

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。

資料1-3

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 (指摘事項に対する回答)

2021年9月30日
東北電力株式会社

前回審査会合(7/6)における指摘事項及び回答概要

- 第988回審査会合において、審査の中で論点として新たに整理された、使用済燃料貯蔵ラックの設計用減衰定数について説明し、以下の指摘があったことから、指摘事項に対する回答について説明する。

| No. | 実施日 | 指摘事項 |
|-----|------------------------|--|
| 1 | 2021年7月6日 第988回審査会合 | <p>使用済燃料貯蔵ラックの減衰挙動に関する詳細解析について、以下の観点も含め、解析モデル及び解析条件の設定方法並びに減衰定数の算出方法の妥当性を整理して説明すること。その上で、改めて設計用減衰定数の設定の妥当性を整理して説明すること。</p> <ul style="list-style-type: none">➤ 流体－構造連成による燃料ラックの応答低減効果を減衰として扱わないことについて、応答倍率曲線を用いた減衰定数の算定における応答低減効果の除外方法を整理して説明すること。➤ 詳細解析モデルの解析条件のうち、締結ボルト剛性、ラック剛性、摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位等について、燃料ラックの構造及び加振試験データとの関係を含め、入力値の妥当性を説明すること。➤ 詳細解析モデルの解析条件のうち、燃料ラックの構造及び加振試験データ等から得られる値に幅があるものについては、入力値を変動させた場合の減衰定数への影響を説明すること。 |

前回審査会合(7/6)における指摘事項及び回答概要

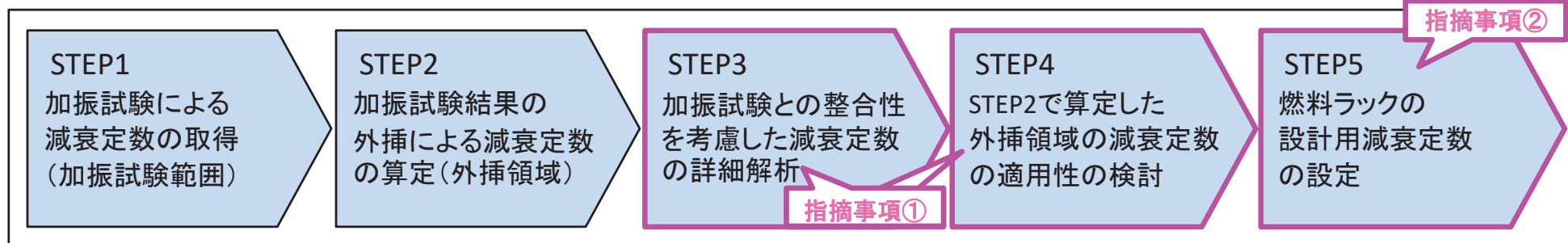
| No. | 指摘事項 | 指摘事項に対する回答 | 記載箇所 |
|-----|--|---|----------------|
| ① | 使用済燃料貯蔵ラックの減衰挙動に関する詳細解析について、以下の観点も含め、解析モデル及び解析条件の設定方法並びに減衰定数の算出方法の妥当性を整理して説明すること。 | <ul style="list-style-type: none"> 解析モデルは試験体構造と燃料ラックの減衰メカニズム(構造減衰, 流体減衰, 摩擦減衰)及び流体-構造連成による応答低減効果を考慮して適切に設定し, 解析条件は試験結果との整合性を考慮して適切に設定している。 減衰定数の算出方法は, 燃料ラックの非線形性を考慮してそれに適した応答倍率法を適用している。 上記に加えて以下の①-1~3の観点を踏まえ, 燃料ラックの減衰定数の詳細解析は妥当なものと判断した。 | P5-17 別紙1 |
| ①-1 | 流体-構造連成による燃料ラックの応答低減効果を減衰として扱わないことについて、応答倍率曲線を用いた減衰定数の算定における応答低減効果の除外方法を整理して説明すること。 | <ul style="list-style-type: none"> 算出する減衰定数には, 燃料ラックが水中にあることに伴う流体-構造連成による応答低減効果が含まれないことについて, 理論式及び定量的な確認結果を整理した上で, 解析モデルは妥当なものと判断した。 | P6-8 |
| ①-2 | 詳細解析モデルの解析条件のうち、締結ボルト剛性、ラック剛性、摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位等について、燃料ラックの構造及び加振試験データとの関係を含め、入力値の妥当性を説明すること。 | <ul style="list-style-type: none"> 解析条件(入力値)のうち、『試験結果との整合性を考慮して設定するもの』に分類した5項目*は, 変動範囲が燃料ラックの構造等を踏まえて現実的に取り得る範囲であり, 試験結果との整合性を考慮して設定(基準ケース)した。その結果, 詳細解析は加振試験範囲内において試験結果の減衰挙動を表現できていることを確認した。 注記*: 締結ボルト剛性, ラック剛性, 摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位, ボルト締結面摩擦力, 締結ボルトばね剛性の振幅依存性を定義する最大変位 | P9-15 別紙2 |
| ①-3 | 詳細解析モデルの解析条件のうち、燃料ラックの構造及び加振試験データ等から得られる値に幅があるものについては、入力値を変動させた場合の減衰定数への影響を説明すること。 | <ul style="list-style-type: none"> 上記5項目について, 現実的に取り得る範囲内で基準ケースから値を変動させた影響確認の結果は, 試験の外挿領域における減衰定数の低下傾向及び低下量が基準ケースと同程度(減衰定数は急減しないものの緩やかに低下し, その低下量は最大2.36%)であった。 | P16, 17 別紙3 |
| ② | 設計用減衰定数の設定の妥当性を整理して説明すること。 | <ul style="list-style-type: none"> JEAG4601等に設計用減衰定数が規定される各種設備の設定事例を下記4項目の着眼点で調査・整理して女川2号機の燃料ラックと比較・検討した。その結果, JEAG4601等に規定される各種設備の設定事例で女川2号機と同様の対応を行っているため, 女川2号機の燃料ラックに対する設計用減衰定数の設定方法は妥当なものと判断した。 着眼点: 減衰定数の取得方法, 減衰定数とパラメータの相関関係, 減衰定数に対する余裕の取り方, 対象設備の汎用性 | P18, 19 別紙4 |

