

# 女川原子力発電所第2号機 使用済燃料貯蔵ラックの設計用減衰定数について

---

2021年7月6日  
東北電力株式会社

# 本日のご説明内容

1. はじめに
2. 女川2号機の燃料ラックの構造
3. 燃料ラックの耐震設計における既工認からの変更点
4. 今回工認における燃料ラックの耐震設計に適用する設計用減衰定数の設定
5. 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数設定の適用性
  5. 1 適用性に係る検討プロセス
  5. 2 燃料ラックにおける減衰要因の抽出
  5. 3 各減衰要因の応答依存性の分類
  5. 4 燃料ラックの減衰挙動に係る解析の検討方針
  5. 5 簡易解析モデルによる減衰の解析
  5. 6 詳細解析モデルによる減衰の解析
  5. 7 解析結果を踏まえた設計用減衰定数の設定
6. まとめ

参考1 加振試験に基づく設計用減衰定数設定の全体概要(設置許可段階)

参考2 燃料ラックの減衰要因と応答依存性

参考3 簡易解析モデル(1質点系解析モデル)の諸元

参考4 詳細解析モデル(多自由度系解析モデル)の諸元

参考5 詳細解析モデル(多自由度系解析モデル)における詳細内容

参考6 燃料ラックの設計用減衰定数の設定手順例

参考7 各減衰要因の減衰定数への寄与

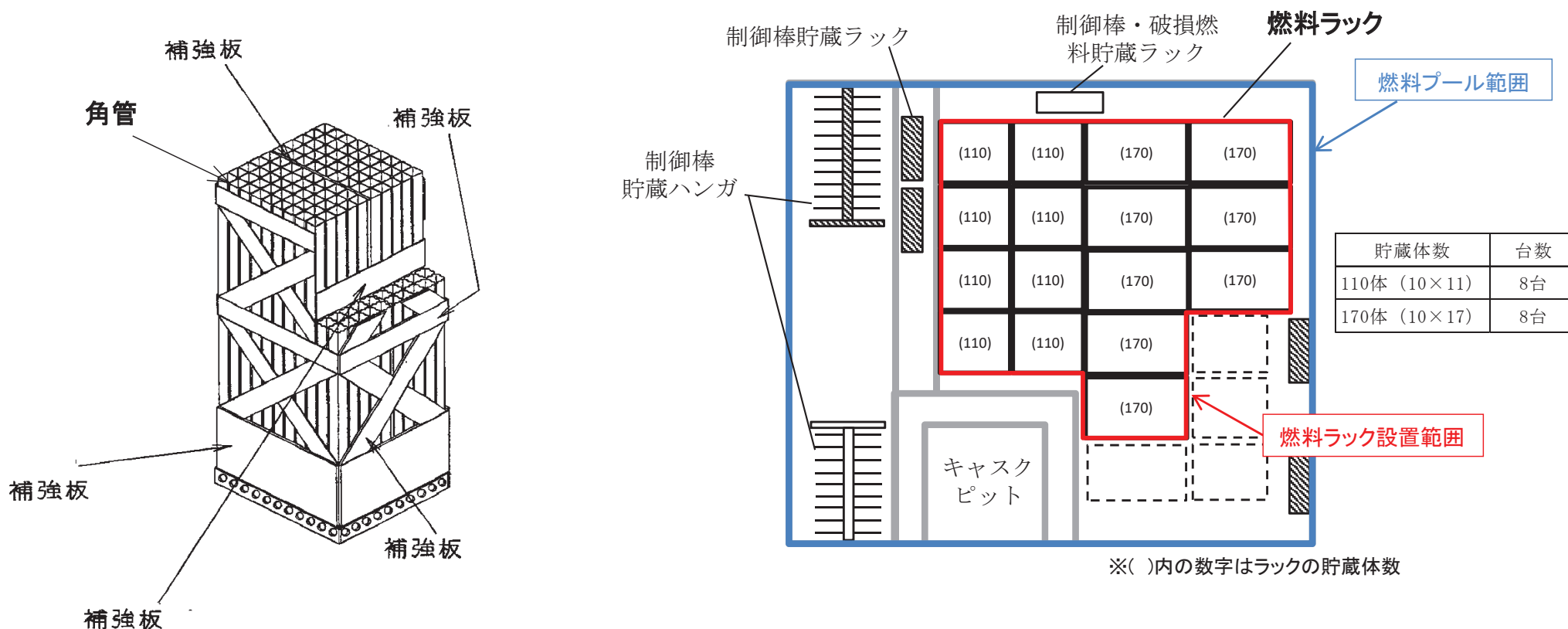
# 1. はじめに

- 女川2号機の使用済燃料貯蔵ラック(以下「燃料ラック」という。)の耐震設計においては、実物大加振試験(以下「加振試験」という。)等に基づき、水平方向の設計用減衰定数を既工認(1%)から変更する。
- 設置許可段階(第560回審査会合, 2018年3月29日他)では、設置変更許可申請時(2013年12月)の基準地震動 $S_s-1, 2$ に対する検討を踏まえ、加振試験結果のばらつき、耐震設計の簡便さと余裕を考慮して、燃料ラックの種類、燃料貯蔵率及び評価用地震動によらず、設計用減衰定数として一律7%を採用することとしていた。【参考1】
- しかしながら、工認段階では、 $S_s-1, 2$ からの地震動の追加及び地盤物性の不確かさ等を追加した基準地震動 $S_s$ に対する燃料ラックの耐震評価の結果、応答加速度の一部が加振試験範囲を超えている(設置許可段階よりも大きくなった)ため、加振試験の外挿領域における設計用減衰定数を設定する。
- 燃料ラックの基準地震動 $S_s$ に対する燃料ラックの応答加速度、加振試験で得られた減衰定数及び加振試験の外挿領域に対する解析的な検討結果を踏まえるとともに、燃料ラックの地震荷重をより実態に応じて評価するため、今回工認に用いる設計用減衰定数を10%と設定した。
- 本資料では、加振試験の外挿領域における設計用減衰定数の設定及び設計用減衰定数10%の適用性について、解析的に検討した結果を含めて説明する。

	設置許可段階	工認段階
設計用減衰定数の設定方法	加振試験	加振試験 (外挿領域は解析的に検討)
燃料ラックの応答加速度と加振試験の関係	全て加振試験の 応答加速度範囲内	一部は加振試験の 応答加速度範囲を超える
水平方向の設計用減衰定数 (基準地震動 $S_s$ )	7%	10%

## 2. 女川2号機の燃料ラックの構造

- 女川2号機の燃料ラックは、原子炉建屋3階の使用済燃料プール内に設置された「角管型」の燃料ラックである。
- 角管型の燃料ラックは角管と補強板を溶接することで、格子状のセルを構成している。
- 燃料ラックには、角管を10列×11列に配列した貯蔵体数110体の燃料ラックと、同じく10列×17列に配列した貯蔵体数170体の燃料ラックの2種類がある。



燃料ラック(110体)概略構造図

燃料ラック配置図

### 3. 燃料ラックの耐震設計における既工認からの変更点

- 既工認における燃料ラックの水平方向の設計用減衰定数は、「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1991 追補版」(以下「JEAG4601」という。)に規定される気中の溶接構造物の1.0%を用いていた。
- 燃料ラックは、燃料プール内の水中に設置され、燃料集合体を貯蔵していることから、燃料集合体のガタつき、着座部の摩擦、燃料ラックとの衝突、燃料ラック締結部の摩擦及び水の抵抗により、運動エネルギーの消散が大きくなり、1.0%より大きな減衰があると考えられる。
- 今回工認では、評価用地震動による燃料ラックの応答加速度、加振試験で得られた減衰定数及び加振試験の外挿領域に対する解析的な検討を踏まえ、余裕を考慮して、燃料ラックの設計用減衰定数を設定する。
- JEAG4601では、配管系の設計用減衰定数の設定に際して、試験結果に解析の検討を交えて設定した実例がある。

		既工認手法	今回工認手法
耐震解析モデル		3次元有限要素モデル	同左
耐震解析手法	水平方向	スペクトルモーダル解析	同左
	鉛直方向	静的解析	同左(剛構造のため)
設計用減衰定数	水平方向	1.0%	Ss:10% Sd:7%
	鉛直方向	—	—
許容応力		JEAG4601	同左
地盤・建屋等の不確実さの考慮		床応答スペクトルの周期方向への±10%拡幅	同左
耐震解析モデルの考え方		剛性は燃料ラック本体の寸法及びヤング率より設定。 質量は燃料ラック本体、燃料ラック内の燃料集合体、水及び付加質量を考慮。	同左

