

# フランジ継手の耐震設計について

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

平成7年1月17日午前5時46分に発生した兵庫県南部地震で東灘区のLPガス貯蔵施設が地盤の液状化によりかなりの被害を受けた。特に容量20,000トンの平底円筒形貯槽の受払い配管系の受払いノズルフランジ継手部で周辺地盤の地盤変状により曲げモーメントを受け開口し、内部流体のLPガスの漏洩が発生したものであり、7万人の避難勧告が出された。

受払い配管系は平底円筒形貯槽の受払いノズルから元弁及び緊急遮断弁が取り付けられたあと伸縮継手で下流側の配管系と強制変位に対して縁切りされていた。

緊急遮断弁はバリアブルハンガーを通して架構で支持され、元弁はバリアブルハンガーを通して貯槽外槽に支持されていた。

緊急遮断弁を支持する架構の基礎は杭構造でなく、架構周辺の液状化による地盤変状は、約75cm地盤の沈下及び約65cmの南護岸方向水平移動であった。一方、平底円筒形貯槽の基礎は杭構造であり、地盤変状によるノズル部分の移動はほとんど見られなかった。このため、架構・貯槽間の相対変位が生じ、架構重量が配管系に負荷される状態となり受払いノズルフランジ継手部に過大な曲げモーメントが発生し開口してLPガスの漏洩に至った。

この被害を受けて高圧ガス保安法に係る「高圧ガス設備等耐震設計基準」が改正<sup>(文献1)</sup>され、配管系の耐震設計が義務付けられ、フランジ継手からの漏洩に対する設計基準が規定された。

運転時に対する強度・漏洩評価については、管フランジの計算基準として、JIS B 2205-1991「管フランジの計算基準」がある。この計算基準は内圧、あるいは、外圧に対するフランジの応力を計算するもので、接続する配管系からの外力を考慮していない。

本稿では、配管フランジ継手に曲げモーメント及び配管軸力が作用したときのフランジ継手からの気密性の保持（漏洩）に関する評価方法を解説する。

## 2. フランジ継手の力学

フランジ継手は、フランジ本体、ボルトおよびガスケットで構成されている。その挙動は構成する各々の部品の特性の多くの因子によるため、複雑である。ここでは、ボルトとガスケットの変形だけを仮定して、フランジ本体は変形しないと仮定してフランジの挙動の概略を説明する。

