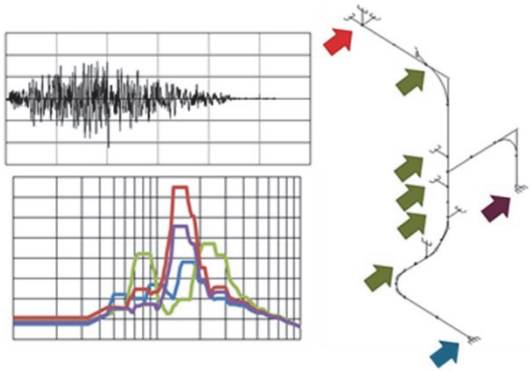
配管系の耐震設計合理化を実現する多入力応答スペクトル解析法

Floor Response Spectrum Method Assisted by Time History Analysis to Rationalize Seismic Design for Multiply Supported Piping System



首藤 博道*1 Hiromichi Shudo
入木 信好*2 Nobuyoshi Iriki

配管系の耐震設計手法としては，詳細な時刻歴解析法と簡易な床応答スペクトル解析手法があり，設計では一般に床応答スペクトル解析手法が採用されている。床応答スペクトル解析法は位相情報がないため，詳細な時刻歴解析手法に比べ，過大評価となる場合があった。そこで，これまでの解析手法とは異なるアプローチとして，各地震波による応答に対して相関係数を用いて合成することで，床応答スペクトル解析手法により時刻歴解析法と概ね同等の解析精度を実現することができる解析手法を開発した。なお，本解析手法は，実機プラントへの適用を目指して Pressure Vessels & Piping Conference 等の学会発表を通じて公知化している。

1. はじめに

原子力発電所内の配管は，その供用期間中に大地震に遭遇した場合でも，周辺公衆が放射線障害を受けないことを保証するために耐震設計しなければならない。各支持点から異なる入力を受ける配管系の地震応答解析手法として，包絡波を用いた単一入力応答スペクトル解析が広く用いられている。しかし，この手法は過剰に保守的となる場合がある。代替手法として多入力応答スペクトル解析が挙げられるが，多入力間の応答合成方法について様々な議論がある。多入力間の応答合成方法が絶対値和（Absolute value sum，以下 ABS）法の場合，常に保守的であり，過剰に保守的な評価となる懸念がある。二乗和平方根（Square Root of Sum of Squares，以下 SRSS）法の場合は，保守的とは限らない。よって，多入力応答スペクトル解析において多入力間の応答合成方法として適用性を確認せず無条件に SRSS 法を用いることは難しい。そこで，多入力応答スペクトル解析において，より現実的な応答を算出できるように SATH（Spectrum Method Assisted by Time History Analysis）法と名付けた，ABS 法，SRSS 法とは異なる新しい手法を三菱重工業株式会社（以下，当社）が独自に開発しており，SATH 法を適用することにより，設備・工事規模の適正化が可能な見込みである。

2. SATH 法について

各支持点から異なる地震入力を受ける配管系には，配管系の各固有振動モードに対して生じる①動的モーダル応答，②高次振動モードに対して生じる動的高次応答，③支持点変位による相対変位応答が生じる。

従来の配管系応答解析では動的解析のモーダル応答，動的高次応答及び相対変位応答の合成において最大応答の合成に SRSS 法または ABS 法を用いて実施していたが，SATH 法では，これらすべての最大応答間の合成を相関係数に基づいて行うというものである。従来の多入

*1 原子力セグメント プラント設計部
*2 原子力セグメント プラント設計部 主席技師

力応答スペクトル解析法とSATH法の応答合成方法の比較を図1に示す。従来の単一入力応答スペクトル解析法及び多入力応答スペクトル解析法では，まず動的モーダル応答及び相対変位応答について，各サポートグループからの励振による個々の応答を合成した上で，動的モーダル応答，動的高次応答及び相対変位応答を合成している。これらに対して，SATH法では各サポートグループからの励振による個々の動的モーダル応答，動的高次応答及び相対変位応答間の相関係数を考慮し，各応答の総当たりにより応答合成を行っている。これは，位相を考慮した適切な応答合成を行うためである。従来の単一入力応答スペクトル解析法または多入力応答スペクトル解析法では過剰に保守的な結果となることが多くあったが，SATH 法では正解とみなす時刻歴解析結果とほぼ一致する結果を算出できるようになった。