1. 設置許可段階からの変更点及び今回工認での検討概要

- 設置許可段階(第560回審査会合, 2018年3月29日他)では, 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。)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%)から一律7%に変更することとしていた。
- 工認段階では, 基準地震動 S_s の追加等により, 燃料ラックの S_s 応答加速度の一部が加振試験の範囲を超えるため, 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必要が生じた。
- 上記を踏まえて今回工認では, 以下の検討フローに基づき, 加振試験結果の外挿により算定した外挿領域の減衰定数に対して, 加振試験との整合性を考慮した減衰定数の詳細解析により外挿領域の減衰定数の適用性を検討した。
- その上で, 改めて設計用減衰定数の設定の妥当性を検討した結果として, 弾性設計用地震動 S_d 及び基準地震動 S_s に対し, 設置許可段階と同様に一律7%の設計用減衰定数を設定*した。

| | 設置許可段階 | 工認段階 |
|---------------------------|----------------------|----------------------------|
| S_s 応答加速度と加振試験の応答加速度の関係 | S_s 応答加速度は加振試験の範囲内 | S_s 応答加速度の一部が加振試験の範囲を超える |
| 減衰定数の取得方法 | 加振試験 | 加振試験及び加振試験結果の外挿(解析的な確認を含む) |
| 設計用減衰定数(水平方向) | 一律: 7% | 一律: 7%* |

注記*: 今回の説明では, 基準地震動 S_s の応答加速度が加振試験の範囲を超えること及び指摘事項に対する検討結果を踏まえ, 基準地震動 S_s に対する設計用減衰定数を前回会合(第988回, 2021年7月6日)の10%から設置許可段階と同じ7%に見直した。