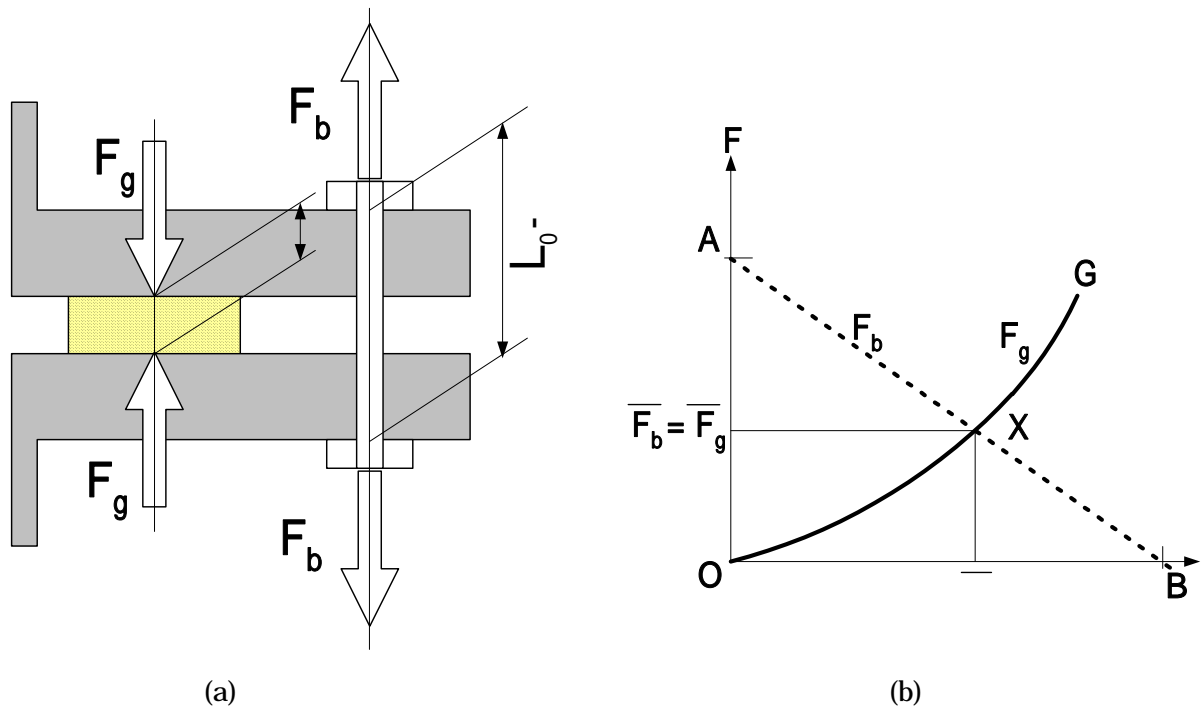
### 2.1. ガスケットとボルトの挙動

ガスケット面圧を確保するために、ボルトを締付けると、ボルトには、ボルト締付け力は引張応力として作用し、自然長から伸長した状態となる。ボルト締付け力はフランジに対しては、フランジ間隔を狭める方向に作用する。この時、ガスケットはガスケット面圧に相当する圧縮力が作用し、自然厚さから縮んだ状態である。ガスケット圧縮力はフランジに対しては、フランジ間隔を広げる方向に作用する。

以下、話を簡単化するために、ガスケットとボルトのみが変形するとし、フランジ等は変形しないとす。図 1 において、横軸はガスケットの圧縮変位量  $\delta_g$  とし、縦軸はフランジに作用する力（ガスケット圧縮力  $F_g$  又はボルト締付け力  $F_b$ ）としている。

曲線 OG は、ガスケット圧縮力とガスケット圧縮変位量を表す曲線であり、O 点はガスケットには力が作用せず、変形（縮み）はない。（以下、このときのガスケット厚さを「ガスケット自然厚さ」という。） ガスケットの圧縮変位量  $\delta_g$  が増加するに応じてガスケット圧縮力は、曲線 OG に沿って増加していく。

直線 AB は、ボルトの荷重・変位を表す直線であり、A 点は、フランジ間隔がガスケット自然厚さ  $\delta_0$  になるとき（ $\delta_g = 0$ ）のボルト締付け力を表している。ガスケットが縮む（ $\delta_g$  が増加する）とボルトは伸び量は減少し、ボルト締付け力は直線 AB に沿って低下してゆく。直線 AB と横軸との交点 B は、ボルト反力が生じておらずボルト自然長に相当するフランジ間隔（ $\delta_g = \delta_0 - \delta_b$ ）であることを表している。



$F_g$  : ガスケット圧縮力  
 $F_b$  : ボルト締め付け力  
 $L_A$  : A 点に対するボルト長さ  
 $t_0$  : ガスケット厚さ  
 $x$  : ガスケット自然厚さ  
 $y$  : ガスケット圧縮量

図 1 フランジ継手に作用するボルト締め付け力とガスケット圧縮力

### 2.2. 初期締め付け時のガスケット面圧

初期締め付け時は、フランジ間隔を狭める方向に作用するボルト締め付け力と広げる方向に作用するガスケット圧縮力は等しい。したがって、図 1 において曲線 OG と直線 AB との交点 X が締め付け時の状態を表し、その x 軸の値  $x$  がガスケットの圧縮量、F 軸の値  $F_b = F_g$  がボルト締め付け力及びガスケット圧縮力を表している。

初期締め付け時のガスケット面圧  $\bar{p}_g$  は、

$$\bar{p}_g = \frac{F_g}{\pi D_e w} \quad \text{--- (式 1) ---}$$

ここで、 $D_e$  : ガスケット有効径  
 $w$  : ガスケット有効幅

### 2.3. 内圧が作用する時のガスケット面圧

内圧  $p$  に係るガスケット面圧  $\sigma_p$  は、フランジを広げる方向に作用する。

$$\sigma_p = \frac{D_e}{4w} p \quad \text{(式 2)}$$

この結果、フランジは広げられ、ガスケットは初期締付の状態からガスケット圧縮力（フランジ間隔を広げる方向の力）は減少する一方、ボルトは伸長し締付け力（フランジ間隔を狭めんル方向の力）は増加して、内圧とガスケット圧縮力及びボルト締付け力が釣り合う。この様子を図 2 に示す。

