

# 大地震に対して設備の耐震設計はどのようにするか

株式会社 プラント耐震設計システムズ

池 田 雅 俊

## 1 まえがき

近年、十勝沖地震、新潟県中越沖地震等の地震が発生し、世界的にも、スマトラ地震、パキスタン北部地震、インドネシア・ジャワ島中部地震などが多発し、多大の被害が見られた。

一方、内閣府中央防災会議などで、東海地震、東南海地震、南海地震あるいは首都圏直下地震などの危険性が指摘され、文部科学省地震調査研究推進本部からは地震調査・研究の最新情報から作成された地震動予測値図が平成 17 年 3 月に公表され、その後も新しい知見で改正が重ねられている。

兵庫県南部地震までは、レベル 1 地震すなわち通常発生する地震（50 年ないし 100 年に 1 度発生する可能性のある地震）に対して無被害（地震発生応力が降伏応力以下、弾性応力状態）とする耐震設計を行っていきしたが、兵庫県南部地震以降は極めて稀ではあるが高レベルの地震（レベル 2 地震）に対しても安全性を確保する（高圧ガスが漏洩しない）ための耐震設計が要求されている。すなわち、レベル 2 地震に対しては、安全性の確保を第 1 優先として、過剰な強度を要求せず、構造物の塑性変形も許容する基準となっている。

このため、レベル 1 地震に対しては、線形計算すなわち地震力（設計震度）と発生応力が比例関係にあることを利用して耐震設計を行うことができるが、レベル 2 地震に対しては、非弾性変形を考慮した非線形の耐震計算が必要となる。

今回は大地震（レベル 2 地震動）に対するこのような耐震設計計算の方法に関して基本的な考え方を解説する。

## 2 レベル 2 地震で構造物はどのように揺れるのか

### 2.1 応答解析法

レベル 2 地震動に対しては、構造物はどのように揺れるのかは、構造物は塑性変形するので応答塑性変形量（最大応答塑性変位量）を算出することにより知ることができる。

応答塑性変形量は次に掲げる応答解析法により算出することができる。

- (1) エネルギー法
- (2) 等価線形応答解析法
- (3) 非線形応答解析法

応答解析法は大きく分けてエネルギーの釣合から総合的に耐震設計構造物の応答量を照査するエネルギー法（1）と構造要素それぞれの力と変位の釣合い方程式を作成して行う応答解析の 2 種類の方法に

分けて考えることができる。後者は、さらに、非線形応答解析法（3）と非線形特性を等価な線形特性に置き換え簡易な解析を行う等価線形応答解析法（2）に分けられる。

いずれの応答解析法を選定するかは、地震動データの種類、対象構造物の特性や要求品質に応じて適切な手法を選定することができる。エネルギー法が簡易的な計算であり、かつ、安定的な解が得られることから、一般的に設計用に使われる。

## 2.2 解析モデル

応答解析を行うにあたり想定する力学的振動モデルおよびその構成要素は、耐震設計構造物ごとに、その妥当性が証明されたものから適切な解析モデルを選択することとなる。

解析モデルは、応答解析手法に応じて適切な構成要素を組み合わせることで構成することとなるが評価の対象とする損傷モードを正しく表現できるよう定めなければならない。

## 2.3 エネルギー法

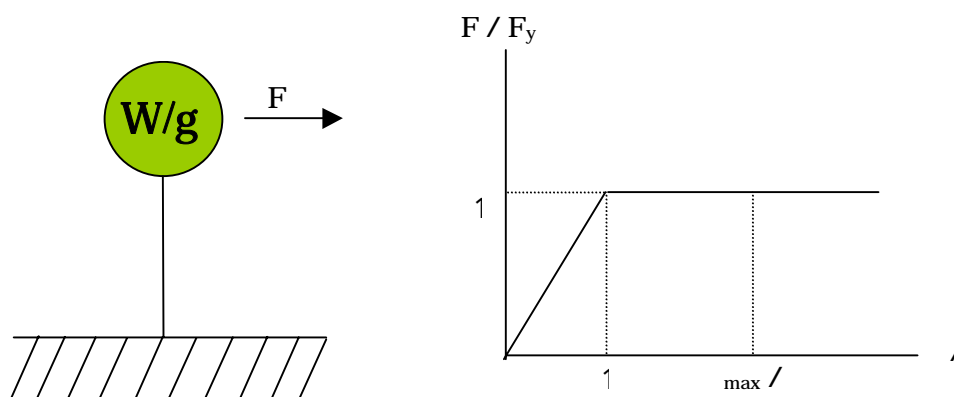
エネルギー法とは建築構造物のように1次の振動モードの卓越する構造物に関して確立された方法で「エネルギー一定則」を基本として、耐震設計設備のような耐震設計構造物の応答塑性率を算定する手法である。

エネルギー一定則とは、「1つの地震により構造物に入力される総エネルギーは、構造物の総質量および1次固有周期に依存し、構造物の降伏耐力、質量分布および剛性分布に依らない量である」という。

