

# 許容スパン法による配管系の耐震設計

## 慣性力に対する設計

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

配管系の耐震性は、各種の基準<sup>2) 3) 4)</sup>などを適用して解析的な評価を行うのが普通である。これらの基準による計算機の解析コードに配管系の設計条件や寸法形状を詳細に入力してやれば自動的に適・不適が表示・出力されて、耐震性の評価が完結される。

いっぽうで、プラント設備等においては、様々な寸法・形状の配管系が塔槽類間を行き来している。その間、多種多様の支持構造物や架構にサポートされ構造物として機能している。すべての多数の配管系について、上記の解析による耐震性の判定を行うことは困難であるので、重要な配管（設備として重要な性能を担う配管、その損傷が重大な災害に発展する可能性のある配管など）に限定して実施することが多い。

解析評価を行わない配管系については、地震被害事例<sup>5)</sup>などを参考にして、地震時の配管の挙動を想定しながら経験的な意味も含めて、配管耐震設計（計画）を行い地震安全性を確保している。高圧ガス保安法で規定<sup>1)</sup>されている許容スパン法は、同様の趣旨で解析を行わない配管系について表1のようにその支持間隔（許容スパン長）を規定しているものである。

表1 許容スパン長 (m)

管サイズ	40A	50A	80A	100A	200A	300A	400A	500A	600A
液化ガス	6.6	7.1	8.6	9.5	12.2	14.2	16.0	17.6	19.1
圧縮ガス	7.0	7.8	9.5	10.7	14.8	18.0	20.3	22.7	24.9

配管系に関する被害事例<sup>5)</sup>をみると、配管被害モードは、図1のように地盤変状による被害を別にすれば、大きく分けて地震時の揺れによる地震慣性力（地震力）の影響と配管支持点変位（サポート間の相対変位）の影響による下記のような(1)から(4)までの地震による損傷に基づく被害である。

- (1) 配管の損傷
- (2) フランジ、ノズル等の継ぎ手からの漏洩
- (3) 配管反力による接続機器・弁の損傷又は機能喪失
- (4) 配管変位による周辺構造物等と接触・衝突のため配管および周辺構造物の損傷  
または機能喪失

表1の許容スパン長は、地震時の慣性力の影響を減ずるために設けられた基準である。今回は、慣性力の影響に関して解説する。なお、相対変位の影響に関しては本講座「その7」

地盤変状に関しては本講座「その9」<sup>5)</sup>に<sup>10)</sup>に解説している。

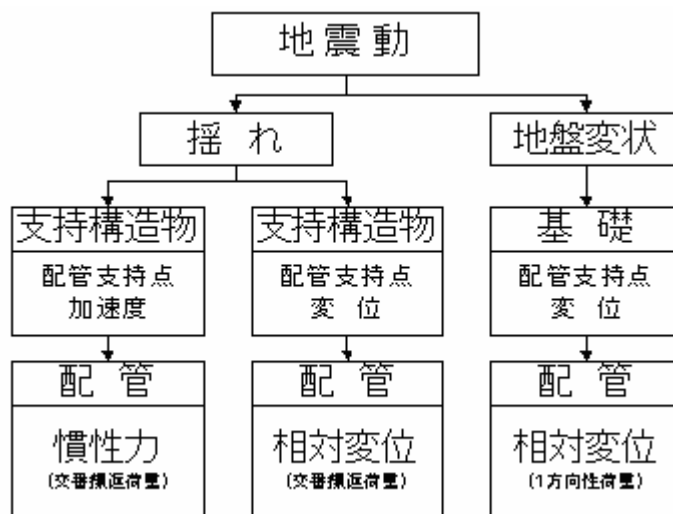


図1 配管系の地震時の挙動(損傷モード)

## 2. 配管系の耐震設計とは

### 2.1. 配管耐震設計の難しさ

配管系は、当該配管系の動的応答特性、変形特性、損傷モード、配管被害事例等を留意して、その耐震性能を確保するために下記の様な対策を合わせて行なう。これらの対策はお互いに矛盾する対策であることもあり、適切に配管剛性と可とう性のバランスを取りながら設計を進めることになる。ここに配管耐震設計の難しさがある。

#### (1) 地震慣性力対策

配管系については、配管の揺れ加速度に配管（弁そのほかの重量物も含む）の質量を乗じて得られる慣性力（地震力）により、機器ノズルやフランジに過大な地震荷重が作用しないように、また、配管の弱い部位を損傷させることのないよう、サポート、ガイド、アンカーを適切に配置する。