図 2 において、内圧  $p$  の管軸方向の総和  $F_p$ （以下「内圧力」という。）が作用すると、初期締付時の状態  $X$  から内圧負荷時の状態  $P$  にガスケットの復元力曲線上を移動する。ガスケット厚さは  $\bar{w}$  から  $w$  に増える。すなわち、ガスケット圧縮量は  $\bar{w}$  から  $w$  に減少する。ガスケット面圧は、 $\bar{F}_g$  から  $F_g$  に減少し、ボルト長さは長くなりボルト締付け力は  $\bar{F}_b$  から  $F_b$  に増える。

力の釣り合いを考慮すると、

$$F_b = F_g + F_p \quad (\text{式 3})$$

となる。

いま、ガスケットの復元力曲線は直線であり、 $X$  の位置にかかわらず、一定の勾配であると仮定すると、

$$F_g = \bar{F}_g - c \cdot F_p \quad (\text{式 4})$$

$$\text{すなわち、} \quad p_g = \bar{p}_g - \cdot p \quad (\text{式 5})$$

ここで、 $c$  及び  $\cdot$  は、ガスケットの復元力特性及びボルト特性及び圧力の負荷特性に関する定数である。 $p_g$  及び  $\bar{p}_g$  は、下式による。

$$p_g = \frac{F_g}{\pi D_e w} \quad , \quad \bar{p}_g = \frac{\bar{F}_g}{\pi D_e \bar{w}} \quad (\text{式 6})$$