### 2.3.1 エネルギー一定則の定式化

地表震度  $K_H$  の地震により構造物に入力する総エネルギーとは地震動の仕事率 = (各瞬間の地震慣性力) × (速度) を地震動の継続時間にわたり積分した値で、この値は構造物の質量分布および剛性分布や降伏耐力に依らず、構造物の総質量および1次固有周期のみに依存する量である。

以下では、簡単のために(図 2-1)に示すような完全弾塑性の変形特性を有する構造物に関して説明する。



$W$  : 耐震設計構造物の総重量、  $g$  : 重力加速度

F : 地震力等の外力  
 : 耐震設計構造物の変位量

F<sub>y</sub> : 降伏耐力  
 y : 降伏変位

図 2-1 1 質点系応答解析モデル

弾性変形範囲の応答の計算によると、この総エネルギーは、一般的に修正震度から次式により計算することができる。

$$E(T, W) = \frac{1}{2} \frac{W}{g} \left\{ g K_{MH} \frac{T}{2\pi} \right\}^2 \quad (\text{式 2-1})$$

ここで、

E(T, W) : 構造物の損傷に寄与する総エネルギー

W : 耐震設計構造物の全重量

T : 耐震設計構造物の 1 次固有周期

K<sub>MH</sub> : 固有周期 T の耐震設計構造物の設計水平修正震度で次式により算出する。

$$K_{MH} = 5 K_H$$

g : 重力加速度

一方、完全弾塑性の変形特性をもつ耐震設計構造物（固有周期 T，総重量 W，降伏震度 K<sub>y</sub>）のに入力される総エネルギーは、弾性変形エネルギーおよび塑性変形エネルギーとして吸収されるので、次式により表せる。

$$E(T, W) = W_y + W_p \quad (\text{式 2-2})$$

ここで、

E(T, W) : 構造物に入力される総エネルギー

W<sub>y</sub> : 当該耐震設計構造物の弾性運動エネルギーで、弾性変形は 0 から降伏変位 y まで範囲であるので、次式により算出できる。

$$W_y = \frac{1}{2} \frac{W}{g} \left\{ g K_y \frac{T}{2\pi} \right\}^2 \quad (\text{式 2-3})$$

K<sub>y</sub> : 当該損傷モードに係る降伏開始点における水平震度をいう。

W<sub>p</sub> : 降伏を開始後に当該耐震設計構造物に吸収される総エネルギー

エネルギー一定則により(式 2-1)、(式 2-2) はそれぞれ総エネルギーに等しい値であるので、(式 2-3) を用いて変形して、次式をうる。

$$W_p = W_y \left\{ \left( \frac{K_{MH}}{K_y} \right)^2 - 1 \right\} \quad (\text{式 2-4})$$

(式 2-4)の右辺は、耐震設計構造物に降伏後入力するエネルギーを、当該耐震設計構造物の総重量 W，固有周期 T，降伏震度 K<sub>y</sub> および設計修正震度 K<sub>MH</sub> から算出する式を与えている。

### 2.3.2 塑性吸収エネルギー

塑性吸収エネルギー W<sub>p</sub> は考慮する損傷モードにより適切に評価されなければならない。塔槽類は 1 質点系応答解析モデルで表わされるとする。

一方向に静的に加力するときの外力と変位の関係は、簡単のため(図 2-1)に示すような完全弾塑性を仮定すると、最大変形  $y_{max}$  となるとき、吸収される塑性エネルギー  $W_{ps}$  は、下式で算出される。

$$W_{ps} = \mu_p \cdot y_{max} \cdot F_y \quad (\text{式 2-5})$$

ここで、

$W_{ps}$  : 最大変形  $y_{max}$  となるとき吸収される塑性エネルギー

$\mu_p$  : 塑性率で、次式による。

$$\mu_p = y_{max} / y - 1 \quad (\text{式 2-6})$$

最大変形  $y_{max}$  の振幅で 1 サイクルのループを描くとき、損傷モードによりさまざまな形態の復元力特性がある。模式的に(図 2-2)に弾塑性タイプおよびスリップタイプのものを示す。

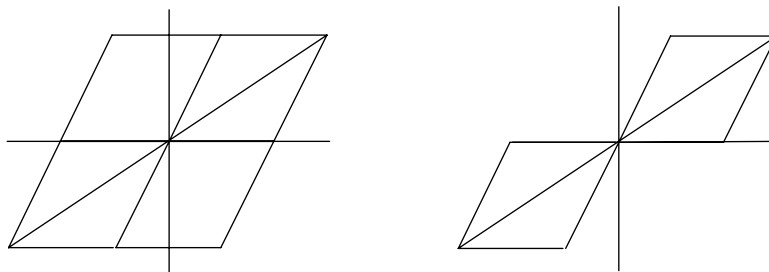


図 2-2 復元力特性

1 サイクルの吸収エネルギーは弾塑性タイプで  $4 W_{ps}$ 、スリップタイプでは  $2 W_{ps}$  となる。

地震波はランダムな波形であり応答波形は複雑な履歴を示すが、簡単のため地震時の吸収エネルギーと等価な最大応答変位  $y_{max}$  の振幅で  $n$  サイクルループを繰り返すによるエネルギー吸収に置き換える。このとき、塑性吸収エネルギー  $W_p$  は、正負の変位の方向を考慮して、次式で計算できる。