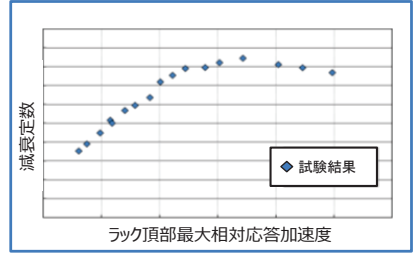
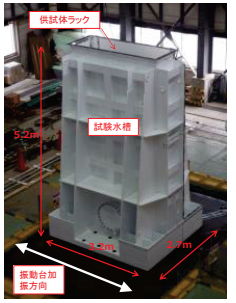
燃料ラックの設計用減衰定数設定に係る検討フロー

2. 女川2号機使用済燃料貯蔵ラックの設計用減衰定数設定の全体概要

■ 女川2号機使用済燃料貯蔵ラックの今回工認における設計用減衰定数は、STEP1~5の検討に基づき設定している。

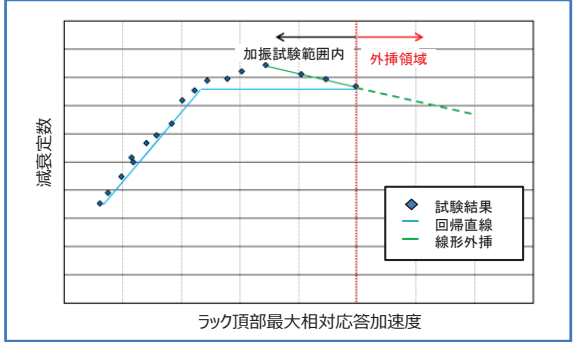
STEP1: 実物大加振試験による減衰定数の取得

- 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、着座部の摩擦、燃料ラック締結部の摩擦及び水の抵抗等により、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想定。
- JEAG4601の規定*1も踏まえて実物大加振試験を実施し、加速度応答依存性のある減衰定数を取得。



STEP2: 加振試験結果の外挿による減衰定数の算定(外挿領域)

- Ss応答加速度の一部が加振試験範囲を超えているため、加振試験範囲の内外で各々以下の統計処理を実施して減衰定数を算定。



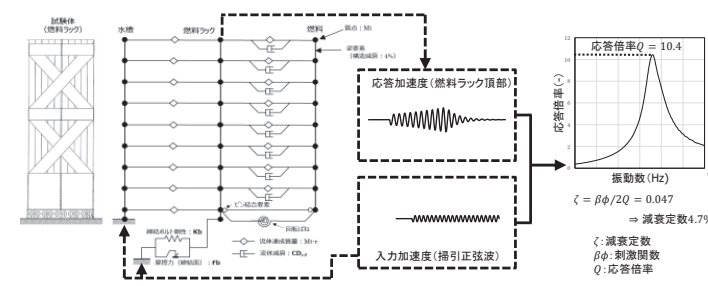
| 応答加速度 | 減衰定数算定(統計処理)方法 |
|---------------|--|
| 加振試験範囲内 | 実施範囲の回帰直線(-2σ) (以下「試験結果の回帰直線」) |
| 加振試験範囲外(外挿領域) | 減衰定数低下部分の回帰直線(-2σ)の 線形外挿(以下「試験結果の線形外挿」) |

注記*1: 設計用減衰定数の設定に係るJEAG4601の規定「JEAG4601-1991 追補版」では、実験等に基づきその妥当性が確認された場合は表と異なる設計用減衰定数を用いることができることを規定。

STEP3: 加振試験との整合性を考慮した減衰定数の詳細解析

解析モデル, 解析条件の妥当性

- 詳細解析*2の解析モデル及び解析条件は、加振試験結果等の分析に基づく減衰要因検討結果等に基づき、試験体を多質点系でモデル化し、減衰挙動を表現するように設定。
(指摘事項①-1: 流体-構造連成による応答低減効果の扱い)に対する検討を含む)
- 解析条件は、試験条件等から一意に定まるもの(10項目)、試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)に分類。
- 試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)は、現実的に取り得る変動範囲内の値となっている。(指摘事項①-2)

