

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

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-他-F-19-0030_改1
提出年月日	2021年 6月 18日

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6月18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 燃料ラックの設計用減衰定数の設定手順例

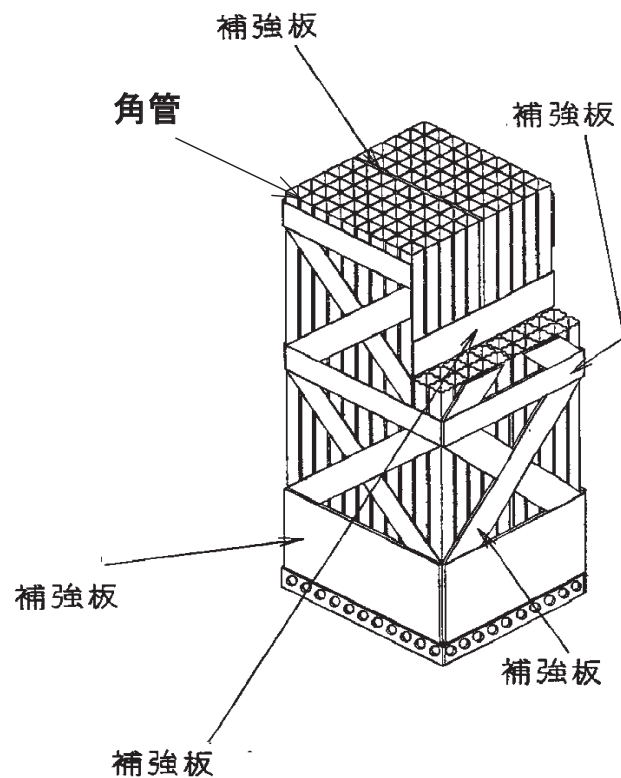
1. はじめに

- 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(平成25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。
- 燃料ラックの耐震評価にあたっては、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を踏まえ、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。

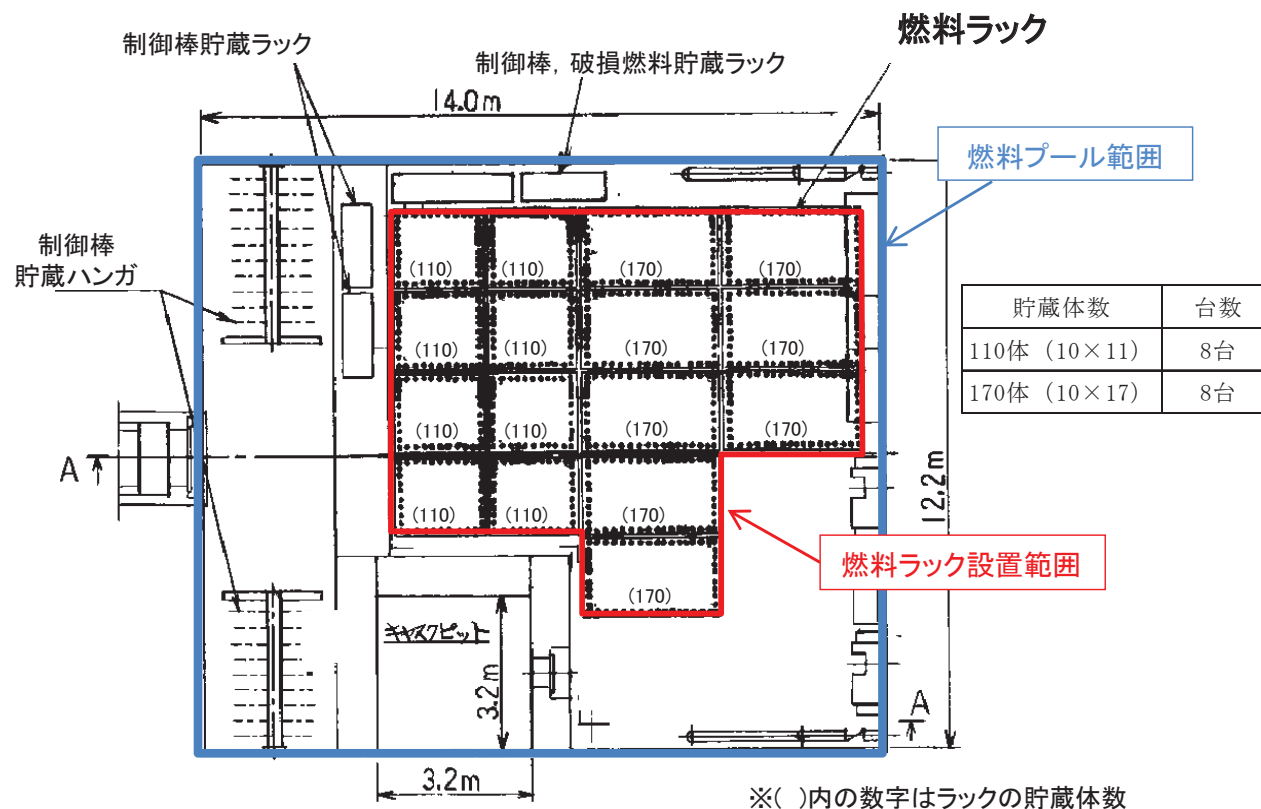
	設置許可段階	工認段階
設計用減衰定数の設定方法	加振試験	加振試験 (外挿領域は解析的に検討)
燃料ラックの応答加速度と加振試験の関係	全て加振試験の 応答加速度範囲内	一部は加振試験の 応答加速度範囲を超える
水平方向の設計用減衰定数 (基準地震動 S_s)	7%	10%

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、ラックとの衝突、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

