
球形貯槽の地震時変位について

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

地震による配管の損傷は架構・パイプラックや塔槽類（以下「配管支持構造物」という。）の米揺れに起因するケースが多い。配管は、配管支持構造物にサポートを通して支持されている。配管支持構造物が地震の時に揺れると、配管が支持される点（支持点）は変位する。配管の支持点と支持点の間に相対的な変位差があると、配管は強制的に変形させられる。大きな変位差があると配管は、損傷に至る。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。

従来から塔槽類や架構などでは地震慣性力にたいしてその部材や継ぎ手部分に発生する応力を評価して耐震設計を行ってきた。これらの変形や変位量に対しては大きな設計要因とは考えていない。しかしながら、配管系の耐震安全性という観点からは塔槽類や架構の変形量は大きな設計要因となる。

今回は、球形貯槽を例にとり地震時変位量の算定の仕方について説明する。

2. 球形貯槽などのプラントの構造物は地震時にどのように揺れるか

地震により地表が揺れ（「地震動」という。）ると、貯槽類、圧力容器、配管系などの構造物（以下「構造物」という。）は揺れ（以下「地震応答」という。）て、変形あるいは変位する。地震動の強さ（一般には最大加速度）が同じでも、構造物の振動特性と地震動の波形特性が異なればその構造物の地震応答（「動的地震応答」という。）は異なる。プラントの構造物の耐震設計を行うときこれらの動的地震応答を考慮しなければ思わぬ被害が発生することになる。

たとえば球形貯槽は図1のように球殻の中心に球形貯槽の全質量が集中しているとして、1質点系振動モデルにより地震応答が計算できる。他の塔類や架構などの様な高さにわたり質量が分布するような構造物でも、最も揺れやすい固有周期（1次の固有周期という。）及びこの時の高さに沿った変形分布（1次振動モードといい、自重を水平方向にゆっくりと加力した時の変形の形で近似できる。）だけを考慮しても配管設計に必要な変位量としては、大きな誤差が生じない。

高圧ガス保安法などの規定で示されている応力等の算定方法は、このような1次の固有周期に関する1質点系の地震応答を考慮して作成されたものである。

固有周期は、その構造物の自由振動で揺れる周期で、最も揺れやすい周期である。この周期で加振してやると共振して振幅（揺れ幅）はどんどん大きくなる。構造物の固有周期 T は、1質点系の質量 (kg) および、ばね定数 (N/m) をそれぞれ M および k とすると、次式で計算できる。

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{k}} \quad (1)式$$

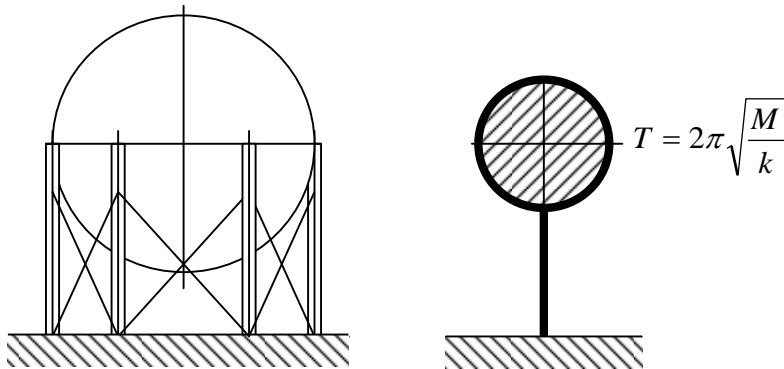


図 1 球形貯槽の応答解析モデル

このときの重心に作用する最大地震力 F (N)は、下式で計算される。

$$F = K_{MH}W \quad (2)式$$

この式で、 K_{MH} は修正震度で、図に示すように、その固有周期 T 及び減衰定数 h の関数である。 W (N) は自重であり、 $W = Mg$ で計算できる。 g は重力加速度で、 $g=9.80665 \text{ m/s}^2$ である。

