

本資料のうち、枠囲みの内容は
当社の商業機密を含むため、又
は他社の機密事項を含む可能
性があるため公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0600-13_改13
提出年月日	2021年11月11日

補足-600-13 使用済燃料貯蔵ラックの設計用減衰定数について

目 次

1.	はじめに	1
2.	燃料ラックの概要及び既工認と今回工認の耐震設計手法の比較	1
2.1	燃料ラックの構造と燃料プール内の配置	1
2.2	燃料ラックの耐震設計手法	4
2.3	既工認と今回工認の耐震設計手法の比較	6
2.4	燃料ラックの設計用減衰定数の考え方	7
3.	加振試験に基づく減衰定数設定の全体概要	9
4.	減衰特性の確認試験	11
4.1	実物大加振試験の概要	11
4.2	供試体ラックの水中加振試験装置及び試験手法	13
4.3	試験結果	23
4.4	加振試験における試験条件の妥当性	28
5.	試験結果に基づく燃料ラックの設計用減衰定数の設定	29
5.1	実機応答と供試体応答の比較	29
5.2	設計用減衰定数の設定	31
5.3	設計用減衰定数の設定方法の妥当性確認	32
6.	結論	34

別紙-1 プール水及び燃料集合体の体数が減衰定数に与える影響

別紙-2 試験水槽の形状決定方法

別紙-3 試験における水深の影響

別紙-4 応答倍率による減衰比の算出方法

別紙-5 スロッシングによる減衰への影響

別紙-6 減衰の応答依存性を考慮した燃料ラックの減衰定数の確認方法

別紙-7 燃料ラックと供試体ラックの振動モード

別紙-8 加振試験範囲を超える応答加速度での減衰定数

別紙-9 NASTRAN 仮想質量法を用いた刺激関数の算出手順

別紙-10 固有振動数による減衰定数への影響

別紙-11 燃料ラックの刺激関数 $\beta \phi$ 及び振動モードの詳細

別紙-12 貯蔵率を変化させた加振試験における燃料集合体の配置条件

別紙-13 先行プラントの類似知見に基づく減衰定数設定の妥当性に関する考察

別紙-14 計算機プログラム（解析コード）の概要・ISOL

 : 今回提出範囲（該当ページのみ）

表 4-4 加振試験結果データ一覧 (1 / 3)

No.	入力 加速度*1 (m/s ²)	計測 位置*2	頂部応答 加速度 (m/s ²)	共振 振動数 (Hz)	応答倍率 (Q)	減衰定数*3 (%)
1	0.42	A22Y	3.1		7.1	7.0
		A27Y	3.0		7.1	7.1
		A32Y	3.0		7.0	7.1
		A34Y	3.0		7.0	7.2
2	0.56	A22Y	3.8		6.4	7.8
		A27Y	3.7		6.4	7.9
		A32Y	3.7		6.4	7.9
		A34Y	3.7		6.3	7.9
3	0.80	A22Y	4.9		5.6	9.0
		A27Y	4.8		5.6	9.0
		A32Y	4.8		5.5	9.1
		A34Y	4.8		5.5	9.1
4	1.08	A22Y	5.8		4.9	10.3
		A27Y	5.6		4.8	10.4
		A32Y	5.7		4.8	10.4
		A34Y	5.6		4.8	10.5
5	1.08	A22Y	5.9		5.0	10.0
		A27Y	5.7		5.0	10.1
		A32Y	5.8		5.0	10.1
		A34Y	5.7		5.0	10.1
6	1.43	A22Y	7.0	4.4	11.3	
		A27Y	6.7	4.4	11.4	
		A32Y	6.9	4.4	11.5	
		A34Y	6.6	4.4	11.5	

注記*1：振動台上の実測加速度（最大値）

*2：計測位置は図 4-10～図 4-12 参照

*3：減衰定数 $\zeta = \beta \cdot \phi / (2 \cdot Q)$ ($\beta \doteq 2.43$, $\phi \doteq 0.413$)

刺激係数 $\beta = \frac{\{\phi\}^T([M]-[M_D])\{1\}}{\{\phi\}^T([M]+[M_d])\{\phi\}}$ ，固有ベクトル $\{\phi\}$ は質量マトリックスで正規化

固有ベクトルの一般的な正規化方法は別紙-9 2 項に記載

(応答倍率による減衰定数算定の詳細は別紙-4 参照)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表 4-4 加振試験結果データ一覧 (2 / 3)