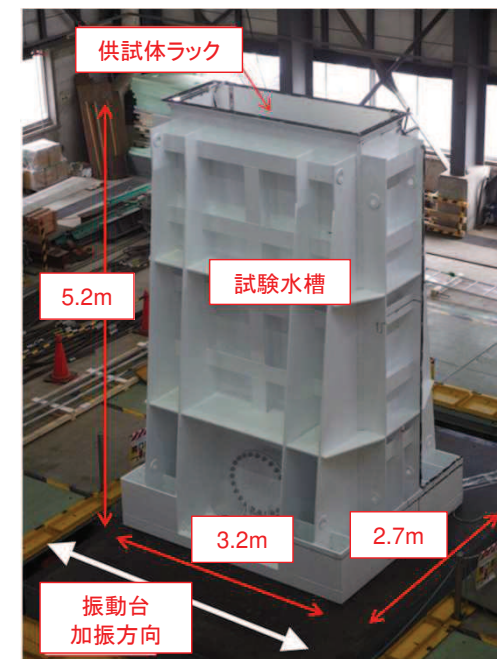
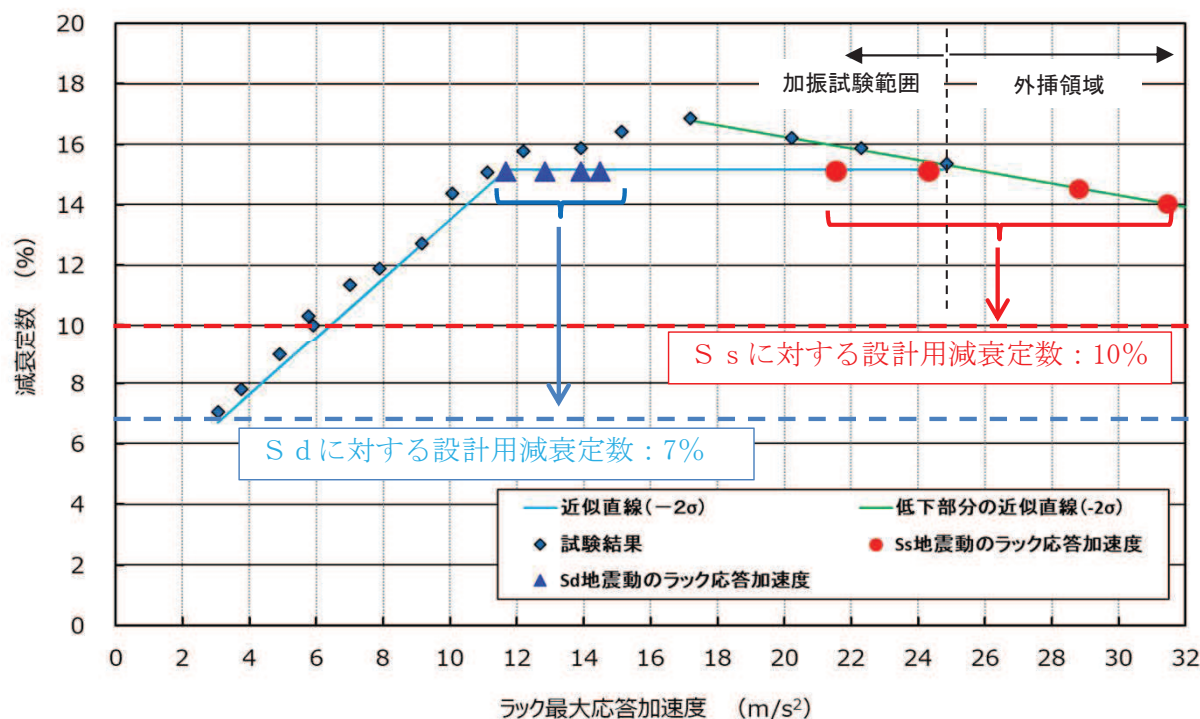


図 実物大加振試験

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

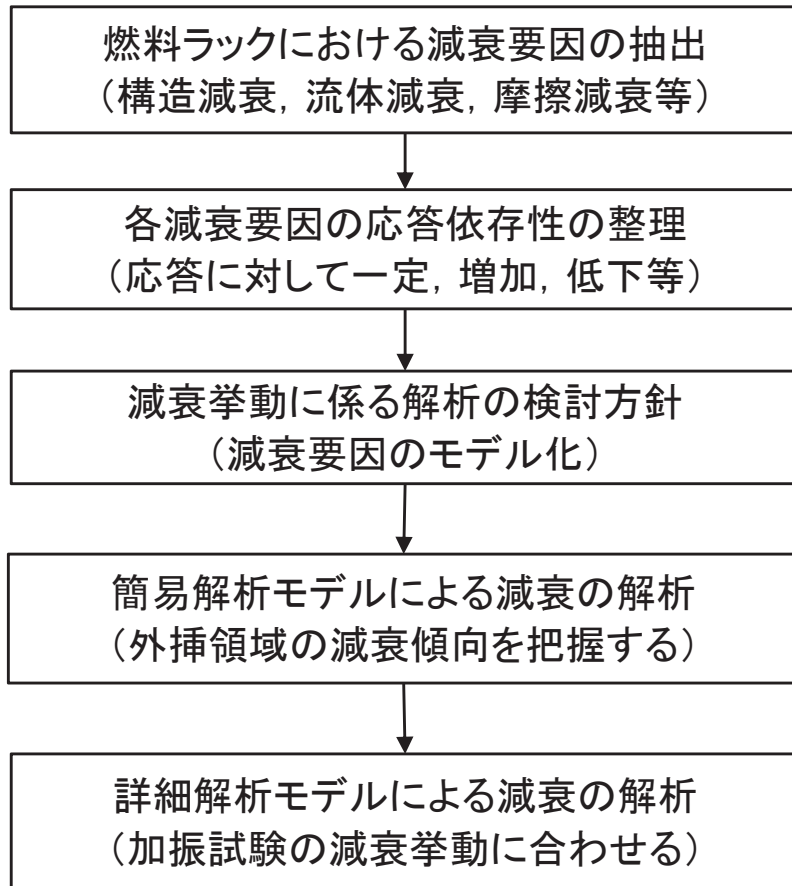
- 加振試験の結果，燃料ラックの減衰定数は応答依存性があり，燃料ラックの応答加速度の増加に伴って増加（最大で約17%）した後，次第に低下する傾向が確認されたことを考慮し，下図の通り，燃料ラックの減衰挙動を近似直線で設定した。
- 弾性設計用地震動 S_d に対する燃料ラックの設計用減衰定数（近似直線に余裕を考慮した7%）は，設置許可段階（第560回審査会合，2018年3月29日他）から変更なし。
- 基準地震動 S_s に対する燃料ラックの減衰定数は，燃料ラックの応答加速度の増加に応じて低下傾向を示すものの，加振試験の外挿領域においても14%程度と考えられるため，設置許可段階から応答加速度が大きくなったことも踏まえ，設計用減衰定数を10%と設定した。



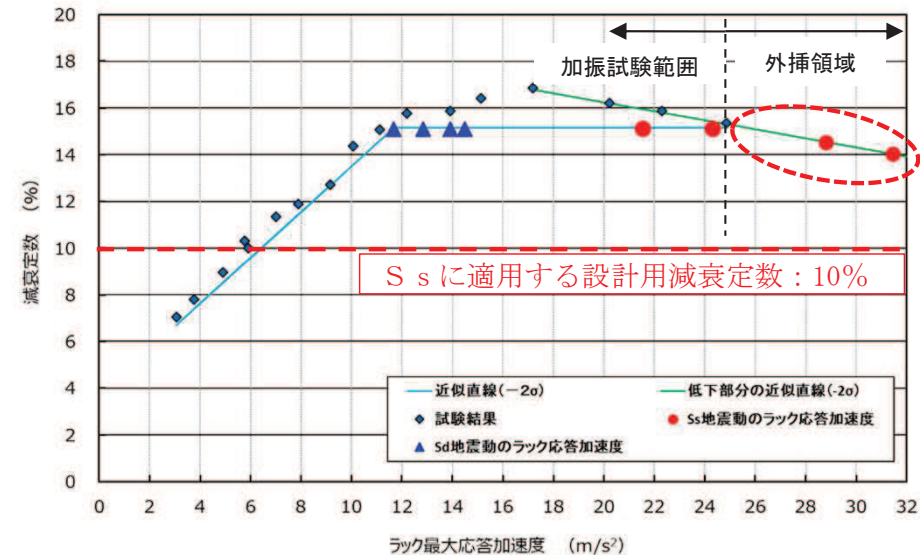
燃料ラックの最大応答加速度と減衰定数の関係

5.1 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、加振試験に対する解析的な検討を実施した。
- 適用性の検討にあたっては、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)を確認した。



