

MSP0010-R00
2016 年 9 月 21 日
エムエス配管解析技術
水野 貞男

「配管の設計解析法⁽¹⁾」本文に関する訂正のお願い

1. まえがき

「配管の設計解析法⁽¹⁾」本文に間違いが判明しましたので、お詫びして、以下の通り訂正させていただきます。

尚、訂正後の本文を、次葉以降に添付しましたので、これを A5 サイズでプリントアウトし、水色破線で囲まれた部分を切り取り、本文に貼り付けて頂くようお願い致します。

ご迷惑をおかけしますが、宜しくお願い致します。

2. 訂正箇所

以下の 3 箇所です。

尚、本訂正に係わる技術的説明は関連資料(2)～(4)によります。いずれも著者の Web サイトの「補足技術資料」(pdf)にアップロードしていますので、適宜ダウンロードして内容をご確認下さい。

(1) 5.3.5b 項の(viii)の訂正(p.229～230)

「 $① \leq ⑤ \leq ④ \leq ③ \leq ②$ 」は、「 $⑤ \leq ④ \leq ①_{\max} \leq ③ \leq ②$ 」に訂正します。

また、それに関わる説明を関連資料(2)に述べた結論に基づいて訂正します。

(2) 5.3.5b 項の表 5.3-6 の訂正(p.230)

表中に記載の式 $R_s = \sqrt{(R_z \cos \theta)^2 + (R_x \sin \theta)^2}$ を $R_\theta = R_z \cos \theta + R_x \sin \theta$ に訂正します。

また、表 5.3-6 内の説明も、関連資料(2)の表 1 に示した内容に沿って、分かり易く訂正しました。

尚、応答 R のサフィックスを S から、 $\theta \cdot \text{ABS} \cdot \text{SRSS}$ などに変更し、関連資料(2)での説明と対応がつかうようにしました。

(3) 5.3.9 項の訂正(p.243)

(5.3-33)式 $R_s = \sqrt{(R_z \cos \theta)^2 + (R_x \sin \theta)^2}$ を $R_\theta = R_z \cos \theta + R_x \sin \theta$ に訂正します。

関連資料(2)の記述に合わせ、本文の文章も若干修正しました。

3. 関連資料

- (1) 水野貞男 「配管の設計解析法」 エムエス配管解析技術, 2013 年 5 月
- (2) MSP0003-R00 「水平 2 方向地震力の合成方法の比較検証」
- (3) MSP0008-R00 「3 次元簡易配管モデルによる地震入力方向の検討」
- (4) MSP0009-R00 「20B 標準配管モデルによる地震入力方向の検討」

5.3.5.b 配管の耐震動解析

耐震解析は大きく静解析と動解析に分けられる。静解析は、自重解析と本質的に同じで、自重解析が下方方向に1Gの加速度で解析するのに対し、任意の座標方向に指定加速度で解析するものである。これに対して動解析は、静解析とは本質的に異なり、モーダル法スペクトル応答解析によって実施し、解析手順は概ね次の通りである。

- (i) 配管系を梁要素でモデル化し、多質点のバネマスモデルに置換する。
- (ii) これを用いてまず固有値解析を行い、固有円振動数 ω_i 、固有ベクトル(固有振動モード) ϕ_i 、刺激係数 $\beta_{i,k}$ ($k=x, y, z$ の3方向を表す。)を求める。

$$\beta_{i,k} = \frac{\phi_i^T \mathbf{M} \cdot \mathbf{I}_k}{\phi_i^T \mathbf{M} \phi_i} \quad (5.3-1)$$

ここで、 $\mathbf{I}_k$: k 方向の地震入力を表す単位ベクトル

$\mathbf{M}$: 質量マトリックス

ϕ_i : i 次の固有ベクトル(固有振動モード)

- (iii) 配管の減衰定数 ζ を定め、使用する床応答スペクトル^(注記1)を決める。
- (iv) 床応答スペクトルから固有振動数 $f_i = \omega_i/2\pi$ に対する応答加速度 A_i を求める。
- (v) k 方向地震入力 ($k=x, y, z$) に対する各次の変位応答 $D_{i,k}$ を計算する。

$$D_{i,k} = \beta_{i,k} \cdot \frac{A_i}{\omega_i^2} \cdot \phi_i \quad (5.3-2)$$

ここで、 $i = 1 \sim n$ 次の固有振動モード No. を表す。

$k=x, y, z$ の地震力の入力座標方向を表す。

$D_{i,k}$: 変位応答ベクトル

ϕ_i : 固有ベクトル(固有振動モード)