No.	入力 加速度*1 (m/s ²)	計測 位置*2	頂部応答 加速度 (m/s ²)	共振 振動数 (Hz)	応答倍率 (Q)	減衰定数*3 (%)
7	1.69	A22Y	7.9		4.2	11.9
		A27Y	7.6		4.2	11.9
		A32Y	7.8		4.2	12.0
		A34Y	7.4		4.2	12.0
8	2.06	A22Y	9.2		4.0	12.7
		A27Y	8.8		3.9	12.8
		A32Y	9.1		3.9	12.7
		A34Y	8.7		3.9	12.9
9	2.60	A22Y	10.1		3.5	14.4
		A27Y	10.0		3.5	14.4
		A32Y	9.9		3.5	14.5
		A34Y	9.9		3.5	14.5
10	3.01	A22Y	11.1	3.3	15.1	
		A27Y	11.2	3.3	15.2	
		A32Y	11.0	3.3	15.2	
		A34Y	11.1	3.3	15.3	
11	3.42	A22Y	12.2	3.2	15.8	
		A27Y	12.3	3.2	15.9	
		A32Y	12.1	3.1	16.0	
		A34Y	12.1	3.2	15.9	
12	3.80	A22Y	13.9	3.2	15.9	
		A27Y	13.8	3.2	15.9	
		A32Y	13.8	3.1	16.1	
		A34Y	13.6	3.2	16.0	

注記*1：振動台上の実測加速度（最大値）

*2：計測位置は図 4-10～図 4-12 参照

*3：減衰定数 $\zeta = \beta \cdot \phi / (2 \cdot Q)$ ($\beta \doteq 2.43, \phi \doteq 0.413$)

刺激係数 $\beta = \frac{\{\phi\}^T([M]-[M_D])\{1\}}{\{\phi\}^T([M]+[M_d])\{\phi\}}$ ，固有ベクトル $\{\phi\}$ は質量マトリックスで正規化

固有ベクトルの一般的な正規化方法は別紙-9 2 項に記載

(応答倍率による減衰定数算定の詳細は別紙-4 参照)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表 4-4 加振試験結果データ一覧 (3 / 3)

No.	入力 加速度*1 (m/s ²)	計測 位置*2	頂部応答 加速度 (m/s ²)	共振 振動数 (Hz)	応答倍率 (Q)	減衰定数*3 (%)
13	4.37	A22Y	15.1		3.1	16.4
		A27Y	14.8		3.1	16.5
		A32Y	15.0		3.0	16.6
		A34Y	14.7		3.0	16.5
14	5.02	A22Y	17.2		3.0	16.9
		A27Y	16.6		3.0	16.9
		A32Y	17.2		3.0	16.9
		A34Y	16.6		3.0	16.9
15	5.60	A22Y	20.2		3.1	16.2
		A27Y	19.5		3.1	16.2
		A32Y	20.1		3.1	16.2
		A34Y	19.4		3.1	16.2
16	6.24	A22Y	22.3		3.2	15.9
		A27Y	21.4		3.1	16.0
		A32Y	22.3		3.2	15.9
		A34Y	21.3		3.1	16.0
17	7.09	A22Y	24.9		3.3	15.4
		A27Y	24.0	3.3	15.5	
		A32Y	24.8	3.3	15.4	
		A34Y	24.0	3.2	15.5	

注記*1：振動台上の実測加速度（最大値）

*2：計測位置は図 4-10～図 4-12 参照

*3：減衰定数 $\zeta = \beta \cdot \phi / (2 \cdot Q)$ ($\beta \doteq 2.43$, $\phi \doteq 0.413$)

刺激係数 $\beta = \frac{\{\phi\}^T([M]-[M_D])\{1\}}{\{\phi\}^T([M]+[M_d])\{\phi\}}$ 固有ベクトル $\{\phi\}$ は質量マトリックスで正規化

固有ベクトルの一般的な正規化方法は別紙-9 2項に記載

(応答倍率による減衰定数算定の詳細は別紙-4 参照)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

1.3 気中における地動に対する多自由度系の運動方程式と伝達関数^[1]

図 2 に示す気中の地動に対する多自由度系の運動方程式は次式で表される。

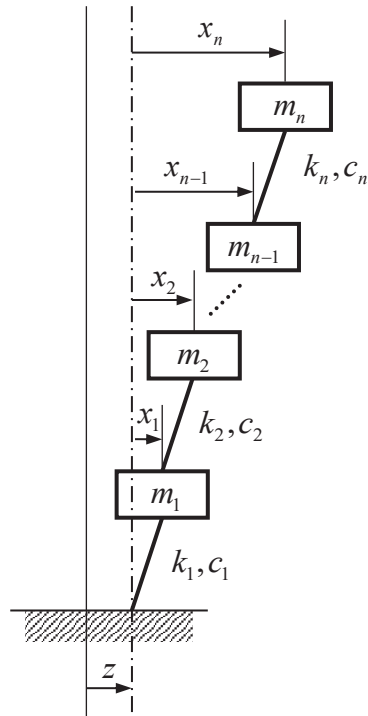


図 2 多自由度振動系

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{1\}\ddot{z} \quad (13)$$

ここで、

$[M]$: 質量マトリックス (構造質量)