適用性に係る検討プロセス

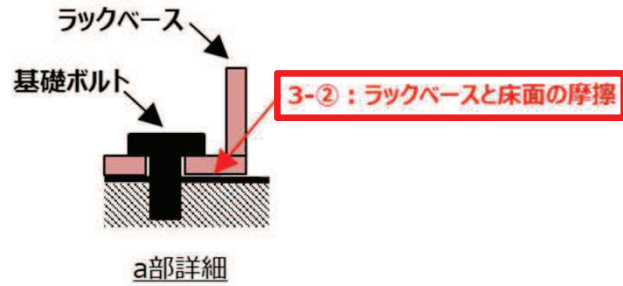
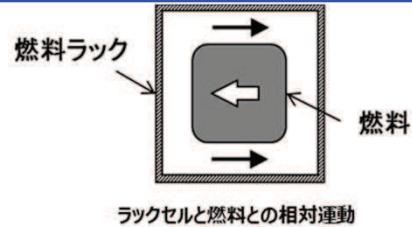


5.2 燃料ラックにおける減衰要因の抽出

➤ 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、下記のとおり分類できることを確認した。

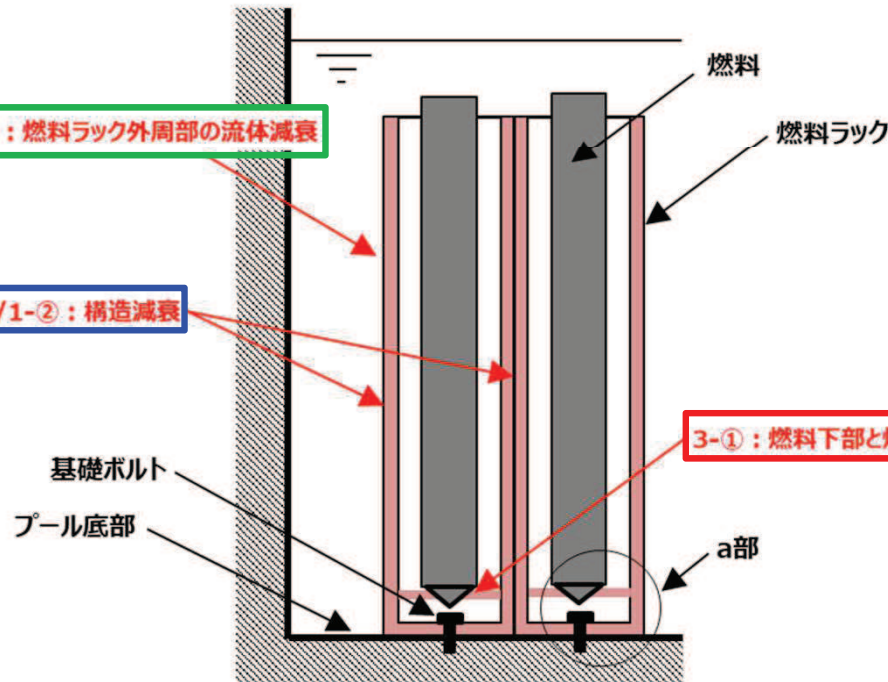
2-①：燃料ラックセル内流動による流体減衰

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

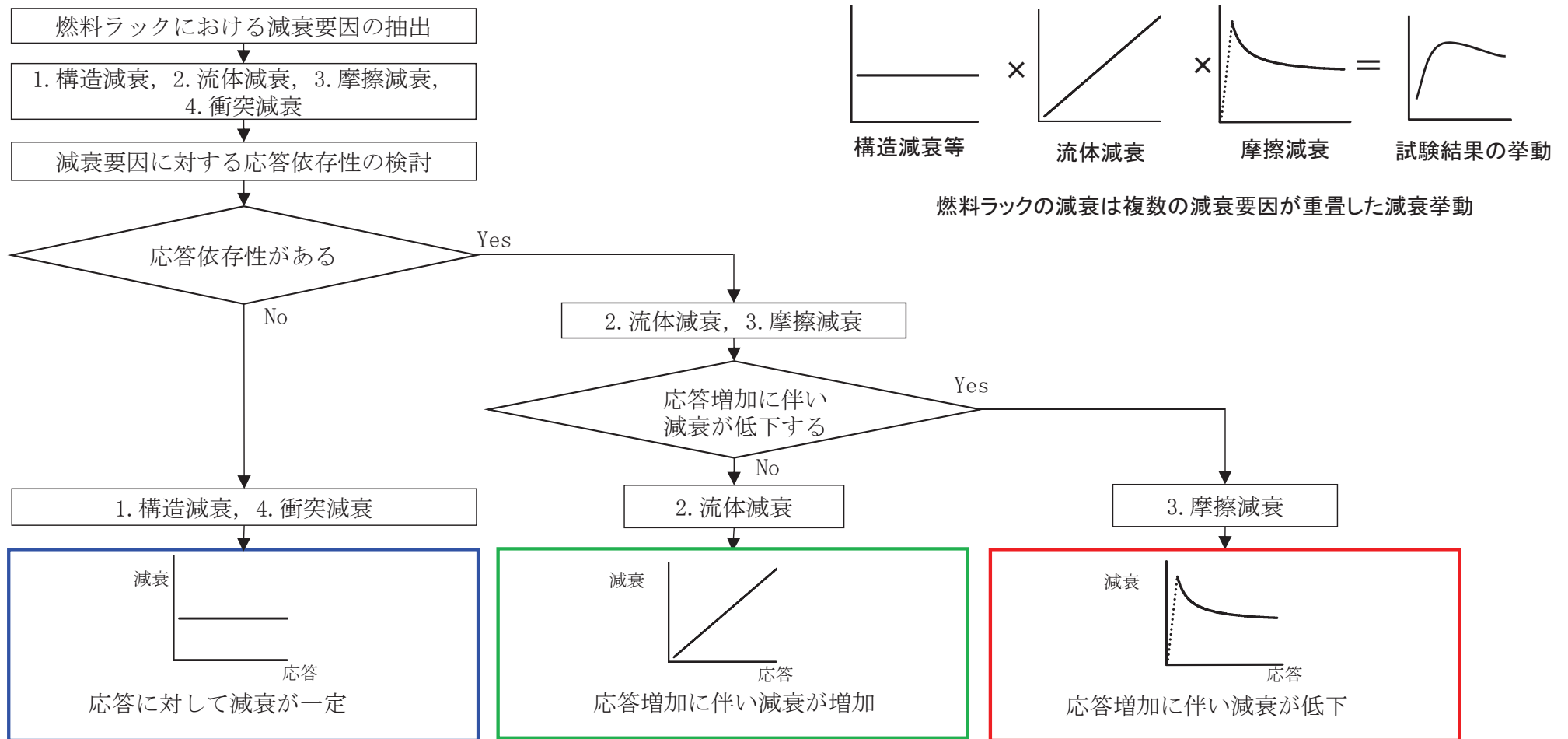


要因	内容
1.構造減衰	1-① 材料自体の減衰(内部減衰)
	1-② 部材間(角管, 補強板)の摺動などによる減衰
2.流体減衰	2-① 燃料ラック内に貯蔵された燃料(セル内流動)の流体抵抗による減衰
	2-② 燃料ラック外周部の流体抵抗による減衰
3.摩擦減衰	3-① 燃料下部と燃料支持板の摩擦
	3-② ラックベースと床面の摩擦
4.衝突減衰	4-① 燃料とラックセルとの衝突