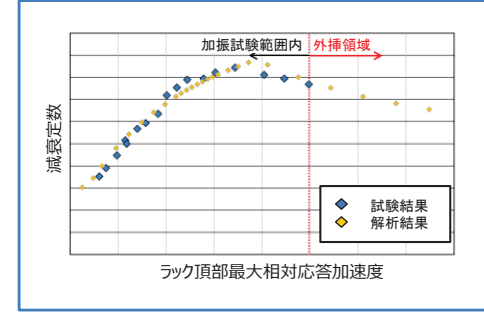


減衰定数算出方法の妥当性

- 減衰定数の算出方法は、燃料ラックが非線形性(ラックベースと床面の摩擦等)を有するため、非線形性のある振動系の減衰算出に適した応答倍率法を適用。

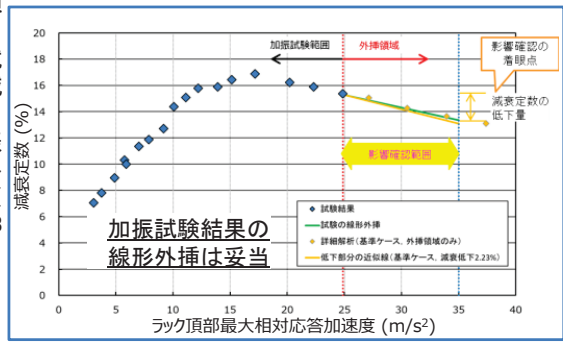
詳細解析による減衰定数算出結果

- 詳細解析結果は、加振試験範囲内において試験の減衰挙動を表現できており、その外挿領域でも減衰挙動を概ね表現できているものと判断。



STEP4: STEP2で算定した外挿領域の減衰定数の適用性の検討

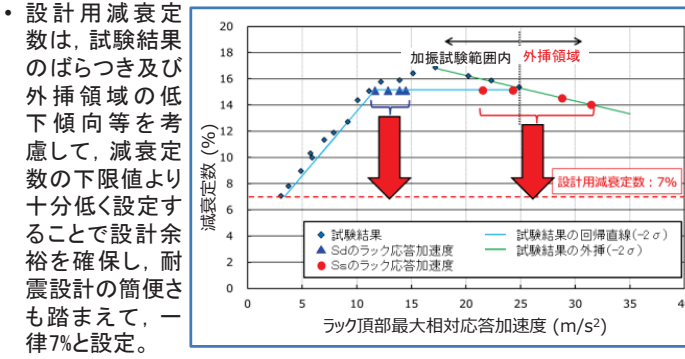
- STEP2で算定した外挿領域における減衰定数について、STEP3で検討した「試験結果との整合性を考慮して設定する項目(5項目)」の入力値を変動させ、減衰定数とラック頂部最大相対応答加速度の関係に与える影響(減衰低下傾向、低下量)を確認。
- いずれの項目でも試験の外挿領域で減衰定数が急減せず、減衰低下量は、加振試験結果の線形外挿は1.97%、解析(基準ケース)は2.23%とほぼ同程度。(指摘事項①-3)



注記*2: 詳細解析の目的
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減に低下するものでないこと及び減衰定数の大きさの程度を確認することにより、加振試験結果の外挿によるSsの応答範囲における減衰定数の適用性を示す。

STEP5: 燃料ラックの設計用減衰定数の設定

- JEAG4601等の設定事例を考慮して女川2号機の燃料ラックに対する設計用減衰定数設定の妥当性を確認。(着眼点は以下4項目)
①減衰定数の取得方法: クレーン類と同様、試験及び試験結果の外挿(解析的な確認含む)によって減衰定数を取得している。
②減衰定数とパラメータの相関関係: クレーン類と同様、減衰定数とパラメータ(応答)に相関関係があるものの、減衰定数は応答に依らず一律に設定している。
③減衰定数に対する余裕の取り方: 空調用ダクト等と同様、下限値(回帰直線に-2σ考慮)に一定の余裕を見込んでいる。
④対象設備の汎用性: PWR使用済燃料貯蔵ラック等と同様の固有設備であり、汎用設備に比べて減衰定数のばらつきは小さいと考えられるものの、減衰定数の下限値に対して一定の余裕を見込んでいる。