$$W_p = 2C W_{ps} \quad (\text{式 2-7})$$

ここで、

$W_p$  : 降伏後のエネルギー吸収量

$W_{ps}$  : 一方向静的加力において最大変位  $y_{max}$  のときの塑性 吸収エネルギー

$C$  : 復元力特性および等価繰り返し数  $n$  による値で、

・弾塑性タイプの場合は  $C = 2n$

・スリップタイプの場合は  $C = n$

この場合において等価繰り返し数  $n$  は、耐震設計構造物全体に期待できる塑性エネルギー吸収効果に係る等価繰り返し数であり、構造局部の疲労損傷等に係る等価繰り返し数より小さな値でなければならない。ここで  $n$  を大きくとることは、地震エネルギーが多数回の繰り返しで塑性エネルギーとして吸収

されるので最大塑性変位量は小さくてよい。実際の繰返し数より少なく見積もり安全側に設定する(塑性ひずみ量は大きく算出される)。通常、塔槽類では  $n=1$ 、基礎構造物では  $n=0.5$  とされる。

図 2-3 は塔類の振動試験における地震力と変位との履歴を表す。基礎ボルトを損傷モードとする試験で (b) のスリップタイプの変形モードであることがわかる。

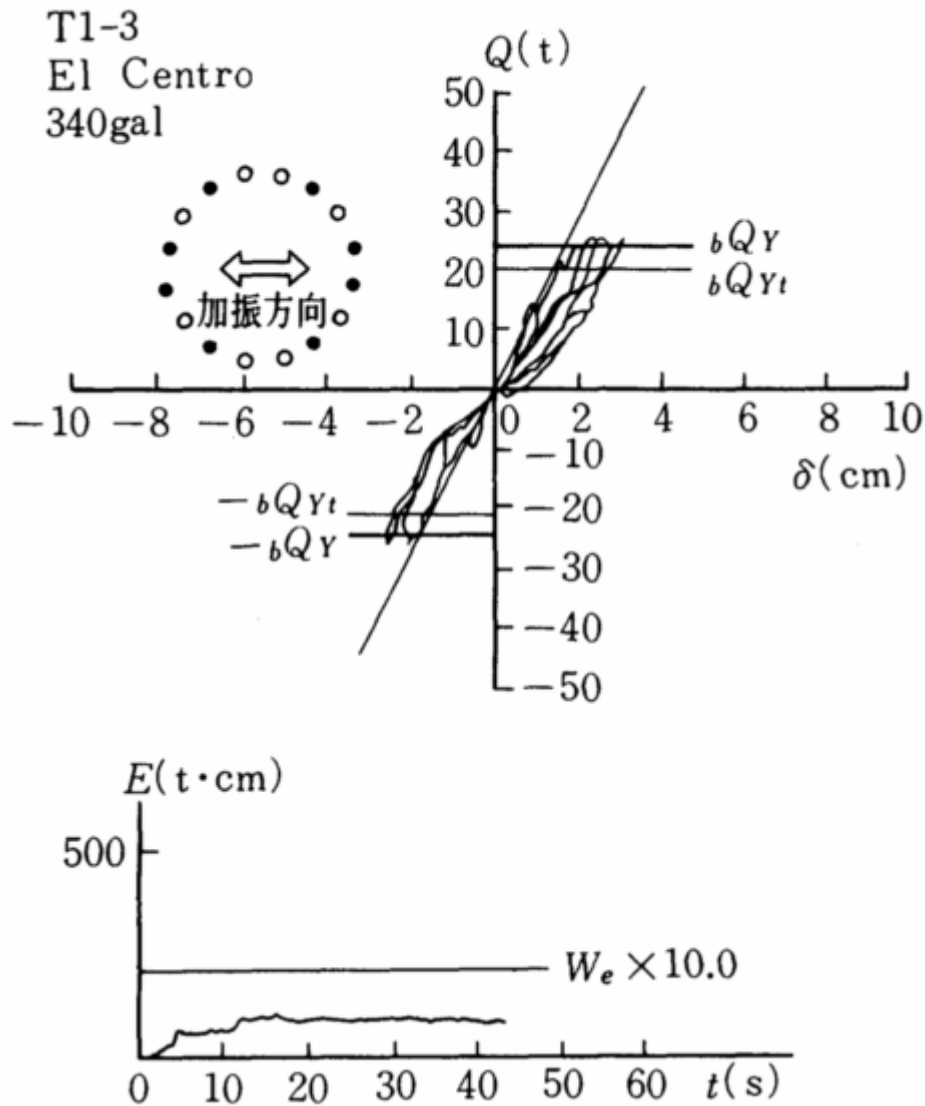


図 2-3 塔類の基礎ボルト部を損傷モードとする振動試験における地震力と塔類の変位量

### 2.3.3 応答塑性率

応答解析モデルが、完全弾塑性特性 1 質点系で塑性変形する場合、耐震設計構造物に吸収される全弾性エネルギー  $W_y$  は次式で表すことができる。