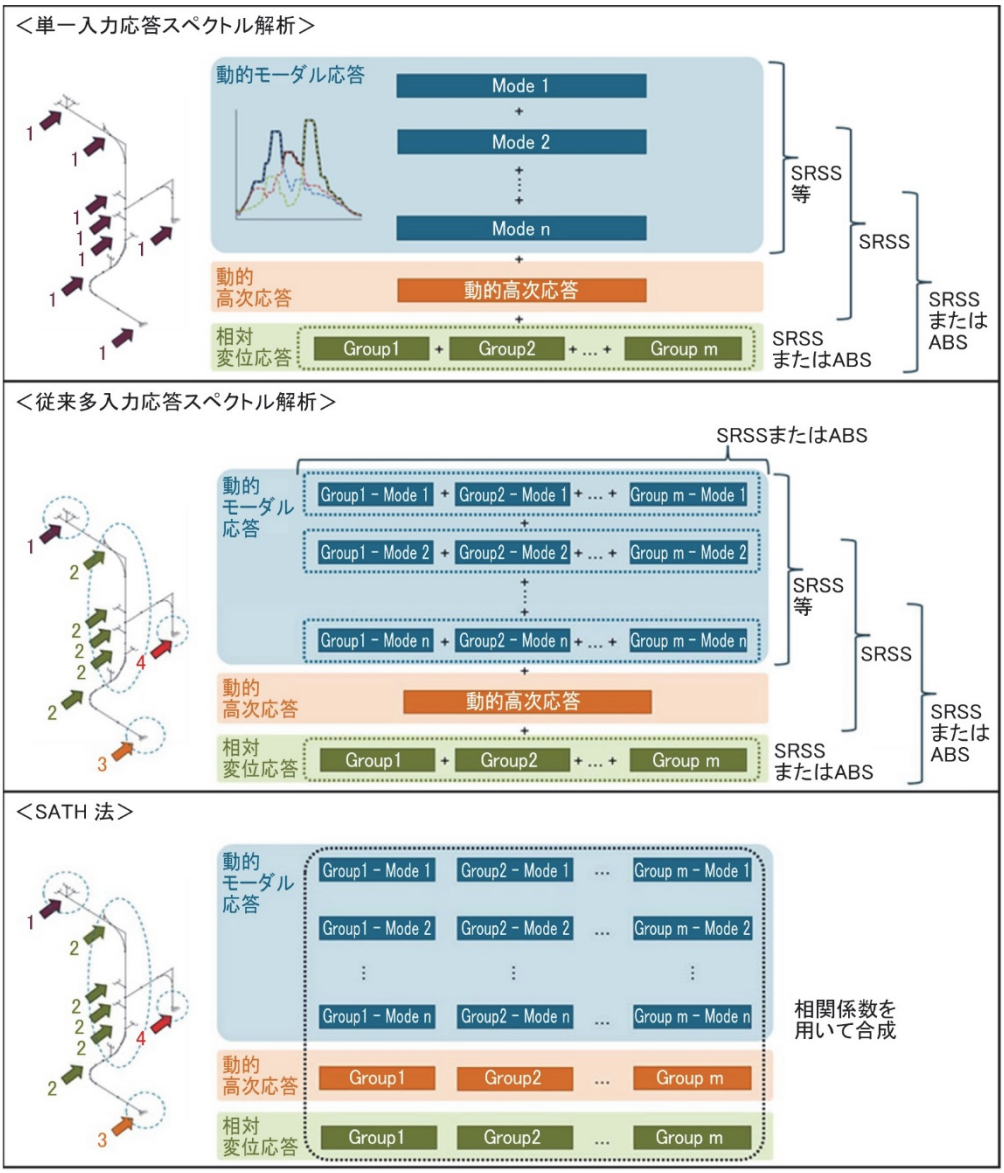


図1　合成方法イメージ図
各解析手法における動的モーダル応答，動的高次応答，相対変位応答の合成方法を示す。

2.1　相関係数を用いた合成方法

配管系が各支持点から受ける入力の総数をm，配管系の応答スペクトル解析におけるカットオフ振動数までのモード次数をnとすると，配管系には各入力に対してモード毎に動的応答が生じ，合計$m \times n$個のモーダル応答が生じる。また，各入力に対して合計m個の高次応答が生じる。さらに各入力に建屋変位があり，これらの建屋変位により配管系に合計m個の静的応答が生じる。これらの応答を表1に示す。

表1 動的応答と静的応答

			異なる建屋床面からの励振力(総数m)						
		No.	1	…	k	…	l	…	m
動的応答	モーダル応答(総数n)	1	${}_DR_{11}$	…	${}_DR_{1k}$	…	${}_DR_{1l}$		${}_DR_{1m}$
		…	…	…	…	…	…	…	…
		i	${}_DR_{i1}$	…	${}_DR_{ik}$	…	${}_DR_{il}$		${}_DR_{im}$
		…	…	…	…	…	…	…	…
		j	${}_DR_{j1}$	…	${}_DR_{jk}$	…	${}_DR_{jl}$		${}_DR_{jm}$
		…	…	…	…	…	…	…	…
		n	${}_DR_{n1}$	…	${}_DR_{nk}$	…	${}_DR_{nl}$		${}_DR_{nm}$
	高次応答	$n+1$	${}_HR_1$	…	${}_HR_k$	…	${}_HR_l$		${}_HR_m$
静的応答	相対変位応答	$n+2$	${}_SR_1$	…	${}_SR_k$	…	${}_SR_l$		${}_SR_m$

