

産業プラント内配管系の耐震設計の合理化に関して

- 1 まえがき
- 2 多入力応答解析
- 3 非線形性による応答低減効果
- 4 耐震設計の合理化への提案
- 5 あとがき

曾 根 彰*
 鈴木 浩 平*

要 約

原子力発電プラントなどの機器・配管系の耐震設計において、急速に設計基準等が整備されてきた。しかしながら、現行の設計計算では、線形解析にもとづいた剛設計思想が根本にあり、配管系の多入力性や支持部に介在する非線形性の影響などはほとんど考慮されず、その結果として過大な設計裕度を持つことになる。そこで、近年、現行の耐震設計の合理化・高度化を目的に、その見直しが行われており、さらに多入力性・非線形性等による効果を取入れた実用に耐得る設計計算手法の体系化が図られつつある。

本稿では、著者らが進めてきた配管系の多入力性・非線形性の研究成果を踏まえ、これらによる効果を反映させた設計手法を提案して、耐震設計への指針を与えている。

1 まえがき

生産施設のなかで重要な位置を占める火力・原子力発電プラントや大規模な石油化学プラントを構成している立体配管系は、振動特性が異なる複数の支持構造物やサポート機器に連結されておりさらに配管支持点には、配管の熱膨張の見込による間隙や据付工時に生じたがた、および配管面と支持面の間に摩擦が存在している。したがって厳密な配管系の地震応答解析は、いわゆる「多入力・多次元問題」となり、その上支持点のがた・摩擦などの非線形性による影響を入れた「非線形応答問題」となる。

しかしながら、これら多入力性・非線形性を考慮することは、原子力配管の厳密なる解析方法に

おいて若干行われているものの、修正震度法にもとづいた簡便な耐震設計ではこれらによる効果を取入れた合理的な計算手法は確立されておらず、まして一般のプラント配管で全く見られないのが実情である。このような状況化で、現行の耐震設計の合理化・高度化を目的に、その見直しが行われており、さらに多入力性・非線形性等による効果を取入れた実用に耐得る設計計算手法の体系化が図られつつある。

上記の背景から、本稿では、配管系の耐震設計計算の体系化に反映させる一つの具体的な提案を行っている。すなわち、配管系耐震設計の現状を概説し、多入力問題や非線形応答問題に対して著者が行って得られた成果を整理するとともに、これらを実際の配管系の耐震設計に適用する立場か

らの考察を行っている。

2 多入力応答解析

ここでは、配管系の現行の耐震設計を述べるとともに、多入力問題を明らかにする。さらに、この多入力問題に対して、従来から提案されている設計手法と著者らが提案している方法を比較・検討する。

2. 1 多入力問題

現行の耐震設計における動的解析手法としては時刻歴解析法と応答スペクトル法に大別される。時刻歴解析法とは、非常に複雑な配管系で厳密なる解析が必要な場合に適用されるものであり、計算コストや煩雑さが伴うものである。一方、応答スペクトル法とは、修正震度法の流れを汲むものであり、経済性・簡便さの特徴をもっている。配

管系の耐震設計の合理化・高度化を目指す上では具体的には後者の方法を取扱うことになる。(日本機械学会編, 1985)。この応答スペクトル法には、

- (1) 単一入力応答スペクトル法と
- (2) 多入力応答スペクトル法

があり、前者は配管系支持点の全て入力が同一であると仮定したもので、後者は多入力性を考慮したものである。

一般には、図1に示すように配管は振動特性が異なる複数の支持構造物によって支持され、異なる入力を受けている。当然のことながら、各支持点の入力により計算できる(床)応答スペクトルは異なってくる。「多入力問題」とは、このように得られた応答スペクトルをいかに組み合わせるかあるいは加算するかということである。すなわち各々(床)応答スペクトルを適切に加算する計算手法を確立することにある。このことは、個々の