$$W_Y = \frac{1}{2} \delta_Y F_Y \quad (\text{式 2-8})$$

(式 2-4)、(式 2-5)、(式 2-7)及び(式 2-8)から、応答塑性率または塑性変形量の算式は次式となる。

$$\mu_p = \frac{1}{4C} \left\{ \left( \frac{K_{MH}}{K_y} \right)^2 - 1 \right\}, \text{あるいは}, \delta_p = \frac{\delta_y}{4C} \left\{ \left( \frac{K_{MH}}{K_y} \right)^2 - 1 \right\} \quad (\text{式 2-9})$$

Cの値はそれぞれの損傷モードに応じて適切に設定すれば、荷重変形曲線が完全弾塑性でない場合、1質点系でない場合、塑性変形が集中する場合等いずれも応答塑性率 $\mu_p$ は(式 2-9)の形で表すことができる。

応答塑性率、弾性振動エネルギー、降伏震度及び限界震度などを模式的に(図 2-4)に示す。

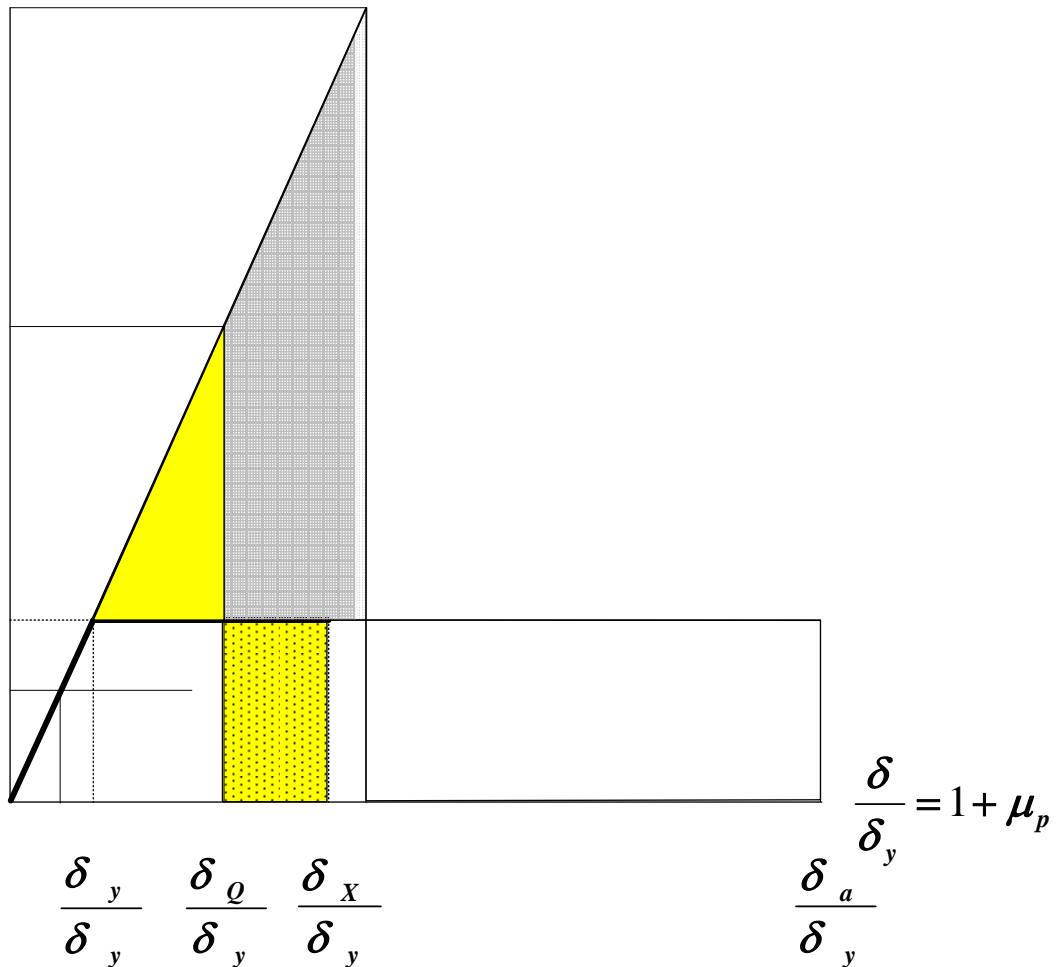


図 2-4 応答塑性率と応答変位量

横軸は応答変位率(応答変位量/降伏変位 =  $1 + \mu_p$ )、縦軸は震度(地震力/重量)であり、対象構造物が弾性変形する場合は、設計修正震度 $K_{MH}$ に対して点Qに対応し、弾性振動エネルギー  $QQ'O$ である。対象構造物が $F_y = K_y \cdot W$ で降伏するとき地震時には点Xに対応し、弾性振動エネルギー  $YY'O$ であり、

