

# 高圧ガス施設の地震対策について

—その現状と若干の問題点—

鈴木 浩平\*

## 要 約

1978年6月の宮城県沖地震により、仙台市近辺で多くの家屋・建築構造物及び道路・橋梁など土木構造物が被害をうけたが、同時に、都市ガス用ガスホルダーが崩壊炎上したり、原油タンクが破損して重油が海上に流出するという事故が生じた。このようなプラント施設、とくに高圧ガス施設の地震による損傷や機能損失は、施設内はもとよりその近郊住民に与える損害は甚大になりうる事が予想される。都市の地震防災を考えるに当り、こうしたプラント施設の地震対策は近年ますます重視されなくてはならない。

筆者は数年来、高圧ガス設備の耐震対策実施の一端にかかわってきた経験をもつが、これらの施設の地震対策の現状を紹介し、今後解決されるべき若干の問題点をさぐってみた。

## はじめに

1978年6月の宮城県沖地震において、東北石油仙台製

油所内で容量31,500klの重油タンク2基と23,700klの軽油タンク1基の底部が破損し、全貯蔵量が流出するという事故があったのは記憶に新しい。(写真1参照) また、仙台市ガス局原町供給所の低圧有水ガスホルダー

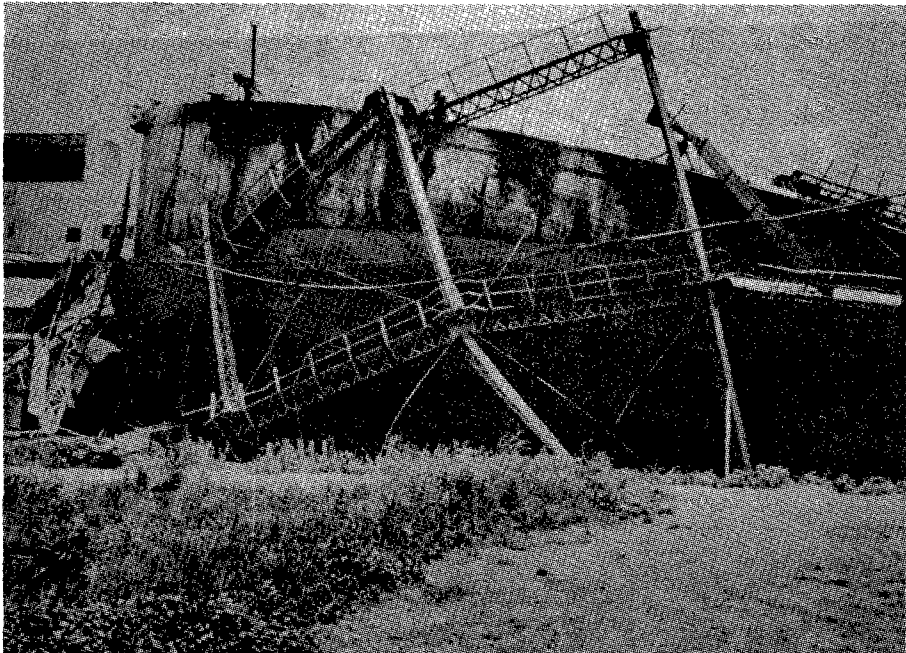


写真1 宮城県沖地震における石油タンク被害(「生産研究」30巻11号より)

\* 東京都立大学都市研究センター, 工学部

(容量17,000m<sup>3</sup>、高さ27m、直径38m)の最上段円筒が崩壊炎上した。幸いにして、これらの事故により周辺住民の人命財産が損われることはなかったが、近い将来に來襲が予想される巨大地震に対してプラント施設が安全であり、かつその機能性が保持されるよう十分な対策が講じられねばならない。とくに、石油・化学コンビナート等における高圧ガス施設については従来からその耐震設計指針の作成など具体的対策を進めることが要請されていた。

これをうけて、昭和49年12月に通産省の高圧ガス及び火薬類保安審議会に地震対策分科会(分科会長、鶴戸口英善東京大学名誉教授)がおかれ、耐震設計基準作成のための審議・作業がなされてきた。数年にわたる審議作業の結果、昭和55年8月「高圧ガス製造施設等耐震設計基準」(通称「4次案」ともいう)が報告としてまとめられた。このような基準は、地方自治体の段階でも作成されつつあり、神奈川県が昭和48年に作成した「高圧ガス製造施設耐震設計技術基準」はその先駆的なものである。

一方、新しく建設する高圧ガス施設は、こうして制定された、あるいは制定される予定の「技術指針」に基づいて設計するとしても、すでに設計されている既存施設の耐震安全性をどう評価し、危険と判定されたものをどう修復するかという問題も同様に重要視されなくてはならない。とくに、大規模地震対策特別措置法に基いて、地震防災対策強化地域に指定された東海地区においてはこの点検は重要であり、早急に何らかの対策がなされなくてはならない。筆者は、ここ2、3年来、こうした既存の高圧ガス施設の耐震性診断にかかわる仕事の一部を担ってきた経験をもつが、実際に点検をすすめること自体にもいくつかの困難な問題がある。

本稿では、上記の観点から都市地震防災の重要な一翼をなす高圧ガス施設の耐震設計及び耐震性診断の考え方と現状について紹介・解説し、そこに横たわる若干の問題点を指摘してみたい。

## 1. 耐震設計基準の考え方

生産施設、プラントの耐震設計に関する基準または指針としては大きく分けて

- (1) 原子力発電施設を対象とするもの
- (2) 化学プラント、石油コンビナートなど一般産業施設を対象とするもの

の二種類がある。前者に対する基準はわが国ではまだ完成されていないが、アメリカでは、例えば ASME Section III Code for Nuclear Vessels and Pipings などがあり、日本でも1970年に「原子力発電所耐震設計技術指針」(いわゆる「青本(あおほん)」)が日本電気協

会で策定されている。後者についていえば、本年8月に通産省高圧ガス及び火薬類保安審議会から、「高圧ガス製造施設等耐震設計基準」が5年半にわたっての審議を経て報告されているのを始め、48年4月に神奈川県でも同趣旨のものが制定されている。

これら産業施設の「基準」を作成、制定する際の基本的考え方のひとつに、“開かれた基準”としてのそれがある。“開かれた基準”は、“閉じた基準”に対応して与えられた術語であるが、後者がその基準の中にそれを実施するに当たって必要な知識がすべて網羅されているのに対し、前者は、基本概念だけを規定して、実施運用に際しては例えば力学の法則など一応の技術知識は当然有しているものとして含めていない。最近の耐震設計、および後に述べる耐震診断に対する要請は、その内容がきわめて複雑多岐であり、従来の“閉じた基準”の概念では十分に文章化しえないという問題を反映して出てきたのが“開かれた基準”の概念であるといえる。

すなわち、“開かれた基準”では 1)基本的考え方、2)基本概念、3)技術的選択、4)技術的制限、5)近似手法などが示されている。先に挙げた ASME の Section III や通産省、神奈川県基準はいずれもこの形式をとっているといえる。例えば、神奈川県基準をみると、基準自体はわずか1ページ半であり

§ 1. 一般(目的、適用範囲、用語の定義)

§ 2. 耐震設計(重要度による分類、耐震解析、設計地震の地震入力、設計許容応力、一般事項)

