の損傷事象を決定する要因となる損傷モード（以下、「支配する損傷モード」）の抽出を行う。

⑦ 損傷モードの対策費用と耐震性能向上率の設定：損傷モードごとに費用対効果が最大の耐震対策を設定し、その耐震対策によって向上した耐震性能と、対策前の耐震性能との比率から求める割合を耐震性能向上率とする。

次に設備全体の耐震対策を考えた場合、損傷レベルごとに「支配する損傷モード」の許容する地表面震度の内、最も小さい地表面震度と損傷レベルを設定した耐震対策の目標となる地表面震度の比率から設備全体としての耐震性能向上率を求める。

さらに、損傷モードごとの耐震性能向上率は、耐震対策にかかる費用と、対策結果としての耐震性能の向上割合から「単価当りの耐震性能向上率」を求める。

⑧ 対策費用と耐震性能向上率との関係の構築：FT に基づき、損傷レベルごとに「支配する損傷モード」と「単価当りの耐震性能向上率」から、損傷レベルごとの地表面震度と対策費用および耐震性能向上率と対策費用の関係算定する。

この場合、対象設備としての全体の対策費用は「支配する損傷モード」の対策費用の総和として算定する。

3. 耐震評価実施における FT 作成

本研究では、前章で提案した「評価方法の枠組み」を実際の設備を対象として FT の作成までを検討した。

(1) 損傷レベルの設定と対象設備の選択

運転性能の観点から耐震性能を評価した損傷レベルの設定事例を表1に示す。この表では、対象設備における具体的な損傷事例についても例示した。

本研究では対象設備として化学プラントにおける代表的な設備であるスカート有する自立式の塔類（以下、スカート支持塔）を対象設備とした。対象設備の外形を図2に示す。

(2) 損傷モードの抽出およびそれらの地表面震度

本設備の耐震設計は高圧ガス設備等耐震設計基準（通産省改正告示143号）（以下、耐震告示）を適用しているため、損傷モードは「耐震告示の指針」に定義されている塑性率評価法で照査が求められている損傷モード」な

る。許容値は耐震告示の塑性率評価法に基づき、損傷レベルごとに許容塑性率で与えることになる。

表1 損傷レベルの定義

設定項目	損傷レベル1	損傷レベル2	損傷レベル3	損傷レベル4
変形程度	降伏変形量程度	降伏変形量を少し超える。	降伏変形量の2倍弱。	許容塑性変形限界。(崩壊等を防ぐ限界)
運転状況	継続運転	シャットダウンする。短期運転停止部分補修で再運転可能。	シャットダウンする。長期運転停止補修が済むまで再運転できない。	シャットダウンする。再運転不能
損傷程度(事例等)	運転停止しない損傷(ベースプレートのわずかな曲がり等)	軽微な補修により機能回復する程度の損傷(全面補修は定期検査まで延期可能な程度)	補修しなければ運転再開不能な程度の損傷(支持部にクラック発生、スカート変形等)	修復には再調達価格以上かかる。(塔本体の歪曲による曲がり)
補修の可否・期間の可能性(技術的可能性) [経済的可能性]	補修なしで使用可。(応急対応不要) [保守費用不要]	補修要。(早急な補修は不要) [費用要小]	3ヶ月程度の補修要。(早急に補修要) [費用要大]	補修には対応困難。(補修不能) [再調達価格要]