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。
- なお、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

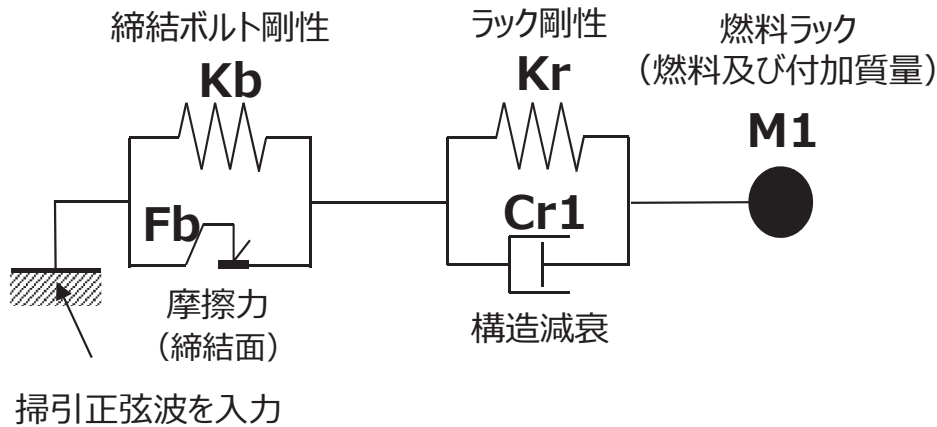
- 燃料ラックの加振試験条件及び加振結果等を考慮し、各減衰要因における減衰の程度を考察・整理した。【参考2】
- 上記検討結果を踏まえ、燃料ラックの減衰挙動に係る解析の検討方針を設定した。
 - 加振試験の外挿領域における減衰傾向の把握することを目的とし、簡易解析モデル(1質点系解析モデル)による、構造減衰及び摩擦減衰を考慮した減衰の解析を行う。
 - 加振試験における減衰挙動を合わせることを目的とし、詳細解析モデル(多自由度系解析モデル)による、構造減衰、流体減衰及び摩擦減衰を考慮した減衰の解析を行う。

燃料ラックの減衰要因等に係る整理

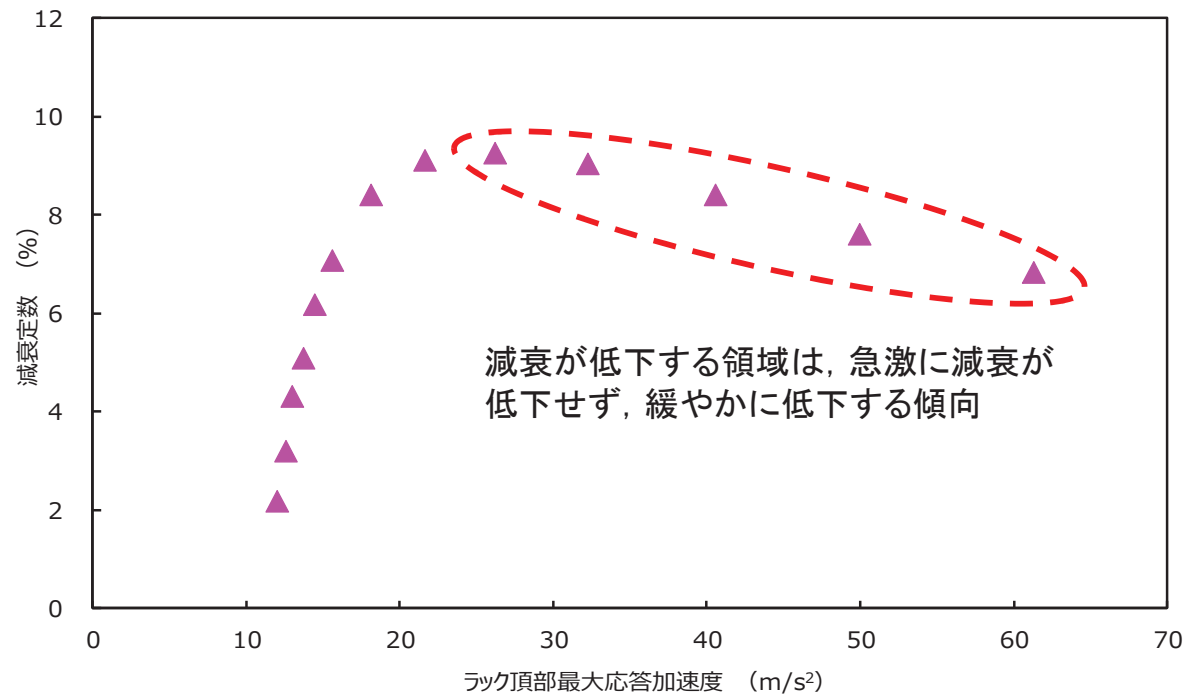
減衰要因	具体的要因	減衰の程度	1質点系解析モデル	多自由度系解析モデル
1.構造減衰	材料自体の減衰(内部減衰)	加振試験結果から燃料ラックの応答がゼロの場合の減衰は約4%と想定される。	○	○
	部材間(角管, 補強板)の摺動などによる減衰			
2.流体減衰	燃料ラック内に貯蔵された燃料(セル内流動)の流体抵抗力による減衰	燃料ラック内の狭い空間(セル内)における相對運動による流体減衰のため、応答が大きくなるに従い、減衰が増加すると考えられる。	-	○
	燃料ラック外周部の流体抵抗力による減衰	燃料ラック外周の間隔が広いため、流体減衰は小さいと考えられる。	-	-
3.摩擦減衰	燃料下部と燃料支持板の摩擦	試験燃料体の自重による押付け力は、下記摩擦に対して小さく、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。	-	-
	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	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、燃料ラック及び試験体燃料等を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緩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