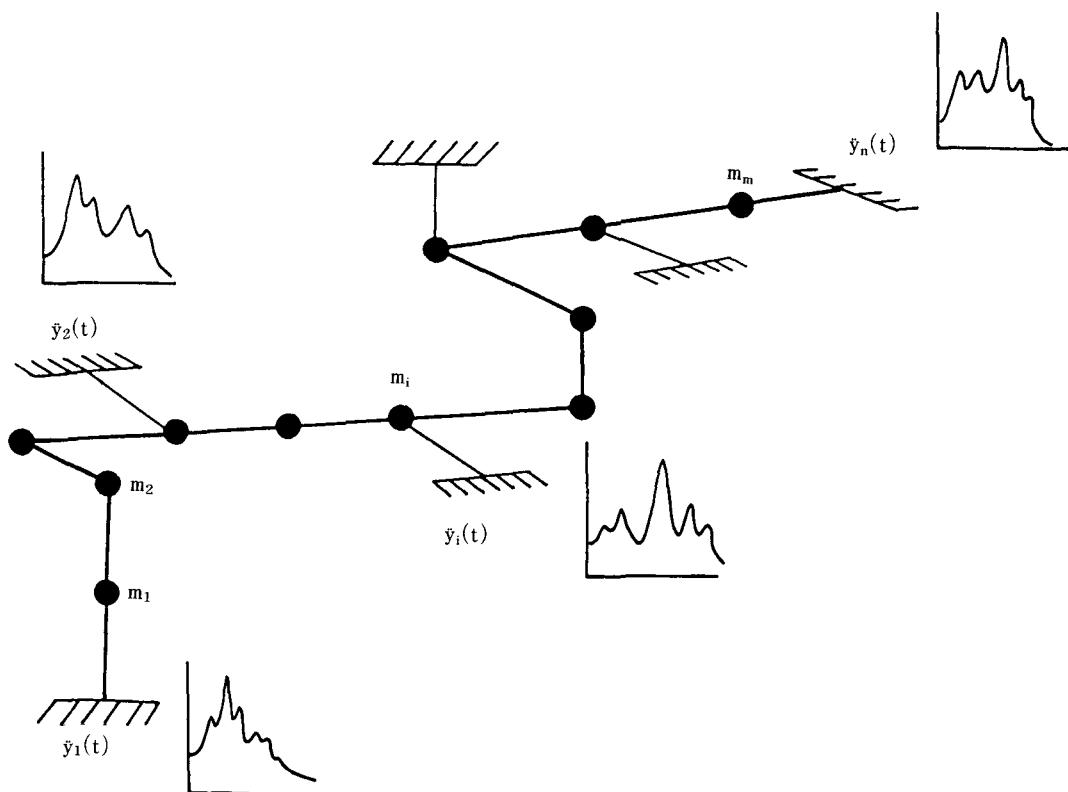


図1 多入力をうける配管系の概略図

加算法による応力などの計算値が直接配管構造部材の設計値の反映するため、特に設計の合理化の観点から重要である。

2.2 多入力応答スペクトルの加算法

現状の配管系の耐震設計計算では、簡便さ等の点から各支持点入力毎における応答スペクトルを包絡させたものを、単一入力応答スペクトルとして用いている。これは、設計値に過大な余裕を与える結果となるが、経済性の観点からは決して合理的な方法でなく、さらに合理化が可能と考えられる。そこで、従来から多入力応答スペクトルを作成するための各種の加算法が提案されている。各

種加算法により多入力応答スペクトルの作成法が提案されているものと著者らが提案しているものを表1にまとめて示す。ここで、モード合成法など、様々な耐震設計計算で広く採用されている、各荷重間の統計的独立性を仮定した二乗和平方根法 (SRSS) は、特に近接するモードを有する構造物において相当な誤差を生じることや、前述したように応答スペクトルを包絡的に加算する絶対値和法 (ABS) は、設計値に過大な余裕を与えることが指摘されている。さらに、配管系の多入力問題に対する定量的な評価や各種振動問題への加算法の得失が十分に検討されているとはいえない。そこで、著者らは最下欄に示す、異入力間の相互

表1 各種多入力応答スペクトル作成法

加算法	$S_d(i)$	$S_a(i)$
ABS	$\sum_{j=1}^n A_{ij} S_{dj}$	$\sum_{j=1}^n A_{ij} S_{aj}$
SRSS	$\left\{ \sum_{j=1}^n \left(A_{ij} S_{dj}(i) \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$	$\left\{ \sum_{j=1}^n \left(A_{ij} S_{aj}(i) \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$
Proposed Method	$\left(\sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n A_{ij} \cdot A_{il} \rho_{jl}(i) \times S_{dj}(i) \cdot S_{dl}(i) \right)^{\frac{1}{2}}$	$\left(\sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n A_{ij} \cdot A_{il} \rho_{jl}(i) \times S_{aj}(i) \cdot S_{al}(i) \right)^{\frac{1}{2}}$