したがって、地震時の最大変位量 (m)は、1,000 夫婦

$$\delta = \frac{F}{k}$$

(1)及び(2)式より、

$$\delta = \frac{K_{MH}Mg}{\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 M} = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 gK_{MH} = S_D(T, h) \quad (3)式$$

ここで、 $S_D(T, h)$ は、変位応答スペクトル (単位は m) と称せられ、地震時の重心における最大応答変位を表している。固有周期と減衰定数だけの関数で構造物の形状、寸法等によらない値である。

したがって、球形貯槽などのプラント構造物の重心点の地震時変位量の計算は a、固有周期 T を算定すること、b 減衰定数 h を設定して c 応答スペクトルから修正震度 K_{MH} を読み取ることに帰する。

a 固有周期 T

スカート支持の自立式の塔類、平底円筒形貯槽、レグ支持の塔類、球形貯槽及び塔槽類の架

構に関する固有周期の算定法が詳細^{参考文献 1)及び 2)}に規定されている。これらの規定による計算方法に関する各塔槽類ごとの固有周期の計算シートは参考文献 3) に示されている。

b 減衰定数 h

減衰定数に関しては、構造力学的、材料的な条件等の条件により影響を受け一律に設定するのが困難な定数であるが、耐震告示^{参考文献 1)}では耐震設計設備の種類に応じて、次表のように設定している。

球形貯槽	鋼管ブレースタイプ	0.03
	ロッドブレースタイプ	0.05

◎ 設計修正震度 K_{MH}

応答スペクトルから固有周期、減衰定数にたいして K_{MH} を読み取る。

また、経済産業省が開発した標準耐震設計プログラム（塔類に関しては SEISMIT-TW、球形貯槽に関しては SEISMIT-SP、横置円筒形貯槽に関しては SEISMIT-HV、架構に関しては SEISMIT-ST）は詳細な振動モデルにより応答解析をおこない、応力の計算とともに地震時変位計算も行っているので参考にされたい。

3. 球形貯槽の簡易式

球形貯槽などの配管支持構造物の固有周期は、多くのパラメータが関係しているために、詳細設計諸元がきまらないと算定が困難である。また、配管設計では大きな設計要因となる揺れ量は、球形貯槽などそのものの設計では大きな設計要因となっていないために、概略の固有周期を詳細な設計諸元がなくても推定ができる簡易式により算出した揺れ幅（最大変位量）を配管設計に供していることが多い。

ここでは球形貯槽の容量または直径だけがわかっているときの固有周期の推定方法を実績をベースに検討し、変位の推定式を提案する。球形貯槽の固有周期はブレースの形式により大きく異なるので、鋼管ブレースタイプのものとロッドブレースタイプのものに分けて検討する。