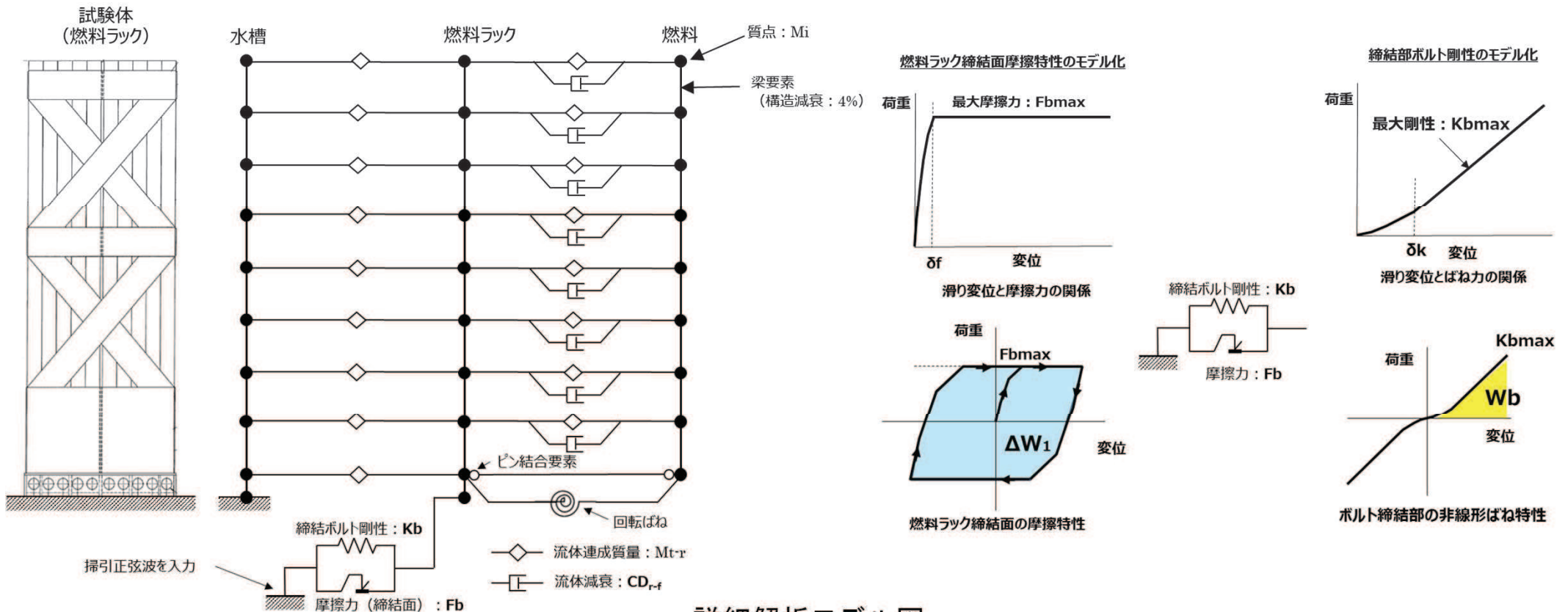


簡易解析モデルによる解析結果

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)

- ▶ 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、燃料ラック及び試験体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、燃料ラック締結面摩擦特性及び締結部ボルト剛性を詳細にモデル化した。

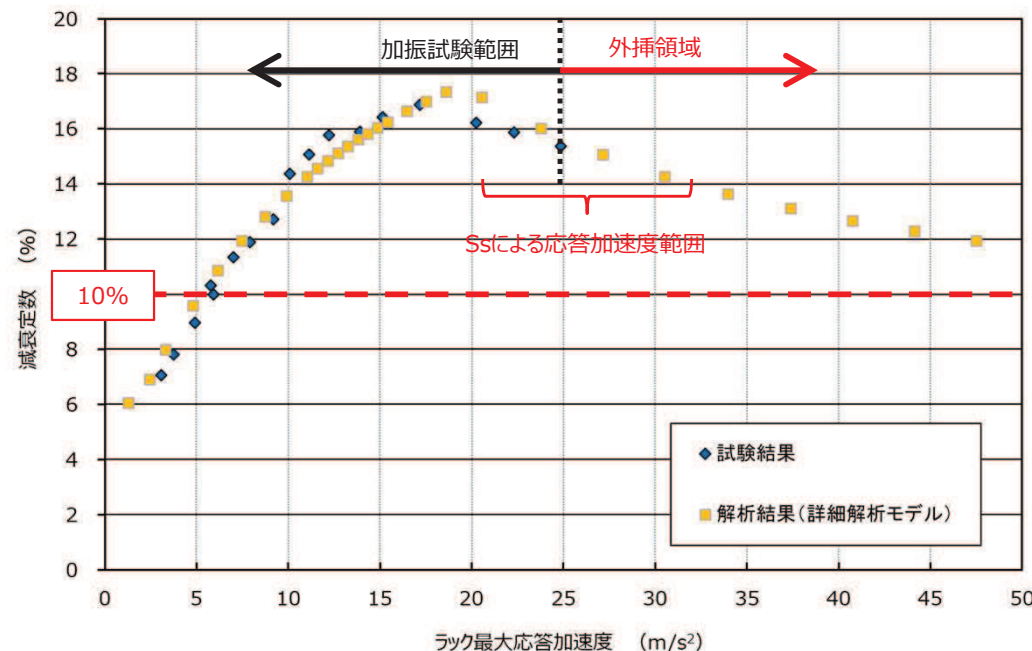


詳細解析モデル図

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)

- 詳細解析モデルによる解析結果は、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緩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、減衰が緩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_s 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。
- なお、詳細解析モデルによる解析結果は、加振試験結果で得られた減衰定数と合わせるように、横軸方向にシフト(-3m/s^2)させている。