表1において，m個の入力に対して，モーダル応答がn個，高次応答が1個，静的応答が1個あることから，表1のマトリクスは$(n+2)\times m$のマトリクスになる。このマトリクスで，i行目k列の応答の最大値をR_{ik}とする。R_{ik}には動的モーダル応答，高次応答及び静的応答のすべてが含まれる。ここで，$1\le i\le n+2$，$1\le k\le m$である。応答R_{ik}と応答R_{jl}の相関係数をρ_{ikjl}とすると，全入力に対する動的モーダル応答，動的高次応答及び静的変位応答の合計応力は相関係数を用いて以下の通り求められる。

$$R=\sqrt{\sum_{i=1}^{n+2}\sum_{j=1}^{n+2}\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}\rho_{ikjl}R_{ik}\,R_{jl}}$$

なお，相関係数ρ_{ikjl}は表 1 の各応答の変位時刻歴を$X_{ik}(s)$とすると次式より求まる。(sはタイムステップを表しており，全タイムステップ数をNとする。)

$$\rho_{ikjl}=\frac{\sum_{s=1}^{N}X_{ik}(s)X_{jl}(s)}{\sqrt{\sum_{s=1}^{N}\left(X_{ik}(s)\right)^2}\sqrt{\sum_{s=1}^{N}\left(X_{jl}(s)\right)^2}}$$

ここで，相関係数を算出するための各応答の変位時刻歴$X_{ik}(s)$は以下とする。

①動的モーダル応答:配管系のi次モードの固有振動数について，k床面加速度時刻歴波を入力とする1自由度系の時刻歴解析を行い，得られた応答変位時刻歴を$X_{ik}(s)$とする。

②動的高次応答:剛体応答であるから，応答変位時刻歴は入力加速度時刻歴に比例する。相関係数を算出する際に，時刻歴の値を比例倍しても相関係数の値は同じであるから，入力加速度時刻歴を応答変位時刻歴$X_{(n+1)k}(s)$とみなす。

③相対変位応答:静的応答であるから，応答変位時刻歴は入力変位時刻歴に比例する。相関係数を算出する際に，時刻歴の値を比例倍しても相関係数の値は同じであるから，入力変位時刻歴を応答変位時刻歴$X_{(n+2)k}(s)$とみなす。