$[C]$: 減衰マトリックス

$[K]$: 剛性マトリックス

$\{x\}$: 相対変位ベクトル

$\{1\} = \{1 \ \dots \ 1\}^T$: 単位ベクトル

z : 地動変位

モーダル解析の手法により、モード分離を行う。変位ベクトルを空間と時間の関数に変数分離する。

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} = q_1 \begin{Bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \vdots \\ \phi_{n1} \end{Bmatrix} + q_2 \begin{Bmatrix} \phi_{12} \\ \phi_{22} \\ \vdots \\ \phi_{n2} \end{Bmatrix} + \dots + q_n \begin{Bmatrix} \phi_{1n} \\ \phi_{2n} \\ \vdots \\ \phi_{nn} \end{Bmatrix} = \sum_{s=1}^n q_s \{\phi_s\} \quad (14)$$

ここで、

$\{q_s\}$: s 次のモード座標における変位 (時間の関数)

1.5 応答倍率による減衰定数の算出方法

図3に示す相対加速度共振曲線から、応答倍率の最大値 $|H(\omega)|_{max}$ は、振動数比 $\lambda = \frac{\omega}{\omega_0} = 1.0$ の近傍で生じる(図3)。相対加速度の共振曲線は、固有振動数より高振動数側では1に漸近し、低振動数側で0に近づき、振動数比=0で0となる。絶対加速度の場合には、逆に固有振動数より高振動数側で0に近づき、低振動数側で1に漸近し、振動数比=0で1となる。応答倍率の最大値を $Q = |H(\omega)|_{max}$ とすると、1自由度系の場合、応答倍率の最大値は、気中では式(7)より、

$$Q \approx \frac{1}{2\zeta} \quad (28)$$

である。水中では式(12)より

$$Q \approx \frac{\beta}{2\zeta} \quad (29)$$

一方、多自由度系の場合、応答倍率の最大値は、気中・水中ともに式(21)及び式(27)のように同じ形で表されるので、

$$Q_{is} \approx \frac{\beta_s \phi_{is}}{2\zeta_s} \quad (30)$$

である。ただし、前述のとおり、気中と水中で刺激関数 $\beta_s \phi_{is}$ を導出する際の質量マトリックスが異なる。以上より、正弦波掃引試験で得られる相対加速度の伝達関数にて、応答倍率が最大となる角振動数 ω_p を ω_0 とみなすと、応答倍率の最大値 Q と刺激関数 $\beta_s \phi_{is}$ から減衰比 ζ_s を算出できる。これらのまとめを表1及び表2に示す。

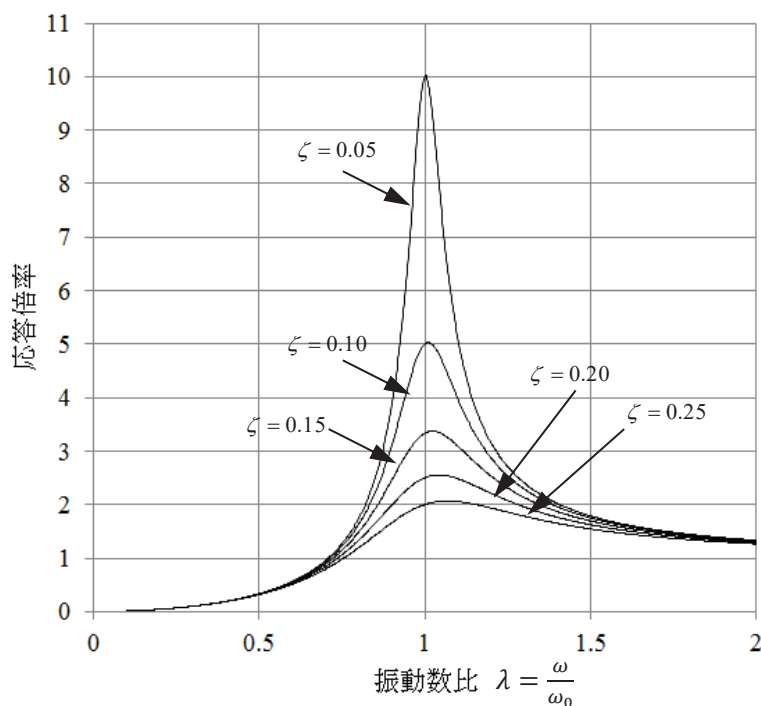


図3 加速度共振曲線

【2】燃料質量 M_f

燃料質量 M_f は、模擬燃料の構造質量 M_{f1} と、燃料ラック-燃料間の流体付加質量 M_{f2} を N 体 (30 体) 分合計した質量で、燃料の高さ方向に 9 点設けた各質点に均等に分割した。