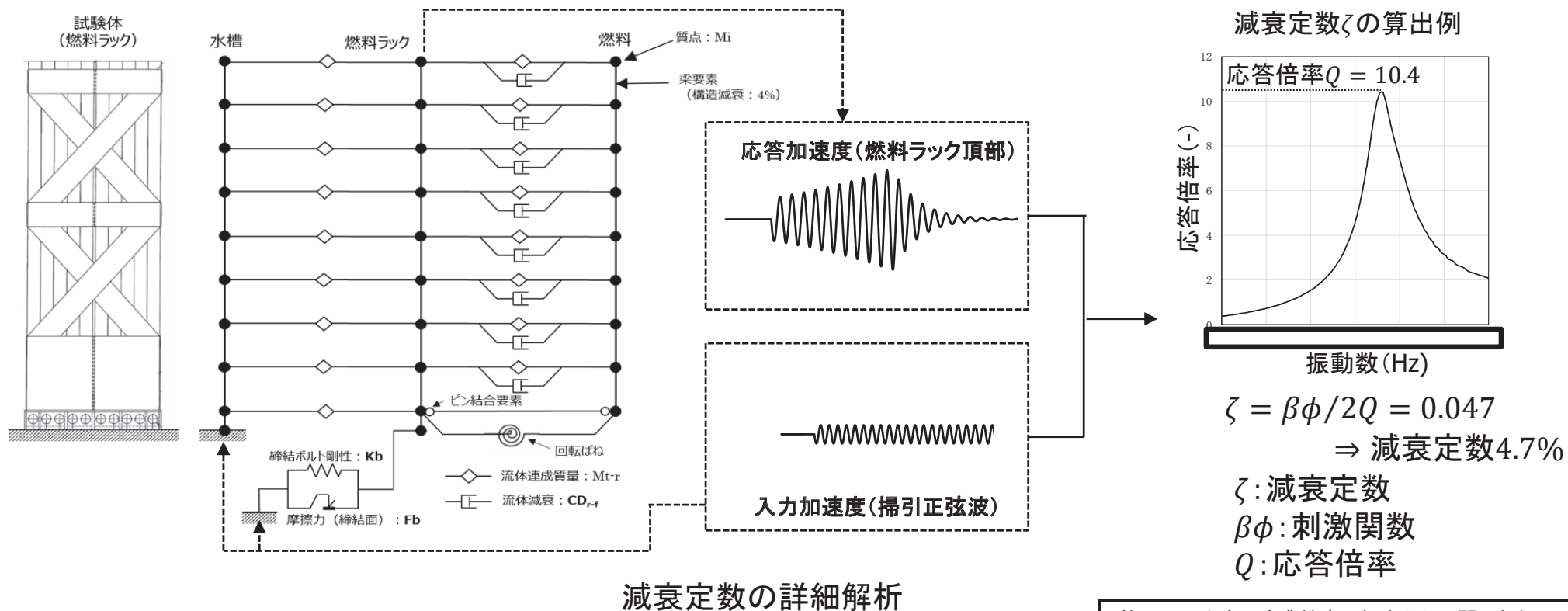


設計用減衰定数は、試験結果のばらつき及び外挿領域の低下傾向等を考慮して、減衰定数の下限値より十分低く設定することで設計余裕を確保し、耐震設計の簡便さも踏まえて、一律7%と設定。