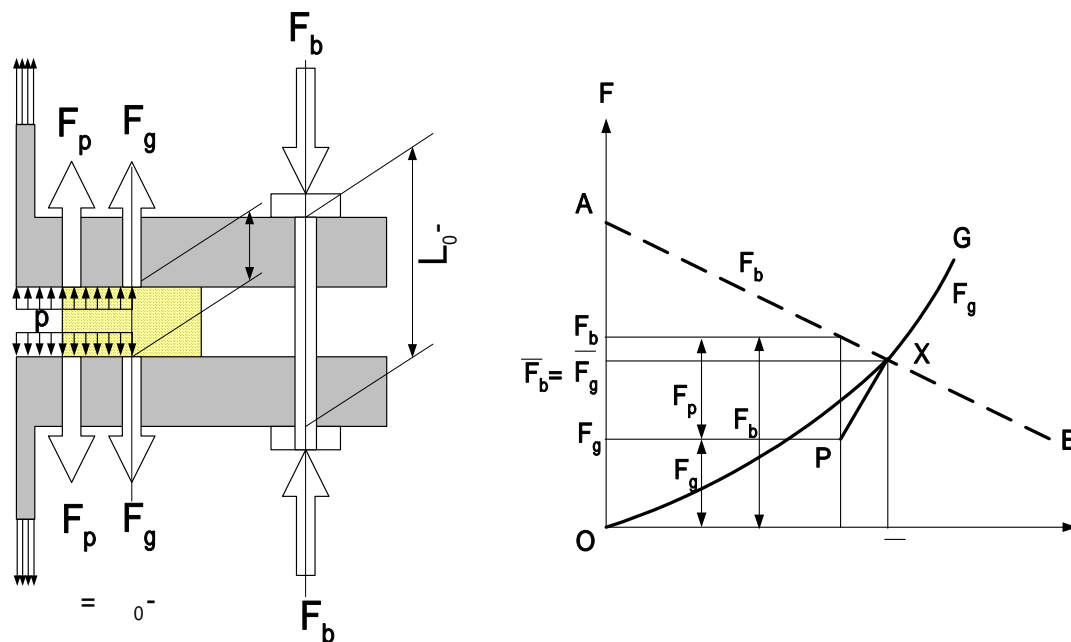


図 2 圧力負荷時のガスケット面圧

## 2.4. 地震時に対するガスケット面圧

地震時には地震慣性力や地盤変状による配管の変位応答によりフランジ継手には配管曲げモーメント  $M$  及び配管軸力  $F_1$  が作用する。

これらの外力及び内圧によるガスケット面圧分布及び最大面圧  $\sigma_{\max}$  は(図 3)のようになる。

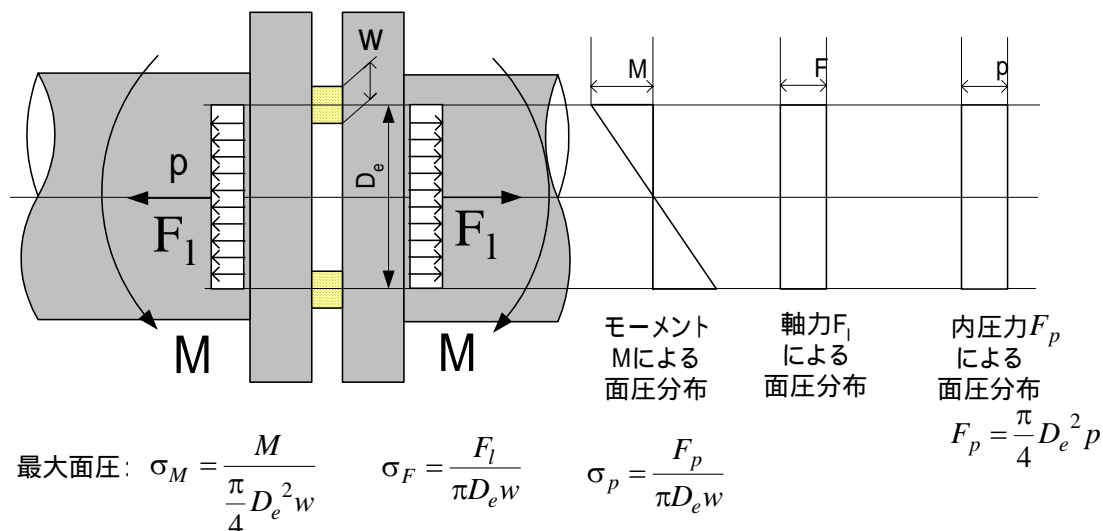


図 3 外力（圧力  $p$ 、曲げモーメント  $M$  及び軸力  $F_1$ ）に対するガスケット面圧

外力（圧力  $p$ 、管曲げモーメント  $M$  及び管軸方向引張力  $F_1$ ）による最大面圧  $\sigma_{\max}$  は

$$\sigma_{\max} = \sigma_M + \sigma_{F_1} + \sigma_p = \frac{D_e}{4w} \left( p + \frac{4F_1}{\pi D_e^2} + \frac{16M}{\pi D_e^3} \right) \quad (\text{式 7})$$

と計算される。

$$\text{ここで、} \quad p_e = p + \frac{4F_1}{\pi D_e^2} + \frac{16M}{\pi D_e^3} \quad (\text{式 8})$$

をフランジ継手外力を考慮した等価圧力と定義すると、(式 7)は、

$$\sigma_{\max} = \frac{D_e}{4w} p_e \quad (\text{式 9})$$

となり、内圧だけが作用するときのガスケット面圧に対する効果を表す(式 2)に対応する。

外力としての曲げモーメント  $M$  及び軸力  $F_p + F_1$  に係るガスケット円周にそって分布する面圧（最大  $\sigma_{\max}$ ）が作用するので、フランジ両面の間隔の他にフランジ両面の開き角の効果も考慮して、外力とボルト及びガスケットに係る荷重との釣り合い式による複雑な計算が必要となる。ここでは、計算結果だけを示すと次のようになる。

$$p_g = \bar{p}_g \cdot p_e \quad (\text{式 10})$$

この式は、内圧だけの(式 5)に対応する。ここで、 $\bar{p}_g = 0.75m$

地震時にフランジ継手に作用する曲げモーメント及び軸方向力に対するこの簡易漏洩評価方法に関して、通商産業省の委託事業として高圧ガス保安協会が行った一連の試験でその(式 10)の妥当性が確認されている。(文献 5),文献 6)

### 3. フランジ継手からの漏洩評価

フランジ継手からの漏洩評価は、現状では ASME BPV(Boiler & Pressure Vessel) code によっている。ここでは、この方法に従い解説する。

#### 3.1. ASME BPV code における漏洩に関する要請

フランジ継手からの漏洩性能に関して、ASME BPV(Boiler & Pressure Vessel) code では、次の二つの要請を行なっている。これらの要請の中で使用されているガスケット係数  $y$  及び  $m$  は、様々な種類のガスケットに対してデータを提供している。日本国内の圧力容器設計基準 (JIS 圧力容器、高圧ガス、労基法など) では、この ASME BPV Code を準用している。

##### (1) 初期締付時に対する要請

初期締付によりガスケット面圧  $\bar{p}_g$  を最小締付圧  $y$  以上にして、フランジシール面にガスケットを馴染ませる。すなわち、

$$\bar{p}_g \geq y \quad (\text{式 11})$$

ここで、 $\bar{p}_g$  : 初期締付時のガスケット面圧、 $y$  : 最小締付圧 (N/mm<sup>2</sup>)