塑性吸収エネルギーは、 $Y\dot{Y}'Q_yQ_y'$ である。点 A は、応答塑性率が許容塑性率に等しい状態を表し、対応する震度は限界震度 ( $K_R = K_y/D_s$ ) である。

## 2.4 非線形応答解析法および等価線形解析法

耐震設計構造物の応答解析は、構造要素の力と変位の釣合を考慮して全体系を合成して解析を行う手法が一般的に利用されている。降伏耐力をこえる耐震設計構造物の応答解析では、構造要素は非線形の力と変位の関係を有する部材となるため、全体系も線形性が成立せず個別の応答結果に関して、一般性が成立せず設計上の利用が困難な場合が多い。

一般に使われている耐震基準においては耐震設計構造物における許容塑性率は比較的小さく設定されるので非線型の度合いは小さい。このことから、弾性剛性 (図 2-2 に示す  $k$ ) より低減した剛性 (図 2-2 に示す  $k_e$ ) 及びエネルギー吸収効果に等価な減衰率を有する部材にモデル化し線形応答解析 (等価線形解析法) を行い、妥当な結果を得ることができる。線形応答解析の技法や結果を一部修正することにより有効に利用できる。

## 3 塔槽類のレベル 2 耐震性能評価法

1 次の振動モードが卓越する耐震設計構造物にあつては、損傷モードごとにエネルギー一定則を適用して、塔槽類のレベル 2 耐震性能評価法を定式化できる。塑性率評価法、保有耐力評価法および代替法が提案されている。

### 3.1 塑性率評価法

塑性率評価法は前節で算定した応答塑性率と定められた許容塑性率 (高圧ガスが漏洩しない塑性率) とを比較することによりレベル 2 耐震性能評価を行う方法であり、次のように定式化できる。

#### 3.1.1 設計修正震度

耐震設計構造物の設計修正水平震度  $K_{MH}$  は地表面震度  $K_H$  に応答スペクトル  $S_5$  を応じた値より算出する。

$$K_{MH} = \beta_5 K_H \quad (\text{式 3-1})$$

弾性応答する場合の地震動から入力された弾性振動エネルギーは、弾性応答に基づき設定された設計震度により算出することができる。この場合、設計修正水平震度  $K_{MH}$  の算定は、弾性応答の場合は当該耐震設計構造物の固有周期  $T$  に基づき応答倍率  $\beta_5$  を算出するが、弾塑性応答する場合には変位量が大きくなり固有周期は伸長する傾向にあるため固有周期  $T$  を修正した値に対して応答倍率  $\beta_5$  を算出しなければならない。この固有周期の変化は応答塑性率等の値にも係わるため修正は困難であることを考慮