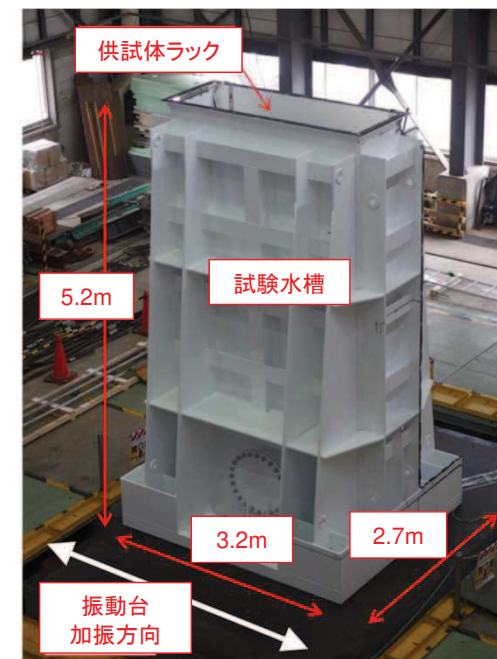
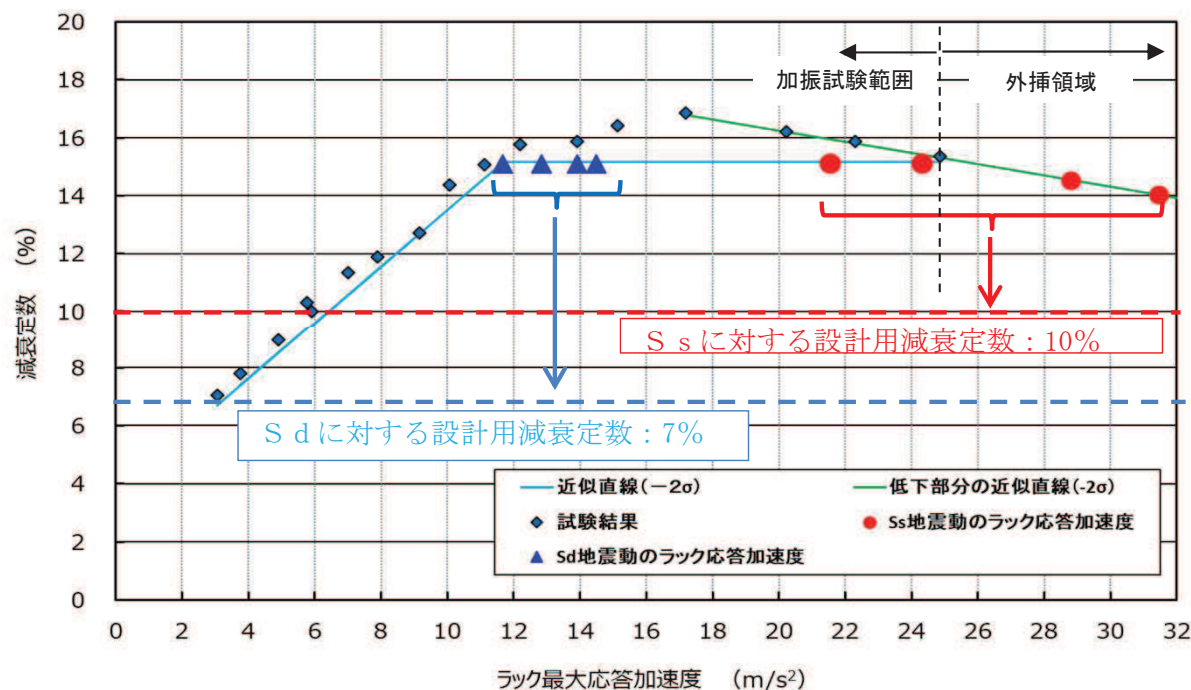


図 実物大加振試験

- 加振試験の結果，燃料ラックの減衰定数は応答依存性があり，燃料ラックの応答加速度の増加に伴って減衰定数が増加（最大で約17%）した後，次第に低下する傾向が確認されたことを考慮し，下図のとおり，工認段階で応答加速度が大きくなった加振試験の外挿領域を含めて，燃料ラックの減衰挙動を近似直線で設定した。
- 弾性設計用地震動 $S_d$ に対する燃料ラックの設計用減衰定数（近似直線に余裕を考慮した7%）は，設置許可段階（第560回審査会合，2018年3月29日他）からの変更はない。
- 基準地震動 $S_s$ に対する燃料ラックの減衰定数は，燃料ラックの応答加速度の増加に応じて低下傾向を示すものの，加振試験の外挿領域においても14%程度と考えられるため，燃料ラックの地震荷重をより実態に応じて評価することとし，設計用減衰定数を10%と設定した。

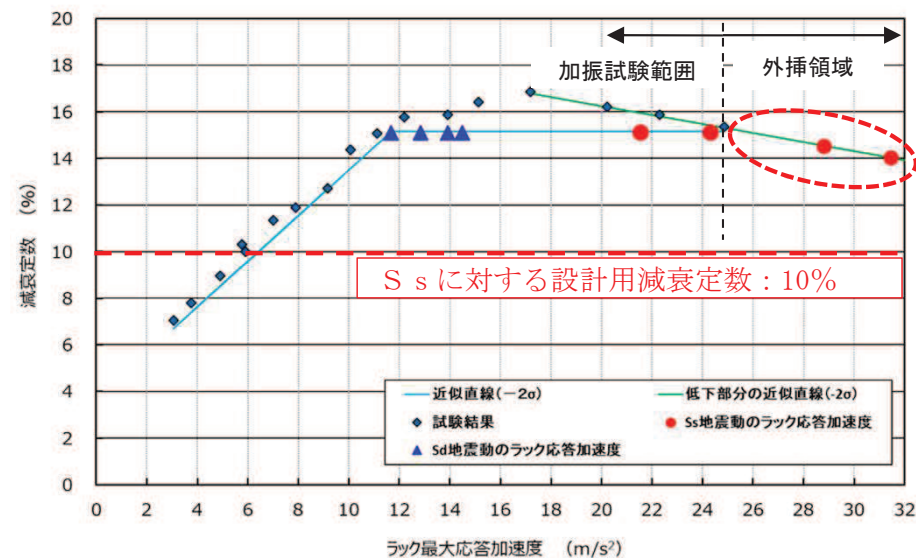
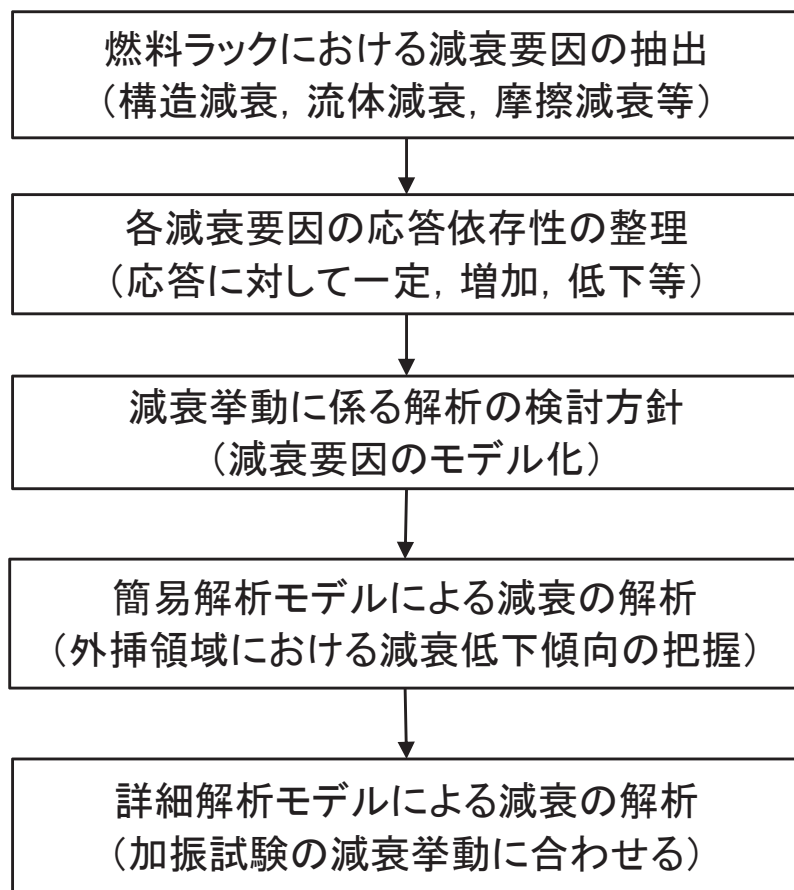


燃料ラックの最大応答加速度と減衰定数の関係

## 5. 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数設定の適用性

### 5.1 適用性に係る検討プロセス

- 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数10%の適用性については、燃料ラックの減衰に寄与する要因等を踏まえ、加振試験の減衰挙動に対する解析的な検討を実施した。
- 適用性の検討は、加振試験の外挿領域における燃料ラックの減衰定数が急激に低下するものでないこと及び減衰定数の程度感(10%を上回るレベル)を確認することを目的として、以下の検討プロセスに基づき実施した。