3.1. 鋼管ブレースタイプの球形貯槽

球形貯槽メーカー 5 社の製作した 19 基の鋼管ブレースタイプ球形貯槽に関して、横軸に直径、縦軸に固有周期をプロットしたものを図 3 に示す。

このグラフから実績平均値（細線）の 15% 増し（太線）を固有周期提案(4)式とすが、簡易式の性格上、少々安全側の設定となるのはやむを得ない。

$$T = 0.0351D^{0.7985} \quad (4)式$$

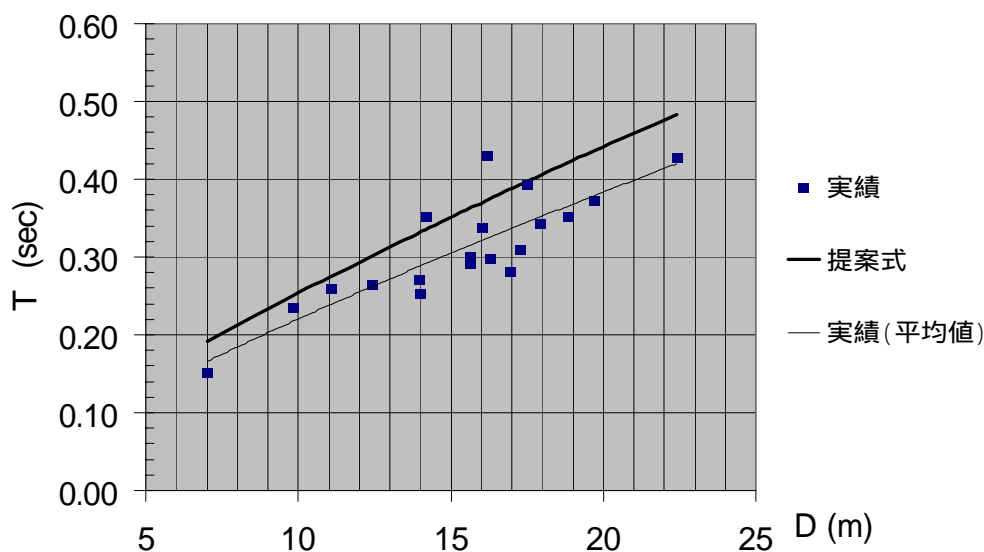


図 2 鋼管ブレース式球形貯槽の固有周期

3.2. ロッドブレースタイプの球形貯槽

球形貯槽メーカー 4 社の製作した 19 基のロッドブレースタイプ球形貯槽に関して、横軸に直径、縦軸に固有周期をプロットしたものを図 4 に示す。

このグラフから実績平均値（細線）の 20% 増し（太線）を固有周期提案(5)式とするが、簡易式の性格上、少々安全側の設定となるのはやむを得ない。

$$T = 0.2128D^{0.3406} \quad (5)式$$

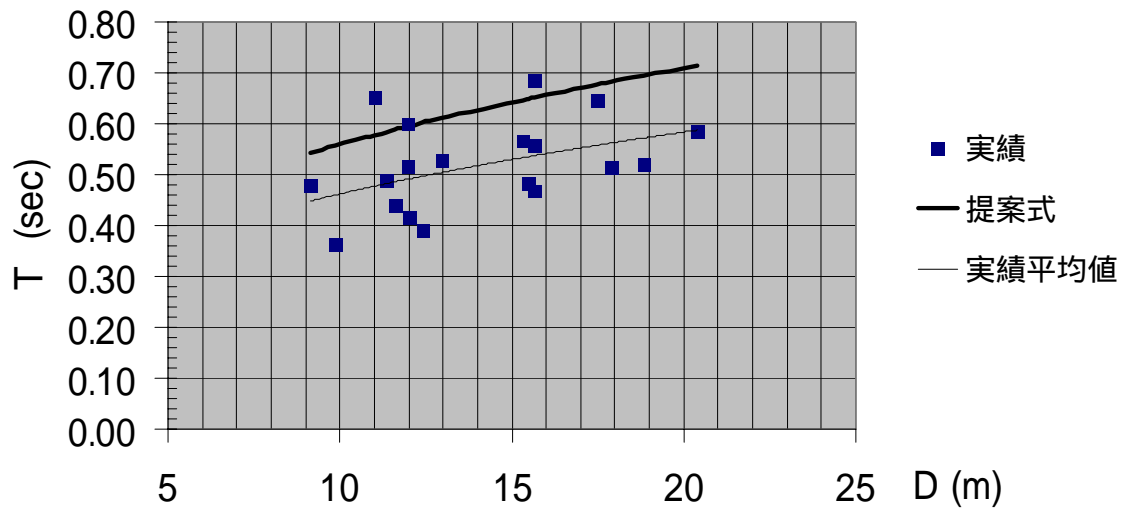


図3 ロッドブレースタイプ球形貯槽の固有周期

3.3. 球形貯槽の変位の簡易推定式の提案

球形貯槽の簡易推定式は、鋼管ブレースタイプの場合は(3)及び(4)式から、ロッドブレースタイプの場合は(3)及び(5)式から計算することができる。

いま、簡易的に $K_{MH}=2.0K_H$ と (応答倍率を 2.0 とする。) して、球形貯槽の地震時変位は次式により計算することができる。

