

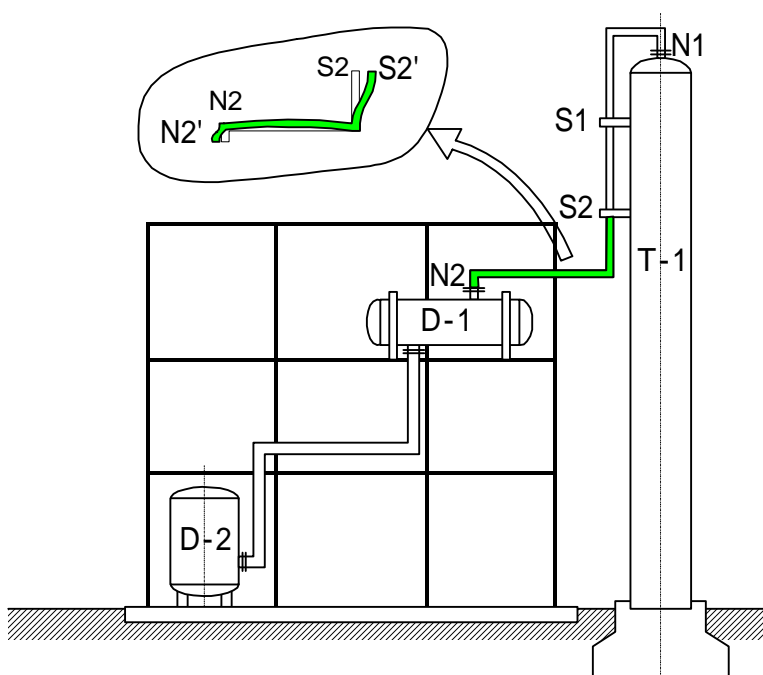
配管の地震時の可とう性について

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

配管は、架構や塔槽類（以下「配管支持構造体」という。）にサポートを通して支持されている。配管支持構造体は地震時揺れると、配管が支持される点は変位する。支持点間の相対的な変位があると、配管は強制的に変形させられる。大きな変形があると配管の損傷に至ることもある。配管を支持する構造物の揺れに対して配管は十分可とう性を付与すること重要である。



塔 T-1 の揺れのために、支持点 S2 は S2' に変位する。架構及びドラム D-1 の揺れのために、ノズル N2 は N2' に変位する。
この結果、S2 及び N2 の間には相対的な変位差が生じ配管 S2 - N2 は配管 S2' - N2' に変形する。

図 6 - 1 塔槽・架構の揺れによる配管の変形

地震による配管の損傷はこのような配管支持構造体の揺れに起因するケースが多い。配管系の耐震設計を行うに際しては、配管そのものに作用する慣性力の他にこの支持点の相対変位により発生する荷重を考慮しなければならない。配管系を解析により耐震性能評価を行なう場合は、慣性力及び支持点の変位を入力してコンピュータにより行う。しかしながら、全ての配管について解析による耐震性能評価を行なうことは時間と労力の面から現実的でない。通常は重要な配管系に対しては詳細解析を行なうが、多くの配管については簡易的な検討により耐震性能を確保する設計が行なわれている。また、詳細解析を行なう

場合も、配管配置・ルート計画を行なう段階においても、簡易的に耐震性を確認しながら行なうことにより効率的な設計を行なうことができる。

本稿では、支持点の相対変位に基づく地震力に対して簡易的に耐震性を確保する方法について紹介する。

2. 相対変位に関する簡易耐震性能評価

2.1. 相対変位に関する耐震性能評価式

高圧ガス保安法の高圧ガス設備等耐震設計基準（昭和 56 年通産省告示第 515 号、平成 9 年通商産業省告示第 143 号、以下「耐震告示」という。）第 17 条第 2 項に配管の相対変位に関する耐震性能を確認する方法が次のよう規定されている。

第 17 条（配管支持の方法）第 2 項

前項第 2 号に掲げる配管支持構造物間の配管に係る地震動の方向の相対変位量は、次の算式により得られる変位吸収能力を超えないことを確認すること。

$$a = L \cdot f$$

この算式において a 、 f 及び L は、それぞれ次の値を表すものとする。

a 配管支持構造物間の配管に係る変位吸収能力（単位 ミリメートル）

L 地震動の方向に直交する平面に対する配管の投影長（単位 ミリメートル）

f 配管 1 ミリメートル当たりの変位吸収能力であつて、次の算式により得られる値

$$f = \frac{C \cdot \varepsilon_y \cdot L}{D}$$

この算式において C 、 ε_y 及び D は、それぞれ次の値を表すものとする。

C 配管の許容ひずみにより定まる定数であつて 0.67

ε_y 配管材料の降伏ひずみ

D 配管の外径（単位 ミリメートル）

この規定の由来及び相対変位に関する基本的な考え方を解説する。適切に設計で考慮されることを期待するものである。本規定によると、配管スパン（サポートから隣接するサポートまでの配管）に関して、次の条件を満たす時、相対変位に関する安全性が確認できるとしている。