#### (2) 配管支持点変位対策

配管系については、配管支持構造物の地震時の揺れに基づくサポートの相対変位により、機器ノズルやフランジに過大な地震荷重が作用しないように、また、配管の弱い部位を損傷させることのないよう、サポート、ガイド、アンカーを適切に配置させ必要な可撓性を確保する。

#### (3) 地盤の液状化対策

地盤の液状化が起こるところでは、構造物の基礎設計において、地盤の変状に基づく相対変位ができるだけ少なくなるよう共通基礎上に配管を配置する等の配慮する。

やむえず相対変位が生じる場合はアンカー、ガイドを適切に配置して必要な可撓性を確保する。

(4) 熱荷重対策

サポートについては、配管の熱膨張を拘束し、通常運転時において配管に有害な影響を及ぼすものでないようとする。

(5) 周辺構造物の揺れ、移動、沈下、傾斜、倒壊、崩壊等の影響によって配管から高压ガスの漏洩が発生することのないよう、配置設計において留意する。

このほか、プロセス、運転や保守上の要求、そのほかの安全、法基準上の要求、コスト上の要求など留意する事項は多い。

## 2.2. 慣性力を受けた配管系の挙動と耐震設計

配管系に地震加速度波が入力されると、配管に慣性力が作用し配管各部に曲げモーメント、ねじりモーメント、せん断力、軸力が発生する。これらの慣性力に対する応力が過大となり各部に損傷が生じる。この場合、配管系を回転させ、地震方向を鉛直方向にすると、地震時の挙動（地震応答特性）が想像しやすい。（一般に、地震加速度は1G程度に設定することが妥当と言われているので、適切な仮想である。）

次のような配管の地震応答特性を考慮し、配管系の耐震設計を行う。この場合、地震の方向は水平2方向と鉛直方向を考慮する必要がある。

(1) 配管支持間隔が狭い場合、配管の揺れは小さく配管に発生する応力は小さくなる。

支持間隔を小さく取る。この場合、許容スパン長が参考になる。

(2) 弁等の重量物の慣性力が大きくなり配管に大きな負担を強いる。

弁等の重量物を有する配管スパンは支持間隔を小さくとる。この場合、集中重量の効果を補正した許容スパン長が参考になる。

または、弁等の重量物をサポート点近傍に配置させたり、外部より支持をとる。

(3) 偏心重量が大きい弁等の場合、その慣性力のために配管に大きな振りモーメントや曲げモーメントが作用する。

弁偏心重量を外部より支持する。

(4) 隣り合う支持点間に曲がり管が多い配管(両端が曲がり管の配管が連なる等)では、変形しやすく配管が大きく揺れ、配管曲がり部や、分岐部、レジャーサ部等の形状が変化する部分に変形・応力などが集中する。また、他の構造物と接触・衝突などが発生する。

サポート間配管の曲がり管の数を少なくする。

(5) ノズル部、バルブ部、フランジ部等の配管材と剛性の相違する部分に応力が集中する。

高いモーメント分布部位に設置することを避ける。または、応力が集中しないように工夫する。

- (6) 配管は管軸方向には変形が少ないが、管軸直角方向及びねじり方向には変形しやすい。

配管の変形特性を有効に利用して、サポート、ガイド、ストッパーなどの配置設計を行ない、配管系としての剛性の確保（慣性力に対する対策）及び可とう性の確保（相対変位対策）をバランスよく行うことができる。

以上のように、慣性力による影響を小さくするためには、配管支持間隔をできるだけ狭くするなどを行い、配管の揺れを少なく押さえ、また、重量物を直接あるいは近傍で支持し慣性力を小さくすることが原則となる。

しかしながら、配管の熱変形、及び地震時の支持点間の相対変位が加えられるところには、支持間隔を小さく取ることが難しい場合があり、適切なサポート、ガイドやストッパーを配置させたり、可とう管を設置するなどにより、配管に可とう性を持たせる措置が必要となる。

### 3. 許容スパン法とは

許容スパン法は高圧ガス保安法において、次のように定められている<sup>1)</sup>。

- (1) 地震動の方向にかかる規定

(2)及び(3)の評価は、水平2方向及び鉛直地震動に関して独立に評価するものとする。

- (2) 支持間隔に係る規定（慣性力対策）

配管スパン長  $L$  許容スパン長  $L_a$

ここで、 $L$ 及び $L_a$ は、次の値を表すものとする。

$L$  : 配管スパン長 ( m )