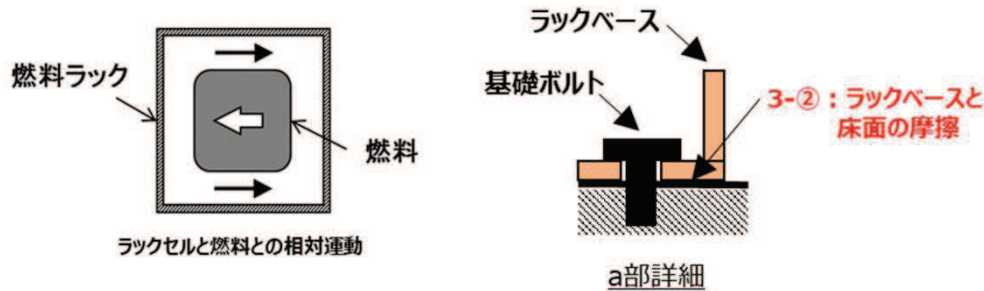


## 5.2 燃料ラックにおける減衰要因の抽出

➤ 燃料ラックの構造特徴を考慮し、地震時の燃料ラックの減衰に寄与する減衰要因を抽出した結果として、下記のとおり分類した。

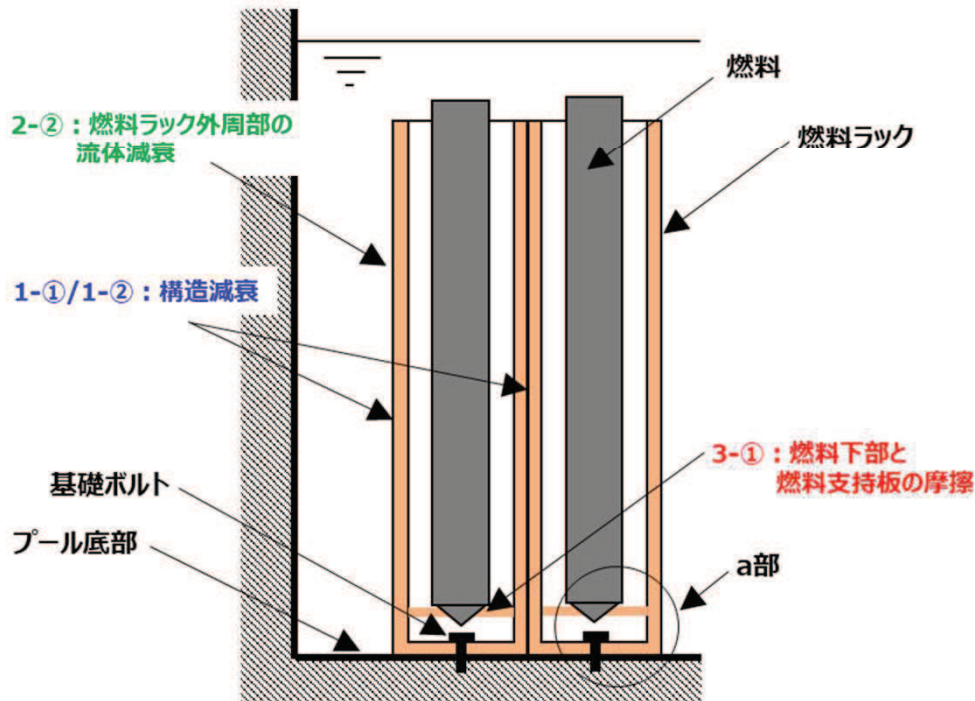
2-①：ラックセル内流動による流体減衰

4-①：燃料とラックセルとの衝突



2-②：燃料ラック外周部の流体減衰

1-①/1-②：構造減衰



要因	内容
1.構造減衰	① 材料自体の減衰(内部減衰)
	② 部材間(角管, 補強板)の摺動などによる減衰
2.流体減衰	① 燃料ラック内に貯蔵された燃料(セル内流動)の流体抵抗力による減衰
	② 燃料ラック外周部の流体抵抗力による減衰
3.摩擦減衰	① 燃料下部と燃料支持板の摩擦
	② ラックベースと床面の摩擦
4.衝突減衰	① 燃料とラックセルとの衝突

### 【流体-構造連成による応答低減効果の扱い】

- 流体-構造連成は、流体中の構造物において流体と構造物の相互作用を質量として考慮するもの。
- 加振試験及び詳細解析における燃料ラック(頂部)の応答倍率 $Q$ (加速度の入力 $\ddot{u}(t)$ と応答 $\dot{x}(t)$ の関係)は、下式の通り、刺激係数 $\beta\phi$ (質量マトリクス $[M]$ として考慮)及び1自由度系の応答倍率 $Q_1$ で表せる。

$$\text{燃料ラック(頂部)の応答倍率 } Q \left\{ \begin{array}{l} \dot{x}(t) \\ \ddot{u}(t)_{max} \end{array} \right\} = \beta\phi \left\{ \begin{array}{l} \dot{q}(t) \\ \ddot{u}(t)_{max} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{1自由度系の} \\ \text{応答倍率 } Q_1 \end{array} \right.$$

- また、減衰定数 $\zeta$ は、1自由度系の応答倍率 $Q_1$ との関係から下式で表せる。

$$\zeta = \frac{1}{2Q_1}$$

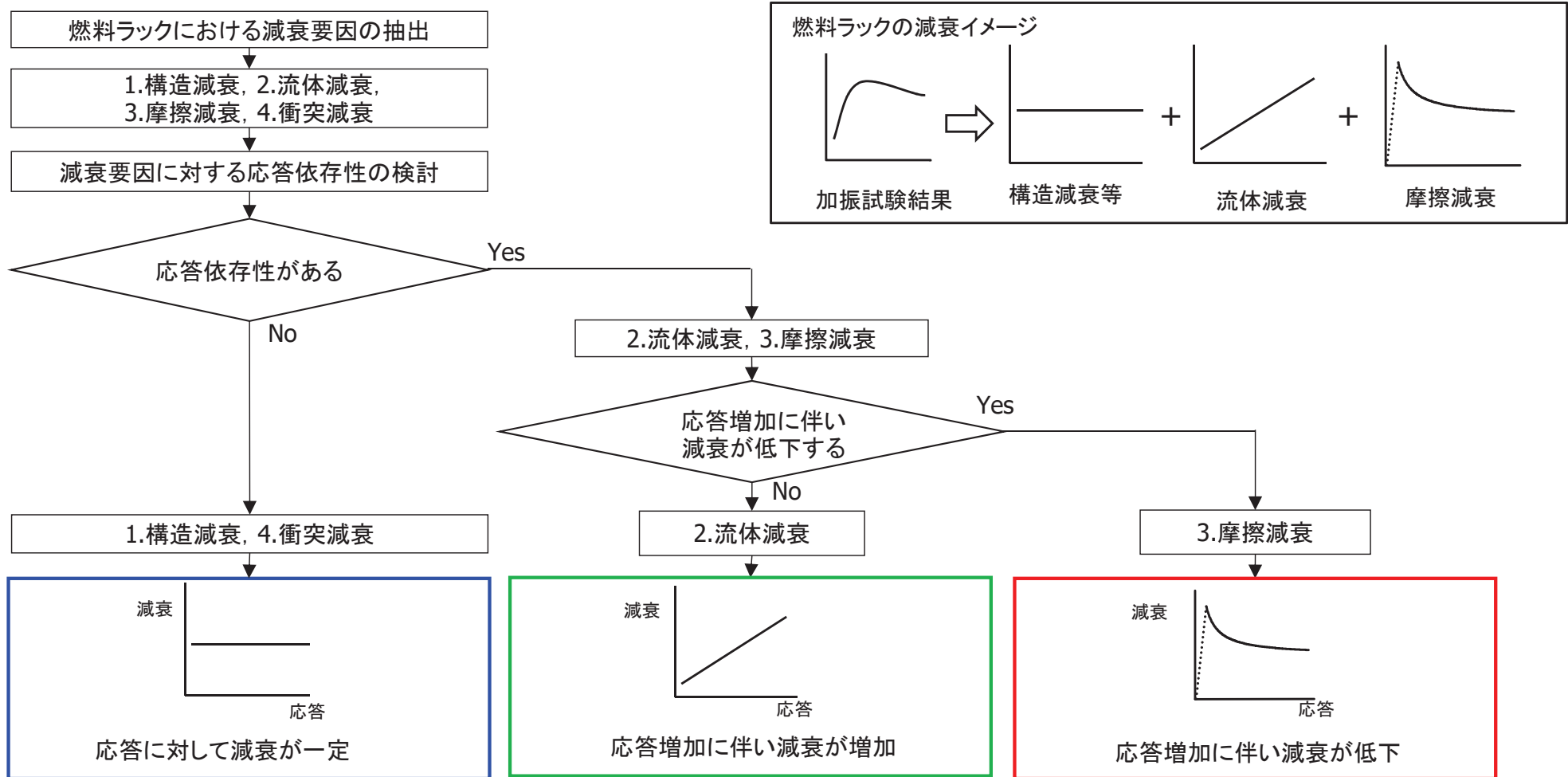
- したがって、流体-構造連成に関連する刺激関数 $\beta\phi$ と減衰定数 $\zeta$ (1自由度系の応答倍率 $Q_1$ に関連)は、各々独立した変数であるため、本検討では、流体-構造連成による応答低減効果を減衰として扱わない。

燃料ラックにおける減衰要因の抽出



## 5.3 各減衰要因の応答依存性の分類

- 燃料ラックにおける各減衰要因について、応答依存性の観点から分類した結果、加振試験範囲及び外挿領域における減衰定数の低下傾向は、摩擦減衰に起因することが分かる。【参考2】
- 加振試験で確認されている燃料ラックの減衰は、以下の減衰要因が重畳した挙動であると考えられる。



各減衰要因の応答依存性に係る分類フロー

## 5. 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数設定の適用性

### 5.4 燃料ラックの減衰挙動に係る解析の検討方針

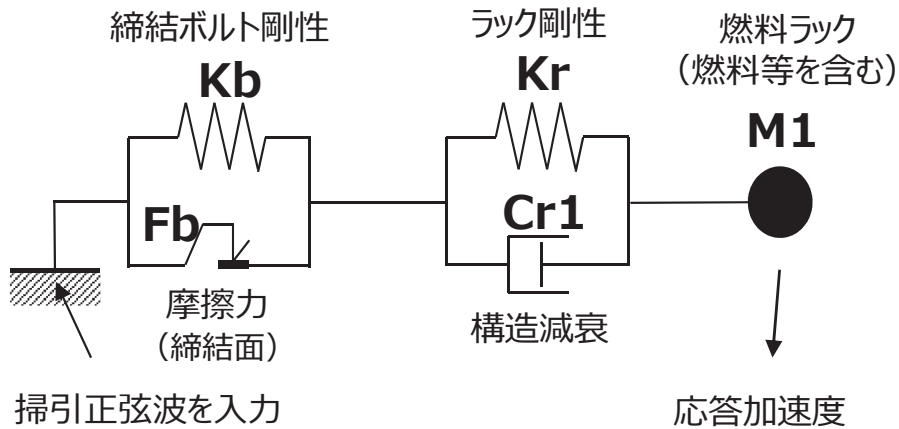
- 燃料ラックの加振試験条件及び加振試験結果等を考慮し、各減衰要因における減衰の程度を検討した。【参考2】
- 上記検討結果を踏まえ、燃料ラックの減衰挙動に係る解析の検討方針を以下のとおり設定した。
  - 加振試験の外挿領域における減衰低下傾向の把握することを目的とし、簡易解析モデル(1質点系解析モデル)による、構造減衰及び摩擦減衰を考慮した減衰の解析を行う。
  - 加振試験における減衰挙動を合わせることを目的とし、詳細解析モデル(多自由度系解析モデル)による、構造減衰、流体減衰及び摩擦減衰を考慮した減衰の解析を行う。