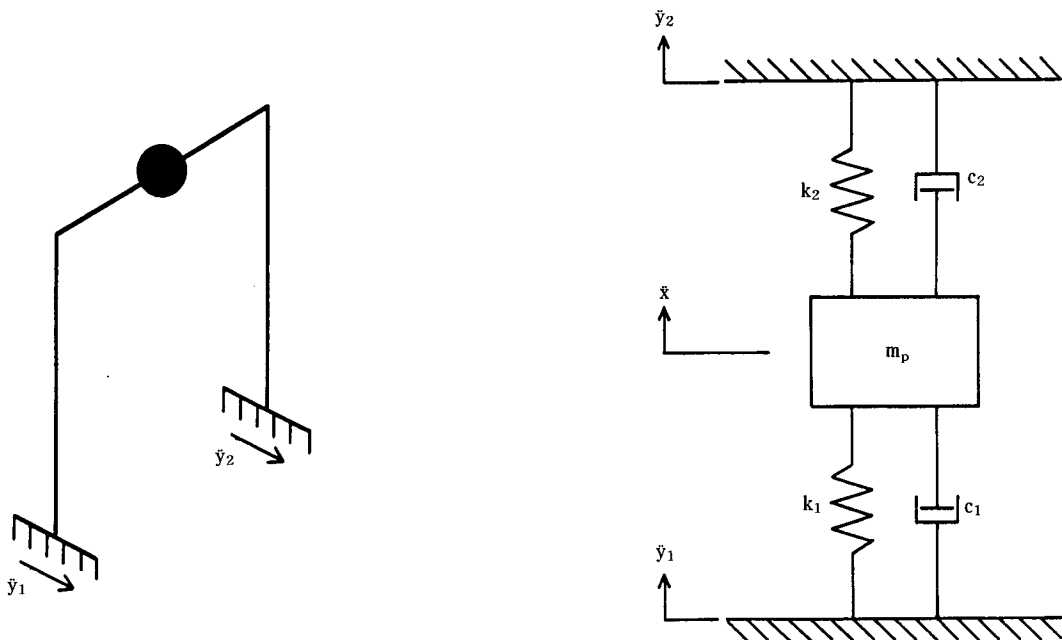


図2 2入力門型配管とそのモデル化

相関性の評価を含む形で加算式を整理し、簡便な実用式として提案した。(曾根ら, 1986)

ここで, $S_d(i)$, $S_a(i)$ は, i 次モードに関する各入力による動的変位応答の総和の最大値と絶対加速応答成分の総和の最大値である。 $S_{d_j}(i)$, $S_{a_j}(i)$ は, それぞれ i 次モードにおける j 番目の支持点入力の相対変位応答スペクトル値と絶対加速度応答スペクトル値である。 A_{ij} は i 次モードに対する j 点入力の刺激関数に関する値である。一方, $\rho_{ji}(f_i)$ は不規則振動論から求まる j 点入力による応答と 1 点入力による応答間の相関係数であるが, これは, 厳密には複雑な積分計算を行う必要があり, 煩雑になると考え, 次のような簡便な式で提案している。

$$\rho_{ji}(f_i) = \frac{\text{Re} [G_{ji}(f_i)]}{|G_{jj}(f_i) \cdot G_{ii}(f_i)|} \quad (1)$$

f_p は i 次モードの固有振動数であり, この $\rho_{ji}(f_i)$ は, 配管系の振動特性によらず, 各入力の振動特性 $G_{jj}(f_i)$ や異入力間の相互相関特性 $G_{ii}(f_i)$ によって定められる。それによって計算された S_d

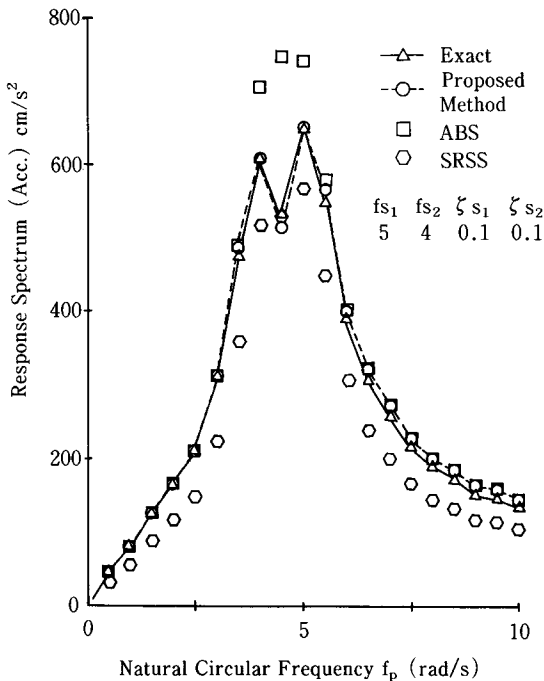


図3 多入力床応答スペクトルの比較

(i), $S_a(i)$ を f_p に対して図示するならば, それらは入力間の相互相関特性を考慮した多入力(床)応答スペクトルになる。

次に, 最も簡単な例として図2に示す2入力の門型配管の面外1次振動をとり上げ, モデル化を行い, 各手法による床応答スペクトルの計算結果を比較・検討する。図3に支持構造物系の振動特性を反映させた2入力による結果を示す。これは支持構造物系, $f_{s1} = 5 \text{ Hz}$, $f_{s2} = 4 \text{ Hz}$, $\zeta_{s1} = \zeta_{s2} = 0.1$ の例であり, 系の固有振動数 f_p を縦軸にとり, 2入力による「床応答スペクトル」で示している。この図より, 提案式による結果は, 支持構造物系の振動特性によらず時刻歴解析の厳密解と良く一致していることがわかる。一方, SRSS法は, 最大で約30%の過小評価であり, ABS法は常に過大評価になっており必ずしも適切な加算法とはいえないことが明らかになった。