$$M_f = N(M_{f1} + M_{f2}) \quad (8)$$

燃料ラック-燃料間の流体付加質量 M_{f2} は (6) 式と同じである。

$$M_{f2} = M_{h2} \quad (9)$$

【3】水槽質量 M_t

水槽質量 M_t は、水槽の構造質量 M_{t1} と、水槽-燃料ラック間の流体付加質量 M_{t2} を合計した質量で、水槽の高さ方向に 9 点設けた各質点に均等に分割した。

$$M_t = M_{t1} + M_{t2} \quad (10)$$

水槽-燃料ラック間の流体付加質量 M_{t2} は (2) 式と同じである。

$$M_{t2} = \alpha M_{h1} \quad (11)$$

【4】燃料ラック-燃料間連成質量 M_{r-f}

燃料ラック-燃料間連成質量は、燃料ラック-燃料間の流体付加質量 M_{h2} と燃料の外形形状が排除する質量 M_{fd} を N 体分合計した質量にマイナスを乗じた値で、質量マトリックスのうち燃料ラック-燃料間の非対角項に均等に分割した。

$$M_{r-f} = -N(M_{h2} + M_{fd}) \quad (12)$$

【5】水槽-燃料ラック間連成質量 M_{t-r}

水槽-燃料ラック間連成質量は、水槽-燃料ラック間の流体付加質量 αM_{h1} と燃料ラックの外形形状が排除する質量 M_{rd} を合計した質量にマイナスを乗じた値で、質量マトリックスのうち、水槽-燃料ラック間の非対角項に均等に分割した。