SATH 法の合成方法フローを図 2 に示す。

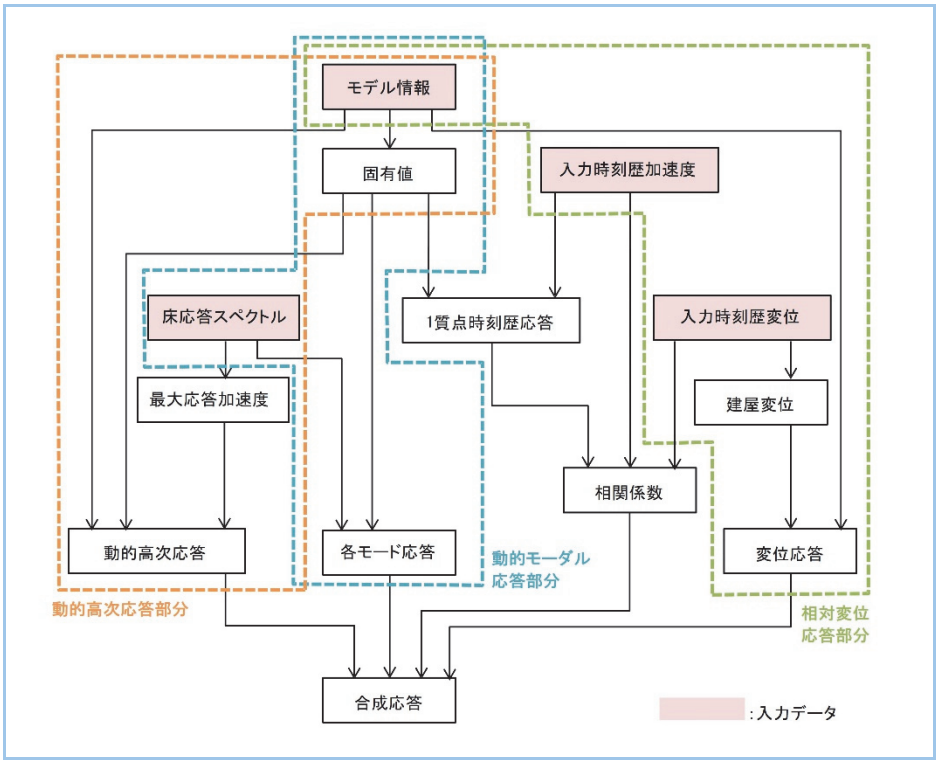


図2 SATH 法フロー
SATH 法での流れを示す。

3. SATH 法を用いた解析結果

SATH 法の有効性と利点を確認するために，複数建屋から異なる地震波入力を受ける配管系の地震応答解析をいくつかの解析方法で行い，SATH 法の結果を時刻歴解析（The independent support motion modal time history analysis，以下 TH）法及び従来の応答スペクトル解析法の結果と比較した。ここで，従来の応答スペクトル解析法として，多入力応答スペクトル（The independent support motion response spectrum analysis，以下 ISM）法と包絡波単一入力応答スペクトル（The uniform support motion response spectrum analysis．以下 USM）法を用いており，解析ケースを表 2 に示す。

表2 解析ケース

解析方法	応答の組合せ方法			
	多入力間合成	モード合成	動的高次 応答合成	相対変位 応答合成
時刻歴 TH	時々刻々代数和			
SATH	相関係数を用いた合成法			
多入力応答スペクトル従来法 ISM	絶対値和 ABS	二乗和平方根 SRSS	二乗和平方根 SRSS	二乗和平方根 SRSS
単一応答スペクトル従来法 USM	—	二乗和平方根 SRSS	二乗和平方根 SRSS	絶対値和 ABS