$$\delta = mD^n K_H \quad (6)式$$

ここで、 δ 、 K_H 、 D 、 m 及び n 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
- D : 当該球形貯槽の球殻内径 (m)
- m 及び n : 当該球形貯槽のブレースの形式に応じて下表による値とする。

ブレース形式	m	n
鋼管タイプ	0.9	1.60
ロッドタイプ	32.4	0.68

減衰定数に関する補正したり、応答倍率を応答スペクトルから読み取るなどしてより精度の高い計算が可能になる。固有周期は実績データのバラツキを考慮して15%から20%の安全率を取っているため、場合によっては、変位レベルだと約1.4倍の余裕がある場合がでてくる。配管系の変位吸収能力とあわせて総合的な安全性を考慮することが望ましい。

4. 限界状態に関する変位計算方法について

限界状態の設計を行う場合（高圧ガス保安法ではレベル2耐震性能評価を行う場合）において保有耐力評価法（または代替法）によると、設計震度を $D_s \cdot K_{MH}$ として、地震力 $F_s = D_s K_{MH} W$ （ $D_s = 0.25 \sim 0.5$ の値、代替法では、一律に $D_s = 0.5$ ）に対して弾性計算により算出した各部応力 s が耐震設計許容応力（降伏応力） s_y を超えないことを確認している。しかしながら、配管系の設計において配管支持構造物の変位量を震度 $D_s K_{MH}$ で算出して変位量 s とすると、過小な値となっているため、不適切である。