$L_a$  : 許容スパン長 ( m )

- (3) 変位吸収能力に係る規定（相対変位対策）

相対変位 変位吸収能力  $a$

ここで、 $L$ 及び $a$ は、次の値を表すものとする。

$L$  : サポート間の地震時相対変位 ( mm )

(相対変位に関しては、本講座「その7」及び「その29」<sup>10)</sup>にて解説)

$a$  : 当該配管の変位吸収能力(mm)

(相対変位に関しては、本講座「その7」<sup>10)</sup>にて解説)

(2)はサポート間隔の上限を規定するものであり。(3)はサポート間隔を広げる措置が必要になる。両者をバランスよく考慮してサポート配置設計することが重要である。

以下は、(2)について解説する。

#### 3.1. 適用事例

配管スパン長を次の様な考え方で算出し許容スパン長と比較して耐震性を判断する。

- (1) 管軸方向地震、管直角方向地震及び鉛直方向地震の3方向に関してそれぞれ算定するものとする。
- (2) 配管スパン長とは、隣り合う支持点間の配管について配管管軸に沿った長さとする。
- (3) (2)の算出において、当該支持点における管軸が支持方向と一致する場合は当該支持点から最初の曲がり管までの長さは含めないで算出することができる。

たとえば、図2の場合、  
A,E 点は3方向点、C 点はy方向及びZ方向の地震方向に対する支持点（Uボルトによる支持）とする。

**(1) x方向地震**

Cは支持点でないで、隣り合う支持点はA及びEである。配管スパンはAEである。

したがって、x方向地震に対しては、

配管スパン AE :

$$\text{配管スパン長} = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 \quad L_a$$

となる。

**(2) Y方向の地震**

支持点はA,C,Eであるので、スパンAC及びCEを考慮する。

配管AB間は管軸方向と地震方向が一致し配管は変形せず、A点に固定されてB点も移動しないので、配管スパン長を考えると、この方向に関してはAB(=L1)は含めなくてよい。

したがって、y方向地震に関しては、

$$\text{配管スパン AB : 配管スパン長} = L_2 \quad L_a,$$

$$\text{配管スパン CE : 配管スパン長} = L_3 + L_4 \quad L_a$$

となる。

**(3) z方向の地震**

支持点はA,C及びE点であるので、スパンAC及びCEを考慮する。

配管ED間では管軸方向は地震方向(z方向)と一致し配管は変形せず、E点に固定されてD点も移動しない移動しないので、この方向に関しては、ED(=L4)は含めなくてよい。

したがって、z方向地震に関しては、

$$\text{配管スパン AC : 配管スパン長} = L_1 + L_2 \quad L_a,$$

$$\text{配管スパン CE : 配管スパン長} = L_3 \quad L_a$$

となる。

なお、Laは表1で定まる許容スパン長である。

表1で示される許容スパン長は、保温材等の分布荷重又はバルブ等の集中荷重が付加され

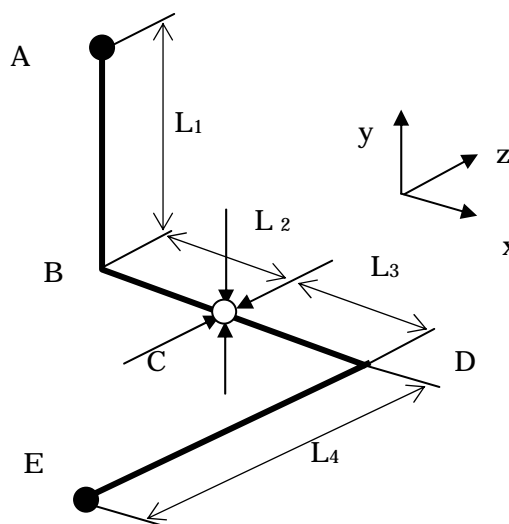


図2 許容スパン法説明図

ないときの値であり、基本許容スパン長ということもある。

## 3.2. 許容スパン長はどのようにして決められたか

許容スパン法とは、地震慣性力に対してゆれ量を小さくすることを目的として、支持間隔（隣り合うサポート間の配管長さ）を許容スパン長（表1）以下にするよう設計する手法である。