さらに, 配管系のモード減衰化 ζ_p による本提案式の適用限界を調べた結果, 支持構造物系の固有振動数が離れている場合には, 提案式による誤差は大きくなるが, その他の場合には, 従来の手法に比べ誤差は小さくなっている。このことから配管系のモード減衰比に対する提案式の適用範囲は次のようになる。

$$\zeta_p \leq 0.1 \quad (2)$$

以上の結果から, 提案式を実用的な配管系の多

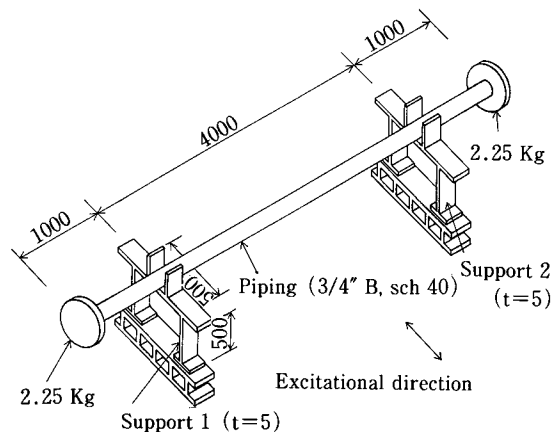


図4 実験用配管—架構モデルの概略図

入力応答解析に適用できる見通しが得られた。

3 非線形性による応答低減効果

ここでは、支持部ががたと摩擦を有する、2入力を受ける配管系を対象として、模擬ランダム波入力を用いた大形振動台による加振実験を行い配管系の非線形振動応答の特徴を明らかにする。

(曾根ら, 1987)

図4に示すように加振実験に用いた配管供試体は、口径 3/4" B (ϕ 27.2mm), 肉厚 Sch 40 (2.9mm), 全長 6 m の直管 (STPG-38) であり、これは一般石油化学プラント内の小径の配管に相当する。また、配管系の多入力性を実現するために、一方の支持架構に重錘を付加することにより、両支持架構の固有振動数にほぼ5%のずれをもたせて配管系を構成し、(以下、異入力形と定義し、

図で Asym. と略す) 加振を行っている。この加振実験結果を支持構造物の振動特性を等しくした同一入力加振実験結果(以下、同一入力形と定義し、図で, Sym. と略す)と比較する。

実験は、3次元大型振動台により、(1)がた・摩擦のない線形系、(2)がたのみの系、(3)がた・摩擦が共存する系、について正弦波掃引加振と模擬ランダム波(帯域白色雑音)加振を行っている。ただし、がたの大きさは0.5mmで、摩擦係数の大きさは0.2~0.5の範囲である。

まず、異入力形と同一入力形の両架構についてランダム波加振で得られた入力に対する配管中央部の相対変位応答の最大値を、入力加速度の最大値に対してプロットしたものを図5に示す。この図より、架構特性の差異、すなわち、同一入力、相関のある入力のいかによらず、支持部に介在するがた、摩擦の非線形性が配管の相対応答に対