して、安全側の評価となるよう(図 3-1)に示すような短周期側で最大応答倍率をとるよう 5 曲線を修正して使用することが一般的に行われている。

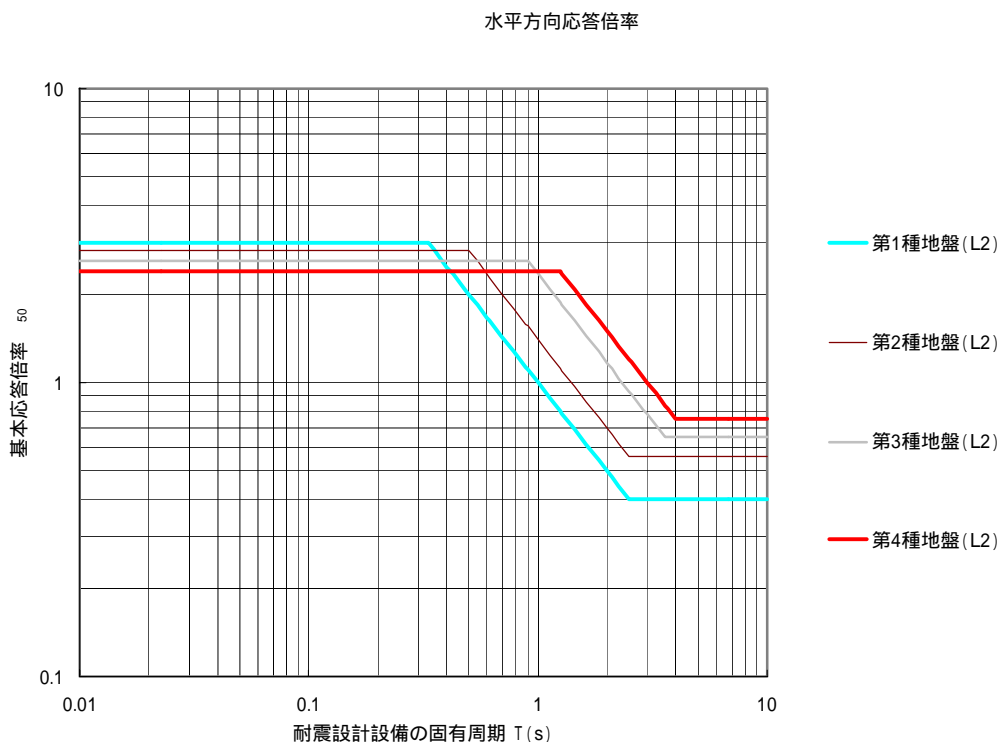


図 3-1 応答スペクトル

### 3.1.2 応答塑性率

当該損傷部材の応答塑性率  $\mu_p$  は(式 2-9)から算出する。

$$\mu_p = \frac{1}{4C} \left\{ \left( \frac{K_{MH}}{K_y} \right)^2 - 1 \right\} \quad \text{(式 2-9)}$$

ここで、

$\mu_p$  : 当該損傷モードに係る部材の応答塑性率、  
ただし、 $K_y = K_{MH}$  のときは、 $\mu_p = 0$

$K_{MH}$  : 当該耐震設計構造物の設計水平修正震度

$K_y$  : 当該損傷モードに係る部材の降伏開始点における水平震度をいう。

$C$  : 当該損傷モード特性に応じて定まる値

### 3.1.3 塑性率評価

当該損傷モードに関して (式 3-2) を確認すること。

$$\mu_p \leq \mu_{pa} \quad \text{(式 3-2)}$$

ここで、

$\mu_p$  : 当該損傷モードに係る部材の応答塑性率



$\mu_{pa}$  : 当該損傷モードに応じて定まる耐震設計構造物の部材の許容塑性率

### 3.2 保有耐力評価法

保有耐力評価法は、保有耐力評価法はエネルギー法と等価なレベル 2 耐震性能評価法であるが、表面的に従来のレベル 1 耐震設計法と同等の計算方法によることができる様に工夫された計算された方法であり、設計のための公式や定数値を有効に利用することができる優れた方法といえることができる。保有耐力評価法は、建築構造物、土木構造物などにおいては多くの実績を有し当該構造に関して確立した設計手法である。

保有耐力  $Q_U$  とは、降伏震度  $K_y$  に耐震設計構造物の重量  $W$  を乗じた値  $Q_U = K_y W$  であり、降伏耐力と同じ意味である。これに対して、必要保有耐力  $Q_{UN}$  とは設計修正水平震度  $K_{MH}$  に対して応答塑性率が許容塑性率と等しくなる場合、言い換えれば、構造物の靱性を最大限利用するとした場合の保有耐力の値である。

(式 3-1) において応答塑性率  $\mu_p$  が許容塑性率  $\mu_{pa}$  とに等しいときの震度  $K_R$  (限界震度という。) とすると、 $\mu_{pa}$  と  $K_R$ 、 $K_y$  の関係は、

$$\frac{K_y}{K_R} = \frac{1}{\sqrt{1 + 4C\mu_{pa}}}$$

となり、 $D_s$  を次式で

$$D_s = \frac{1}{\sqrt{1 + 4C\mu_{pa}}} \quad \text{(式 3-3)}$$

定義するとすると、 $\mu_p$  と  $\mu_{pa}$  の関係は、 $K_{MH} = K_R$ 、すなわち、 $D_s \cdot K_{MH} = K_y$  と等価となる。

このことより、必要保有耐力  $Q_{UN} = K_y \cdot W$  及び保有耐力  $Q_U$  を、次式により

$$\begin{aligned} Q_{UN} &= D_s \cdot K_{MH} \cdot W \\ Q_U &= K_y \cdot W \end{aligned} \quad \text{(式 3-4)}$$

ここで、

- $Q_U$  : 保有耐力
- $Q_{UN}$  : 必要保有耐力
- $D_s$  : 構造特性係数
- $K_{MH}$  : 設計水平修正震度
- $W$  : 当該耐震設計構造物の総重量

と定義するとき、保有耐力がこの必要保有耐力より大きいとき応答塑性率は許容塑性率より小さい値となる。反対に、保有耐力が必要保有耐力より小さいとき、応答塑性率は許容塑性率より大きな値となる。このことより、応答塑性率が許容塑性率以下であることは、次式と等価であるといえる。

$$Q_{UN} \leq Q_U \quad \text{(式 3-5)}$$

架構および基礎等の耐震設計構造物にあつては、建築、土木構造等で実績のある設計資料を有効に利用することができるので、保有耐力評価法によりレベル 2 耐震性能評価を行ってもよいこととしている。

しかしながら、(式 3-4)または(式 3-5)は、形式的な力の関係式に置き換えられ  $D_s \cdot K_{MH}$  の意味に関して誤解を生じることがあるので注意が必要である。また、変形が表面に出ていないために変位量が必要となる場合には、たとえば(式 2-9)によりを算出することになる。