サポート間の相対変位 配管投影スパン長から算出される変位吸収能力

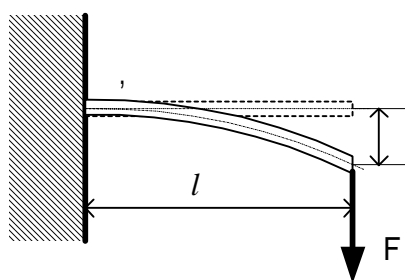
変位吸収能力計算方法は 2.2. に、配管投影スパン長のとり方は 2.3. に、また、サポートの移動量の簡易的な計算方法は 3. 述べることにする。

2.2. 変位吸収能力とは

片持ち配管(1端固定、他端自由)に関して、図6-2のように、自由端に力Fが作用し、先端たわみ、固定端の応力及びひずみは次式により算出される。

$$\sigma = \frac{l}{2I/D} F$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{lD}{2EI} F$$



$$\delta = \frac{l^3}{3EI} F$$

図6-2 片持ち梁の変形

これらの式より、

$$\delta = \left(\frac{2}{3} \frac{l}{D} \varepsilon \right) l \text{ となる。}$$

上式は、先端にデルタなる変位がある時、ひずみ量はであることを表している。そこで、この式を次のように解釈する。「許容できるひずみ = ε_a を与えた時、許容できる先端変位は = δ_a である。」このことを、このような配管の「変位吸収能力は δ_a である。」といい、両端の相対変位が当該 δ_a より小さければ、許容ひずみ ε_a 以下となるので安全性は確保できているといえることができる。

実際の配管では、片持ち配管でも両端はさまざまな拘束条件となっているため、2/3の値とは異なるので、一般的に、変位吸収能力は $\delta_a = \left(C \frac{l}{D} \varepsilon_a \right) l$ であると表せる。両端固定であれば $C=1/3$ となる。両端が曲がり管であれば、 $C>2/3$ となると考えられる。正確には、詳細解析によりCの値が設定できる。

耐震安全性の評価を簡易的に行なうために、配管材料の粘り(降伏後の塑性変形量が大きくても安定な構造的を保つこと)を考慮すれば、許容ひずみを降伏ひずみ ε_y とすれば、Cのばらつきを十分にカバーできると考えられる。