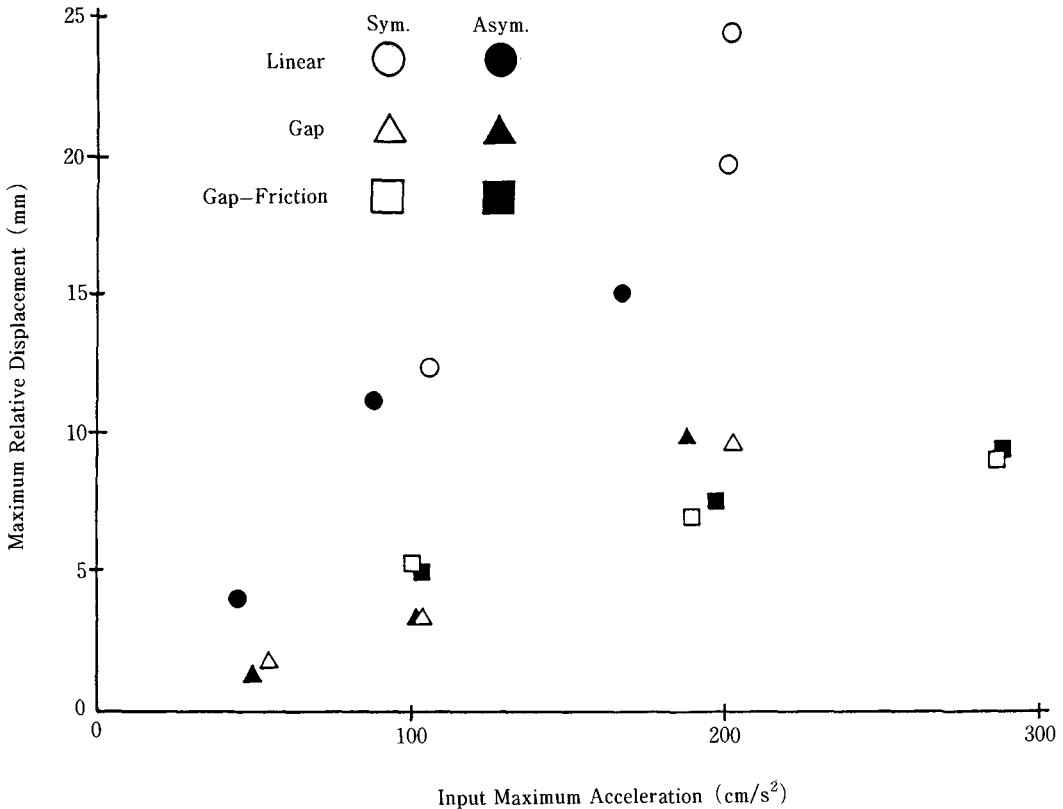


図5 支持条件のちがいによる相対変位応答の最大値の比較

して低減効果があることがわかった。これらの結果を参考にして、最大応答量の計算に際して、次式の「低減係数」を導入することを提案する。

$$X_n(\max) = (1 - \beta) X_1(\max) \quad (3)$$

すなわち、ある入力レベルに対する線形系の相対変位応答の最大値 $X_1(\max)$ として、同レベルでの非線形系の最大値 $X_n(\max)$ を、低減係数 β と $X_1(\max)$ により上式で表わせるとする。図6に、異入力形架構について上式より計算した低減係数の比較を示す。一点鎖線は、がたによる効果と摩擦による効果が独立に働くとして求めた摩擦単独の応答低減係数である。この図より、がた・摩擦が共存する系においては、摩擦による応答の低減効果が支配的であることがわかった。

以上の実験による非線形性の評価から、この応答低減係数は、十分に応答低減効果を示す指標になり得ることがあきらかとなり、さらに配管系の

耐震設計計算への適用ができることが確認された。

4 耐震設計への提案

2章、3章では、多入力応答スペクトルの加算法として、入力間の相関特性を考慮した加算法を示し、2入力配管系の基本的なモデルを用いた数値解析、本手法の有効性を明らかにした。さらに支持部のがた・摩擦を有する配管系を対象に、模擬ランダム波加振を行い、これらの非線形特性の応答低減効果を明らかにし、その効果を「応答低減係数」により定量的に評価した。そこで、ここでは、以上の研究で得られた具体的な成果をもとに、これらを実際の配管系の耐震設計に適用する立場からの考察を行っている。(曾根, 1987)