となっている。それに加えて、解説が4ページほどあり、各項目に対する若干の補足を発行して運用上の便宜をはかれるようにしてある。

このような新しい基準は、近年の技術進歩とその過程を反映しているものであり、東京大学の柴田碧教授の言葉を引用すると、“オーケストラの指揮”に当る。すなわち、従来の閉じた基準はその内容がすべてを網羅した教科書的、“楽譜”的であったのに対し、開かれた基準は技術の進歩についてその内容をも変化させざる余地を残し、そのときどきの最新の正しい技術知識を基にして運用できるようになっている。もちろん、このような基準の適用に当たっては、それが正しく行われているかどうかをチェックできる、より高度の知識をもった審査機関と必要となってくるのは当然であろう。

産業施設の耐震設計基準を策定するに当たって重要なもう一つの考え方は、地震によって想定される緊急事態、事故状態についてのとらえ方である。先にも述べた二種類の生産施設のうち、原子力発電所についていうと、耐震設計の主目的は、それが破壊の大地震に遭遇した場合に、その損傷によって発生するかもしれないプラント内人員及びプラント外の一般公衆への放射線災害を完全に防止しうるような安全性を確保することにあるとされ

ている。原子力施設内の構造物、配管などの耐震設計に当っては上記の観点が見ぬかれており、各種の緊急状態や事故状態を想定して、例えその発生確率が非常に低い場合でもなおその異常状態における安全性が確保されるよう設計がなされなくてはならないという厳しさがあ

る。  
一方、原子力施設以外の、火力発電所、化学プラント、石油コンビナートなどの一般産業施設についていうと、その耐震設計の目的が、地震による事故や設備の破損が事業所外の地域住民の生命・財産に損害を与えないようにすることは原子力施設の場合と同様であるが、その周辺地域に及ぼす可能性のある災害は、原子力発電所の場合とは異なり、放射線の拡散による災害のような問題はない。化学プラントや石油コンビナートなどの施設には、非常に多種多様な構造物、機器などが含まれており、水タンク、冷却塔や低圧熱交換器のように、例えそれらが地震により破損しても、それほど大きな災害を及ぼすとは考えられないものから、重油、ガソリン、液化石油ガス、塩素、アンモニアなどの貯槽や、高温高圧の反応炉などのように、その破損により、大火災、爆発、有毒ガスの拡散が誘起され、地域住民に大災害を与える危険性の大きなものまでである。

これら多種の施設を一様に、例えば、原子力施設と同様の厳しい基準で耐震設計を行うとすると、それに要する建設費は恐らく膨大なものとなり、経済的にも、安全工学上も妥当とはいえない。すなわち、これら一般産業施設については、各種の施設について個々にその災害発生

の潜在的危険性を評価して、安全工学的及び経済的観点の両面から判断した基準が策定されるべきである。本年8月に報告された「第4次案」にはその観点が明確につらぬかれている。以下本稿では、この「高圧ガス製造施設等耐震設計基準」（以下「基準」という）に書かれている内容に沿ってその考え方を説明する。

## 2. 施設の重要度分類

「基準」では、高圧ガス製造施設、特定高圧ガス消費施設、及び保安上これらに関連する施設のうち、その対象を塔類及び貯槽類に限定して適用するとしており、それらの破壊的地震によって発生する損傷または機能喪失が引起す潜在的な災害危険性の程度に従って、次の4段階に分類している。

- ・重要度Ⅲ；通常の耐震性を要するもの
- ・重要度Ⅱ；その損傷もしくは機能喪失が、事業所外の第三者の生命・財産に多少の影響を与えるおそれのあるもの
- ・重要度Ⅰ；その損失もしくは機能損失が、事業所外の第三者の生命・財産に多大の損害を与える恐れのあるもの

ただし、可燃性ガス及び毒性ガスに係わる設備のうち、内容物重量が、可燃性ガスにあっては100 t以上、毒性ガスにあっては30 t以上のものの重要度分類はひとつ上のランクに変更することとし、その場合重要度Ⅰに該当する設備は新たに重要度Ⅰaに分類することになる。

この重要度分類の背景になっている評価の指標は、次式に示す危険度係数である。

表 1 式(1)の  $m_i$

| 仮想被災面積に含まれる地域の区分 | 事業所内 | 工業専用<br>地<br>区 | 工業地区 | 準工業地区,<br>住居地区, 商<br>業地区 | 山林, 原野,<br>緑地 | 海, 河川等 |
|------------------|------|----------------|------|--------------------------|---------------|--------|
| $m_i$            | 5    | 10             | 20   | 100                      | 5             | 0      |

表 2 影響度係数  $k_j$

| 危険性の種類<br>影響度<br>係数 $k_j$ | 爆風圧<br>kg/cm <sup>2</sup><br>以上 | 毒 性                                | 燃 焼    | 輻 射 熱   |   |
|---------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------|---|---|
|                           |                                 |                                    |        | 短期輻射<br>(ファイヤー・ボール)<br>kcal/m <sup>2</sup> ・hr 以上 | 長期輻射<br>(プール火災)<br>kcal/m <sup>2</sup> ・hr 以上 |
| 1                         | 3                               | 毒性ガス<br>の種類に<br>応じて別<br>に定める<br>数値 | 完全燃焼域  | 100,000   | 10,000  |
| 0.3                       | 1                               |                                    | 爆発下限界域 | 36,000  | 7,000   |
| 0.1                       | 0.3                             |                                    | —      | 10,000  | 4,000   |
| 0.03                      | 0.1                             |                                    | —      | 4,000   | 2,400   |

表 3 可燃性ガスの重要度分類表

| W         |          | 10 t 未満 | 10 t 以上<br>100 t 未満 | 100 t 以上<br>1000 t 未満 | 1000 t 以上<br>10000 t 未満 | 10000 t 以上 |
|-----------|----------|---------|---------------------|-----------------------|-------------------------|------------|
| x         |          |         |                     |                       |                         |            |
| 20m 未満    |          | I       | I                   | I                     | I                       | I          |
| 20m 以上    | 40m 未満   | II      | I                   | I                     | I                       | I          |
| 40m "     | 90m "    | II      | II                  | I                     | I                       | I          |
| 90m "     | 200m "   | III     | II                  | II                    | I                       | I          |
| 200m "    | 400m "   | III     | III                 | III                   | II                      | II         |
| 900m "    | 2,000m " | III     | III                 | III                   | III                     | II         |
| 2,000m 以上 |          | III     | III                 | III                   | III                     | III        |

表 4 第1種毒性ガスの重要度分類表

| W         |          | 5 t 未満 | 5 t 以上<br>20 t 未満 | 20 t 以上<br>100 t 未満 | 100 t 以上<br>500 t 未満 | 500 t 以上 |
|-----------|----------|--------|-------------------|---------------------|----------------------|----------|
| x         |          |        |                   |                     |                      |          |
| 100m 未満   |          | I      | I                 | I                   | I                    | I        |
| 100m 以上   | 200m 未満  | II     | I                 | I                   | I                    | I        |
| 200m "    | 500m "   | III    | II                | I                   | I                    | I        |
| 500m "    | 1,000m " | III    | III               | II                  | I                    | I        |
| 1,000m 以上 |          | III    | III               | III                 | II                   | I        |