以下に保有耐力評価法における変位量の関係について、図1にしめすような球形貯槽をイメージして図4に従い説明する。（一般性は失われない）

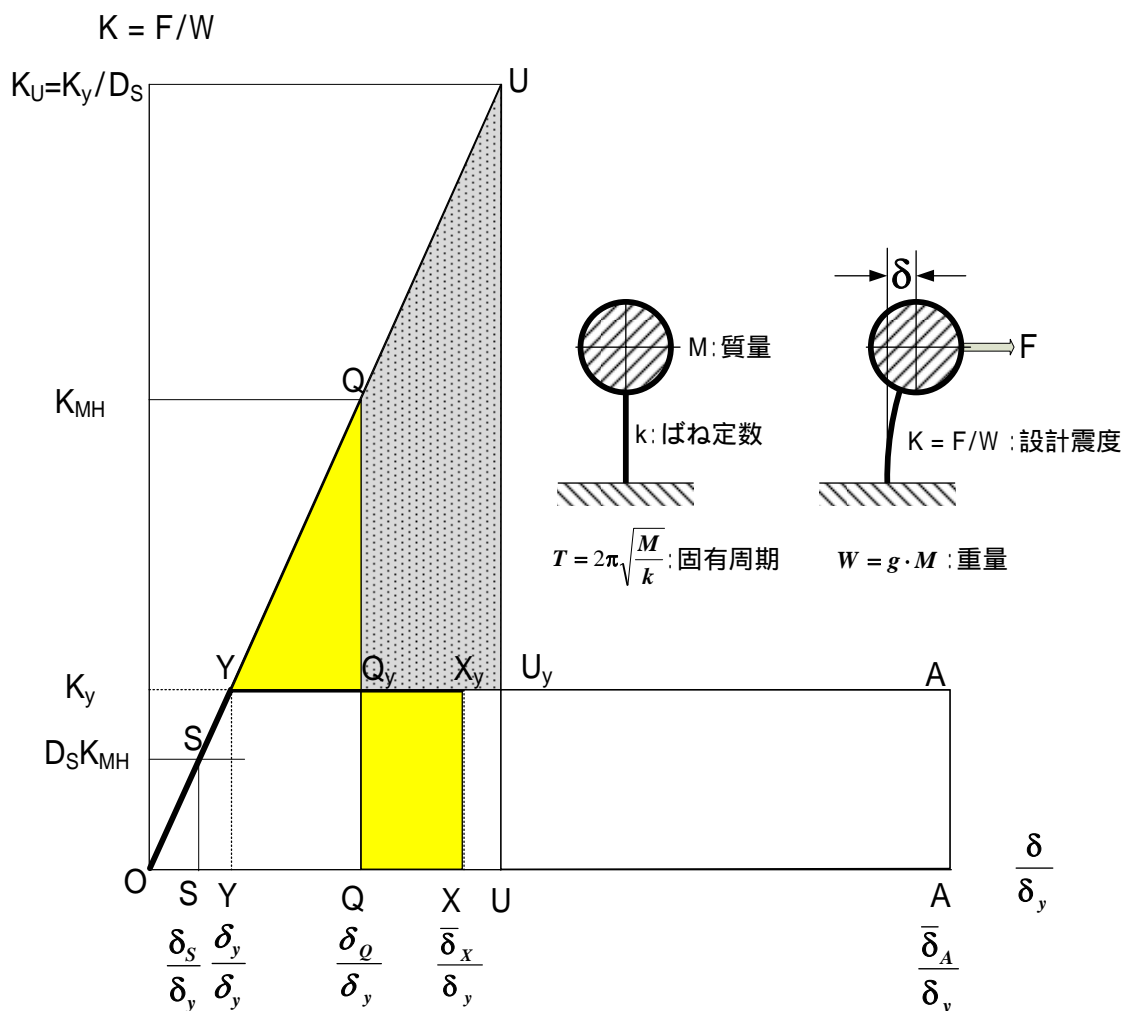


図4 保有耐力評価法

- (1) 横軸を変位量、縦軸を地震力とするが、それぞれ降伏変位、重量で無次元化している。
- (2) 球形貯槽に作用する地震力に対する変形（または変位）は完全弾塑性を仮定して、

OYA とする。ここで、 y は降伏変位、 K_y は降伏震度といい、 $K_y W$ は保有耐力という。

- (3) 降伏震度 K_y より大きな地震力が作用することを考えるとして設計震度 K_{MH} が ($K_{MH} > K_y$) が作用するとき、OYX と変形して最大変位 $\bar{\delta}_X$ となる。
- (4) 当該球形貯槽が降伏しないと仮定すると、設計震度 K_{MH} に対して変形 Q が生じる。
- (5) この場合、地震エネルギー OQQ' の面積と $OYXX'$ は等しい。このことを「総エネルギー一定則」という。 $\bar{\delta}_X$ の値は $Y'YQQ' = Y'YXX'$ または $YQQ_y = Q_y X_y X'$ となるよう幾何的に算出することができる。
- (6) 球形貯槽の限界状態の変位量を $\bar{\delta}_A$ (限界変形量) とするとき、限界震度 K_u の値は、 $Y'YUU' = Y'YUU'$ または $YUU_y = U'U_y A_y A'$ となるよう幾何的に算出することができる。この場合 $D_s = K_y / K_u$ より算出する。逆に、 D_s が既知の時には、同様に $\bar{\delta}_A$ を算出することができる。
- (7) 当該球形貯槽の許容条件は $\bar{\delta}_X = \bar{\delta}_A$ となる、すなわち、 $K_{MH} = K_u$ となる。
- (8) 保有耐力評価法では(7)における式を書き換えて、 $K_{MH} = K_y / D_s$ 、さらに $D_s \cdot K_{MH} = K_y$ として、便宜的に評価式としたものである。したがって、震度 $D_s \cdot K_{MH}$ に力学的な意味はない。