なお、そのサポート間隔では、支持構造物揺れ又は地盤変状に起因するサポート間の相対変位を吸収できない場合には、詳細計算で応力評価体系により耐震性の確認を行う。

### 3.2.1. 許容スパン法の歴史

原子力の配管設計では、その初期のころ（昭和40年代）から定ピッチスパン法という名称で使われてきた<sup>6)</sup>。詳細は各社の設計規定によりことなるが、配管形状をいくつかの形状にパターン化（直配管、L型配管、平面Z型配管、立体Z型配管、T型分岐配管など）して、標準サポート間隔（定ピッチ）を設定して、これらを組み合わせて配管系を構築していく方法である。定ピッチは通常、固有振動数20Hzが目安として設定されており、剛性の高い配管系となるために、実質、低温配管（原子力という低温であり、通常の意味では常温配管がこれに当たる。）に限定されている。

一般の配管系に関しては、ASME B31.3<sup>4)</sup>などの規定に準じて設計がおこなわれ、熱応力設計が主体で、耐震性に関してはその他荷重として明確な規定はなされていない。国内の基準で規定化されているものはなかった。高圧ガス保安法（当時の高圧ガス取締法）でも、塔槽類に関しては耐震告示が昭和56年制定（通商産業省昭和56年告示第515号<sup>1)</sup>）された。配管系に関しては、通商産業省の内部では検討された<sup>8)</sup>が、告示化の段階で時期尚早ということで見送られた。

平成2年度から平成6年度にかけて、通商産業省の委託事業で高圧ガス保安協会の設置された「高圧ガスプラント耐震化推進委員会（委員長 鷗戸口英善 東京大学名誉教授）」のもとで、基準化に向けた検討が行われた。

この委員会での検討では、プラント内を縦横に数多く走っている配管系の設計に従来の設計法（配管系を詳細に解析して各部分の発生応力を許容応力内にすべて抑える評価体系）では耐震設計の負担が重すぎて現実的でないとして、配管系の支持間隔を地震と共振しないようにし、同時に配管系の支持点間の地震時の相対変位を吸収できるように支持間隔決めるという簡便な方法（許容スパン法）が提案された。過去のプラントの被害調査によれば、配管設計の熟練者によって設計された配管系には大きな被害が出ていないことを踏まえて、実配管約200ケース（検討した配管スパン数で1273）についてエキスパートシステムを適用して平成6年度の同委員会の報告<sup>7)</sup>で基準案が提示された。

平成7年1月17日に兵庫県南部地震による高圧ガス施設の配管系の被害（低温LPG貯

槽配管からの漏えい)が発生し、再発防止に向けた通商産業省内部での検討ための委員会<sup>9)</sup>で配管系の耐震基準化の提言がなされた。この提言を受けて、平成9年3月告示143号で耐震基準の改定がなされ、上記の許容スパン法の規定が盛り込まれ、より細かい運用指針が「高圧ガス設備等耐震設計指針(配管編)」<sup>2)</sup>で明記され、現在にいたっている。

### 3.2.2. 許容スパン長の意味

配管系の被害事例をみても配管そのものの揺れにもとづく加速度に対する慣性力で配管が損傷することはほとんどない。通常、配管は金属材料であり、大きな粘りを有する構造物である。薄肉大口径の配管系でなければ、設計震度にたいして発生応力を降伏点に抑える設計をしておけば、設計震度の5~10倍程度の地震であっても損傷することはない。配管そのものの慣性力による影響で損傷に結びつくのは、(a)その反力でサポートが損傷して配管系全体が落下する場合、(b)隣接する構造物に接触・衝突する場合、(c)その配管に接続する小口径分岐管が母管の揺れに伴う変位荷重をうけて損傷する場合、(d)バルブなどの重量物が揺れて配管に大きな集中力が作用する場合などである。これらのことより、応力による評価体系より、むしろ、配管系そのものが大きく移動することを避けることを目的として、配管系の柔らかさを代表する固有振動数を目安とすることが適切であると考えられる。特に弁などの大きな集中重量に関しては、大きく揺れないようにする措置が必要である。

3.2.1で述べた実配管系にエキスパートシステムを適用した検討を経て、両端ピン支持の直配管に関して固有振動数で約3ヘルツ、震度1Gで最大変位40mm程度となる管長を一般の3次元配管に適用する許容スパン長と設定している。これは、従来から実用されている自重(1G)に対するサポート間隔とほぼ整合するものである。