#### 燃料ラックの減衰要因等に係る整理

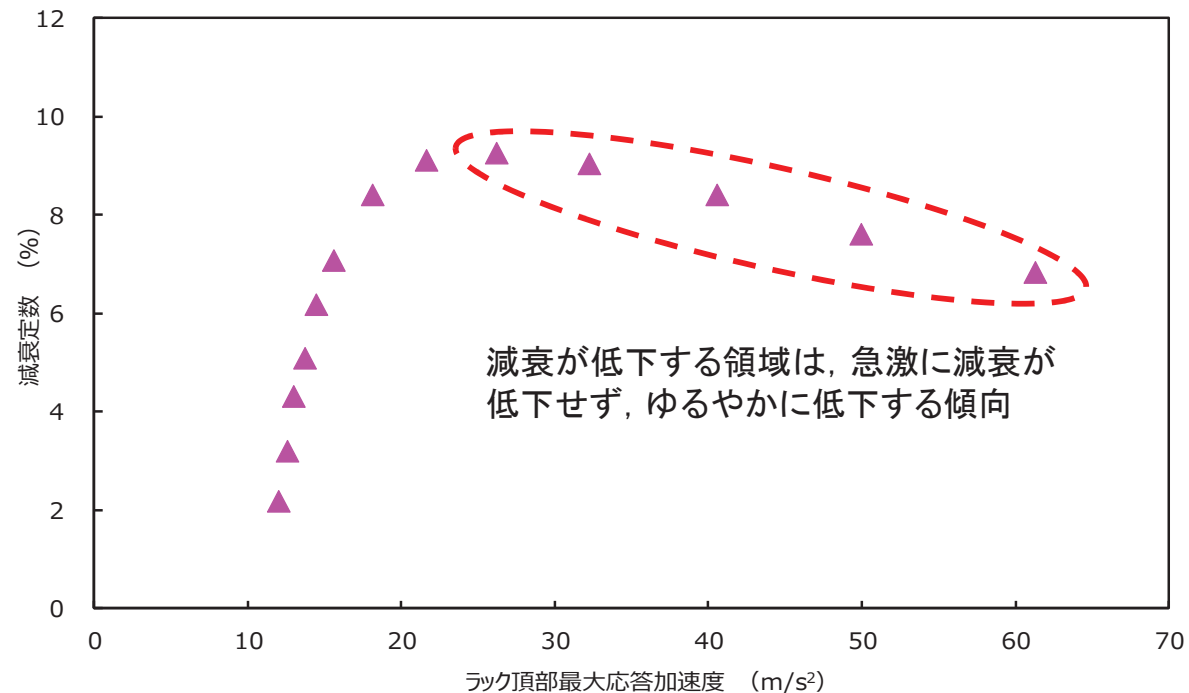
減衰要因	具体的要因	減衰の程度	簡易解析モデル	詳細解析モデル
1.構造減衰	①材料自体の減衰(内部減衰)	加振試験結果から燃料ラックの応答がゼロの場合の減衰は約4%と想定される。	○	○
	②部材間(角管, 補強板)の摺動などによる減衰			
2.流体減衰	①燃料ラック内に貯蔵された燃料(セル内流動)の流体抵抗力による減衰	燃料ラック内の狭い空間(セル内)における相對運動による流体減衰のため、応答が大きくなるに従い、減衰が増加すると考えられる。	-	○
	②燃料ラック外周部の流体抵抗力による減衰	燃料ラック外周の間隔が広いいため、流体減衰は小さいと考えられる。	-	-
3.摩擦減衰	①燃料下部と燃料支持板の摩擦	燃料の自重による押付け力(摩擦力)は、3-②の要因に対して小さく、燃料下部と燃料支持板の摩擦による減衰は小さいと考えられる。	-	-
	②ラックベースと床面の摩擦	ラックベースと床面の締結ボルト締付による押付け力(摩擦力)は、比較的大きいため、すべり始めるときの減衰は大きく、すべり発生後は応答に伴い低下すると考えられる。	○	○
4.衝突減衰	①燃料とラックセルとの衝突	加振試験では、試験体燃料とラックセルに接触痕はなく、試験映像でも衝突が確認されなかったことから、燃料とラックセルの衝突による減衰はなかったと考えられる。	-	-

## 5.5 簡易解析モデルによる減衰の解析

- 簡易解析モデル(1質点系解析モデル)は, 加振試験の外挿領域における減衰傾向を把握することを目的として, 燃料ラック及び燃料等を1質点とし, 燃料ラックの構造減衰及びラックベースと床面の摩擦減衰を考慮した。【参考3】
- 燃料ラックの減衰定数は, 簡易解析モデルに掃引正弦波(加速度一定)を入力して時刻歴応答解析を行い, 質点位置(燃料ラック)の応答加速度と入力加速度との関係から算出した。
- 簡易解析モデルによる解析結果は, 減衰が低下する領域において, 急激に減衰が低下することではなく, 燃料ラックの応答加速度が増加するに伴ってゆるやかに低下する傾向となることを確認した。