##### (2) 内圧が作用する時に対する要請

内圧  $p$  が作用すると、内圧による力のためにボルトが伸長して、ガスケット面圧が減少する。ガスケット面圧  $p_g$  が減少してもその気密性能を評価するために、次式を確認する。

$$p_g \geq mp \quad (\text{式 12})$$

ここで、 $p_g$  : 外荷重を考慮したガスケット面圧、 $p$  : 内圧、 $m$  : ガスケット係数

#### 3.2. 初期締め付け力

初期締め付け力は、ガスケット面圧が  $\bar{p}_g = y$ 、すなわち、 $\bar{F}_b = \bar{F}_g = D_e y$  が必要であり、初期締め付け時のボルト応力

$$\bar{\sigma}_b = \frac{\pi D_e w}{\frac{\pi}{4} d_b^2} y$$

が最低必要応力となる。

通常のトルクレンチを用いた手締めによる場合、得られる初期ボルト締付応力の推定値は次式で与えられる(文献 4)。

$$\sigma_b = \frac{1500}{\sqrt{d_b}}$$

ここで、 $\sigma_b$  = ボルト初期締付応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$d$  = ボルト公称径 (mm)

この式から、M24 のボルトであれば、306 (N/mm<sup>2</sup>) 程度の初期ボルト締付応力と算出される。ボルト応力は降伏点以下 (たとえば 90%) となるようボルトサイズを設定することが望ましい。

### 3.3. 地震時の漏洩評価

運転時の加圧状態における漏洩評価は、(式 12)に(式 5)を代入して、次式による。

$$p_g = \bar{p}_g - \sigma_b \cdot p \quad mp \quad (\text{式 13})$$

このときガスケットの面圧は低下するが、 $mp$  以上となるようガスケット面圧  $p_g$  を設定しなければならない。

さらに、地震時など圧力の他に外力としての曲げモーメント  $M$  及び軸力  $F_1$  が作用すると(式 13 次式による。

$$p_g = \bar{p}_g - \sigma_b \cdot p_e \quad mp \quad (\text{式 14})$$

ただし、 $e = 0.75m$

ガスケット面圧はさらに低下する。

熱応力や流体の変動圧、ボルト初期締め付け時の条件 (締め付け順序など) が不確定なフランジの荷重条件を考えると、ガスケットの種類により規格で示される必要ボルト締付け荷重の 1.4 ~ 2.0 倍程度を割増して締付けることがおくことが望ましい。

## 4. 高圧ガス設備等耐震設計基準におけるフランジ継手に関する漏洩評価

高圧ガス設備等耐震設計基準においてフランジ継手が保有すべき耐震性能は、接続する配管からの荷重に対して有害な残留変形のないこと (レベル 1 地震動) と、気密性 (レベル 1, 2 地震動) を維持することである。

レベル 1 地震動 (耐震設計構造物の供用期間中に発生する確率の高い地震動) に対して有害な変形などが残留せず高圧ガスの気密性が保持されることを確認する<sup>(文献 2)</sup> ためにフランジ継手については、設計水平地震力、設計鉛直地震力および配管支持点の移動に係る配管から加わるフランジ継手外力を考慮した等価圧力に対して、フランジ継手に発生する応力 (フランジの半径方向応力、フランジの周方向応力、ハブの軸方向応力) を計算する。算定方法は日本工業規格 JIS B2205-1991 「管フランジの計算基準」による。

また、レベル 2 地震動 (耐震設計構造物の供用期間中に発生する確率の低い高レベルの地震動) では、高圧ガスの気密性が保持されることを確認する<sup>(文献 3)</sup>。このとき、(式 14) を満足しているかを判定することにより漏洩評価を行う。

このレベル 2 地震動に対する評価はレベル 1 地震動と比較して 2 倍程度の荷重を許容しており、これは、レベル 1 地震動とレベル 2 地震動の地震動の大きさの差とほぼ等しい。

なお、レベル 1 地震動と運転時に対する強度評価・漏洩評価を比較すると許容応力の取り方に 1.5 程度の違いがある。

## 5. フランジ継手に関する今後の動向

フランジ継手は、フランジ本体、ボルトおよびガスケットで構成されている。その挙動は構成する各々の部品の特性の多くの因子によるため、強度および漏洩に関しては数多くの研究が現在でもなされている。運転時に対する強度・漏洩評価として将来的には漏れ量などを設計に反映する手法が整備される方向にある。