そこで、簡易評価基準として、 $\delta_a = \varepsilon_y l$ 、 $C=2/3$ と設定することとする。

2.3. 配管投影スパン長

実際の配管系では、図6-3(a)及び(b)のように、直管と曲がり管が組み合わされて立

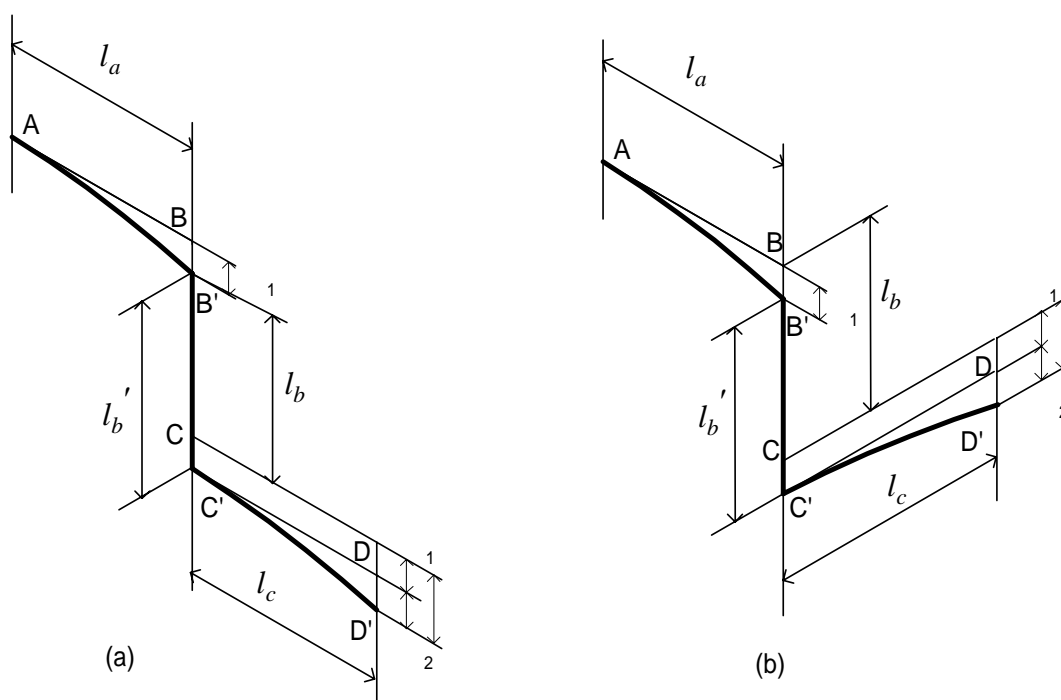
体的な形状となっている。

(a)又は(b)で、A点及びD点の間にy方向に相対変位が生じた時、拘束点A及びB点のサポートにそれぞれy方向に上向き力F及び下向き力Fが作用して、配管ABCDは配管AB'C'D'と変形する。

配管AB部分ではせん断力Fが作用して、y方向への変形 δ_1 は、A点及びB点における配管拘束条件にもよるが、略々、2.2の簡易式により算定できる。

同様に配管部分CDでも、y方向への変形 δ_2 は、略々、2.2の簡易式により算定できる。

配管BC部分は、相対変位によるサポート反力Fは、管軸方向に作用するのでy方向の変形は無視できる。したがって、D点でのy方向移動量は、略々、 $\delta = \delta_1 + \delta_2$ で計算することができる。



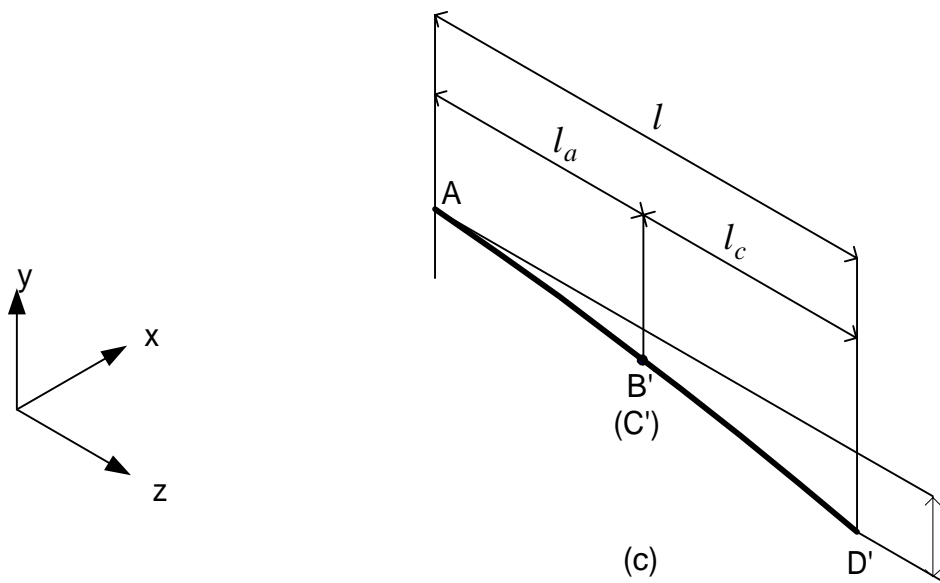


図 6 - 3 一般配管系の変位吸収能力の評価モデル

そこで、図 6 - 3 (a)及び(b)全体としての変位吸収能力（の許容限界相対変位量）の算定に当たっては、F に対して変形しうる配管は、変位方向と直行する配管 AB 及び CD であり、変位方向と並行する配管 BC は変形し得ないとする。すなわち、変位方向と直行する配管のみが変位吸収能力を有するといえる。

以上のことから、(a)又は(b)の配管 ABCD の変位吸収能力は、図 6 - 3 の(c)のように、変位方向と直行する配管 (l_a 、 l_c) を直列につなぎ合わせたモデル ($l = l_a + l_b$) に関して、前節の簡易式で $a = y$ 、 $C = 2/3$ として、算定することができる。耐震告示ではこの l の長さを投影スパン長と称している。

3. 配管支持構造物の地震時変位の簡易計算式

配管サポート間の相対変位の算出はそれぞれのサポートが設置されている塔槽類や架構などの配管支持構造物の揺れ量（変位）を算出して、その絶対値和を両端の最大相対変位とする。