簡易解析モデル図

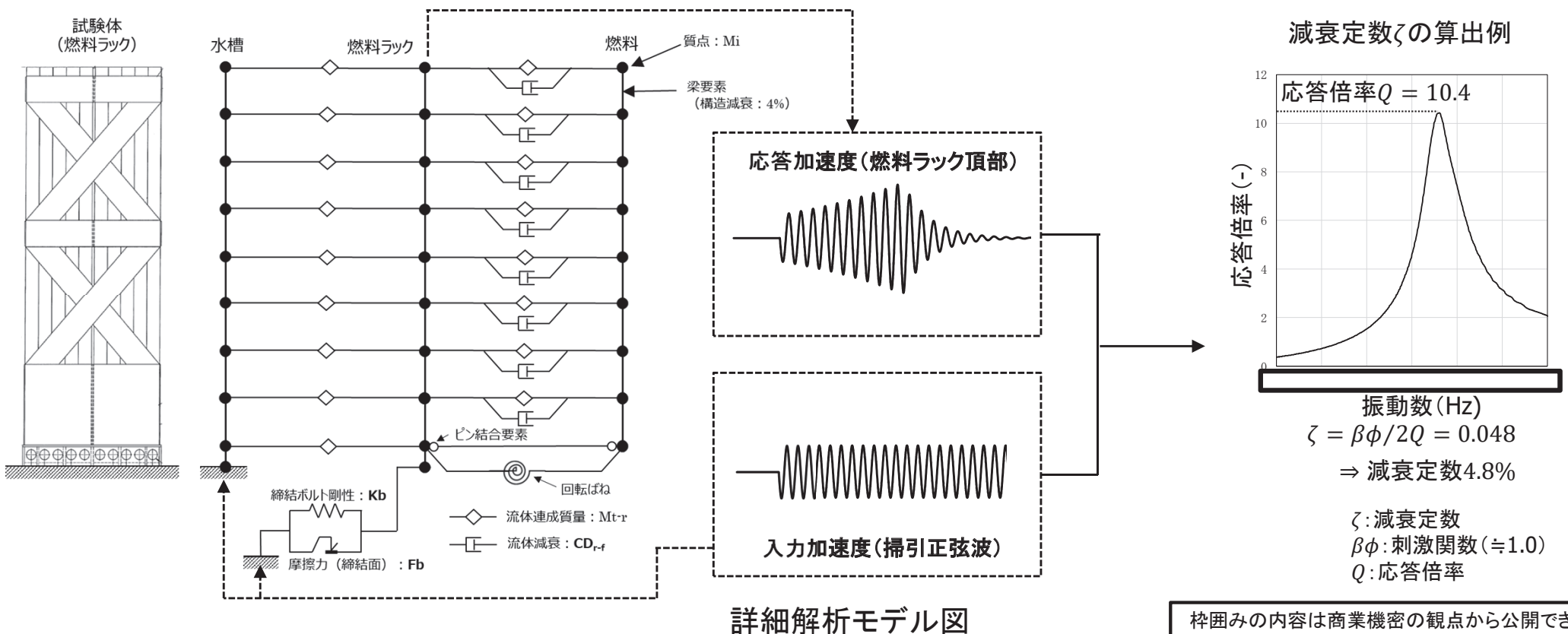


簡易解析モデルによる解析結果

## 5. 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数設定の適用性

### 5.6 詳細解析モデルによる減衰の解析(1) ～解析の概要～

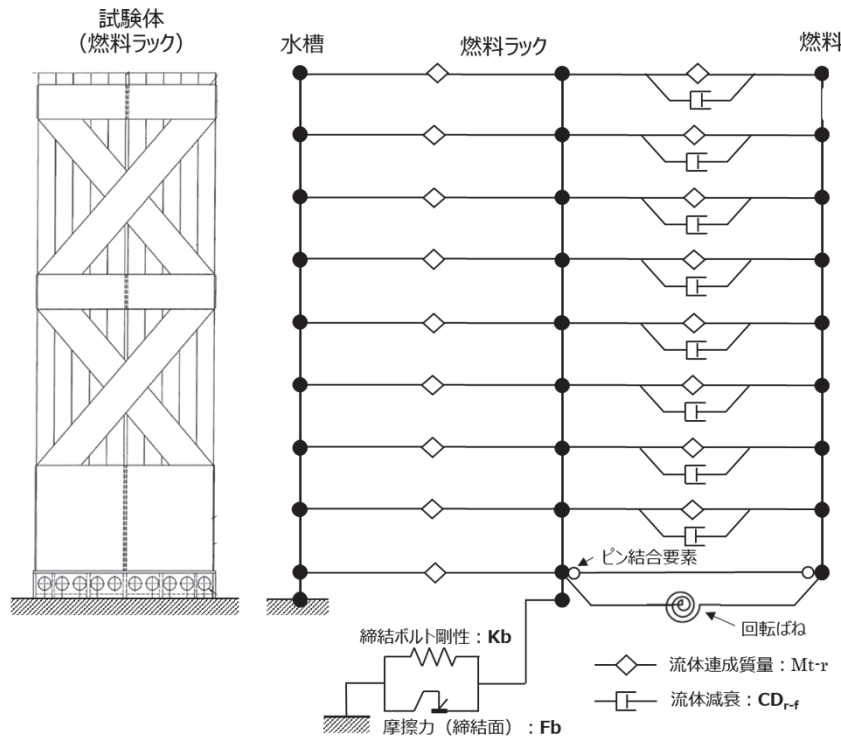
- 詳細解析モデル(多自由度系解析モデル)は、加振試験結果の減衰挙動に合わせることを目的として、燃料ラック及び燃料等を多質点でモデル化し、燃料ラックの減衰要因と考えられる各種の減衰メカニズムを取り込んで解析を実施した。【参考4】
- 燃料ラックの減衰定数は、詳細解析モデルに掃引正弦波(加速度一定)を入力して時刻歴応答解析を行い、燃料ラック頂部の応答加速度と入力加速度との関係等から算出した。
- 減衰の解析にあたっては、加振試験結果から得られた減衰定数に合わせてるように、燃料ラック締結面の摩擦特性及び締結ボルトの剛性を詳細にモデル化した。【参考5】



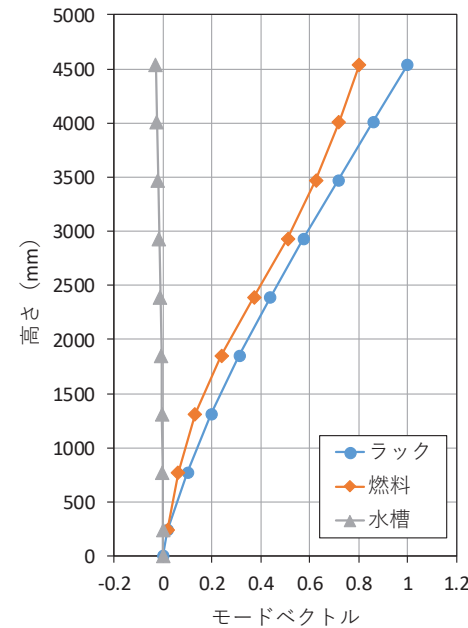
## 5. 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数設定の適用性

### 5.6 詳細解析モデルによる減衰の解析(2) ～加振試験の振動モードとの比較～

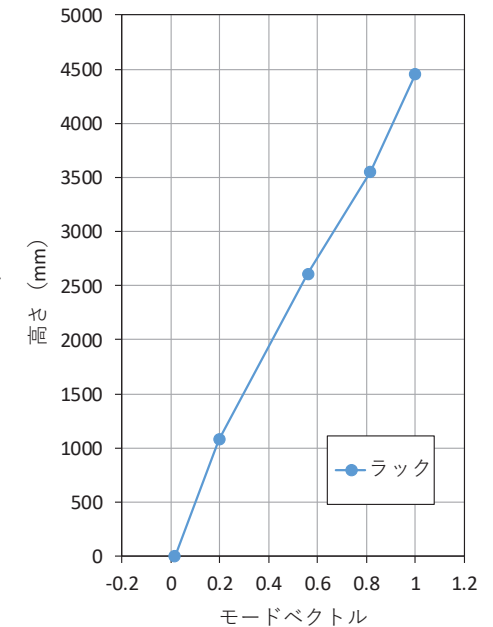
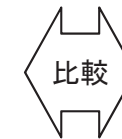
- 詳細解析モデルによる応答解析の適用性の観点から、詳細解析結果から得られた燃料ラックの振動モード及び固有振動数について、加振試験結果と比較した。
- 詳細解析結果における燃料ラックの振動モード及び固有振動数は、加振試験結果と概ね一致しており、詳細解析モデルによる応答解析は、加振試験の振動挙動を表現できていると考えられる。



詳細解析モデル図



詳細解析結果  
(固有振動数  Hz)



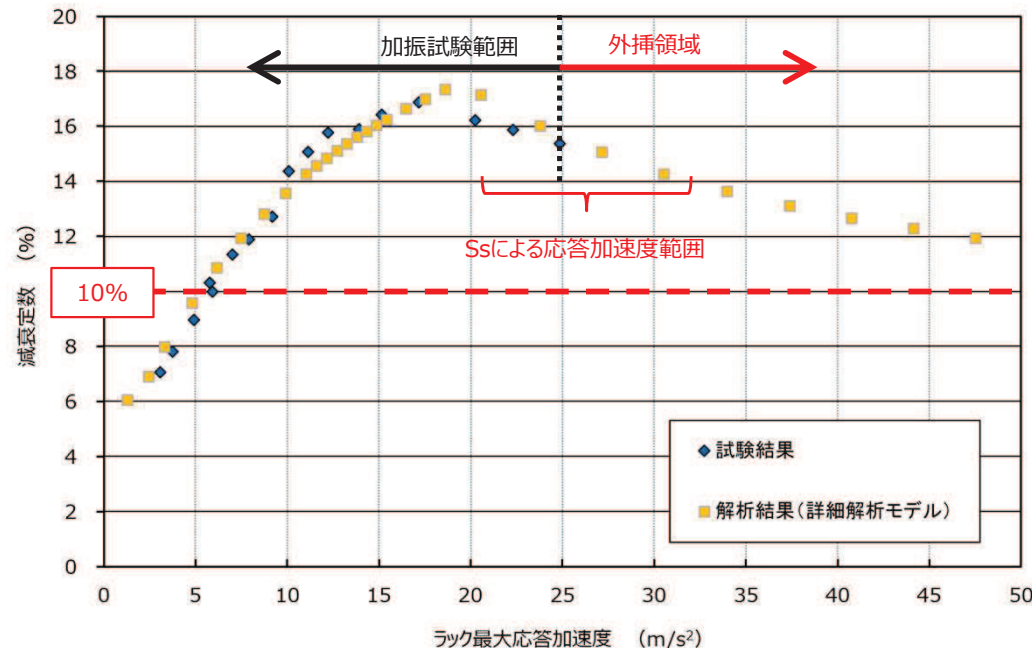
加振試験結果  
(固有振動数  Hz)

燃料ラックの振動モード比較

## 5. 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数設定の適用性

### 5.6 詳細解析モデルによる減衰の解析(3) ～加振試験結果との比較～

- 詳細解析モデルによる解析結果と加振試験結果で得られた減衰定数を下図に示す。ここで、解析結果は加振試験結果と合わせるように横軸方向の小さい側にシフト(3m/s<sup>2</sup>)させている。
- 詳細解析モデルによる減衰定数の解析結果は、加振試験結果で得られた減衰定数と全体的な傾向は概ね一致しており、外挿領域についても、急激に減衰が低下することはなく、燃料ラックの応答加速度が増加するに伴ってゆるやかに低下する傾向となることを確認した。
- 詳細解析モデルによる解析結果は、簡易解析モデルによる解析結果と同様に、減衰がゆるやかに低下傾向を示すものである。
- 外挿領域における燃料ラックの減衰定数は、基準地震動S<sub>s</sub>による応答加速度範囲においても、10%を十分に上回る結果となっている。