3.1 解析条件

解析に用いた 3 次元配管系モデルを図 3 に示す。このモデルは NUREG/CR-1677 の多点から異なる入力を受ける配管系のベンチマーク問題から引用した[(1)]。加速度時刻歴波を図 4，床応答加速度スペクトルを図 5，建屋名称を示した建屋解析モデルを図 6 に示す。図 5 に示す通り，床応答加速度スペクトルは建屋固有値の不確実性への対処として 10%拡幅したものを使用しているため，TH 法においては入力加速度時刻歴波のタイムピッチを 0%，±2.5%，±5.0%，±7.5%，±10%変更したケースを考慮した。

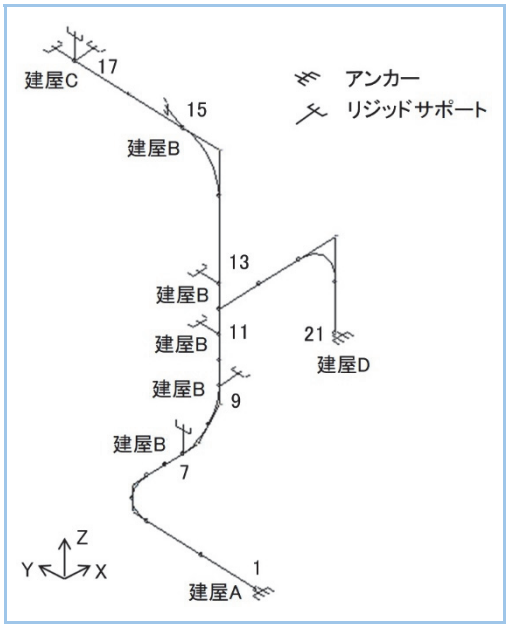


図3　解析モデル
解析に使用した配管系の3次元梁モデルを示す。

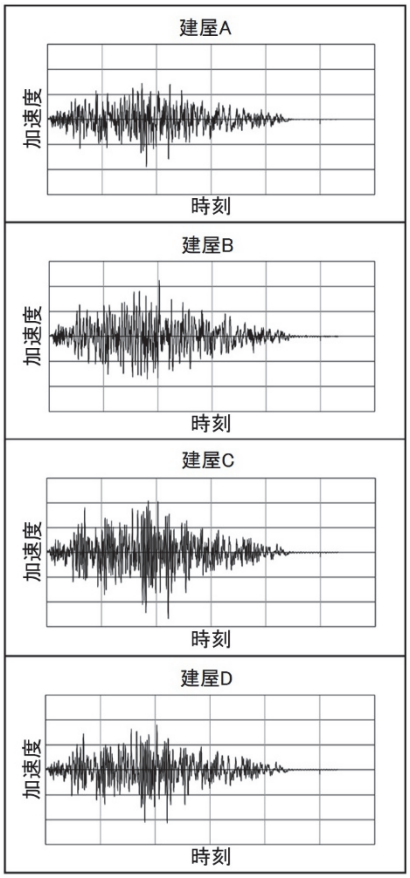


図4　加速度時刻歴波
解析モデルに入力した加速度の時刻歴波形を示す。

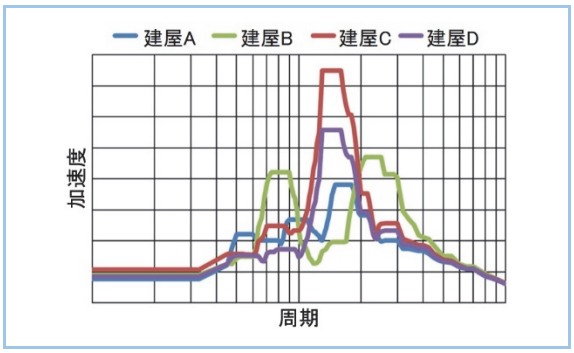


図5　床応答加速度スペクトル
解析モデルに入力した床応答加速度スペクトルを示す。

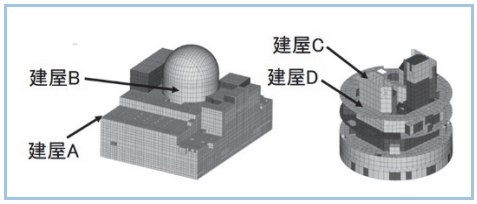


図6　建屋解析モデル
建屋解析モデルにおける建屋名称を示す。

3.2　解析結果

各ケースの解析結果のサポート反力比較を図 7 に示す。左図は①動的モーダル応答のみ，中央図は①動的モーダル応答と②動的高次応答の合成，右図は①動的モーダル応答，②動的高次応答，③相対変位応答の合成結果を示す。