### 3.2.3. 許容スパン長の計算

許容スパン長は、支持間隔は単純支持直配管において、固有振動数 $f_a = 3$  Hz程度に設定する。これは、1Gの地震力に対して、最大変位量40mm程度となる。

$$2\pi f_a = \left( \frac{\lambda}{L_a} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\Gamma_p}} g$$

ここで、

$L_a$	: 許容スパン長	(m)
$p$	: 管1mあたりの管材重量	(N/m)
	$\Gamma_p = \pi D t \rho g \times 10^{-6}$ 、	: 管材比重
	(kg/m)	
	D: 管平均径(mm)、t: 管厚(mm)	
	: pp 梁の1次のモード定数	= (-)
$g$	: 重力加速度	(m/s <sup>2</sup> )
$EI$	: 管材の曲げ剛性	(N・m <sup>2</sup> )

$$I = \frac{\pi}{8} D^3 t \times 10^{-12}$$

これより、E=206 GPa とすると、次式をうる。

$$\frac{1}{f_a} = 0.35150 \left( \frac{L_a}{\sqrt{D}} \right)^2, \text{ここで、} f_a \cong 3 \text{ とおけば、} L_a \cong \sqrt{D} \quad (\text{m})$$

### 3.2.4. 付加重量に関する補正

慣性力の影響に関して、配管そのものの重量のほかに内部流体の重量保温材の重量や保温材等の重量などのような配管の長さにより作用する重量（分布重量という。）弁などのようにある点に作用する重量 w（集中重量という。）などの効果を考慮しなければならない。特に集中重量の効果で大きく揺れないような考慮が重要である。そこで、これらの付加分布荷重や付加集中重量がある場合の許容スパン長の算定方法を示す。

分布重量が配管材だけの重量に流体重量、保温材重量などが付加される時の分布荷重を  $d$  (N/m) とするとき許容スパン長  $L_d$  (m) は、3.2.3 と同じように、

$$2\pi f_a = \left( \frac{\lambda}{L_d} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\Gamma_d}} g, \text{すなわち、} L_d = \phi_d L_a, \quad \phi_d = \left( \frac{\Gamma_p}{\Gamma_d} \right)^{0.25}$$

分布荷重補正係数  $\phi_d$  を導入して  $L_a$  を補正すればよい。

次に、分布重量  $d$  のほかに集中重量  $w$  (N) があるときの許容スパン長  $L_{d+c}$  は、集中重量  $w$  を等価な分布重量  $\Gamma_c = \alpha \frac{w}{L_{d+c}}$  に置き換えて、 $L_{d+c} = L_d + L_c$  として、次式により評価する。

$$2\pi f_a = \left( \frac{\lambda}{L_{d+c}} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\Gamma_{d+c}}} g, \text{すなわち、} L_{d+c} = \phi_c L_d, \quad \phi_c = \left( \frac{\Gamma_d}{\Gamma_{d+c}} \right)^{0.25}$$

これらの関係から、 $\frac{1 - \phi_c^4}{\alpha \phi_c^3} = r_c$  がえられる。（ただし、 $r_c = \phi_d^3 \frac{w}{W_a}, W_a = L_a \Gamma_p$ ）

ここで、 $\phi_c$  の値は、たとえば、集中荷重  $w$  がスパン中央にあるとしたときの最大たわみが分布荷重  $c$  による最大たわみと等しくとると  $\phi_c = 1.6$ 、両者の固有振動数を等しくとると  $\phi_c = 2.03$  となり、ほぼ  $\phi_c = 2.0$  をとればよいことが分かる。

そこで、 $\phi_c = 2.0$  として、横軸を  $r_c$ 、縦軸を  $\phi_c$  として、グラフを描くと、下図の曲線 A となる。既知の  $r_c$  の値に対して同図曲線 A から  $\phi_c$  を得て、分布及び集中荷重がある場合の許容スパン長を算出できる。 $\phi_c$  は集中重量補正係数、 $r_c$  は集中重量率という。