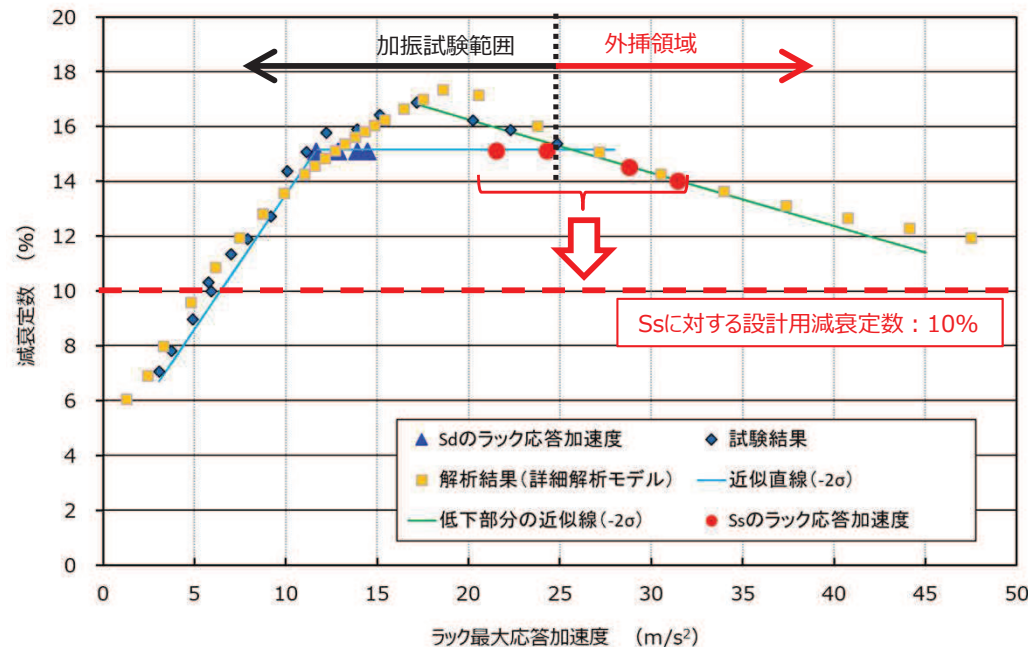


詳細解析モデルによる減衰定数の解析結果

## 5. 加振試験の外挿領域における設計用減衰定数設定の適用性

### 5.7 解析結果を踏まえた設計用減衰定数の設定

- 詳細解析モデルによる解析結果が加振試験結果で得られた減衰定数の全体的な傾向を概ね表現できていることを踏まえると、加振試験結果から設定した外挿領域における加振試験結果の近似直線は、燃料ラックの減衰傾向を示しており、基準地震動 $S_s$ の応答加速度に対する減衰定数は約14~15%の範囲になると考えられる。
- また、燃料ラックの減衰要因等に係る検討結果(5.2, 5.3項)から、他に燃料ラックの応答増加に伴う減衰の急激な低下要因がないことを確認している。
- したがって、加振試験の外挿領域における燃料ラックの設計用減衰定数は、余裕を考慮して10%と設定することは可能である。



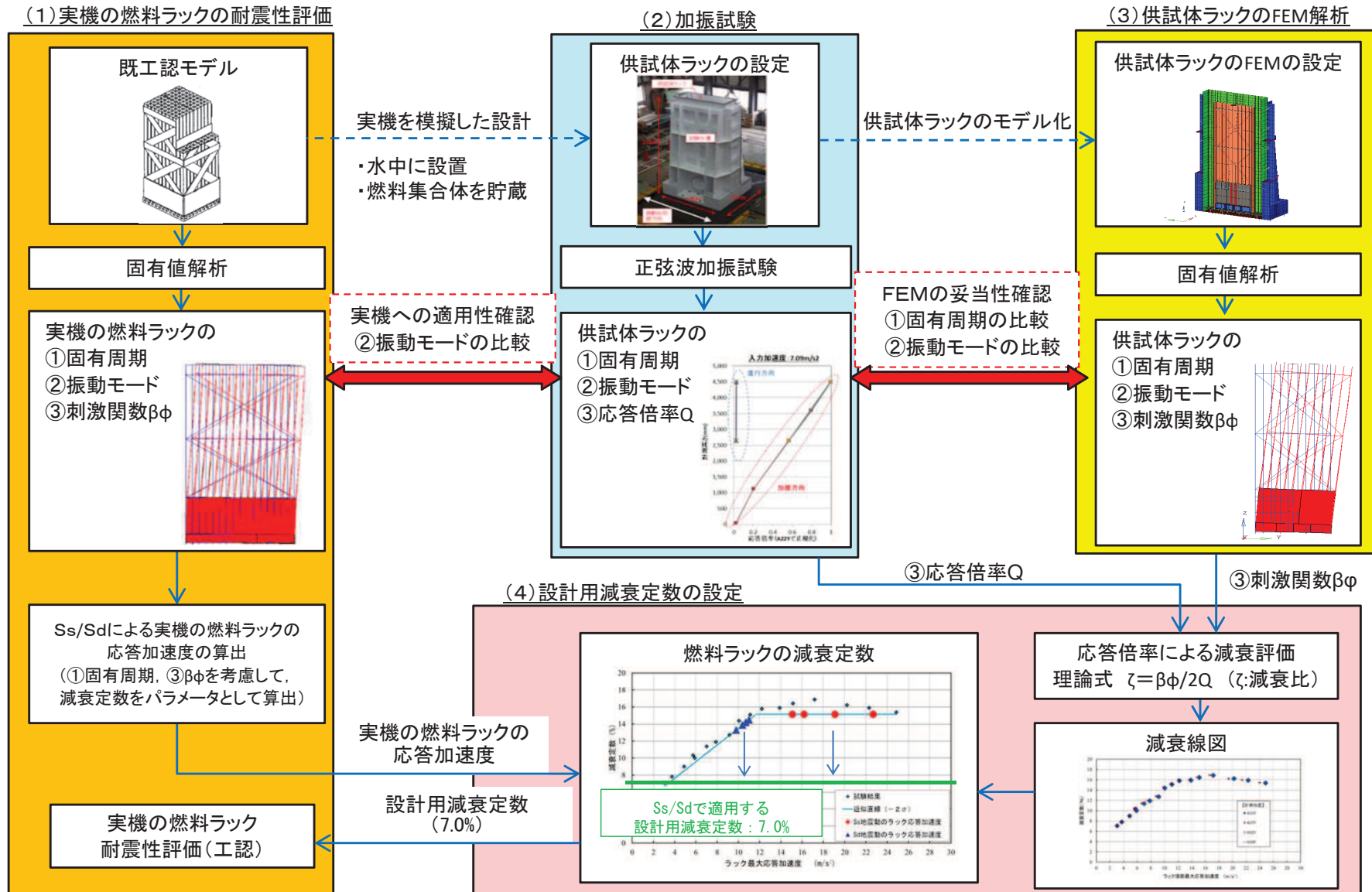
燃料ラックの設計用減衰定数の設定

## 6. まとめ

- 女川2号機の今回工認における燃料ラックの耐震設計に適用する水平方向の設計用減衰定数について、加振試験結果を踏まえて設定するにあたり、基準地震動 $S_s$ による燃料ラックの応答加速度の一部が加振試験範囲を超えるため、外挿領域における設計用減衰定数の適用性の検討として、燃料ラックの減衰要因等を考慮した解析を実施した。
- 解析結果は加振試験から得られた減衰定数と同様、燃料ラックの応答加速度の増加に伴って減衰定数が増加した後、次第に低下する傾向を表現できており、他に燃料ラックの応答増加に伴う減衰の急激な低下要因がないことから、外挿領域における減衰は急激に低下することなく、基準地震動 $S_s$ の応答加速度範囲においても10%を十分に上回る減衰となることを確認した。
- 上記検討結果を踏まえ、女川2号機の燃料ラックの耐震設計に適用する水平方向の設計用減衰定数については、燃料ラックの地震荷重をより実態に応じて評価するため、基準地震動 $S_s$ の応答加速度に対して設置許可段階の7%から変更して10%と設定した。



➤ 女川2号機の燃料ラックの実物大加振試験を実施し、耐震評価に適用する設計用減衰定数を設定した。

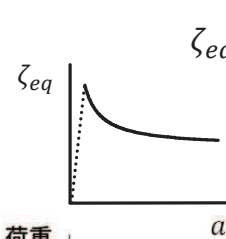
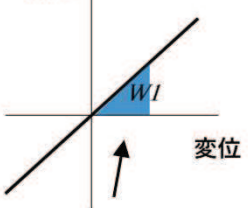
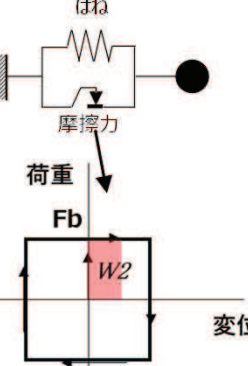
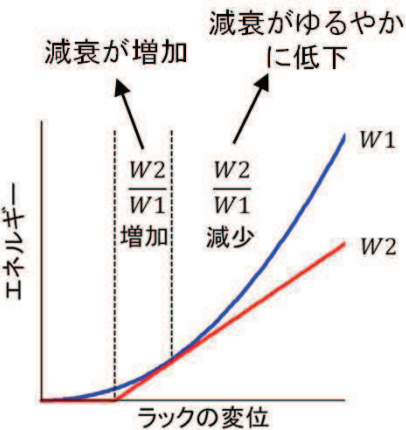


➤ 地震時の燃料ラックの減衰に寄与する減衰要因に対して、応答依存性及び減衰の程度を下表のとおり整理した。

燃料ラックの減衰要因と応答依存性(1/3)

要因	内容	応答依存性	減衰の程度
1.構造減衰	①材料自体の減衰(内部減衰)	材料に起因するため応答依存性なし	<p>加振試験結果から燃料ラック応答が振幅ゼロの場合の減衰は約4%と想定される。</p>
	②部材間(角管, 補強板)の摺動などによる減衰	<p>構造体の振動エネルギー(変位の2乗に比例)と構造に起因する減衰力による消費エネルギー(変位の2乗に比例)はともに応答に応じて大きくなるため、等価減衰定数<math>\zeta_{eq}</math>は変位によらず一定となり応答依存性はない。<sup>*1</sup></p> <p style="text-align: center;"><math>a</math>      <math>a</math> : 変位</p>	
2.流体減衰	①燃料ラック内に貯蔵された燃料(セル内流動)の流体抵抗力による減衰	<p>構造体の振動エネルギー(変位の2乗に比例)に対する流体減衰に起因する減衰力による消費エネルギー(変位の3乗に比例)の関係から、等価減衰定数<math>\zeta_{eq}</math>は変位に比例して増加する。<sup>*1</sup></p> $\zeta_{eq} = \frac{4C}{3\pi M} a$ <p style="text-align: center;"><math>a</math></p> <p><math>C</math> : 流体減衰の減衰係数 <math>M</math> : 質量 <math>a</math> : 変位</p>	<p>燃料ラック内の狭い空間(セル内)における相対運動による流体減衰のため、応答が大きくなるに伴い、減衰が増加すると考えられる。</p> <p>燃料ラック外周と壁との間隔が広いいため、流体減衰は小さいと考えられる。</p>
	②燃料ラック外周部の流体抵抗力による減衰		