最初に提案した、異入力間の相関係数を考慮した加算式と、配管支持点における非線形性による応答の低減効果を表わす応答低減係数を導入した

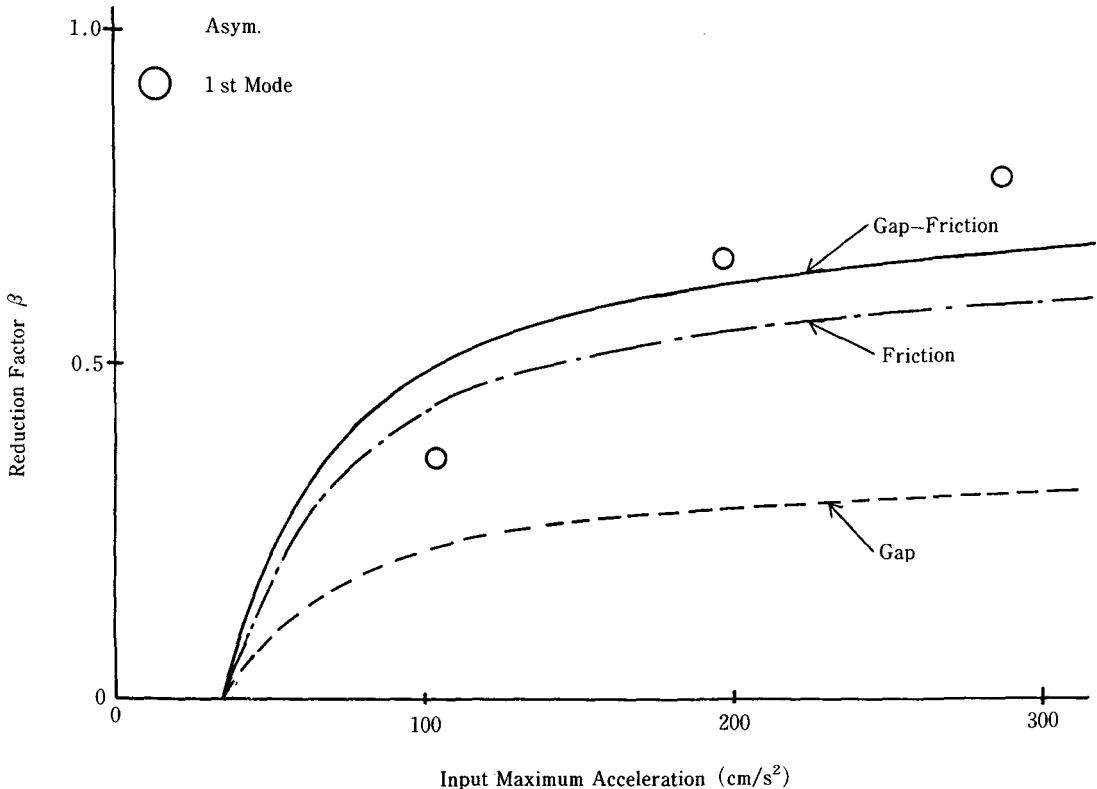


図6 応答低減係数の特徴

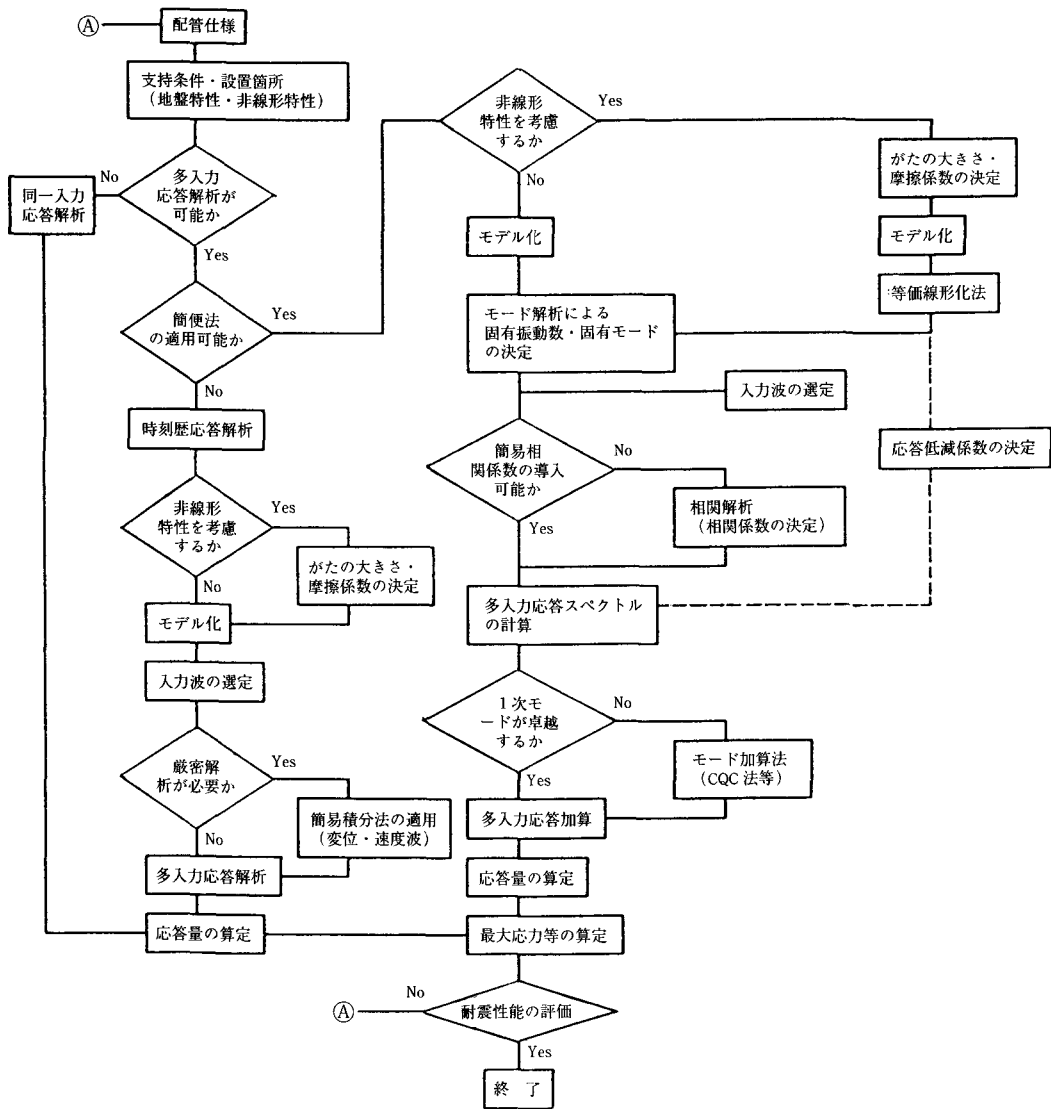


図7 多入力性・非線形性を考慮した配管系の耐震設計の流れ

配管系の耐震設計計算の概略的な流れを図7に示す。この設計計算法において、特に、配管系と入力地震動が与えられた場合、相関係数あるいは応答低減係数をどのように決定するかが重要となる。そこで、上記の研究成果をもとに、そのための考察を行う。ただし、ここでは、配管系と支持構造物系との質量比が小さく、それらの相互干渉はないとし、さらに、応答は基本の振動特性によって与えられることを前提としている。

まず、簡便式による相関係数は、支持構造物系

に作用する地震動の特性によらず、支持構造物系の振動特性 (f_{si} , ζ_{si}) と配管のモードの固有振動数 f_p のみによって決定できる。ただし、モード減衰比 $\zeta_p \leq 0.1$ なる配管系に対して適用可能である。また、例えば、配管系への入力間が時間差を有する場合には、簡便式による相関係数をそのまま適用できず、厳密なる相関解析が必要となる。

支持構造物系の振動特性と配管系の振動特性をパラメータとして、簡便式による相関係数の値をもとに、加算式に導入する相関係数の概略値を整

表2 支持構造物系の振動特性を考慮した
異入力間の相関係数の最適値

支持構造物系の固有振動数比 ; $f_{s2}/f_{s1}=0.4$
支持構造物系の減衰比 ; $\zeta_{s1}/\zeta_{s2}=0.1$

配管系と支持構造物 系との固有振動数比 f_p/f_{s1}	配管系の減衰比		
	0.10	0.05	0.01
0.1 以下	1.0	1.0	1.0
0.2	↓	↓	↓
0.3	↓	↓	↓
0.4	↓	↓	↓
0.5	0.25	0.25	↓
0.6	0.0	0.0	0.25
0.7	↓	↓	0.0
0.8	↓	↓	↓
0.9	↓	↓	↓
1.0	↓	↓	↓
1.1	↓	0.25	0.25
1.2	0.2	↓	0.5
1.3	↓	↓	↓