特に、PVRC ( Pressure Vessel Research Committee , USA ) のボルトフランジ締結体委員会 ( Bolted flanged Connections Committee , 略称 BFC ) では、新しいガスケット係数 (  $G_b, a, G_s$  ) , タイトネス・パラメータ  $T_p$  等を使ったフランジ継手の設計方法が提案<sup>文献 7)</sup>、<sup>(文献 8)</sup>、<sup>(文献 9)</sup>されている。PVRC の考え方は基本的にはガスケットからは微量でも漏洩が発生することを認め、許容される漏洩量を評価した上で、ガスケット・フランジの設計、初期締付け量の設定を行なうことから出発している。

PVRCで提案されている方法およびヨーロッパがこれに基づいて作り上げている方法 ( EN1092-1 , EN1591 など ) のふたつが今後世界の標準的方法になる可能性がかなり高い。

このような、フランジ継手の動向を考慮すると、今後、次の項目に関して、規定が作成され、また研究・開発が行われるものと思われる。

実際の内圧作用時等のガスケット応力は、(式 13)、(式 14)によっているが、より正確に推定する必要がある。

漏洩条件は(式 12)によっているが、漏洩量との関係を明らかにする必要がある。つぎに与えられた許容漏洩量に対してボルト荷重をどのように設定するかが、次の課題である。

漏洩に対してボルト初期締付け荷重を大きくとることが重要であるが、従来規格では過大な評価となっていると考えられ、フランジ継手の強度設計法の開発が課題である。

フランジ継手の組み立てにあたっては、最初の前提はボルト初期締付け力が一様に締結されていると仮定していることである。実際には、一様に設定したボルト初期締付け力を多数のボルトに与えることはかなり難しく、最適なボルト締付け法の開発が大きな課題である。

## 6. さいごに

配管フランジ継手に配管曲げモーメント及び配管軸力が作用するときのフランジ継手の気密性保持に関してその考え方の概略を説明した。

現在フランジ継手の設計では、経験的に設定されたガスケット係数  $y$  及び  $m$  を仮定して安全側に計算された仮想的な初期締め付け力及びガスケット面圧に対してフランジの強度



計算を行っている。フランジ継手の気密性保持を考慮するうえでガスケット面圧と漏洩評価が明確に評価されていない。また、ガスケット面圧を支配する重要な因子である初期締め付け力の設定に関して言及していない。ボルトの締め付け力管理も十分行われていない場合もあると思われる。より厳密な設計と据付・維持管理が望まれる。

近年の環境問題の高まりによる漏洩量の規制に関して、欧米では化学プラントのフランジ継手からの微小漏洩が環境に与える影響が問題になっており、国内のガスケット規格の検討が行われている。今後、新しいフランジ継手の漏洩評価法が確立していくものと思われる。今回は許容漏洩量を考慮したフランジの設計に関しては紙面の関係で解説できなかった。(文献 7)(文献 8)及び(文献 9)等を参考にして頂きたい。

フランジ継手の設計に関して、今回の解説が今後の動向に対応する際に参考になれば幸いである。

- 文献 1) 通商産業省告示平成 9 年第 143 号「高圧ガス設備等耐震設計基準の一部改正」,平成 9 年 3 月 25 日
- 文献 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 E 012-2-1997
- 文献 3) 高圧ガス保安協会,高圧ガス設備等耐震設計指針  
レベル 2 耐震性能評価(解説編) KHK E 012-3-1997
- 文献 4) ASME Sec. Div.1 Appendix S-1995,「Boiler and Pressure Vessel Code」
- 文献 5) F.Ando,T.Sawa,M.Ikeda,2002,「A New Design Method for Piping Components Against Leakage and Damage Subjected to High Level Earthquake Load」,ASME,PVP-Vol.445-1,pp113-118
- 文献 6) F.Ando,T.Sawa,M.Ikeda,2002,「Simplified Method for Aseismic Design of Flanged Joints」,ASME,PVP-Vol.354,pp203-208
- 文献 7) K. H. Hsu and James R. Payne, ASME Valves, Bolted Joints, Pipe Supports, and Restraints, 236,(1992), pp.79-92.
- 文献 8) K. H. Hsu and James R. Payne and J. R. Winter, ASME Advanced Computer Applications, 274 (1994), pp.53-62.
- 文献 9) John H. Bickford, Gaskets and Gasketed Joints, (1997),pp.423, Marcel Dekker