燃料ラックの減衰要因と応答依存性(2/3)

要因	内容	応答依存性	減衰の程度
3.摩擦減衰	①燃料下部と燃料支持板の摩擦	<p>構造体の振動エネルギー(変位の2乗に比例)に対する摩擦減衰に起因する減衰力による消費エネルギー(変位の1乗に比例)の関係から, 等価減衰定数<math>\zeta_{eq}</math>は変位に反比例して低下する。</p> <p>ただし, 摩擦力<math>F</math>に対して, 静止状態からすべり始めるときの減衰は大きく, すべり発生後は応答に反比例の傾向でゆるやかに低下する。<sup>*2</sup></p> <p>(すべり発生後の等価減衰定数<math>\zeta_{eq}</math>は変位<math>a</math>に反比例で減少)</p>	<p>3-②(ラックベースと床面の摩擦)の締結ボルト締付並びに燃料ラック及び燃料の自重による押付け力(<math>9.6 \times 10^5[N]^*4</math>)に対して, 試験燃料(30体)の自重(<math>7.6 \times 10^4[N]^*5</math>)による押付け力は1/10以下であることから, 燃料下部と燃料支持板の摩擦による減衰は小さいと考えられる。</p>
	②ラックベースと床面の摩擦	$\zeta_{eq} = \frac{2F}{\pi K a}$  <p>荷重</p>  <p>変位</p>  <p>ばね 摩擦力 荷重 <math>F_b</math> 変位</p>  <p>エネルギー</p> <p>ラックの変位</p> <p>減衰が増加 減衰がゆるやかに低下</p> <p><math>\frac{W2}{W1}</math> 増加 <math>\frac{W2}{W1}</math> 減少</p> <p><math>W1</math> <math>W2</math></p> <p><math>W1</math> : 振動エネルギー <math>W2</math> : 消費エネルギー</p>	<p>ラックベースと床面の締結ボルト締付および燃料ラック/燃料の自重による押付け力(摩擦力)は, <math>9.6 \times 10^5[N]^*4</math>と大きいため, すべり始めるときの減衰は大きく, すべり発生後は応答に反比例して低下すると考えられる。</p>

## 燃料ラックの減衰要因と応答依存性(3/3)

要因	内容	応答依存性	減衰の程度
4.衝突減衰	①燃料とラックセルとの衝突	<p>衝突による減衰比hは、反発係数eとの関係として下式で表せる。反発係数eは、一般的に衝突部の形状や材質で決まるため、衝突減衰に応答依存性はない。<sup>*3</sup></p> $h = \frac{\{\ln(1/e)\}^2}{\sqrt{\pi^2 + \{\ln(1/e)\}^2}}$	<p>加振試験では、試験体燃料とラックセルに接触痕は確認されず、試験状況映像でも衝突が確認されなかったことから、今回の試験範囲では燃料とラックセルの衝突による減衰はなかったと考えられる。</p>

注記\*1: 参考文献「振動工学 解析から設計まで」森北出版

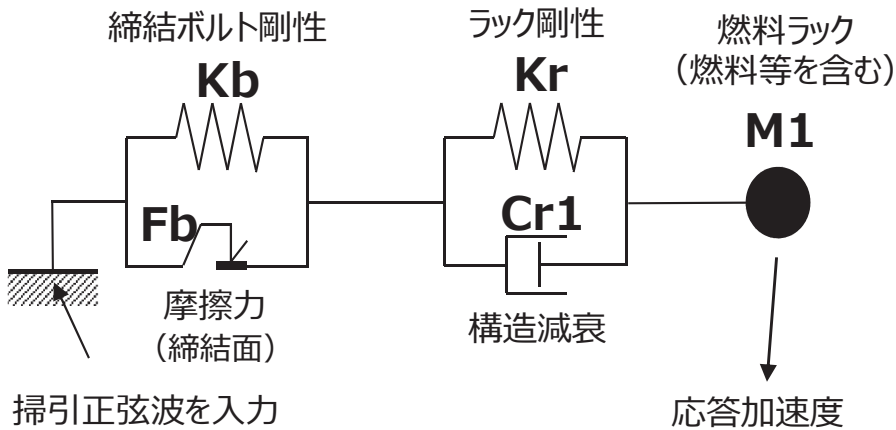
\*2: 参考文献「ダイナミクスハンドブック(普及版)—運動・振動・制御—」朝倉書店

\*3: 参考文献「平成 19 年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 動的上下動耐震試験(クレーン類)に関わる報告書 (08 耐部報-0021, (独)原子力安全基盤機構)

\*4: (試験燃料ラック質量+模擬燃料質量×30体)×浮力×重力加速度+(締結ボルト締付トルク÷呼び径÷トルク係数)×ボルト12本 = 9.6×10<sup>5</sup> [N]

\*5: (燃料質量×30体)×浮力×重力加速度= 7.6×10<sup>4</sup> [N]

➤ 簡易解析モデル(1質点系解析モデル)図及び諸元を示す。



簡易解析モデル図

簡易解析モデルの諸元

記号	解析諸元	入力値	根拠
M1	燃料ラック質量 (燃料等を含む)		構造質量と理論式に基づく付加質量を燃料ラックの1次モード形状に対する1質点系の等価質量として設定
Kb	締結ボルト剛性		理論式から求まる剛性に対して試験結果(固有振動数)を考慮して設定
Kr	ラック剛性		理論式から求まる剛性に対して試験結果(固有振動数)を考慮して設定
Cr1	燃料ラックの構造減衰		試験結果(0体貯蔵)から減衰2%と設定
Fb	ボルト締結面摩擦		燃料ラックのボルト締付力と試験結果(減衰の傾向)から設定

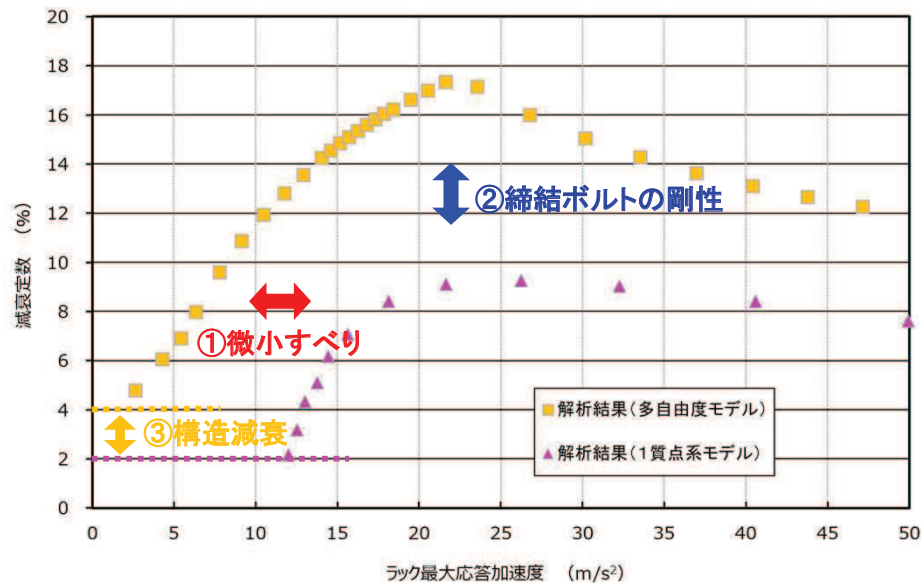
➤ 詳細解析モデル(多自由度系解析モデル)の諸元を示す。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