- (vi) 各次の変位応答 $D_{i,k}$ から、次式を解いて各次の反力モーメントを求める。

$$\mathbf{R}_{i,k} = \mathbf{K} \mathbf{D}_{i,k} \quad (5.3-3)$$

実際の計算は要素毎に $\mathbf{R}_e^e = \mathbf{K}^e \mathbf{D}_e^e$ (e : 要素)として解き、逐次に全体を計算する。

- (vii) 地震入力方向毎($k=x, y, z$)に、 $1 \sim n$ 次の応答をSRSSによって合成し、トータル応答を求める^(注記2)。例えば、反力モーメント $\mathbf{R}_k$ に就いては次の通りである。全く同様にして加速度や速度・変位などを求める。

尚、この場合、 $\mathbf{R}_k$ は、各節点の反力モーメントの $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ の個別成分を意味するが、以下では、これらの6個を並べた「組」を表すものとする。

$$\mathbf{R}_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n \mathbf{R}_{i,k}^2} \quad (5.3-4)$$

- (viii) 最後に、 x, y, z の3軸方向に就いて合成し、設計用地震応答とする。

我国では、水平2方向(x, z)の動解析に鉛直方向(y)の静解析結果を合成する。従って、まず水平2方向応答 $\mathbf{R}_x, \mathbf{R}_z$ を(vii)項にて求め、これらを合成して最終的な設計用応答 $\mathbf{R}_\theta$ を求めるが、水平2方向の合成法には、表5.3-6に示すように①～⑤の5通りがある。

これらの大小関係は、基本となる①の最大値(①_{max}) (実際に計算は困難。)に対して

$$⑤ \leq ④ \leq ①_{\max} \leq ③ \leq ②$$

の順となっており、③が適度な保守性もあり最適である。無論、どの方法を用いても良い

が、それは設計判断である。但し④⑤は、①_{max}に対する常時の保守性が保証されないので、用いない方がよい。

水平2方向の合成の詳細に関しては、後述の5.3.9項を、また、鉛直方向との合成は次項を参照願いたい。

表 5.3-6 水平2方向の応答の合成方法

No.	名称	合成方法
①	基本的な方法 (θ による 本来の方法)	任意座標系 xyz に於いて耐震解析し、水平2方向の応答 R_z 、 R_x を得たとする。 R_z : 地震力 S_z を z 方向に入力したときの応答 (の組) R_x : 地震力 S_x を x 方向に入力したときの応答 (の組) z 軸より θ 傾いた方向に地震力 S_θ が入力された時の応答 R_θ は次式で計算され、 θ に関しパラメータサーベイ計算を行えば、最大値 (① _{max}) を求め得る。 $R_\theta = R_z \cos \theta + R_x \sin \theta$ 本来の方法で最適な最大値を与えるが、目的の物理量に対し個々別々に θ を変化させて最大値を求める必要があり、計算が膨大で、実際の計算は困難。
②	絶対値和 による方法	同上で、成分毎に、応答値 R_{ABS} を次式で合成。 $R_{ABS} = R_z + R_x $
③	SRSS による方法	同上で、成分毎に、応答値 R_{SRSS} を次式で合成。米国で用いられている方法。 $R_{SRSS} = \sqrt{R_z^2 + R_x^2}$
④	成分の大きい方 を取る方法	同上で、応答成分を比較し、大きい方を取って応答値 R_{SELE} とする。 $R_{SELE} = \{\max(R_{xx}, R_{xz}), \max(R_{yx}, R_{yz}), \max(R_{zx}, R_{zz}), \dots\}$
⑤	M_i の大小など、 特別な条件を付 帯して評価する 方法	同上で、例えば、モーメント M に関しては、水平2方向の合成モーメントを $M_{Ix} = \sqrt{M_{ix}^2 + M_{iy}^2 + M_{iz}^2}$ と $M_{Iz} = \sqrt{M_{iz}^2 + M_{iy}^2 + M_{ix}^2}$ として計算し、大きい方を選んで、応答値 R_{SPCON} とする。 $R_{SPCON} = \max(M_{Ix}, M_{Iz})$