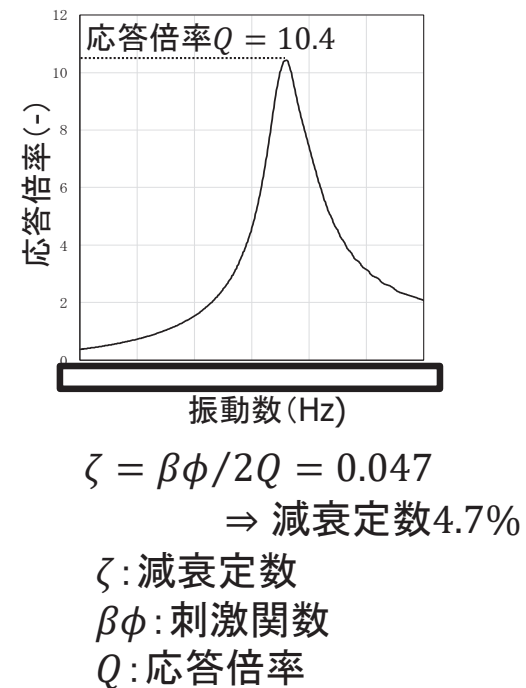
3. 指摘事項①に対する回答

【減衰定数の詳細解析(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法の妥当性)】

- 詳細解析の目的は、加振試験の外挿領域における燃料ラックの減衰定数の低下が緩やかであること及び減衰定数の大きさの程度を確認することにより、試験結果の外挿によるSsの応答範囲における減衰定数の適用性を示すものである。
- 減衰定数の詳細解析では、試験体を多質点とし、燃料ラックの減衰要因と考えられる減衰メカニズム(構造減衰, 流体減衰, 摩擦減衰)等を考慮して解析モデルを適切に設定するとともに、試験結果との整合性を考慮して解析条件を適切に設定している(詳細は、次頁以降の指摘事項①-1, ①-2, ①-3に対する回答参照)。
- 減衰定数の算出方法は、燃料ラックが非線形性(ラックベースと床面の摩擦等)を有するため、非線形性のある振動系の減衰定数の算出に適した応答倍率法を適用している(詳細は別紙1参照)。



減衰定数 ζ の算出例

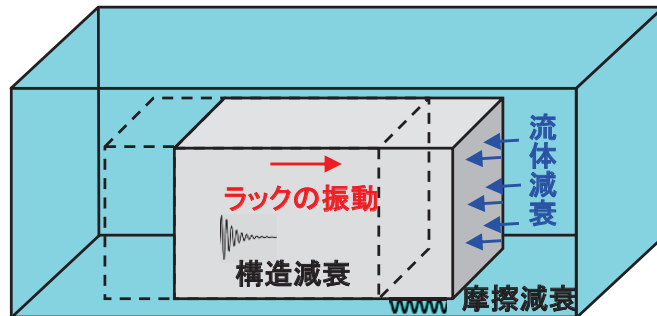


3. 指摘事項①－1に対する回答(1/3)

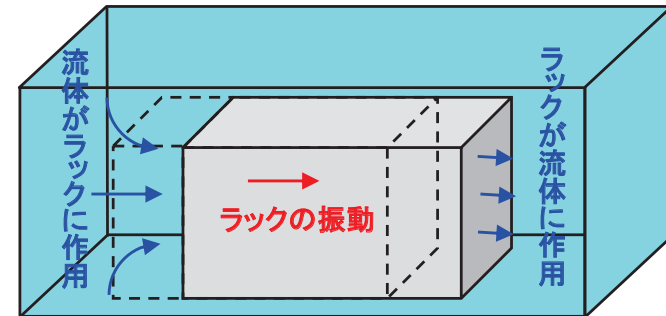
【減衰定数の算出における応答低減効果の取扱い】

- 詳細解析では、燃料ラックが水中に設置されていることを踏まえて解析モデルを作成している。
- 水中にある燃料ラックの応答を低減させる効果は、大きく『減衰要因による効果』及び『流体－構造連成による応答低減効果』の2つに分けられる。

| | 減衰要因による効果 (構造減衰, 流体減衰, 摩擦減衰) | 流体－構造連成による 応答低減効果* |
|---------|--|------------------------------------|
| 効果の説明 | 構造減衰(材料自体の減衰等), 流体減衰(周囲の流体抵抗に伴う減衰)及び摩擦減衰(ラックベースと床面の摩擦等)によって燃料ラックの応答が低減する | 燃料ラックと周囲の流体との相互作用によって燃料ラックの応答が低減する |
| 減衰定数の算定 | 減衰定数に含まれる | 減衰定数に含まれない |