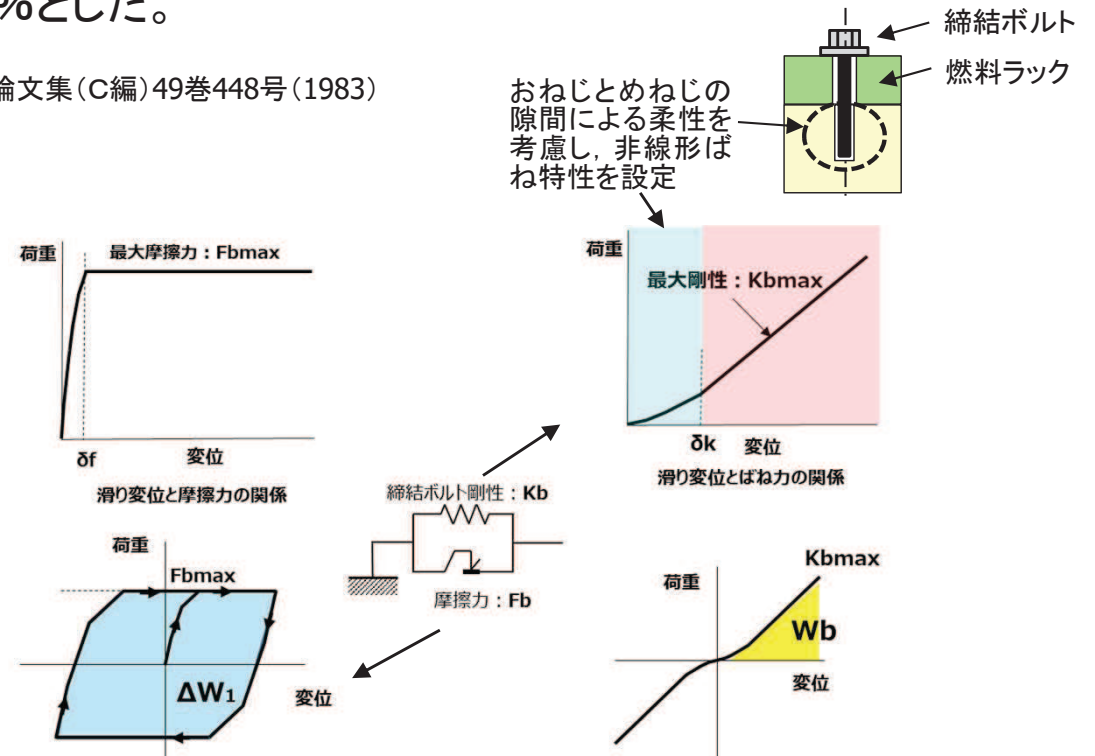
記号	解析条件	モデル入力値	根拠
$M_r$	燃料ラック質量		構造質量と理論式に基づく流体付加質量を燃料ラックの各質点に均等に設定
$M_f$	燃料質量		構造質量と理論式に基づく流体付加質量を燃料の各質点に均等に設定
$M_t$	水槽質量		構造質量と理論式に基づく流体付加質量を水槽の各質点に均等に設定
$M_{r-f}$	燃料ラック-燃料間 連成質量		理論式に基づく流体付加質量を各質点に均等に設定
$M_{t-r}$	水槽-燃料ラック間 連成質量		理論式に基づく流体付加質量を各質点に均等に設定
$Kb_{max}$	締結ボルト剛性		試験結果(燃料ラック固有振動数)を考慮して設定
$EI_r$	ラック剛性 (曲げ剛性)		試験結果(燃料ラック固有振動数)を考慮して設定
$EI_f$	燃料の剛性 (曲げ剛性)		燃料チャンネルボックスの断面形状寸法より設定
$EI_t$	水槽の剛性 (曲げ剛性)		試験結果(水槽固有振動数)を考慮して設定
$K_\theta$	燃料ラック-燃料間の 回転ばね		燃料の転倒方向の剛体モードに対し、下端回転剛性を燃料の高次モードに影響のない範囲で設定
$Cr$	燃料ラックの構造減衰 (1次モード減衰定数)		試験結果(30体貯蔵)から減衰4%と設定
$Fb_{max}$	ボルト締結面摩擦力		燃料ラックのボルト締付力と試験結果を考慮して設定
$CD_{r-f}$	燃料ラック-燃料間 流体減衰 (2乗比例減衰係数)		燃料ラックセル内の流動抵抗を抗力係数: $Cd=2$ として設定
$\delta f$	摩擦力の振幅依存性を 定義する最大変位		摩擦力 $Fb_{max}$ 以下で先行的に微小な予すべりが発生すると仮定し、これを模擬するための摩擦力の低下領域として試験結果を考慮して設定
$\delta k$	締結ボルトばね剛性の 振幅依存性を 定義する最大変位		締結ボルトのおねじとめねじの隙間により剛性が低下すると仮定し、締結ボルトの剛性が低下する領域として試験結果を考慮して設定

- 詳細解析では、燃料ラック及び燃料等を多質点(流体-構造連成質量含む)でモデル化し、加振試験結果から得られた減衰定数に合うように、燃料ラック締結面の摩擦特性及び締結ボルトの剛性をモデルした。
- 加振試験の外挿領域における減衰傾向を把握することを目的とした簡易解析モデル(1質点系解析モデル)に対して、以下のとおり、燃料ラックの減衰挙動をより加振試験結果に合わせることができる。
  - ① 燃料ラック締結面の摩擦特性として低振幅領域における微小すべり\*を考慮することで摩擦減衰の立上りを改善した。
  - ② 燃料ラックの締結ボルトの水平方向剛性として締結ボルトの隙間(おねじとめねじの関係)による柔軟性を考慮し、低振幅領域に非線形ばね特性を考慮することで摩擦減衰を全体的に改善した。
  - ③ 構造減衰の設定は、加振試験結果を踏まえて4%とした。

注記\* : 参考文献「接合面を有する系の減衰振動の解析」, 新野ら, 日本機械学会論文集(C編)49巻448号(1983)



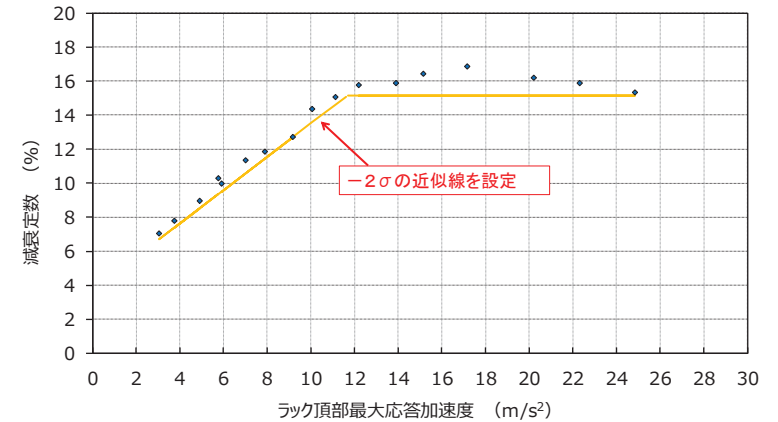
詳細解析モデル及び簡易解析モデルによる解析結果の比較



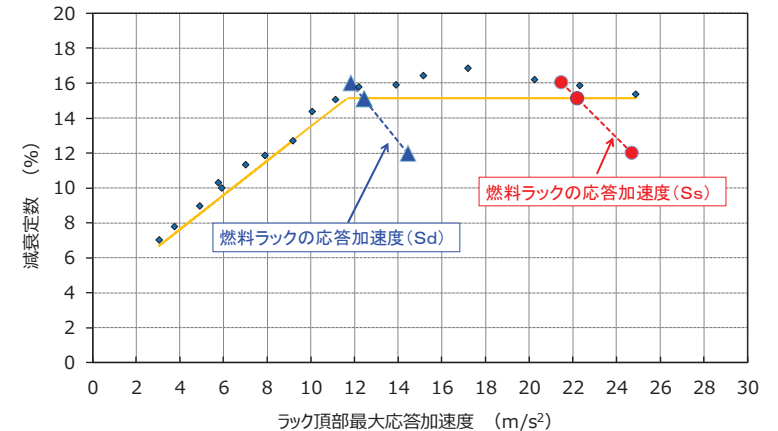
①燃料ラック締結面の摩擦特性

②締結ボルトの非線形ばね特性

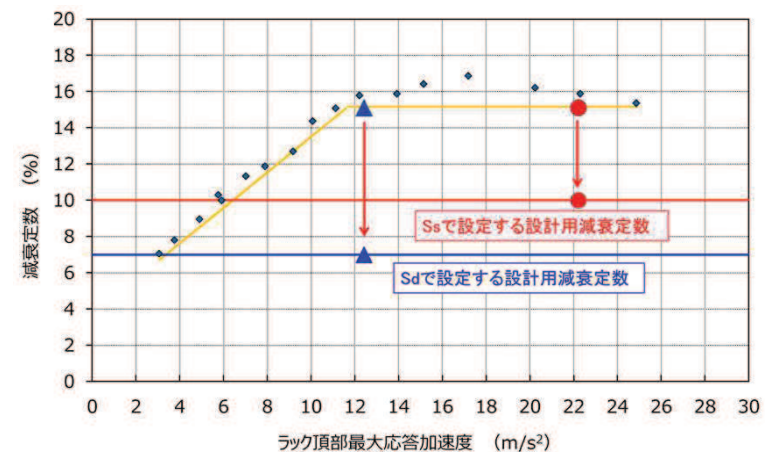
① 加振試験結果のばらつきを考慮し、試験データに対して余裕(95%信頼区間:  $-2\sigma$ )を持たせた近似直線(黄色線)を設定する。右図の設定例は、減衰が増加する領域及び一定となると想定した領域に設定したもの。



② 減衰定数を変数として、評価用地震動( $S_d$ ,  $S_s$ )に対する燃料ラックの最大応答加速度を算定し、それぞれ図示する(青三角の点, 赤丸の点)。これらの点を結んだ直線(青点線, 赤点線)と、①で設定した近似直線(黄色線)との交点が評価用地震動に対する燃料ラックの減衰定数となる。



③ ②で確認した減衰定数に対し、耐震評価における簡便性と余裕を考慮して、燃料ラックの設計用減衰定数を設定する。右図の設定例は、 $S_d$ を7%,  $S_s$ を10%と設定したもの。





## 【参考7】 各減衰要因の減衰定数への寄与

- 詳細解析モデルによる減衰定数の解析結果は、燃料ラックの減衰要因として抽出・分類した構造減衰、流体減衰及び摩擦減衰を考慮したものである。(5.4項参照)
- 燃料ラックの減衰定数における各減衰要因の寄与程度について、以下のとおり、確認した。

各減衰要因の減衰定数への寄与程度

減衰要因	減衰の寄与程度	減衰の寄与程度の確認方法	備考
1.構造減衰	4%	応答によらず一律の設定	—
2.流体減衰	0～0.2%程度	解析モデルにおいて、流体減衰を無効にした詳細解析結果との差異	燃料ラックの振動エネルギーに対して、流体密度とラックセル内でのラックと燃料の相対挙動による流速で定まる流体減衰力は小さいため、減衰効果が小さいものと考えられる
3.摩擦減衰	0～12%程度	詳細解析結果から減衰要因の1.及び2.を除いたもの	—