表 5 第2種毒性ガスの重要度分類表

| W         |          | 5 t 未満 | 5 t 以上<br>20 t 未満 | 20 t 以上<br>100 t 未満 | 100 t 以上<br>500 t 未満 | 500 t 以上 |
|-----------|----------|--------|-------------------|---------------------|----------------------|----------|
| x         |          |        |                   |                     |                      |          |
| 50m 未満    |          | I      | I                 | I                   | I                    | I        |
| 50m 以上    | 100m 未満  | II     | I                 | I                   | I                    | I        |
| 100m "    | 200m "   | II     | I                 | I                   | I                    | I        |
| 200m "    | 500m "   | III    | II                | I                   | I                    | I        |
| 500m "    | 1,000m " | III    | III               | II                  | I                    | I        |
| 1,000m 以上 |          | III    | III               | III                 | II                   | I        |

- 備考 1. Wは設備の貯蔵能力（処理設備にあっては設備内にあるガスの重量）を表わす。  
 2. xは設備から当該設備が設置される事業所の境界線（当該境界線に接続する海、河川、湖沼その他保安物件が設置されるおそれのない土地がある場合にあっては、当該土地の外縁）までの距離を表わす。  
 3. 第1種毒性ガスとは、ホスゲン、二酸化窒素、シアン化水素、塩素及びふっ素をいう。  
 第2種毒性ガスとは、ふっ化水素、三ふっ化ほう素、硫化水素、二酸化硫黄、塩化水素及びブロムメチルをいう。

$$H = \sum_i m_i (\sum_j k_j A_j)_i \quad (1)$$

ここで、 $m_i$  は仮想被災面積の人口密度を考慮する地域係数であり、地域の状況に応じて表1に示すように与え

られている。また、 $k_j$  は施設からの距離を考慮する仮想被災地域内の影響度の係数であり、それぞれの危険性に応じて表2に示すような値となる。 $A_i$  は影響度レベルに対応する仮想被災面積である。この被災面積は、施設

が保有するガスの種類（毒性ガス、可燃性ガス、可燃性毒ガス）のそれぞれが呈する危険性の種別に応じて求められる。

こうして計算した式(1)の危険度係数 $H$ を基準として重要度の分類を表示したものが表3～表5である。なお、「基準」には、防災施設を施した場合の「緩和規定」があり、地震時及び地震後における災害拡大防止対策が十分に講じられていると認定されるときには、その重要度が変更できるようにしてある。

### 3. 耐震設計で考慮すべき地震動

生産施設の耐震設計において、入力地震動をいかに選択するかは重要な問題である。すなわち、施設等はこの設計地震動の影響（地震動による慣性力のほか、内容液のスロッシング等により生ずる影響をも含む）を考慮して耐震設計を行わなければならない。

「基準」では、この設計地震動を、前節で述べた設備の重要度及び各地域ごとに差をつけて規定している。もとより、あるひとつの地震時に加わる地震力が、施設によって異なることはありえないが、同一地震力をうけても、施設の重要度によって地震時にそれらが維持されるべき状態に差をつけるためこのような手段をとっている。こうすると地震時の許容応力限界と正常時の許容応力との関係が各重要度クラスとも共通の基盤で考えられることになり、地震時許容応力の設定が容易になるといふ利点がある。

#### 3.1 静的震度

静的な耐震設計が許される施設に対する設計用の静的震度は次のように規定されている。

(イ) 設計水平静的震度  $K_{SH} = \beta_3 \beta_4 K_{CH}$  (2)

(ロ) 設計鉛直静的震度  $K_{SV} = \beta_3 \beta_4 K_{CV}$  (3)

ここで、 $K_{CH}$ 、 $K_{CV}$ は地震基盤面における水平震度、鉛直震度であり、

$K_{CH} = 0.150 \beta_1 \beta_2$ ,  $K_{CV} = 0.075 \beta_1 \beta_2$  (4)

で与えられる。この式において $\beta_1$ は「重要度係数」と呼ばれ、設備の重要度に応じて表6のように区分される。また $\beta_2$ は「地域係数」と呼ばれ、図1の地域区分をもとにして表7に示す値から選ばれる。

式(2)、(3)中の係数 $\beta_3$ と $\beta_4$ はそれぞれ「表層地盤増幅係数」、「震度分布係数」であり、次のように選ばれる。 $\beta_3$ は、第1種から第4種までの地盤種別に応じて

表6 重要度係数

| 設備の重要度    | I a | I   | II   | III  |
|-----------|-----|-----|------|------|
| $\beta_1$ | 1.0 | 0.8 | 0.65 | 0.50 |

表7 地域係数

| 地域区分*     | 特A  | A   | B   | C   |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| $\beta_2$ | 1.0 | 0.8 | 0.6 | 0.4 |

\* 地域区分は図1に示す

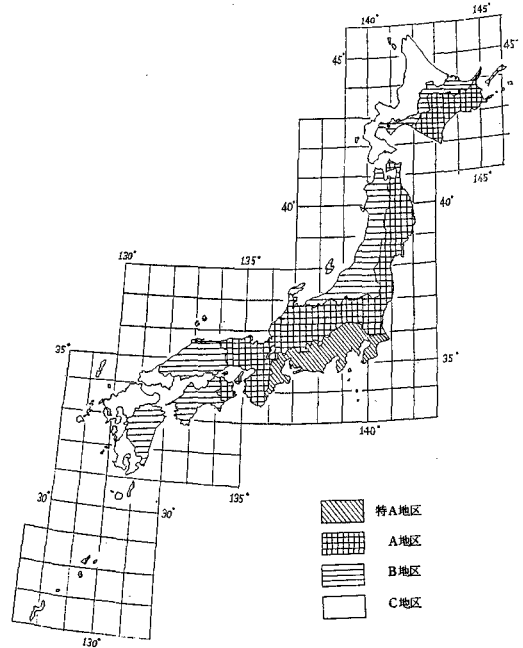


図1 地域区分

表8 表層地盤増幅係数

| 区分        | 第1種         | 第2種      | 第3種            | 第4種                 |
|-----------|-------------|----------|----------------|---------------------|
| 地盤種別      | 第3紀以前の地盤(注) | 洪積層地盤(注) | 第1, 2, 4種以外の地盤 | 埋土又は沖積層の厚さが25m以上の地盤 |
| $\beta_3$ | 1.4         | 2.0      | 2.0            | 2.0                 |

(注) 次の場合は、第3種又は第4種に該当する表土層があっても第1種又は第2種地盤上にあるものとみなすことができる。

- ① 構造物が杭等、剛な基礎により直接支持されている場合であって、表土層の深さが構造物の重心高さの1/2に相当する深さ以下の場合
- ② 表土層の深さが、構造物の重心高さの1/5に相当する深さ以下の場合

表8に示す値から選択される。 $\beta_4$ は、鉛直方向地震動に対しては一律に $\beta_4=2.0$ とするが、水平動については、構造物の高さ $H(m)$ 、基礎部の深さ $a(m)$ により下記のようにする。

$$(1) \left. \begin{aligned} \beta_4 &= 2.0 && ; H \leq 16 \\ &= 1.04 + 0.06H && ; 16 < H \leq 35 \\ &= 3.14 && ; H > 35 \end{aligned} \right\} (5)$$

$$(2) \left. \begin{aligned} \beta_4 &= 2.0 - a/5 && ; a \leq 5 \\ &= 1.0 && ; a > 5 \end{aligned} \right\} (6)$$

3.2 修正震度

修正震度法で耐震設計を行う設備は、次式に示す設計修正震度によって計算をすすめる。

(イ) 設計水平修正震度,  $K_{MH} = \beta_3 \beta_5 K_{CH}$  (7)

(ロ) 設計鉛直修正震度,  $K_{MV} = \beta_3 \beta_5 K_{CV}$  (8)