集中重量補正係数  $c$

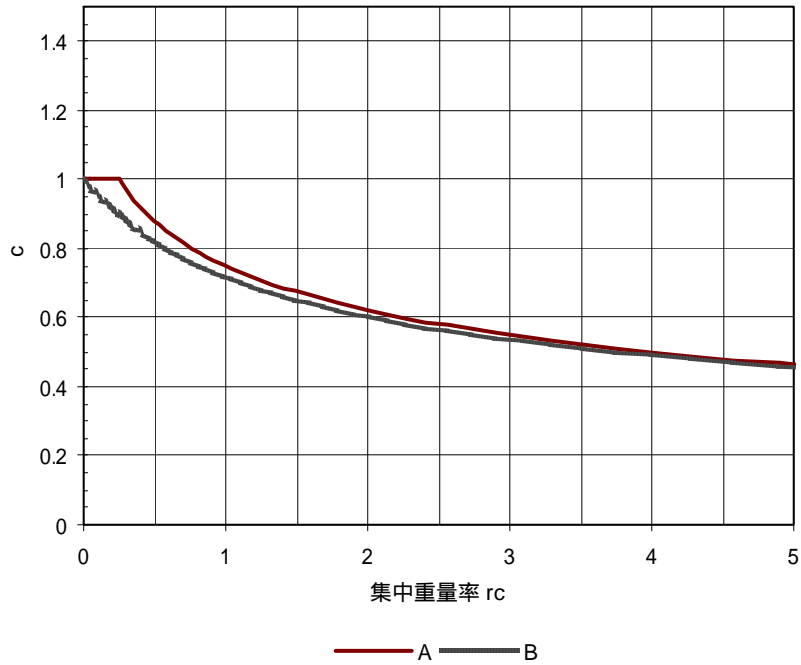


図 3 集中重量補正係数

実際の運用においては<sup>2)</sup>、曲線 B (表 2) を採用している。これは、どんなに小さな荷重であっても一律に  $c$  を算出して許容スパン長を算出することを強制することは好ましくないとして、修正したものである。この場合、 $r_c = 0.25$  までは、スパン長を低減しないので、最大 20% 程度固有振動数が低下するが許容スパン法の趣旨に反するものでないとして、採用された。

表 2 集中重量補正係数

集中重量率の範囲	集中重量補正係数 $c$
$r_c \leq 0.25$	$c = 1$
$0.25 < r_c \leq 0.5$	$c = \frac{1.5}{1 + \sqrt{r_c}}$
$0.5 < r_c$	$c = \frac{9.66}{16.1 + r_c}$

## 4. あとがき

配管系に関する簡易耐震設計法である許容スパン法のうち慣性力による設計について基本的な考え方や歴史、式の由来などを解説した。実際の適用に役に立つと思う。有効に使って頂きたい。

このほか、基準の運用上、分岐のある場合、ループのある場合、管径がスパン途中で変化する場合など多くの解説が必要であるが、今回は紙面の都合で省略した。別途、解説することにする。

## 文献

- 1) 通商産業省昭和 57 年告示第 515 号：高圧ガス設備等耐震設計基準、1981.10
- 2) 高圧ガス保安協会：高圧ガス設備等耐震設計指針 レベル1 耐震性能評価（配管系）編、KHK E012-2-1997,1997.11
- 3) 高圧ガス保安協会：「高圧ガスの配管に関する基準」、KHKS0801、2004.3
- 4) ASME B31-7(NuclearPiping)、B31-1(Power Piping),B31-3(Refinery Piping)など
- 5) JLPA：“耐震設計講座（その 8）配管系の被害事例”、JLPA,Vol.41、No. 6,2004
- 6) 岡田、柴田：“配管の規格化による耐震設計作業の簡易化について”、機械学会講演論文集、第 46 期東京秋季 No.195（昭和 43 年 8 月）
- 7) 高圧ガス保安協会：「高圧ガス耐震化推進委員会 報告書」（委員長 鶴戸口英善）平成 2～6 年度 通商産業省委託事業
- 8) 通商産業省：高圧ガス施設等耐震設計基準第 3 次案、高圧ガス及び火薬類保安審議会、地震対策分科会、昭和 52 年 3 月
- 9) 通商産業省：「兵庫県南部地震に伴う LP ガス貯蔵設備ガス漏洩調査」（中間報告書及び最終報告書）平成 7 年、高圧ガス保安協会
- 10) JLPA：“耐震設計講座(その 7)配管の地震時の可とう性について”、JLPA,Vol.41、No. 5,2004、及び、“耐震設計講座（その 9）地盤変状で生じる基礎の変位と配管設計”、JLPA,Vol.42、No. 1,2005