$$M_{t-r} = -(\alpha M_{h1} + M_{rd}) \quad (13)$$

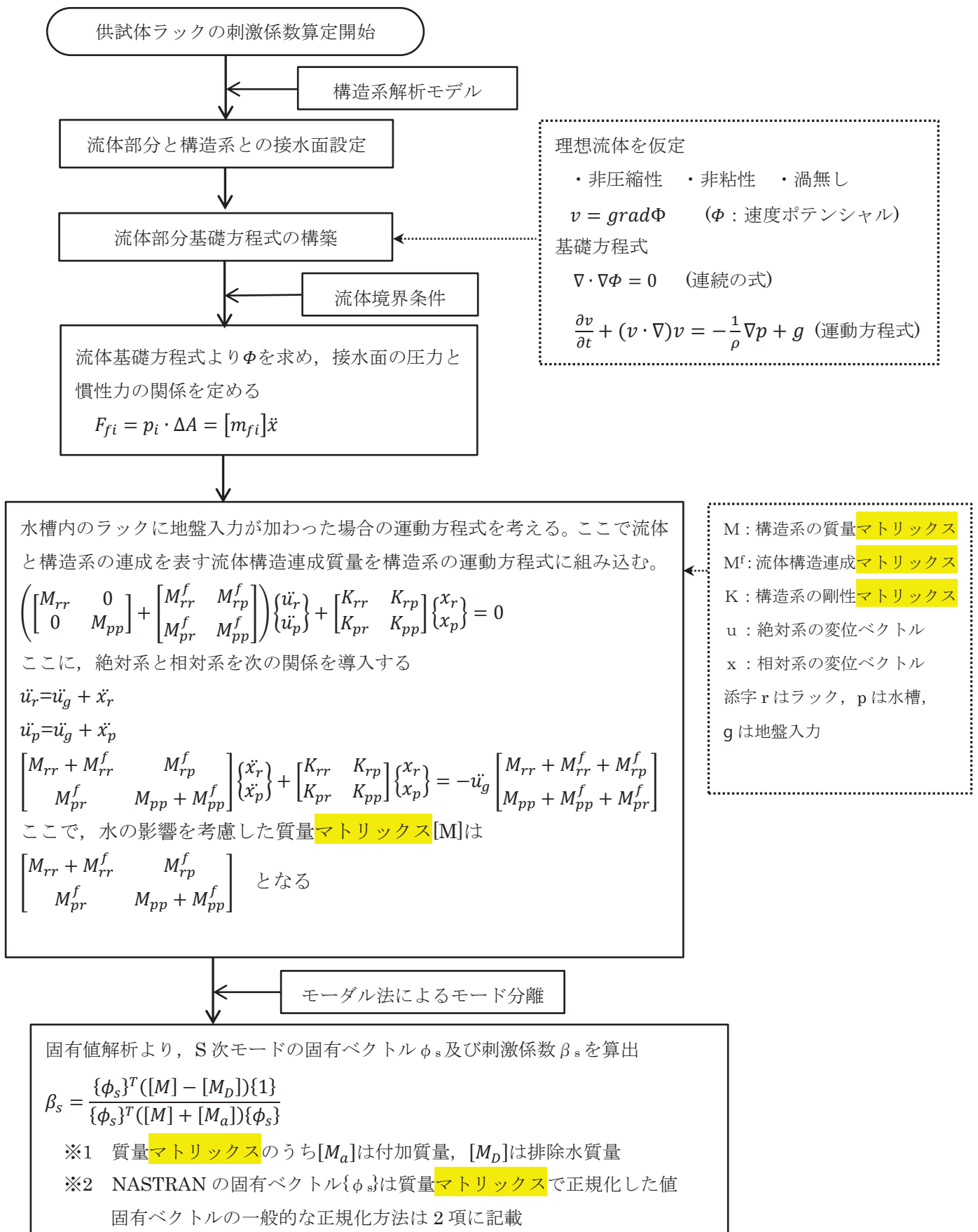


図1 NASTRAN 仮想質量法による刺激関数の算定フロー

2. 固有ベクトルの正規化方法

2.1. 概要

多自由度系の応答解析において、固有ベクトルの正規化について異なる方法が取られる場合があるが、最終的な応答評価結果は同じになる。本資料では2つの正規化の方法を例に、このことを示す。

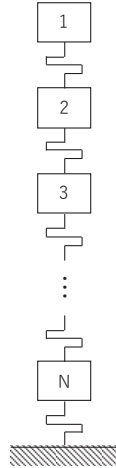


図2 多自由度ばね-質点系

2.2. 正規化の方法

ここでは多自由度系の例として、図1に示す一般的なばね-質点系を用いて説明する。正規化の方法として、下記の(a)(b)2つを比較する。

(a) 固有ベクトルの1つの要素を1として正規化

対象とする固有ベクトルの成分のうち、1つの質点変位が1になるように正規化する。次式の例では、質点1に対応する成分 φ_{s1} が1になるように正規化している。一般的には、最大変位の質点変位で正規化することが多い。

$$\{\varphi_{sa}\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ \varphi_{s2}/\varphi_{s1} \\ \varphi_{s3}/\varphi_{s1} \\ \vdots \\ \varphi_{sN}/\varphi_{s1} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

(1)式において、添え字の s はモード次数、 $1\sim N$ は質点番号、 a は正規化の方法を示している。

(b) モード質量を1とする正規化

次式のように対象とするモードのモード質量が1になるように正規化する。商用のFEM解析コード等ではこの正規化が一般的である。

$$\{\varphi_{sb}\}^T [M] \{\varphi_{sb}\} = 1 \quad (2)$$

(2)式において、 $[M]$ は質量マトリックス、添字の b は正規化の方法を示している。

3. 解析手法

3.1 基本式

基本方程式は以下の形であらわされる。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f(t) \quad (3-1)$$

ここで M 、 C 、 K はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックスである。 u は各質点の変位を表す変位ベクトルであり、その成分として各方向の変位及び回転の自由度を含む。 $f(t)$ は系に対する外力を表すベクトルであり、一般に動的解析において時間変動する。

質量マトリックス M は各質点の並進及び回転自由度に対して集中分布質量系で取り扱う。また付加質量（流体－構造連成質量）のように非対角成分を持つ場合も取り扱うことができる。剛性マトリックス K は各部材（ばね、梁）の剛性マトリックスの和として表す。減衰マトリックス C は剛性部材に定義される減衰定数や質点間に定義される減衰係数など各種減衰系で定義することで取り込むことができる。また質点間の相対速度や相対変位に依存して減衰係数や剛性を変化させる非線形要素が組み込まれており、線形減衰（構造減衰）以外にも速度二乗比例減衰（流体減衰）や摩擦減衰、履歴減衰、すべり、衝突などの非線形挙動のシミュレーション解析を取り扱うことができる。

3.2 数値計算手法

固有値解析においては、固有値、固有モードを全次数にわたって精度よく求めるためにヤコビ法を用いている。また時刻歴応答解析においては、実空間における運動方程式を時間積分する直接積分法としてルンゲ・クッタ法を用いている。