### 3.3 代替評価法

保有耐力評価は、(式 3-5)に示すとおり必要保有耐力  $Q_{UN}$  に対して降伏耐力、いいかえれば降伏応力以下になるように設計することを要求しているといえる。

必要保有耐力が震度  $D_s K_{MH}$  に対する地震力であることから、保有耐力評価法は震度  $D_s K_{MH}$  に対する算定応力が降伏応力、いいかえれば耐震設計用許容応力以下であることを確認することと等価であることがいえる。

高圧ガスの設備の場合一般的にかなりの靱性を保有し  $D_s = 0.5$  を満たすことがいえる。そこで、設計の簡便さを考慮して安全側の評価として、 $D_s = 0.5$  とし震度  $0.5 K_{MH}$  に対する算定応力が耐震設計用許容応力以下であることを確認してもレベル 2 耐震性能評価を行うことができる。これを代替評価法という。

また、より汎用化して震度  $D_s \cdot K_{MH}$  に対する算定応力が耐震設計用許容応力以下であることを確認することが行われている。配管系のように靱性の高い場合には、 $D_s = 1/3$  程度としてよいとされている。

### 3.4 個別塔槽類のレベル 2 耐震性能評価法

塔槽類の塑性率評価の定式化では、一般的に次のような基本原則を設定している。

#### 3.4.1 損傷モード

塔槽類のレベル 2 耐震性能評価においては、レベル 1 耐震性能評価との整合性および損傷モードに関するデータの信頼性を考慮して安全側の評価となるよう、原則として、損傷モードはレベル 1 耐震性能評価において考慮している損傷モードと同一とする。

#### 3.4.2 応答解析

塔槽類の応答解析モデルは 1 次モードが卓越しているとして、1 質点系として扱う。一般に、固有周期は、塑性変形の程度に応じて弾性変形時の固有周期から伸長するが、簡単のため弾性変形時の固有周期に対する応答倍率を採用することとしている。しかしながら、この固有周期が伸長することを考慮して、計算に使用する応答倍率は、短周期側では応答倍率曲線のピーク時の値を採用して、(図 3-1 応答スペクトル)を使用する。

#### 3.4.3 荷重・変形曲線

当該損傷モードは、安全側の評価となるよう荷重・変形曲線は完全弾塑性を仮定している。この場合、降伏耐力はレベル 1 耐震性能評価における算定応力が耐震設計用許容応力またはその修正値に達したとき、1 質点系としての耐震設計構造物は、降伏を始めるとして設定する。降伏耐力は小さめの値なので応答塑性率は大きく計算され、安全側の設定といえる。

### 3.4.4 降伏震度

応答塑性率を算定するためには、各損傷モードに係る降伏震度  $K_y$  を設定する必要がある。スカート支持の塔類の胴板の引張降伏震度を例として、耐震設計設備における降伏震度の算定法を解説する。

地震時胴板に生じる引張応力  $\sigma_t$  は、常時の運転時に作用する応力と水平地震力による応力及び鉛直地震力による応力に分けると、次により算出される。

$$\sigma_t = \sigma_{t0} + \sigma_{tH} + \sigma_{tV} \quad (\text{式 3-6})$$

ここで、 $\sigma_{t0}$ 、 $\sigma_{tH}$  および  $\sigma_{tV}$  はそれぞれ次の値を表す。

$\sigma_{t0}$  は、常時の運転時に作用する引張応力である。

$$\sigma_{t0} = \frac{P_o D_m}{4t} - \frac{W_v}{\pi D_m t} \quad (\text{式 3-7})$$

$\sigma_{tH}$  は、水平地震動により生じる引張応力であり、設計修正水平震度  $K_{MH}$  に比例する。

$$\sigma_{tH} = \frac{4M}{\pi D_m t} \quad (\text{式 3-8})$$

$\sigma_{tV}$  は、鉛直地震動により生じる引張応力であり、設計修正鉛直震度  $K_{MV}$  に比例する。

$$\sigma_{tV} = \frac{F_v}{\pi D_m t} \quad (\text{式 3-9})$$

ただし、 $t$ 、 $P_o$ 、 $D_m$ 、 $W_v$ 、 $F_v$  及び  $M$  は次の値を表す。

$t$  : 胴の板厚

$P_o$  : 常用の圧力

$D_m$  : 胴の平均直径

$W_v$  : 計算位置における塔類の自重と内容液の重量

$F_v$  : 計算位置における設計鉛直地震力

$M$  : 計算位置における地震動によるモーメント

さて 鉛直および水平修正震度がそれぞれ  $K_{yV}$  および  $K_{yH}$  のとき胴板に生じる引張応力  $\sigma_t$  が引張降伏応力  $S_y$  に達したとすると、水平地震動および鉛直地震動により生じる応力は、それぞれ、震度に比例するので、

$$\frac{K_{yH}}{K_{MH}} \sigma_{tH} \quad \text{及び} \quad \frac{K_{yV}}{K_{MV}} \sigma_{tV} \quad (\text{式 3-10})$$