減衰要因による効果(構造減衰, 流体減衰, 摩擦減衰)



流体－構造連成による応答低減効果

燃料ラックの応答を低減させる効果のイメージ図

- これらのうち、『流体－構造連成による応答低減効果』は減衰定数には含まれない。これについて以下の2つの観点から次頁以降で説明する。

- 理論式を用いた減衰定数の算出過程
- 詳細解析モデルを用いた定量的な確認結果

注記* : 機器・配管系の耐震評価においては、対象設備の地震応答をより現実的に評価するため、減衰とは別に流体－構造連成による応答低減効果を地震応答解析で考慮する場合がある。

3. 指摘事項①－1に対する回答(2/3)

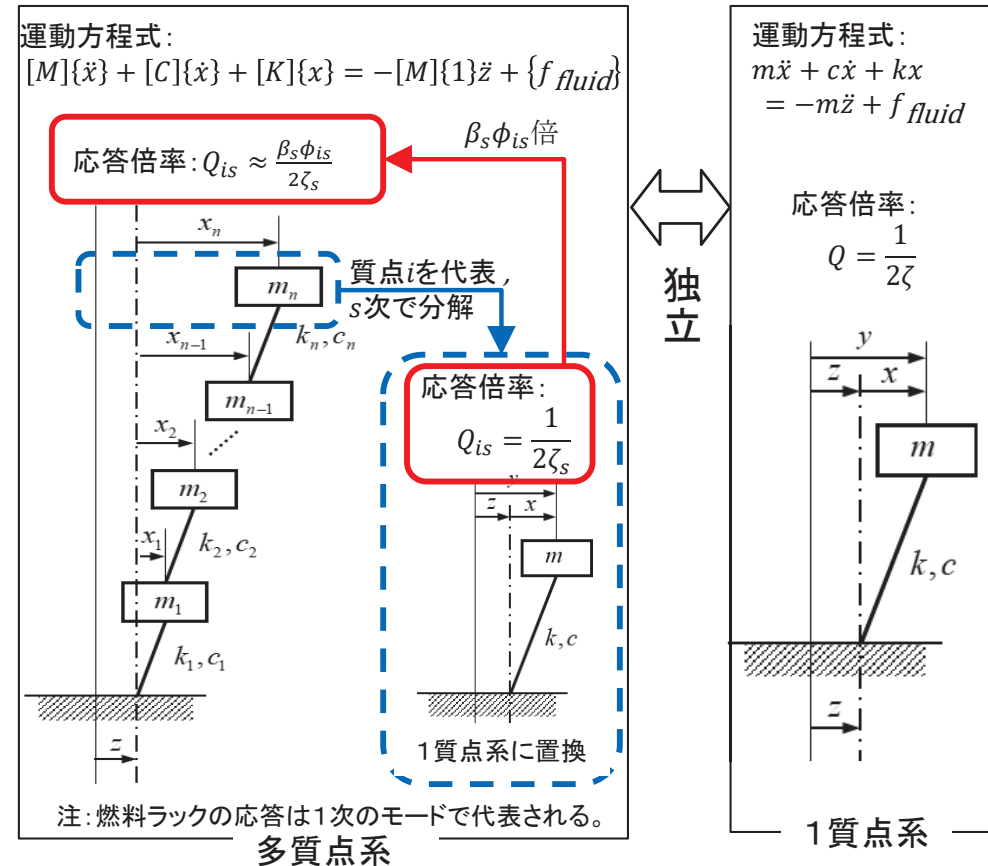
【減衰定数の算出における応答低減効果の取扱い】

(1)理論式を用いた減衰定数の算出過程

- 燃料ラックの詳細解析では、水中の振動を適切に評価するため、流体の付加質量効果(質量マトリクス $[M]$ の対角質量, $[M] + [M_a]$)及び流体－構造連成による応答低減効果(質量マトリクス $[M]$ の非対角質量, $[M] - [M_D]$)を考慮する。多質点でモデル化した場合には、運動方程式の展開により気中と水中それぞれ下表のとおりとなる。
- 各質点(質点 i)に着目すると、多質点系の応答は、固有モードベクトルを用いて次数(s 次)ごとに分解できる、すなわち、各次数(s 次)で分解した質点 i の1質点系の運動方程式に置き換えられる(ただし、 $\beta_s \phi_{is}$ 倍)ことを示している。
- 一方で、1質点系の応答倍率は減衰定数 ζ を用いて $Q = \frac{1}{2\zeta}$ で表されるので、1質点系の減衰定数 ζ と多質点系の刺激関数 $\beta_s \phi_{is}$ とは独立した変数である。
- よって、流体－構造連成による応答低減効果($[M] - [M_D]$)が考慮される $\beta_s \phi_{is}$ と減衰定数 ζ の関係は、互いに影響を及ぼさないため、減衰定数 ζ には流体－構造連成による応答低減効果は含まれないことになる。

多質点系の応答倍率と減衰定数

| 項目 | 気中 | 水中 |