配管支持構造物の揺れ量は詳細解析によれば良いが、ここでは、簡易的に算出する方法を紹介する。

3.1. スカート式の自立式の塔類

スカート式の自立式の塔類のように曲げ系でモデル化できる場合、計算モデルとして下図のように一端固定、他端自由の断面一定梁を考える。

地震力 K_{MW} に対して変位は、1次のモードを自重を水平方向に静的に負荷した時の変位に近似できるとして、次式で表せる。

$$\delta = \frac{K_M w H_T^4}{8EI} \frac{\eta^2(6-4\eta+\eta^2)}{3}$$

ただし、 $\eta = h/H_T$

固有周期は、次式で計算できる。

$$\frac{T}{2\pi} = \left(\frac{H_T}{\lambda}\right)^2 \sqrt{\frac{w}{gEI}}$$

両式より、高さ $h = H_T$ における変位量は次式で計算できる。

$$\delta = K_M \frac{g\lambda^4}{32\pi^2} T^2 \frac{\eta^2(6-4\eta+\eta^2)}{3}$$

そこで、 $\lambda = 1.875$ 、 $g = 9800 \text{ mm/s}^2$ とすると、

$$\frac{g\lambda^4}{32\pi^2} = 383$$

一方、

$$\frac{\eta^2(6-4\eta+\eta^2)}{3} \cong \eta^{1.5} \text{ と置けるので、}$$

$$\delta = 383 K_M T^2 \left(\frac{h}{H_T}\right)^{1.5}$$

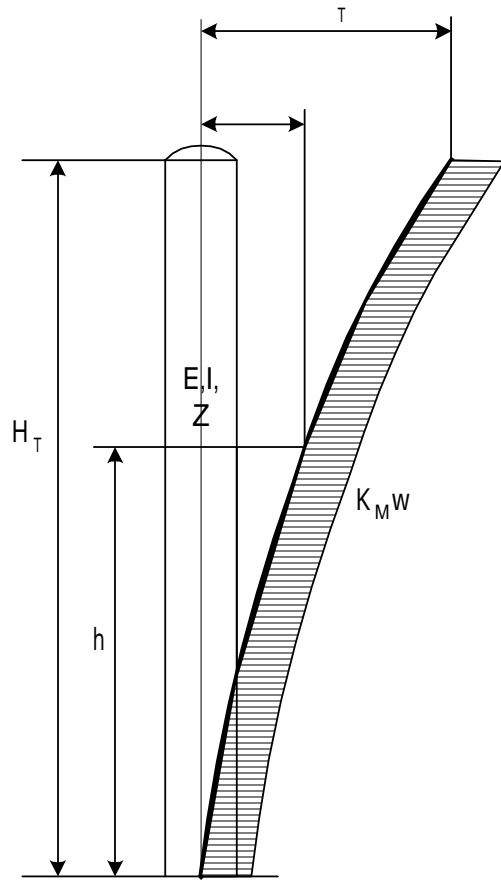


図6-4 塔類の地震時変位

さらに、スカート式の自立塔の場合概略固有周期は、 $T = 0.03 H_t$ と置き、また、 $K_{MH} = 2 K_H$ (応答倍率を2と設定している。)とすると、次のように簡易式が誘導できる。なお、2次モードの影響を考慮して定数383は $383 \times 1.3 = 500$ としている。

スカート式の自立塔の地震時変位は、

$$= C_b K_H \cdot H_t^{0.5} h^{1.5}$$

ここで、 C_b 、 K_H 、 H_t および h は、それぞれ、次の値を表すものとする

C_b : 当該配管支持点の変位 (mm)

K_H : 地表面における水平震度

C_b : 0.9

H_t : 当該自立式スカート支持塔の全高 (m)

h : 当該配管支持点の高さ (m)

なお、簡易式と理論式を比較すると、図6-5のようになる。

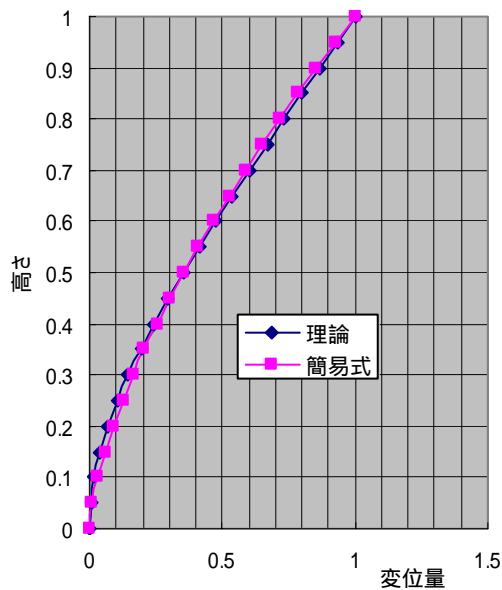


図6 - 5 簡易変形式と理論値の比較

3.2. 球形貯槽の場合

$$\delta = K_M \frac{W}{K}, \quad \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{gK}{W}}$$