となる。これより、(式 3-6) は次式のようになる。

$$S_y = \sigma_{t0} + \frac{K_{yH}}{K_{MH}} \sigma_{tH} + \frac{K_{yV}}{K_{MV}} \sigma_{tV} \quad (\text{式 3-11})$$

ここで、降伏震度  $K_y$  を定義し、修正水平震度  $K_{yH}$  や降伏修正鉛直震度  $K_{yV}$  に対して次式が成り立つとする。

$$\frac{K_y}{K_{MH}} = \frac{K_{yH}}{K_{MH}} = \frac{K_{yV}}{K_{MV}} \quad (\text{式 3-12})$$

(式 3-11)及び(式 3-12)の関係から、降伏震度  $K_y$  について解くと次式が得られる。

$$K_y = K_{MH} \frac{S_y - \sigma_{t0}}{\sigma_{tH} + \sigma_{tV}} \quad (\text{式 3-13})$$

一般に、降伏震度  $K_y$  の計算式は、上記の例と同様に、レベル1地震動に係る応力計算式を常時運転時応力、水平地震時応力及び鉛直地震時応力に分け、(式 3-12)を仮定してレベル1に係る許容応力と比較することにより導入することができる。

---

#### 3.4.5 エネルギー吸収特性

エネルギー吸収を期待する繰り返し回数  $n$  は安全側の評価となるよう、 $n=1$  とする。  
復元力特性を考慮して、 $C$  の値は(表 3-1)のように設定した。

---

#### 3.4.6 許容塑性率

許容塑性率は、明確なデータがある場合又は各種の基準等で規定されている場合は、これを採用するが、ない場合は安全側の評価となるよう(表 3-1)のように設定してよい。

表 3-1 塔槽類の損傷モードと許容塑性率

塔槽類	部位	損傷モード	C	$\mu p$
スカート塔	胴	引張降伏	2	1.00
		座屈	2	0.35
	スカート	スカートの座屈	2	0.35
	基礎ボルト	伸び降伏	1	1.80
	ベースプレート	曲げ降伏	2	0.35
レグ塔	胴	引張降伏	2	1.00
		座屈	2	0.35
	レグ	引張降伏	2	1.00
		座屈	2	0.35
		曲げ降伏	2	1.00
	基礎ボルト	せん断降伏	2	1.00
		引張降伏	1	1.80
		せん断降伏	2	1.00
レグ取付部	曲げ降伏	2	1.00	
ラグ支持塔	胴	引張降伏	2	1.00
		座屈	2	0.35
	セットボルト	引張降伏	1	1.80
球形貯槽	上部支柱	曲げ降伏	2	1.00
		座屈	2	1.00
		せん断降伏	2	1.00
	下部支柱	曲げ降伏	2	1.00
		座屈	2	1.00
	タイロッドブレース	引張降伏	1	1.80
	鋼管ブレース	引張降伏	2	1.00
		座屈	2	0.35
	基礎ボルト	引張降伏	1	1.80
		せん断降伏	2	0.35
	シアープレート	曲げ降伏	2	0.35
		せん断降伏	2	0.35
	ベースプレート	支圧力による曲げ降伏	2	0.35
ボルト引き抜きによる曲げ降伏		2	0.35	
横置円筒形貯槽	胴(サドル部)	引張降伏	2	0.35
		座屈	2	0.35
	胴(中央部)	引張降伏	2	0.35
		座屈	2	0.35
	鏡	引張降伏	2	1.00
	サドル	座屈	2	1.00
	基礎ボルト	引張降伏	1	1.80
		せん断降伏	2	0.35
	シアープレート	曲げ降伏	2	0.35
		せん断降伏	2	0.35
平底円筒形貯槽	側板	座屈 $0/c \quad cr > 0.2$	2	0.13
		座屈 $0/c \quad cr \leq 0.2$	2	0.35
	アンカーストラップ	引張降伏	1	cal
		(min)	1	0.75
	(max)	1	2.50	

## 4 あとがき

本稿では、高圧ガス施設の耐震設計基準について高圧ガス保安法での考え方の概要を述べたが、近年の地震の発生状況や調査・研究でも明らかなように今後も巨大地震は極めて稀ではあるが、必ず発生し、被害を受ける。高圧ガスや原子力の設備は、耐震上の重要度分類に従い、最悪の事態をの避けることを目的とする基準であり、一部の設備で災害に結び付かない軽微な損傷を受けることが想定される。総合的な地震防災対策を講じておくことが重要であると考え。

規制的な側面からだけでなく、現実的で有効な耐震対策は、防災対策（事前準備、地震時の緊急対応）の他、被災後の復旧、事業の継続対策なども考慮に入れてハード面及びソフト面から総合的に実施されなくてはならない。

地震発生に関する情報、耐震設計法、耐震・免震・制振構造、リアルタイム地震情報システム、その他の地震被害軽減システム等の新しい技術・情報が研究・開発されている。有効な耐震対策を継続的に改善・推進して行く努力が必要であると考え。