$\beta_3, K_{CH}, K_{CV}$ についてはすでに述べたものを使うが、新しい係数 $\beta_5$ については若干の説明を要する。 $\beta_5$ は対象施設の振動特性及び表8に示す地盤種別を考慮した応答倍率である。

水平方向地震動の応答倍率についていうと、図1の地域区分、および表8の地盤種別に応じて別途に作成された基準応答倍率(図2)をもとにして $\beta_5$ を求める。た

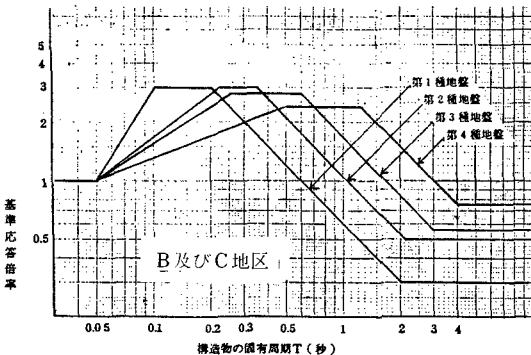
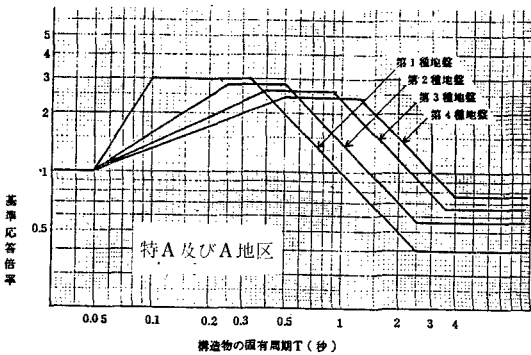


図2 基準応答倍率

表9 減衰定数 $h$

| 構造物等の種類 |                                  | $h$ (%) |
|---------|----------------------------------|---------|
| 塔 類     | 固有周期 1.5 秒未満                     | 3       |
|         | 固有周期 1.5 秒以上                     | 1       |
| 球 形 貯 槽 | 鋼管ブレースによる支持                      | 3       |
|         | タイロッドブレースによる支持                   | 5       |
| 横置円筒形貯槽 | 一体コンクリート支持                       | 7       |
| 平 底 貯 槽 | 液面揺動                             | 0.5     |
| 架 構     | 鉄骨建屋及びブレースを有する架台、非溶接架台           | 5       |
|         | 上記以外の溶接鋼構造                       | 3       |
|         | 鉄筋又は鉄骨コンクリート構造(ラーメン構造又はそれに準ずるもの) | 5       |
|         | 鉄筋又は鉄骨コンクリート構造(壁量の多いもの)          | 10      |

表10 基準応答倍率に対する乗数

| $h$ (%) | 0.5  | 1.0  | 2.0  | 3.0  | 5.0  | 7.0  | 10.0 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|
| 乗数      | 1.73 | 1.55 | 1.32 | 1.19 | 1.00 | 0.88 | 0.78 |

だし、対象施設の減衰特性と固有周期を考慮し、まず減衰定数を構造物の種別により表9から選定する。そして選んだ減衰定数 $h$ (%)に応じて表10の乗数を求め、この乗数と図2から得た基準応答倍率の積をもって $\beta_5$ の値とする。もし、固有周期 $T$ が0.3秒未満の施設でこうして求めた $\beta_5$ が1.5を下回るときは $\beta_5=1.5$ とし、 $T$ が0.3秒以上で $\beta_5$ が0.75を下回るときは0.75とするとしている。

鉛直方向の応答倍率については、修正震度法による計算の場合も、またモード解析法による場合も得られた固有周期の2倍の値をもって固有周期として水平方向の場合と同様に $\beta_5$ を求めることになっている。しかし、固有周期を必ずしも求めなくとも、スカートを有する塔槽類など鉛直方向に比較的剛であるとみなせるものに対しては $\beta_5=1.5$ 、その他の構造物では $\beta_5=2.0$ をとってもよいとしている。

「基準」は、また、構造物の応答解析法、設計応答ス

表11 通商産業省・高圧ガス及び火薬類保安審議会・地震対策分科会・耐震設計基準，耐震設計用許容応力

min  $S_u$  : 最小引張強さ  
 min  $S_y$  : 最小降伏点又は 0.2% 耐力  
 $S_u$  : 引張強さ  
 $S_y$  : 降伏点又は 0.2% 耐力

| 耐震設計用基準応力 (以下の値の最小のものとする)         |  |                            | 耐震設計用許容応力                                 | 備考   |   |
|-----------------------------------|--|----------------------------|---|--|---|
| 構造の種類                             | 常 温  | 設計温度                       |   |  |   |
| 耐<br>圧<br>部<br>材<br><br>( $S^*$ ) | 一 般<br>(耐圧部材)  | min $S_u$ の60%             | $S_u$ の60%                                | 耐圧部材の耐震設計用許容引張応力 ( $f_t$ )<br>$f_t = S^*$<br>耐圧部材の耐震設計用許容圧縮応力 ( $f_c$ ) (以下の最小のもの)<br>$f_c = S^*$<br>$f_c = \frac{\sigma_k}{1.5}$<br>$\sigma_k$ : 限界座屈応力<br>耐圧部材の耐震設計用許容せん断応力 ( $f_s$ )<br>$f_s = 0.6 S^*$ | 低温材：室温以下の低温で使用する低温用アルミニウム合金材及び9%ニッケル鋼材<br>高温材：室温以上高温で使用するオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金材 |
|                                   |  | min $S_y$ の90%             | $S_y$ の90%                                |  |   |
|                                   | 低温材  | _____                      | $S_u$ の60%<br>$S_y$ の90%                  |  |   |
| 高温材                               | min $S_u$ の60%*<br>min $S_y$ の90%**                    | $S_u$ の60%<br>$S_y$ の90%   |   |  |   |
| 耐圧部テンションボルト ( $S$ )               | min $S_u$ の20%*<br>min $S_y$ の25%**                    | $S_u$ の25%<br>$S_y$ の62.5% | 耐圧部テンションボルトの引張応力に対する耐震設計応力<br>$f_t = 2 S$ | 高圧部テンションボルトのうち低温で使用されるものについては、脆性遷移温度の検討を行なうこと  |   |
| 構造材 (支持構造材及びボルト材)                 | 日本建築学会「鋼構造設計基準」及び「鉄筋コンクリート構造設計基準」における短期応力に対する許容応力度を用いる |                            |   | 支持構造材及びボルト材で低温で使用されるものについては、脆性遷移温度の検討を行なうこと  |   |

\* ただし、焼入れ焼もどしを行っていない材料の場合は25%とすることができる。

\*\* ただし、焼入れ焼もどしを行っていない材料の場合は62.5%とすることができる。

ベクトルについても記しているがここでは詳しく解説しない。基本方針として、例えば動的設計，静的設計の選択，さらに動的設計における修正震度法，モード解析法，正弦波による応答解析法および時刻歴応答解析法の選択について“開かれた基準”の精神がうめられていることを強調しておこう。

#### 4. 地震時の許容応力について

化学プラント，石油コンビナートなどの施設を構成する各種の機器・配管・建造物の設計基準に規定されている通常の許容応力は，これらの正常運転時に作用する荷重に対して十分安全性を保持しうるように定められている。ところがすでに述べたように，高圧ガス諸施設の耐