まず左図に関して SATH 法は TH 法とよく一致している。一方，ISM 法と USM 法はそれらに比べて過大評価となっており，特に No.7，15 のサポート反力は約 2 倍となっている。

また，中央図でも SATH 法は TH 法とよく一致しており，特に左図と比較すると No.9 のサポート反力が小さくなっており，これは①動的モーダル応答と②動的高次応答の組合せにおいて逆位相効果により反力を打ち消しあっており，SATH 法では位相情報が適切に考慮されていることを示している。

最後に，右図でも SATH 法と TH 法はよく一致しており，ISM 法と USM 法はいくつかのサポート反力が SATH 法や TH 法の約 2～3 倍となっている。

上記の結果から，SATH 法はいずれも TH 法とよく一致するため，①動的モーダル応答，②動

的高次応答，③相対変位応答を適切に組み合わせて評価することができ，従来手法と比較して過大応答を回避することが可能であり，かつ時刻歴解析法と概ね同等な解析精度を実現することを確認した。

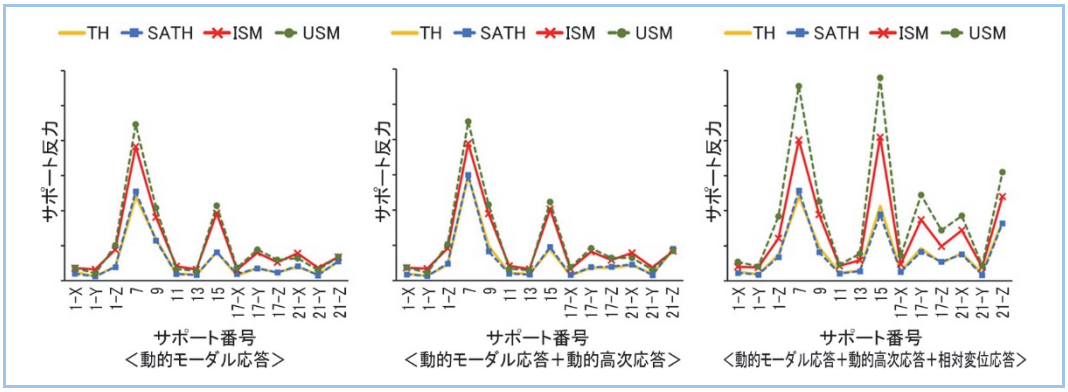


図7　解析結果（サポート反力の比較）
サポート反力結果における従来手法とSATH法の比較を示す。

3.3　SATHの利点

前項でSATH法はTH法と概ね同等な解析精度を実現することを確認したが，TH法と比較して，SATH法が優位である理由を以下に述べる。

- SATH法はTH法と比較して計算時間が少ない。これは特に，建屋固有値の不確実性への対処として床応答加速度スペクトルを拡幅する場合に顕著である。
- 配管系の適切なサポート配置において，TH 法では支配的なモードの特定が困難な一方，SATH法は従来の応答スペクトル解析法と同様に支配的なモードの特定ができるため，適切なサポート配置が比較的容易である。

4. まとめ

当社はこれまでに耐震評価技術の高度化により，原子力発電所の信頼性向上を図っており，本報では原子力発電所内の配管向けに開発した新しい耐震設計手法について紹介した。今後も継続して技術・設備の改良や開発を進め，原子力発電所の安全性向上を支援していく。

参考文献

(1) P. Bezler et al., Dynamic Analysis Independent Support Motion Response Spectrum Method, NUREG/CR-1677, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Vol. 2, (1985) p.77-86