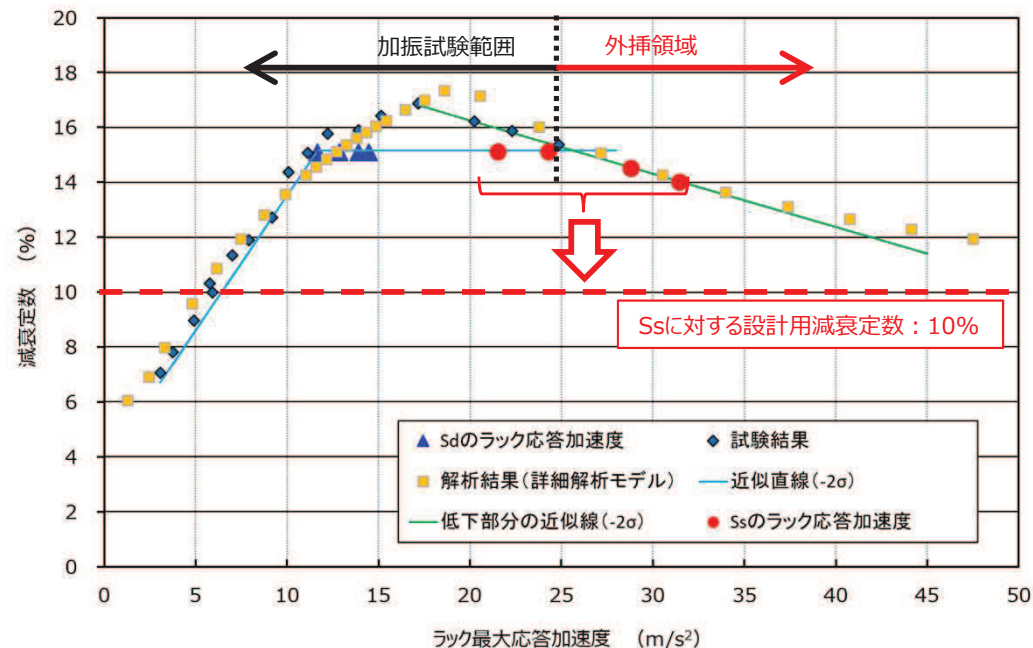


詳細解析モデルによる解析結果

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

5.7 解析結果を踏まえた設計用減衰定数の設定

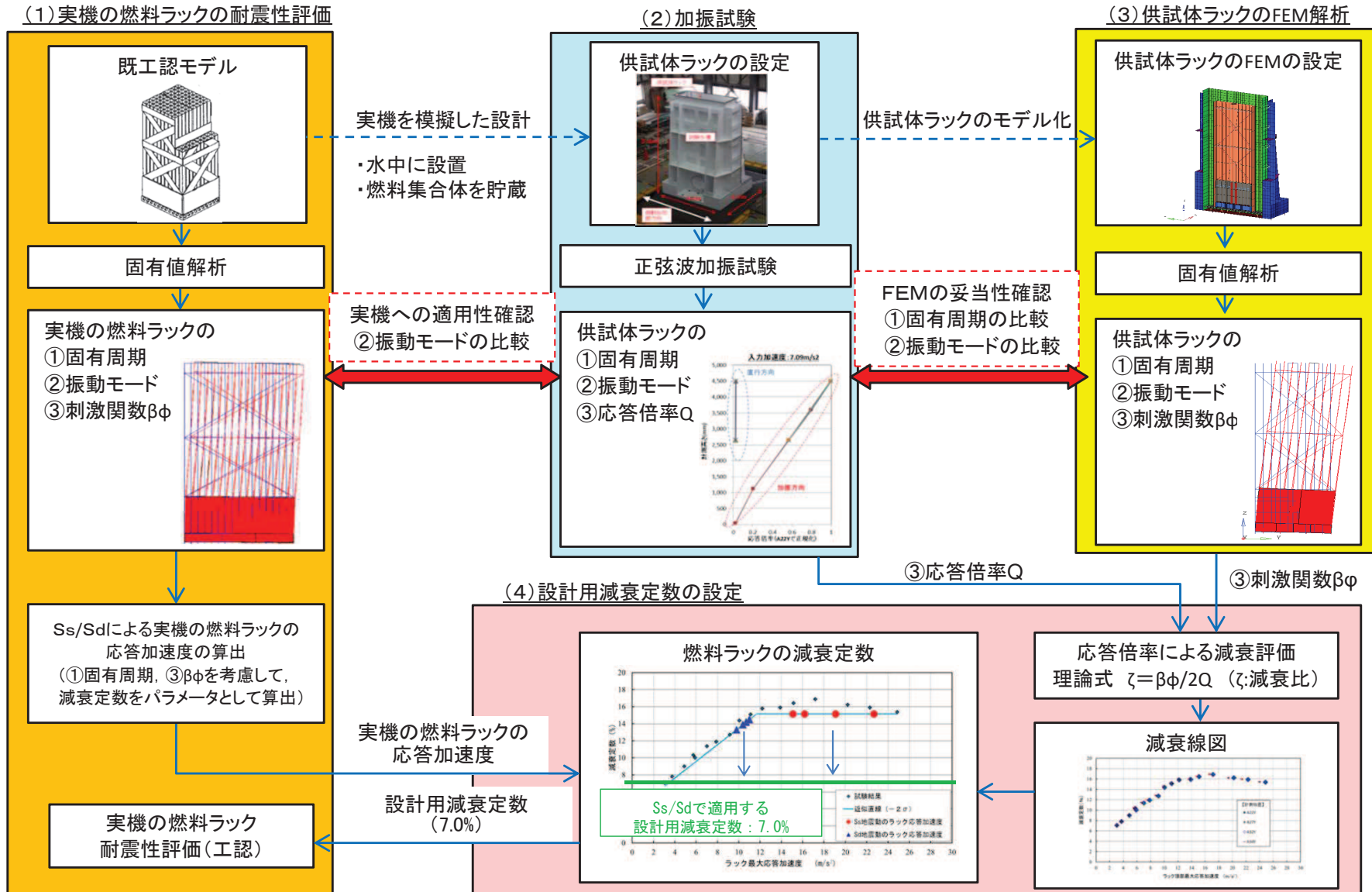
- 詳細解析モデルによる解析結果が加振試験結果で得られた減衰定数の全体的な傾向を概ね表現できていることを踏まえると、加振試験結果から設定した外挿領域における加振試験結果の近似直線は、燃料ラックの減衰傾向より安全側となっており、基準地震動 S_s の応答加速度に対する減衰定数は約14~15%の範囲になる。
- また、減衰要因の抽出と分析から、他に燃料ラックの応答増加に伴う減衰の急激な低下要因はない。
- したがって、加振試験の外挿領域における燃料ラックの設計用減衰定数は、余裕も考慮して10%と設定することは可能である。



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、燃料ラックの減衰等を考慮した解析を実施した。
- 解析結果は加振試験結果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大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しており、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もないことから、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、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%と設定する。



➤ 燃料ラックの加振時に発生する減衰の各要因に対し，応答依存性及び減衰の大きさについて整理した。

表 燃料ラックの減衰要因と応答依存性(1/3)


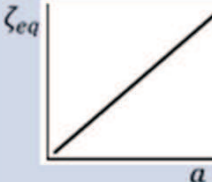
要因	No.	内容	応答依存性	減衰の大きさ
1.構造減衰	1-①	材料自体の減衰(内部減衰)	材料に起因するため応答依存性なし	加振試験結果から燃料ラック応答が振幅ゼロの場合の減衰は約4%と想定される。
	1-②	部材間(角管, 補強板)の摺動などによる減衰	減衰力による消費エネルギーと構造体の振動エネルギーはともに応答に応じて大きくなるため, 等価減衰定数は一定となり応答依存性はない。 	
2.流体減衰	2-①	燃料ラック内に貯蔵された燃料(セル内流動)の流体抵抗による減衰	等価減衰定数 ζ_{eq} は変位に比例して増加 $\zeta_{eq} = \frac{4C}{3\pi M} a$ <p>C: 流体減衰の減衰係数 M: 質量 a: 変位</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。
	2-②	燃料ラック外周部の流体抵抗による減衰		燃料ラック外周と壁との間隔が広いため, 流体減衰は小さいと考えられる。

表 燃料ラックの減衰要因と応答依存性(2/3)