震設計で考慮する地震は，200~300年に一度という非常に頻度の低い破壊的地震である。従って，正常運転状態を考慮した許容応力を耐震設計にそのまま適用することは設計技術的にも無理があり，見かけの安全性を過大に評価していることになる。このことから，耐震設計で考慮する許容応力は，正常運転時の許容応力をもとにしてそれにある割り増しを与えた耐震許容応力（応力の許容限界）を設定することが必要となる。

この地震時許容応力に与えるべき割り増し量の設定に当たっては，施設に不当な過大変形や崩壊・破損が発生してはならないという条件を考える必要がある。具体的には，弾性計算による地震時の最大応力または応力強さを使用材料の降伏応力  $S_y$  および引張り強さ  $S_u$  の適当な割合以下に制限し，それによって発生する変形が，施設

表12 強化地域内の立形、枕形、及び球形貯槽の基数

| 業種     | 機種           | 点検の種類<br>(目視+数解)または(目視) | 神奈川 | 長野 | 山梨  | 静岡  | 愛知 | 岐阜    | 合計  |
|--------|--------------|-------------------------|-----|----|-----|-----|----|-------|-----|
| L<br>P | 立形           | 全て10t以上(目+数)            | —   | —  | —   | 9   | —  | —     | 9   |
|        | 枕形           | 10t以上(目+数)              | 90  | 17 | 42  | 332 | 2  | 3     | 486 |
|        |              | 10t以下(目)                | 7   | —  | 4   | 10  | —  | —     | 21  |
|        |              | 地下(目)                   | 4   | —  | —   | 19  | —  | —     | 23  |
|        |              | 小計                      | 101 | 17 | 46  | 361 | 2  | 3     | 530 |
| 球形     | 全て10t以上(目+数) | 5                       | 2   | —  | 32  | —   | —  | 39    |     |
|        | 中計           | 106                     | 19  | 46 | 402 | 2   | 3  | 578   |     |
| 一<br>般 | 立形           | 液酸, CE(目)               | 13  | —  | 1   | 42  | —  | —     | 56  |
|        |              | オートクレーブ等(目)             | 10  | —  | —   | —   | —  | —     | 10  |
|        |              | 小計                      | 23  | —  | 1   | 42  | —  | —     | 66  |
|        | 枕形           | 10t以上(目+数)              | 11  | —  | —   | 24  | —  | —     | 35  |
|        |              | 10t以下(目)                | 5   | —  | —   | 2   | —  | —     | 7   |
|        |              | 小計                      | 16  | —  | —   | 26  | —  | —     | 42  |
|        | 球形           | 10t以上(目+数)              | —   | —  | —   | 2   | —  | —     | 2   |
|        |              | 10t以下(目)                | —   | —  | —   | 2   | —  | —     | 2   |
|        |              | 小計                      | —   | —  | —   | 4   | —  | —     | 4   |
|        |              | 中計                      | 39  | —  | 1   | 72  | —  | —     | 112 |
| 冷<br>凍 | 枕形           | 10t以上(目+数)              | —   | —  | 2   | 1   | —  | —     | 3   |
|        |              | 10t以下(目)                | 43  | 23 | 38  | 223 | —  | 3     | 330 |
|        |              | 小計                      | 43  | 23 | 40  | 224 | —  | 3     | 333 |
|        | 立形           | 10t以下(目)                | 2   | —  | —   | —   | —  | —     | 2   |
|        | 中計           | 45                      | 23  | 40 | 224 | —   | 3  | 335   |     |
|        | 目視+数値解析      | 106                     | 19  | 44 | 400 | 2   | 3  | 574   |     |
|        | 目視           | 84                      | 23  | 43 | 298 | —   | 3  | 451   |     |
|        | 合計           | 190                     | 42  | 87 | 698 | 2   | 6  | 1,025 |     |

の構造保全上ならびに機器の機能維持の上から要求される変形の制限値以内に納まるようにする。さらに、地震によって繰返される応力がいわゆる shake down 限界以下にあって変形の進行ならびに疲労破損を発生しえないように、適切な割り増し量を定める。表11は、このような考え方のもとで「基準」に策定された耐圧部材、耐圧テンションボルトの耐震設計用許容応力及び平底貯槽の許容応力の算定をまとめてある。これらの策定にあたっては、材料工学の専門家から成る委員会での数年間にわたる審議がベースになっており、数度にわたり改定されたものであることをつけ加えておく。

つぎに、もうひとつの重要な観点として、巨大地震時における各種施設・構造の破損確率を推定するという考え方があつた。この考え方は、先に述べた原子力発電施設の耐震設計にあたってより重視されるべきであるが、高圧ガス施設の設計に際しても当然考慮されてもよいものである。すなわち、この場合、想定される設計地震の発生確率に対して、採用した割り増しの許容応力が作用する構造・施設の破損確率に見合う値をとり、設計の安全性または信頼度が、設計地震の遭遇を考慮しても低下しないような限度に許容応力の割り増しを制限するものである。しかし、このような破損確率的評価は、入力