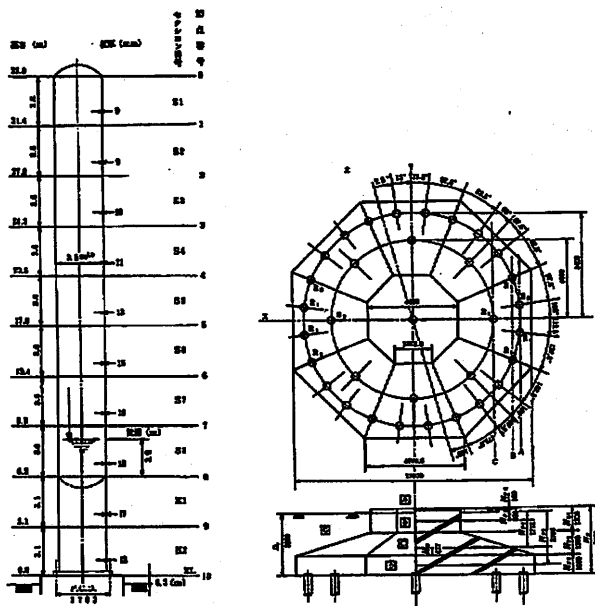


図2 対象設備(スカート支持塔)の概要

対象設備の損傷レベルおよび損傷モードごとの許容される地表面震度は、耐震告示に準拠してレベル2耐震性能評価法を適用して算定する。具体的には高圧ガス設備等耐震設計指針³⁾の方法を適用し、塔及び基礎共に応答解析方法はエネルギー法を用いる。ただし、エネルギー法のうち塔については塑性率評価法を、また基礎については保有耐力評価法を適用している。

本研究における実施手順は以下の通りとする。地表面における水平震度を仮定し、その震度で塔の応答解析を実施し、塔の各部位の応答塑性率を求めると共に基礎へのローディングデータを作成する。次にそのローディングデータ及び基礎自体にかかる地震荷重を考慮して基礎の応答値を算出する。ここで、基礎に関しては、その応答値を「上記指針のレベル1地震動に対する耐震性能評価で用いる許容応力設計法での許容値」で除した値を応答塑性率と仮定する。結果として、塔および基礎共に損傷レベルごとに各損傷モードの許容される地表面震度を、応答塑性率と許容塑性率が一致する時の値として算定した。

算定結果を表2に示す。評価部位は、表2で示した塔と基礎の損傷モードを設定した部位とした。

表2 各損傷モードの地表面震度

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	鋼の引張降伏に係る降伏	0.69	0.92	1.42	1.71	
	鋼の圧縮座屈に係る降伏	0.49	0.58	0.61	0.85	
	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	
基礎の損傷モード	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	
	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	
	杭体の圧縮座屈強度	1.54	1.91	2.40以上	2.40以上	
	杭体の引張座屈強度	0.78	0.82	0.87	0.95	
	フーチング	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
	フーチング上端筋の必要鉄筋量	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		

(3) FTを用いた地震損傷度の評価

ここでは、損傷レベル1および4に対応したFTを図3、4に示す。

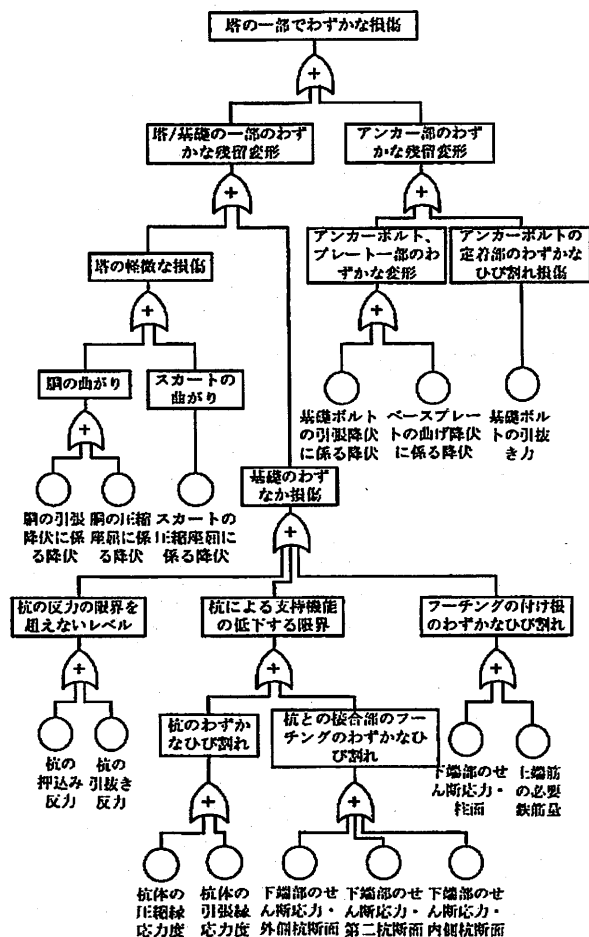


図3 損傷レベル1のスカート支持塔のFT

このFTには基本事象を前節に示した損傷モードとし、中間事象を塔自体の損傷、塔を支持する基礎及び杭の損傷、並びに塔と基礎を接続するアンカーボルト自体とア