1.4	↓	↓	↓
1.5	↓	↓	↓
1.6	↓	↓	↓
1.7	↓	↓	↓
1.8	↓	↓	0.25
1.9	0.1	↓	↓
2.0 以上	↓	↓	↓

表3 支持構造物系の振動特性を考慮した
異入力間の相関係数の最適値

支持構造物系の固有振動数比 ; $f_{s2}/f_{s1}=0.6$
支持構造物系の減衰比 ; $\zeta_{s1}/\zeta_{s2}=0.1$

配管系と支持構造物 系との固有振動数比 f_p/f_{s1}	配管系の減衰比		
	0.10	0.05	0.01
0.1 以下	1.0	1.0	1.0
0.2	↓	↓	↓
0.3	↓	↓	↓
0.4	↓	↓	↓
0.5	0.75	0.75	↓
0.6	0.25	0.25	↓
0.7	0.0	0.0	0.25
0.8	↓	↓	0.0
0.9	↓	↓	↓
1.0	↓	↓	↓
1.1	0.25	0.35	0.25
1.2	↓	↓	0.75
1.3	↓	↓	↓
1.4	↓	↓	↓
1.5	↓	↓	↓
1.6	↓	↓	↓
1.7	↓	↓	↓
1.8	↓	↓	0.5
1.9	↓	0.25	↓
2.0 以上	↓	↓	↓

理し、表2と表3にその例を示す。これらの表から、相関係数の値が1、あるいは零となるような配管系と支持構造物系の振動特性の範囲では、それぞれABS法、SRSS法が適用可能であることもわかる。

一方、応答低減係数は、入力レベル、さらにはがたの大きさ、摩擦係数等に依存しているため、与えられた地震動、配管系に対して適用する場合には、がたの大きさ、摩擦係数は、実機に対して適切な値を採用し計算しなければならない。さらに、種別に応じて広範な固有振動数をもつ一般の配管系に対しては、次のような低減係数 β を導入した応答スペクトル、あるいは床応答スペクトルが考えられる。

$$S_n = (1 - \beta) S_1 \quad (4)$$

ここで、 S_1 は線形系の応答スペクトルであり、 S_n は、非線形系における応答スペクトルになる。これは、配管系の基本モードが卓越することを仮定して導いたものであり、例えば、モードが近接するような場合には、さらに別の展開が必要となる。また、この β は、非線形系を等価に線形化した系の振動特性と線形系の振動特性から簡単に推定できることも得られている。