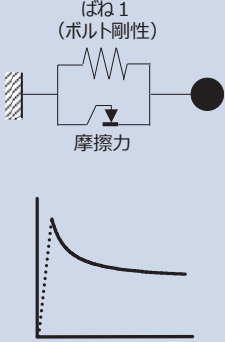
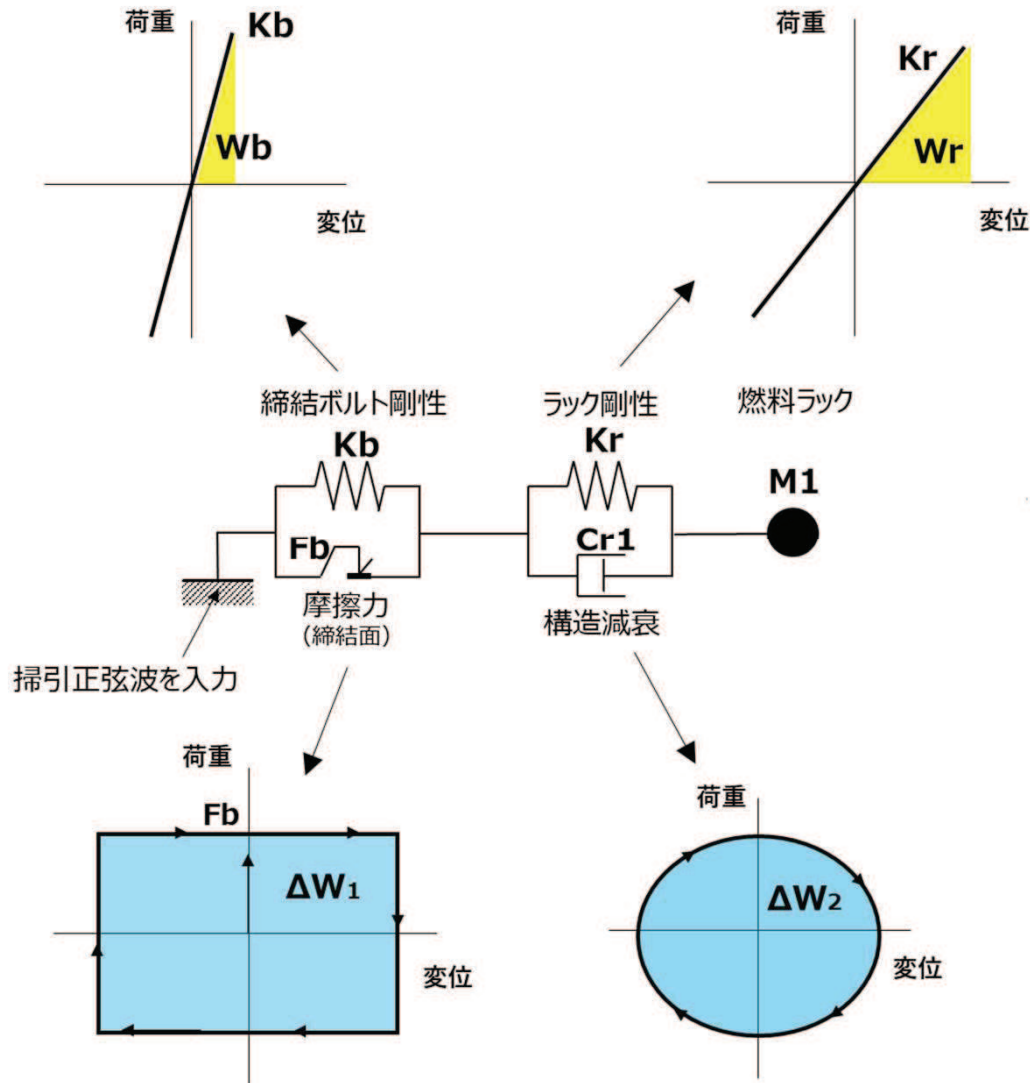
要因	No.	内容	応答依存性	減衰の大きさ
3.摩擦減衰	3-①	燃料下部と燃料支持板の摩擦	<p>摩擦力Fに対して, 静止状態からすべり始めるときの減衰は大きく, すべり発生後は応答に反比例の傾向で緩やかに低下する。 (すべり発生後の等価減衰定数 ζ_{eq} は変位aに反比例で減少)</p> $\zeta_{eq} = \frac{2F}{\pi K a}$ <p>F: 摩擦力 K: ばね定数 a: 変位</p> 	<p>3-②(ラックベースと床面の摩擦減衰)の締結ボルト締付および燃料ラック/燃料の自重による押付け力(9.6×10^5[N])に対して, 試験燃料(30体)の自重(7.6×10^4[N])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>
	3-②	ラックベースと床面の摩擦	<p>静止状態からすべり始めるまでは摩擦減衰に直列にばねが結合したモデルで表すと, 等価減衰は増加した後に緩やかに低下する。</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, 9.6×10^5[N]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>

表 燃料ラックの減衰要因と応答依存性(3/3)