なる地震そのものが、きわめて不確実な事象であることもあり、非常にむつかしい。今後、この面での研究の発展と、実験などでのデータの蓄積が望まれるゆえんである。

### 5. 既存設備の地震対策について

すでに詳しく述べたように、今後高圧ガス施設を新し

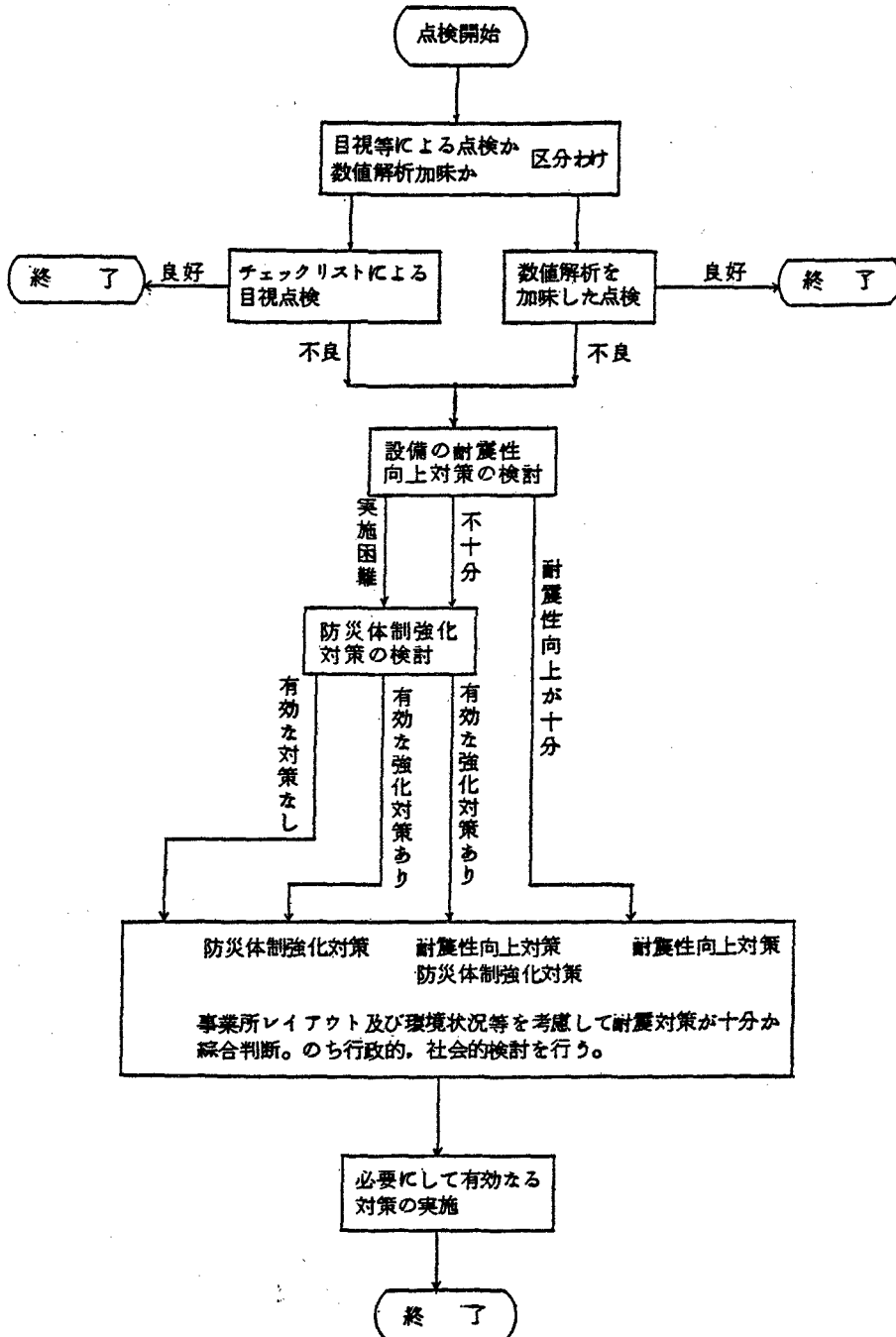


図 3 耐震性検討作業フローチャート

く建設する場合には、今年8月に報告された「基準」に従って設計がなされることになるだろうが、既に建設されている施設の耐震性の判定して、必要な補強を行うことも非常に重要である。

表12には、大規模地震特別対策措置法に基づく地震防災対策強化地域に指定された県に設置されている高圧ガス第一種製造者の施設のうち、球形、枕形、立形の貯槽の基数を示している。

このような既存設備に対する地震対策として、現在、通産省及び各自治体の指導の下でチェックがすすめられている。その基本的考え方は、耐震設計基準に準拠してはいるが、以下のようなになる。すなわち、対象設備をもつ各事業所の所在する地域に影響を及ぼすと予想される破壊的地震の発生に際して、高圧ガス製造施設の破壊から起る災害を最小限に抑止し、とくに施設周辺の第三者に対して重大な被害を与えないことを目標にして、まず簡便な方法で一次判定を行い、問題のある個所には、より詳細な検討を行うか、あるいは耐震性向上対策や防災体制強化対策を総合的に検討して必要な対策を実施するというものである。

現状はいわゆる事業所ごとのチェックが始まった段階であり、対策は次年度以降のことになる予定である。図3は、上述の耐震性検討のフローチャートである。このなかの目視点検によるチェックのみでよいか、数値解析をも加味して点検するかとの区分けについては図4を使う。すなわち、貯槽の保有量と、その第2種保安物件までの距離をパラメータにして、各ガス種別に描かれた境界線(斜線を引いたもの)を基準にして、目視か数値計算かの区分けを行うのである。表13は、横置円筒貯槽及び受槽の目視によるチェックリストの例であり現在はこの表によって、通産省や自治体(強化地域に指定されていない自治体をも含む)で事業所ごとにすすめられつつある。

数値解析が必要と判断された施設については、その数が全施設数の過半数を越える(表12参照)ことをも勘案し、短期間に作業を終了させる必要性から、解析モデル、解析上の仮定などに条件を課して非常に簡便化している。このことから当該施設がこれら条件に適合するかどうかの事前調査が義務づけられている。

貯槽の耐震性診断について特徴的なことは、「応力の

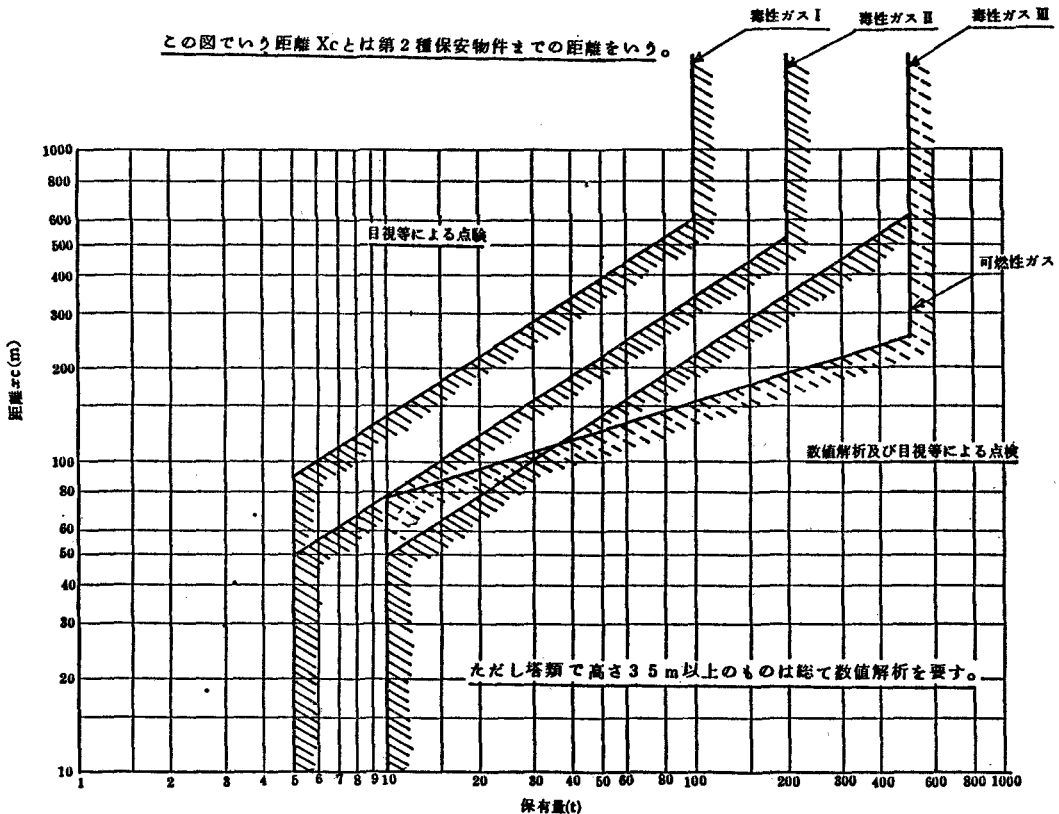


図4 可燃性ガス及び毒性ガスの対象物点検区分

表13 目視等による点検表（横置円筒貯槽及び受槽の場合）

| 材器部位名                    | 耐震性点検内容   | 点検結果                       |             |             |
|--------------------------|---|----------------------------|-------------|-------------|
|                          |   |                            |             |             |
| 1. 基礎関係                  | ○基礎は共通または連結になっているか点検する。                             | (1)共通連結                    | 有           | 無           |
| 2. サドル等の<br>接合部          | ○サドル等と本体との接合部に腐食その他による著しい損傷が認められないか点検する。            | (1)腐食<br>(2)損傷             | 有<br>有      | 無<br>無      |
| 3. アンカーボ<br>ルトおよびナ<br>ット | ○アンカーボルトに著しい腐食その他の損傷がないか。また、ボルトナットにゆるみが認められないか点検する。 | (1)腐食<br>(2)損傷<br>(3)ゆるみ   | 有<br>有<br>有 | 無<br>無<br>無 |
| 4. 接続配管                  | ○接続配管は可撓性を有しているように配管されているか点検する。                     | (1)可撓性                     | 無           | 有           |
| 5. 緊急しゅ断<br>弁            | ○緊急しゅ断弁が本体と一体の動きをするか。または支持台での揺動性があるか点検する。           | (1)本体と一体の動き<br>(2)支持台での揺動性 | 無<br>無      | 有<br>有      |
| 6. 附属品                   | ○附属品（液面計，安全弁等）が本体と一体の動きをするか。また，安全弁放出管等に可撓性があるか点検する。 | (1)本体と一体の動き<br>(2)放出管の可撓性  | 無<br>無      | 有<br>有      |
| 7. その他                   | ○階段，歩廊，梯子等と本体に逃げがとられているか点検する。                       | (1)逃げ<br>(2)本体と一体の動き       | 無<br>無      | 有<br>有      |