- (9) そこで、 $D_s \cdot K_{MH}$ に対する変位量を s とすると、 $\frac{\delta_s}{D_s \cdot K_{MH}} = \frac{\delta_y}{K_y}$ より、

$$\delta_s = D_s \frac{K_{MH}}{K_y} \delta_y \text{ と計算できる。同様に } \delta_Q = \frac{K_{MH}}{K_y} \delta_y$$

- (10) ところが、地震荷重は正逆方向の繰り返し荷重で地震による総仕事エネルギーは、見かけの最大変位量 δ_X としこの振幅で n 回の繰り返しの等価であるとし置き換える (実際は地震波形は様々な振幅がランダムに合成されている。) と、次式のように計算できる。

$$Y'YXX' = \bar{\delta}_X - \delta_y = 2C(\delta_X - \delta_y)$$

となる。ここで、 C は、荷重変形履歴により定まる値で、 $0.5n \sim 2.0n$ となる。

n は通常、安全側に $n = 1$ としている。

- (11) K_{MH} に対して見かけの変位量 δ_X の値は(5)及び(10)により計算できる。計算結果を示すと次式となる。

$$\delta_X = \left[1 + \frac{1}{4C} \left\{ \left(\frac{K_{MH}}{K_y} \right)^2 - 1 \right\} \right] \delta_y, \text{ (} K_{MH} > K_y \text{ のとき)}$$

$$\delta_X = \frac{K_{MH}}{K_y} \delta_y, \text{ (} K_{MH} = K_y \text{ のとき)}$$

- (11) 同様に、限界変位量 $\bar{\delta}_A$ を見かけの限界変位量に置き換えて、 $\bar{\delta}_A$ は、

$$\delta_A = \left[1 + \frac{1}{4C} \left(\frac{1}{D_s^2} - 1 \right) \right] \delta_y$$

と計算でき、(7)式に代えて、評価は δ_x 、 δ_A による。すなわち、 $D_s K_{MH} < K_y$

- (12) 震度 K_{MH} に対して弾性計算で得られる変位量 q に対する x の比の値を算出すると、 $K_{MH} > K_y$ のとき、

$$\frac{\delta_x}{\delta_q} = \left[1 + \frac{1}{4C} \left\{ \left(\frac{K_{MH}}{K_y} \right)^2 - 1 \right\} \right] \frac{K_y}{K_{MH}}$$

$K_{MH} = K_y$ のとき

$$\frac{\delta_x}{\delta_q} = 1$$

となる。

- (13) 震度 $K_s = D_s K_{MH}$ に対して弾性計算で得られる変位量に s に対する x の比の値を算出すると、 $D_s \cdot K_y < K_s$ のとき、

$$\frac{\delta_x}{\delta_s} = \left[1 + \frac{1}{4C} \left\{ \left(\frac{K_s}{D_s K_y} \right)^2 - 1 \right\} \right] \frac{K_y}{K_s}$$

$K_s = D_s \cdot K_y$ のとき

$$\frac{\delta_x}{\delta_s} = \frac{1}{D_s}$$

となる。

$D_s = 0.5$ (代替法による場合を含む。) のときの計算結果を、横軸は $D_s \cdot K_{MH} / K_y$ 、縦軸は δ_x / δ_s として、図5に示す。

この図より、震度 $K_s = D_s \cdot K_{MH}$ に対して算出した変位量 s は、過小評価になっていることに注意が必要である。また、 K_{MH} に対して弾性計算を行い算出した変位量 q に関しては、(12)により補正した変位量に対して評価する必要がある。