3章で示した応答低減係数は、地震動入力として白色雑音を用いて計算した例であり、種々特性をもつ地震動入力に対して適用するため、横軸にいわゆるがたが閉じ始める入力レベルにより無次

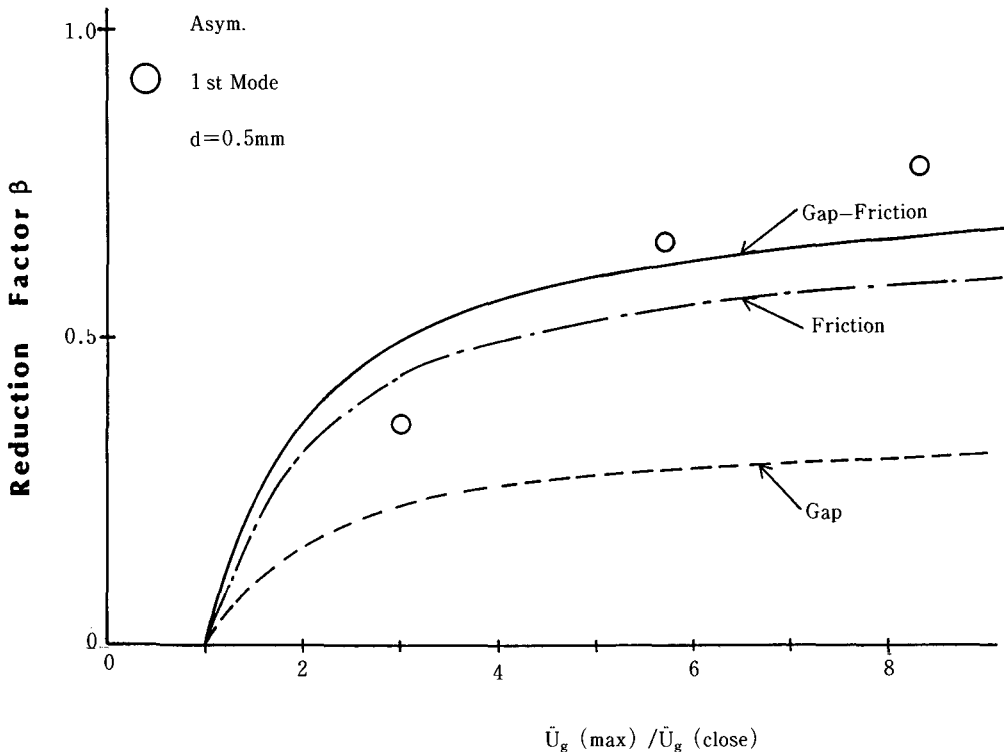


図8 無次元化した入力で表わした応答低減係数

元化した量を採用し、プロットしたものを図8に示す。この無次元量をもとに表した β は、入力特性によらず、非線形性が与える配管系の応答低減効果を示す指標となり得ると考えている。

4 あとがき

本稿では、現行の配管系の耐震設計について概説するとともに、特に、今後その耐震設計の合理化・高度化を遂行する上で重要となる多入力・非線形効果を考慮した設計計算の簡易化を提案した。すなわち多入力解析に対する提案式、応答低減係数を実際の設計に適用する際の得失について、対象となる構造物の種別ごとに検討した。特に、動荷重間の相関係数の推奨値を、配管系と支持構造物系の振動特性の組み合わせ別に提案した。さらに応答低減係数は、がたが閉じ始める入力レベルをもとにした無次元量で整理した。

文献一覧

日本機械学会編

1985 「耐震設計と構造力学」日本工業出版

曾根彰・鈴木浩平

1986 「振動荷重間の相関性を考慮した荷重加算法に関する研究（第3報、配管系の多入力応答解析）、その1」『日本機械学会論文集』第51巻、第467号、C編、PP. 1493~1498.

曾根彰・鈴木浩平・小林博栄

1987 「配管系の多入力振動応答解析に関する研究（がたと摩擦による応答低減効果の実験的評価について）」『日本機械学会論文集』第53巻、第483号、C編、PP. 330~336.

曾根 彰

1987 「液体貯槽および配管系の耐震設計における荷重加算法に関する研究」『東京都立大学学位論文』

Key Words (キー・ワード)

Aseismic Design (耐震設計), Piping System (配管系), Load Combination (荷重加算), Multi-Excitation Problem (多入力問題), Response Reduction Effect (応答低減効果), Nonlinearity (非線形性)