(注記1) この床応答スペクトルは、「配管設計用床応答スペクトル」と言い、その求め方は、後述の5.3.8.b項による。

(注記2) 1~n 次の SRSS をとった以降、例えば、力に就いて (F_x , F_y , F_z) と表示するが、これらは、見かけ上、力ベクトルの3成分のような形を取ってはいるが、単なるスカラー量を並べたものに過ぎない。また SRSS を取っているので、全て正值である。解析プログラムや設計基準では、地震動の片振幅を示すと言う意味で便宜的に土を付けて表示することもあるが、無論、複合同順ではない。従って、ベクトルではないので、当然、物理的な意味を保持した座標変換はできないし、また自重や熱膨脹などベクトル荷重成分との間の物理的特性を保った加減算も不可能で、設計評価的な便宜計算しかできない。これは同じ性格の耐震や地震相対変位の解析結果間でも同じである。7.3.2項とその(注記)を参照願いたい。

5.3.5.c 上下方向静解析の重ね合せ^(注記)

ここでは、動解析と上下方向の静解析との重ね合せに就いて述べる。

我国では上下方向は静解析を行っており、米国などの考え方とは異なる。米国では上下方向も動解析のため、実際には上記(viii)の③に示した SRSS による加算法を3次元に拡張したものをを用いる。これに対して我国では、水平2方向の応答値 R_x 、 R_z に上下方向の静解析結果 R_y を絶対値和的に加算する。このため、上記(viii)の水平2方向の合成処理を実施した後に、 R_y を絶対値和的に加算し、最終応答とするのである。尚、上下方向の静的震度は、従来は建築基準法ベースの震度であったが、入力地震波の最大加速度 S_{max} の 1/2 に変わって来た。これは、米国 Regulatory Guide の規定と同じである。

長周期応答の解析法や長周期床応答曲線の策定法に就いては現状明確な規定がなく、プラントや機器設備毎に各々検討しているのが実態である。いずれにしても今までの地震観測データから周期2秒以上に関しては200～300Kineの大きな応答が観測されており、この程度の入力を考える必要がある。第6.9節を参照。

5.3.9 解析座標系と水平2方向の合成

特定の容器やタンクに関しては、特異構造断面に合わせて水平2方向座標を取り、それぞれに異なる地震力を入力して解析することがあるが、一般の機器・配管は、構造の特異性を考慮せず、任意の直交座標を取って、同じ地震力で解析し、2方向の応答を重ね合わせて評価する。その前提は、建物の床応答スペクトルに方向性がある場合は包絡して使うことである。このように包絡すれば、図5.3-11に示すように、機器・配管を任意の直交座標系でモデル化し、水平2方向(図ではZ方向とX方向)にそれぞれ地震力Sを入力して解析した時、この解析座標系の任意方向に入射する地震力S(図ではZ軸から θ 傾いた方向)に対する応答は、Z・X方向に対する解析結果と以下の関係を持つのである。

まず任意方向に入射する地震入力Sは次のように成分分解される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{Z方向: } S \cos \theta \\ \text{X方向: } S \sin \theta \end{array} \right\} \quad (5.3-32)$$

これに対して、ZとX方向にそれぞれ地震力Sが入射したとして解析した時の応答の組をそれぞれ R_z 、 R_x とすれば、 θ 方向の地震波入力Sに対する応答 R_θ は、

$$R_\theta = R_z \cos \theta + R_x \sin \theta \quad (5.3-33)$$

ここで、 R_z :地震力SがZ軸方向に入射した場合の応答の組

R_x :地震力SがX軸方向に入射した場合の応答の組

として計算することができる。

ここで最大応答は、 θ をパラメータにしてサーベイ計算を行えば、上式から求めることができるが、実際の計算は、配管の全節点に於いて、また全ての物理量(反力・モーメント・変位などの成分毎)に就いて、ここが重要であるが、「個々別々にパラメータサーベイ計算をする」必要があり、計算が膨大となる。また、求めるべき物理量の数を限定し、ある特定数の物理量としても、その最大値全部を一挙に求めることはできないし、更に、このようなサーベイ計算を常に行うのでは、設計解析としても通用しない。そこで現実的には、任意の直交2方向の解析値から、5.3.6.b項(viii)の表5.3-6に示した②～⑤の4つの合成方法のいずれかによって合成して応答を求めるのである。

尚、表5.3-6に示した①～⑤の5通りの計算方法の大小関係の証明に就いては、本書では省略したので、必要の折は著者のホームページを参照願いたい。

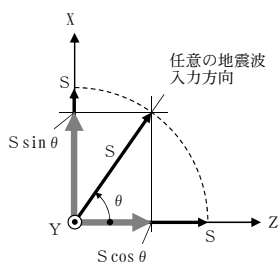


図5.3-11 解析座標系と地震波入力方向