表14 設計仕様書 (横置円筒貯槽及び受槽の場合)

|          |                |                     |                |                 |                |                  |
|----------|----------------|---------------------|----------------|-----------------|----------------|------------------|
| 貯槽名称     |                |                     |                |                 |                |                  |
| 貯蔵物(比重量) |                | 最大貯蔵量               |                |                 | Kgf            |                  |
| 設計圧力     |                | Kgf/cm <sup>2</sup> |                | 設計温度            |                | ℃                |
| 基本<br>条件 | 設置場所           | 地表面水平震度             |                |                 |                |                  |
|          | 地盤の種類          | 減衰定数                |                |                 |                |                  |
| 部位名      |                | 材質等                 |                | 呼び径, 板厚, 型式     |                | 本数               |
| 貯槽本体     |                |                     |                | t = mm, くされ代 mm |                |                  |
| サドル      |                |                     |                |                 |                |                  |
| ベースプレート  |                |                     |                |                 |                |                  |
| アンカーボルト  |                |                     |                |                 |                |                  |
| ベヂスタル    |                |                     |                |                 |                |                  |
| つなぎ梁     |                |                     |                | 径, 長さ, 断面積      |                |                  |
| 枕        |                | 材質                  |                |                 |                |                  |
| 地盤       |                | 地盤反力係数 (表3.3.3参照)   |                |                 |                |                  |
| 主要寸法(mm) | H <sub>X</sub> | H <sub>Y</sub>      | H <sub>V</sub> | L <sub>S</sub>  | u <sub>X</sub> | u <sub>Y</sub>   |
|          | l <sub>X</sub> | l <sub>Y</sub>      | b              | d               | D              | d <sub>0</sub> B |
| 重量(Kgf)  | 貯槽本体           | 全サドル                | 附属品            | 貯蔵液             | 全ベヂスタル<br>地上部  |                  |
|          | W <sub>1</sub> | W <sub>2</sub>      | W <sub>3</sub> | W <sub>4</sub>  | W <sub>5</sub> |                  |
| (旧)設計震度  |                |                     |                |                 |                |                  |

表15 耐震性判定結果例（横置円筒貯槽）

|              |                                      |                                 |                       |           |
|--------------|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------|
| 貯槽名称         |                                      | 20トンブタンストレージタンク                 |                       |           |
| 貯蔵物（比重量）     |                                      | ブタン                             | 最大貯蔵量                 | 20000 Kgf |
| 設計圧力         |                                      | 6.5 Kgf/cm <sup>2</sup>         | 設計温度                  | ℃         |
| 基本条件         | 設置場所                                 | E市                              | 地表面水平震度               | 0.48      |
|              | 地盤の種類                                | 第3種                             | 減衰定数                  | 7%        |
| (旧)設計震度      |                                      |                                 |                       |           |
| 事前調査         | 1. 腐食等による著しい損傷の有無                    |                                 |                       | 無         |
|              | 2. 計算モデルと実物との一致                      |                                 |                       | OK        |
|              | 3. 接続配管、ステー等が本体の振動性状に著しい影響を与えないこと    |                                 |                       | OK        |
|              | 4. 解析条件が満足されること                      |                                 |                       | OK        |
| 一次検討         | $\tau_B$ 31.9 Kgf/mm <sup>2</sup>    | $f_s$ 23.67 Kgf/mm <sup>2</sup> | $\tau_B / f_s$ 1.35   |           |
| 固有周期         | $T_x$ 0.234 sec                      | $T_y$ 0.326 sec                 |                       |           |
| 水平修正震度       | $K_x$ 0.878                          | $K_y$ 0.970                     |                       |           |
| 水平地震荷重       | $F_x$ 25070 Kgf                      | $F_y$ 27690 Kgf                 |                       |           |
| アンカーボルトせん断応力 | $\tau_B$ 24.19 Kgf/mm <sup>2</sup>   | $f_s$ 23.67 Kgf/mm <sup>2</sup> | $\tau_B / f_s$ 1.02   |           |
| 引張応力         | $\sigma_B$ 12.12 Kgf/mm <sup>2</sup> | $f_t$ 41 Kgf/mm <sup>2</sup>    | $\sigma_B / f_t$ 0.30 |           |
| 判定結果         | 要対策                                  |                                 |                       |           |

許容限界」という概念を導入していることである。すなわち、支持構造材及びボルト材に関して既存設備に限り、その地域に予想される最大の地表面地震動に対し、立形貯槽にあってはアンカーボルトが破壊し、転倒するような強度である場合、横形円筒貯槽にあってはペDESTALから逸脱落下するような強度である場合、球形貯槽にあっては繰り返し地震動によって崩壊するような強度である場合、をそれぞれ応力の許容限界とする。

ところで、表12をみてわかるように当然のことながら、3種の貯槽は、全県ぐるみ強化地域に入っている静岡県

の基数が約7割を占めていて圧倒的に多い。また、

図4の区分線図を使うと半数以上574基が目視だけではなく、何らかの数値解析が必要ということになる。高圧ガス保安協会が作成した「地震防災対策強化地域における高圧ガス設備耐震性総点検要領」をもとにして、基数が断然多い横置円筒貯槽（いわゆる「枕形」）を例に点検の実例を説明する。

まず目視点検を行うに当っては、表13のような点検表にもとづいて、表14の設計仕様書に示す貯槽の基礎、サドル等の接合部、アンカーボルト、接続配管および附属部品などを主体にとくに腐食、損傷、可燃性などを重点にチェックする。

数値解析が必要と判断されたものについては、設計図書など関係書類および設備の現状調査により、次の諸条件が満たされているか否かを事前にチェックする。

- (1) 貯槽本体、支持部材（サドル）及び基礎コンクリート部材に著しい腐食・損傷等がないこと
- (2) 計算に用いる重量、形状、諸寸法が実物と一致していること
- (3) 接続配管ステージ等が本体の振動性状に著しい影響を与えないこと