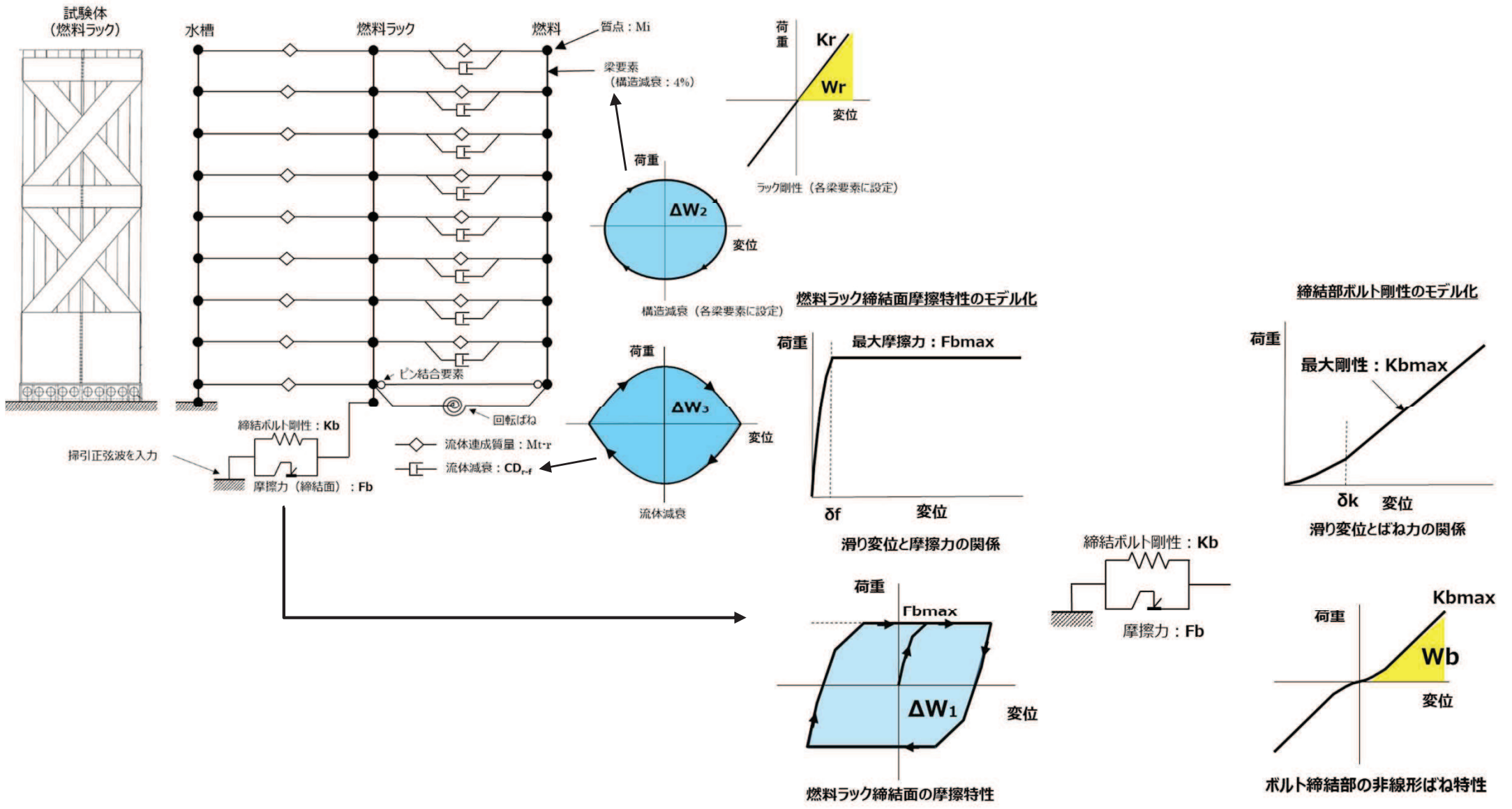
要因	No.	内容	応答依存性	減衰の大きさ
4. 衝突減衰	4-①	燃料とラックセルとの衝突	<p>衝突による減衰は、反発係数eと減衰比hとして以下の式で表せる。反発係数は一般的に衝突部の形状や材質で決まるため、衝突減衰に応答依存性はない。</p> $h = \sqrt{\frac{\{\ln(1/e)\}^2}{\pi^2 + \{\ln(1/e)\}^2}}$	<p>加振試験では、試験体燃料とラックセルに接触痕は確認されず、試験状況映像でも衝突が確認されなかったことから、今回の試験範囲では燃料とラックセルの衝突による減衰はなかったと考えられる。</p>
5. その他	5-①	燃料ラックと燃料の連成による応答低減(動吸振器効果)	<p>燃料ラックと燃料の振動数比により応答低減程度が決まるため応答依存性なし</p>	<p>燃料ラックの質量に対して燃料の質量が比較的大きいため、連成挙動による応答低減効果があると考えられる。連成挙動による応答低減効果に応答倍率の低下として他の減衰要因と同様に等価減衰定数として評価している。</p>



簡易解析モデル図

簡易解析モデルの諸元

記号	解析条件	モデル入力値	根拠
M1	ラック質量 (燃料及び付加質量含む)		構造質量と理論式に基づく流体付加質量を供試体ラックの1次モード形状を考慮した1質点系の等価質量に変換した。
Kb	締結ボルト剛性		締結ボルトの剛性と試験結果に基づき設定
Kr	ラックの剛性		供試体ラック1次モードの試験結果より設定
Cr1	ラックの構造減衰		低振幅の試験結果から減衰2%と想定して設定
Fb	ボルト締結面摩擦力		供試体ラックのボルト締付力と試験結果から設定

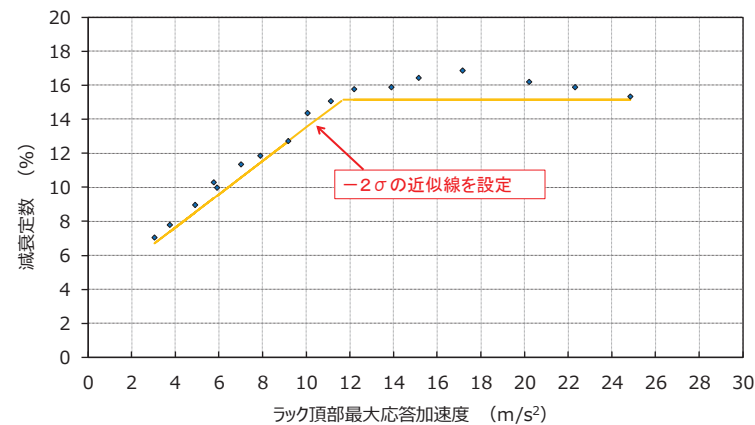


詳細解析モデル図

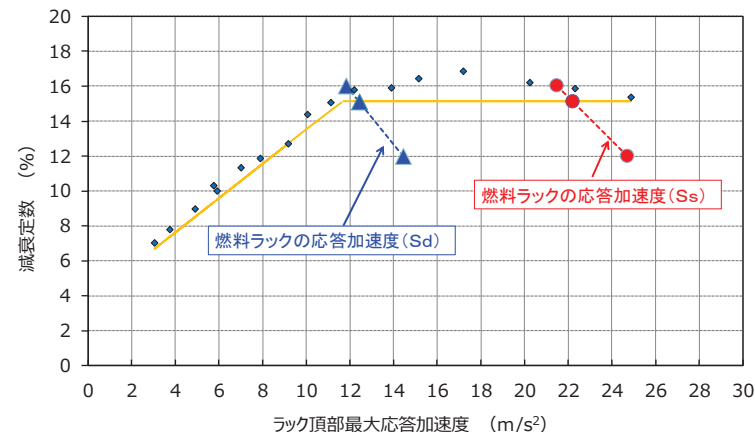
詳細解析モデルの諸元

記号	解析条件	モデル入力値	根拠
M_r	燃料ラック質量		燃料ラック質量と理論式に基づく流体付加質量。全質量を各質点に均等に設定。
M_f	燃料質量		燃料質量と理論式に基づく流体付加質量。全質量を各質点に均等に設定。
M_t	水槽質量		水槽質量と理論式に基づく流体付加質量。全質量を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1次共振振動数)に基づき設定
EI_r	燃料ラックの代表剛性 (胴部中央曲げ剛性)		試験結果(燃料ラック1次共振振動数)に基づき設定
EI_f	燃料の代表剛性 (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	水槽の代表剛性 (曲げ剛性)		試験結果(水槽1次共振振動数)に基づき設定
K_θ	燃料ラック-燃料間の 回転ばね		燃料の高次モードに影響のない範囲で燃料の転倒方向の剛体モードに対し下端回転剛性を設定
Cr	燃料ラックの構造減衰 (1次モード減衰定数)		試験結果における振幅ゼロ近傍の減衰定数4%を設定
Fb_{max}	ボルト締結面摩擦力		供試体ラックのボルト締付力と試験結果から設定
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
δf	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に基づき設定
δk	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を設定

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: -2σ)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。