そこで、球形貯槽の場合、 $T=0.5$ (s) としても安全側であるので、また、 $K_{MH} = 2 K_H$ とすると、次式のような簡易式が誘導できる。

球形貯槽の地震時変位は、

$$= 150 K_H$$

ここで、 および K_H は、それぞれ、次の値を表すものとする

：当該配管支持点の変位 (mm)

K_H : 地表面における水平震度

3.3. その他の配管支持構造物

その他の配管支持構造物の計算モデルとして、一様断面のせん断変形系を仮定する。

せん断変形係数： G (N/m²)、断面積： A (m²)、 単位長さ当たり自重： (N/m)

高さ： H_t (m) とすると、一次固有周期 T (s) は、次式により計算できる。($g = 9.8$ m/s²)

$$T = \sqrt{\frac{16\gamma H_t^2}{\kappa G A g}}$$

修正震度 K_M の時の最大変位 δ_{max} (mm) は、

$$\delta_{\max} = K_M \frac{\gamma}{2\kappa GA} H_t^2 \quad \text{この式は、} \delta_{\max} = 1000K_M \frac{T^2}{32} g$$

高さ h (m)における変位は(1次のモードを自重を水平方向に静的に負荷した時の変位に近似できるとして)

$$\delta = \delta_{\max} \left(2 - \frac{h}{H_t}\right) \frac{h}{H_t}$$

簡易式を作成するため、 $K_{MH} = 2 K_H$ 、 $T = 0.03 H_t$ とすると、次式のような簡易式が誘導できる。

$$\delta_{\max} = 1000K_M \frac{T^2}{32} g = 0.551K_H H_t^2$$

さらに、高さ方向分布を $\left(2 - \frac{h}{H_t}\right) \frac{h}{H_t} \approx 1.05 \left(\frac{h}{H_t}\right)^{0.6}$ と置き換えると、 $= 0.6 \cdot K_H H_t \cdot h^{0.6}$

その他の架構のような配管支持構造物の場合

$$= C_s \cdot K_H H_t \cdot h^{0.6}$$

ここで、 δ 、 K_H 、 C_s 、 H_t および h は、それぞれ、次の値を表すものとする

δ : 当該配管支持点の変位 (mm)

K_H : 地表面における水平震度

C_s : $C_s = 0.6$

H_t : 当該配管支持構造物の全高 (m)

h : 当該配管支持点の高さ (m)

なお、簡易式と理論式を比較すると、図6 - 6のようになる。

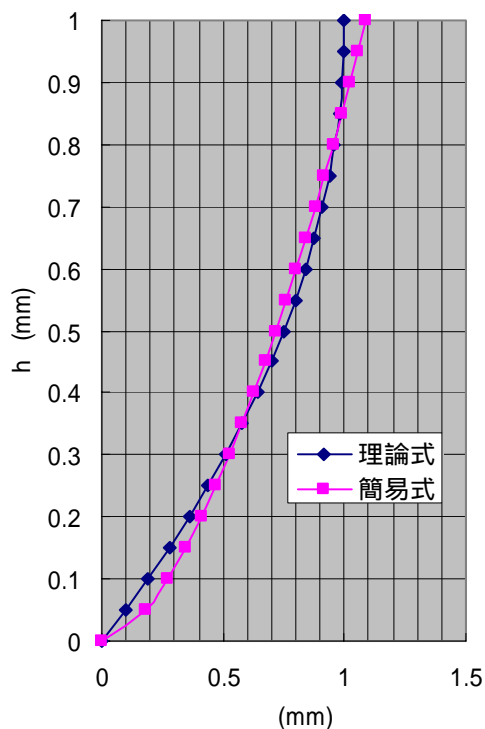


図 6 - 6 簡易式と理論値の比較

4. あとがき

今回は、配管の支持点の相対変位に対する耐震性能を確認するための簡易な判定法を紹介した。この方法は高圧ガスの耐震告示第 17 条で規定されている方法で、重要度の低い配管系に対して適用されているものであるが、他にも概略の安全性を簡便に確認する方法として有益である。たとえば、重要度が高くても配管系の配置設計の段階で、簡便に確認しながら配管ルート設計を適切に行なうことができる。また、既存設備の配管系の耐震性評価を行なう場合、現場でも簡単な諸元だけで評価ができる点で有益である。大いに利用して頂きたい。