数値解析は、(イ)静的震度法に準じた簡便な一次検討と(ロ)修正震度法に準じた二次検討を行うようにしてあり、具体的チェックポイントとしては貯槽本体の脱落の原因となるおそれのあるアンカーボルトに限定している。(イ)の一次検討では、設備の固有周期には無関係に応答倍率として、当該施設の設置地区及び地盤から定められた応答倍率スペクトラムの最大値をとって地震荷重を安全側に定めている。また、この地震荷重に対して検討する応力としては、アンカーボルトのせん断応力のみとしている。これは、実際の既存の枕形タンクを検討してみると大抵の場合、このアンカーボルトのせん断応力をもっとも危険な応力となることが認められているからである。一次検討で安全となったものは、二次検討をする必要はないが、NOとなったものについては(ロ)の二次検討を行う。二次検討では、図5のX方向（貯槽本体の軸方向）とY方向（本体直角方向）の一次固有周期を計算し、図2に示した地盤種別応答倍率から、修正震度法的に地震荷重を計算する。荷重は、「軸方向+鉛直方向」および「軸直角方向+鉛直方向」の2種類とし、それぞれの組合せについて別個に、アンカーボルトのせん断応力（X方向）、同じく引張り応力（Y方向）が、その許容限界（せん断の場合は、許容引張り応力 $\sqrt{3}$ 、引張りの場合は許容引張り応力）より小さいか否かで耐震性の判定をするというものである。表15は、こうして行った判定結果の一例である。

計算の詳細は省略するが、図5に示した設計仕様が完成されてさえいれば、プログラム付きの小形電卓で計算できるようになっており、前記の「総点検要領」には計算例も示されている。立形貯槽、球形貯槽についても、「応力の許容限界」の項で説明したフィロソフィーに沿ってほぼ同様な解析チェックがなされる。

現在、高圧ガス保安協会の指導のもとで、対策強化地域内の全事業所でチェックがすすめられているほか、埼玉県など県独自で同手法のチェックをしようとしている自治体もある。

## 6. 問題点と今後の展望

すでに明らかにしたように、高圧ガス施設の地震対策

については、対策強化地域の6県はもとより、そのほかの自治体においてもようやく本格的取り組みがなされてきたのは歓迎すべきことと考えられる。しかし、同時にこれらの対策に付随して今後解決しなくてはならない問題も生じている。

まず耐震設計の基準についていうと、国（通産省）と各自治体で策定される基準の整合性の問題がある。例えば入力地震動をどうとるかひとつについてもなかなかうまくゆかない。例えば、耐震性点検をする場合全県ぐるみ対策強化地域に指定された静岡県では、国の基準とは別に、独自に地表面水平震度  $K_{GH}$  を最大0.48としているが、通産省の指導は最大限0.30である。静岡では県独自の判断で割り増しを行い“より厳しい条件”で点検を行っているわけである。こうした安全性への“割増し対策”はそれほど問題が少ないというものの、例えば何らかの技術的根拠にもとづいて自治体が国とは全く異った基準を作成したとき、いかなる機関がいかにしてその整合をはかるかという問題は今後もし生じるであろう。交通整理をする審査機関が必要と考えられる。

さらに各自治体によって地震対策を扱う部や課が違う、あるいは、同じ対策を異なる部・課が同時に行うという問題もあり、各自治体が有機的かつ有効に対策を実施できるように体制を整備することが望まれる。また、自治体の地震対策に関する担当者の知識の不揃いも目立つ。静岡県のように県の重大施策として真剣に取り組んでいるところでは、担当者全員が地震事象や対策について一通りの知識水準をもって、むしろ学識経験者に対して実施者としての意見や批判を行なえる力のある人材がいる一方、単にお題的に地震対策を唱えるだけで、対策施行上のフィロソフィーはもとより、最低限必要な技術用語すら知らない担当者が（それも管理的立場の人）多い自治体もある。このような状況を脱却し、アンバランスを是正しない限り、例えいくら多額の子算をかけても地震対策は前進しないであろう。そのためには、まず担当者を中心とする関係者に対する教育活動などが重視されなくてはならない。

次に、特に高圧ガス施設に限定して考えたとき、対象とする設備によって適用される法的根拠とその基礎となるフィロソフィーが異なるということも地震対策上、たびたび障害となる。例えば、電気事業法を適用する場合と、ガス事業法を適用する場合との問題についていうと、前者は比較的耐震性のチェックなどに対して適応性があるのに対し、後者は融通がききにくいというような問題である。具体的にいうと、ガス協会などの貯槽施設に対するフィロソフィーは“なるべく安く地域住民にガスを供給し、その供給源を絶やさぬ”ところにある。従って、こうした理念からは、タンクが常にガスで充滿していることが望ましいことになり、また経済面の面か

ら500トンのタンクを二基設置してパラレルな操業をはかるより、1,000トンタンクを一基もつ方が得策ということになってしまい、とても空タンクのチェックをするいとまがない。安全工学的にみると矛盾した現象となる。電気事業法については、大手電力6社の整合性をはかれば比較的フレキシブルな運用ができるのに反し、ガスを扱う事業は非常に多く、全体的統一をはかりにくいという事情も背景にある。

既存施設の耐震診断にかかわる重要な問題に、対象設備の残存寿命への無配慮がある。既存設備が仮に全く同じ設計仕様で作られ、同一の環境下で操業されている施設でも、将来おこりうる巨大地震に対する対策は当然その残存寿命を考慮して適切になされなくてはならない。施設に対する点検そのものが始まったばかりであり、チェックの結果ノーとなったものをどうするのかという問題は今後早急に具体化されなくてはならず、その時点で残存寿命についての配慮も検討されるべきであろう。

いずれにしても、高圧ガス施設の地震対策は、その地震時破損が都市防災とぎわめて密接な関連をもつだけに、単に“対策的”な検討をするのではなく、供給者、使用者および行政サイドの問題を総合的に把握して具現されなくてはならない。

本稿をまとめるに当っては、多くの文献を引用させて頂いたことを付記し、御提供頂いた高圧ガス保安協会白崎氏はじめ関係諸氏の御努力に改めて敬意を表したい。

また、筆者にこの面での仕事をすすめる道をひらいて下さった東京大学柴田碧教授の日頃の御指導に深く感謝

いたします。

東京都の地震防災問題に対して本稿が何らかの一助となることを切望するものである。

## 文献一覽

- 神奈川県商工部  
1973 「高圧ガス製造施設耐震設計基準」  
通産省高圧ガス及び火薬類保安審議会  
1980 「高圧ガス製造施設等耐震設計基準」  
神奈川県商工部  
1978 「高圧ガス施設耐震性判定基準」  
高圧ガス保安協会  
1980 「地震防災対策強化地域における高圧ガス設備耐震性総点検要領」  
日本電気協会  
1970 「原子力発電所耐震設計技術指針」J E A G  
4601」  
鶴戸口英善  
1978 「化学プラントの耐震設計の考え方」『化学工場』第22巻8号, pp. 17~22。  
柴田 碧  
1976 「技術基準の性格についての一考察」『生産研究』28巻5号, pp. 25~26。  
久保慶三郎ほか  
1978 「1978年宮城県沖地震の被害調査報告書(概報)」『生産研究』30巻11号, pp. 18~21。

## RECENT SITUATION IN COUNTERPLANNING FOR ASEISMIC DESIGN OF HIGH PRESSURE INDUSTRIAL EQUIPMENTS

Kohei Suzuki\*

*Comprehensive Urban Studies*, No. 11, 1980, pp. 79—93

Recently some political and technical counterplans for an aseismic design of high pressure industrial equipment such as spherical and cylindrical tanks, pipings and cooling evaporators have been established in several prefectures and in the MITI (Ministry of International Trade and Industry).

In this report these situations are surveyed and attention is particularly paid to the contents of the aseismic standard and some technical criteria for this equipment.

Since we have a lot of high pressure equipment around the metropolitan area systematic procedures for this planning are eagerly requested. From this point of view some basic problems to be solved are discussed and several comments are added.

\* Center of Urban Studies, Tokyo Metropolitan University