一方、配管系に対しても代替法により評価を行う場合については、 $D_s = 0.5$ を乗じてもよいので、 s によるなら、安全側の評価と考えられる。

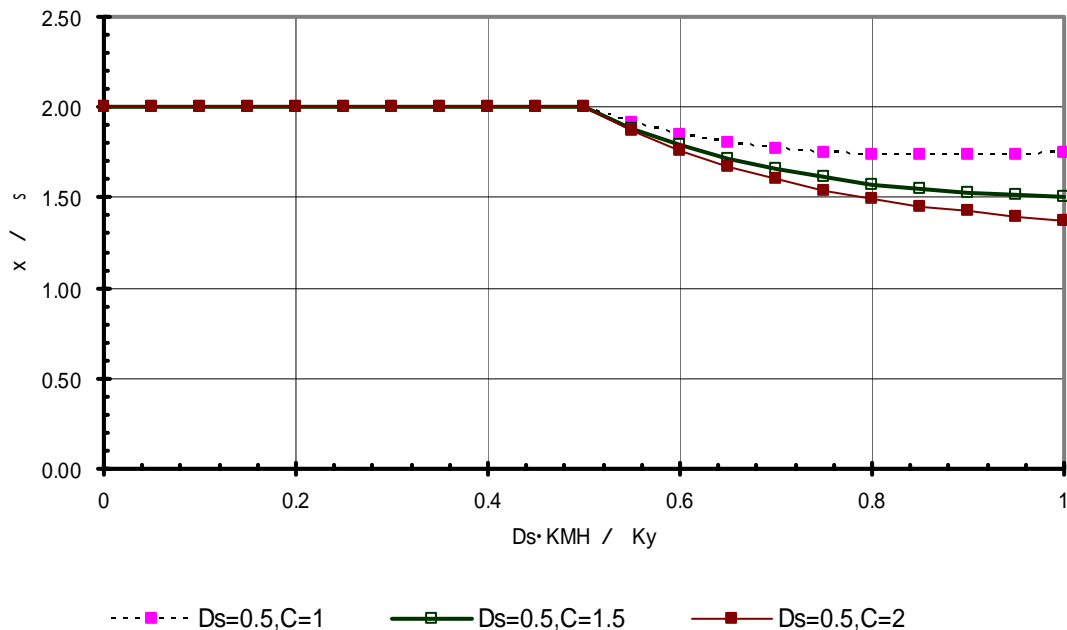


図5 $K_S = D_S \cdot K_{MH}$ に対する応答最大変位量（弾性計算変位量 s に対する倍率）

5. おわりに

今回は、配管系の耐震設計で重要な評価項目である配管支持構造物の変位量の考え方及び算出方法などを解説した。球形貯槽をイメージして説明したが他の塔槽類や架構でも同様に扱えるよう、一般性ある記述を心がけた。

配管支持構造物は詳細設計が行われないと正確な応答計算は困難であるために、配管設計部門でも概略の変位量計算が行えるように簡易計算が一般に行われているが、今回は球形貯槽について、実績にもとずく計算方法をしめた。当然、バラツキが出てくることは止む得ないことで、安全側の設定とした。製造・設計者が同一であればバラツキの少ないデータが得られると思われる。各事業者でデータを整理されるのがよいかと思う。また、できるだけ詳細計算を実施することが好ましい。

通常、配管支持構造物(塔槽類、架構など)は設計において変位量の計算を行うことはない。計算をおこなっても、保有耐力法による場合や代替法による場合など、その算出されてきた変位量の意味を十分理解していないと問題が出てくる。これらの方法による場合の変位を補正する方法について説明した。

配管系の設計において使用する配管支持構造物の変位量の算出法に関してその考え方を詳しく説明した。十分に検討いただき設計に生かして頂ければ幸いです。

参考文献

- 1) 経済産業省: 高圧ガス耐震設計基準、昭和 56 年 10 月 26 日、通商産業省告示第 151 号

- 2) 高圧ガス保安協会:高圧ガス設備等耐震設計指針、KHK E012-2006
- 3) 高圧ガス保安協会:高圧ガス保安法特定設備検査規則に基づくレベル 1 耐震計算書様式、平成 18 年 4 月