|---------------------|--|---|
| 固有モードベクトル | $[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\}$ から求める | $([M] + [M_a])\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\}$ から求める |
| 刺激係数 | $\beta_s = \frac{\{\phi_s\}^T [M] \{1\}}{\{\phi_s\}^T [M] \{\phi_s\}}$ | $\beta_s = \frac{\{\phi_s\}^T ([M] - [M_D]) \{1\}}{\{\phi_s\}^T ([M] + [M_a]) \{\phi_s\}}$ |
| 応答倍率 (質点 i) | $Q_{is} \approx \frac{\beta_s \phi_{is}}{2\zeta_s}$ | $Q_{is} \approx \frac{\beta_s \phi_{is}}{2\zeta_s} = \frac{1}{2\zeta_s} \times \beta_s \phi_{is}$ |
| 減衰定数 (s 次モード) | $\zeta_s \approx \frac{\beta_s \phi_{is}}{2Q_{is}}$ | $\zeta_s \approx \frac{\beta_s \phi_{is}}{2Q_{is}}$ |



3. 指摘事項①-1に対する回答(3/3)

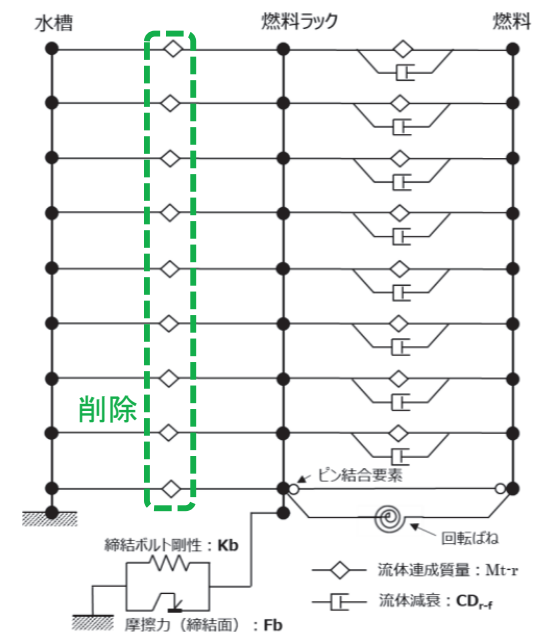
【減衰定数の算出における応答低減効果の取扱い】

STEP1 STEP2 STEP3 STEP4 STEP5

(2) 詳細解析モデルを用いた定量的な確認結果

- ▶ 流体-構造連成による応答低減効果を定量的に確認するため、詳細解析モデルにおける水槽と燃料ラック間の流体-構造連成質量(質量マトリクス[M]の非対角質量)を考慮せずに解析を実施した結果、実際に減衰定数と応答加速度の関係に大きな差異はないことを確認した。
- ▶ よって、算出する減衰定数には、流体-構造連成による応答低減効果は含まれない。

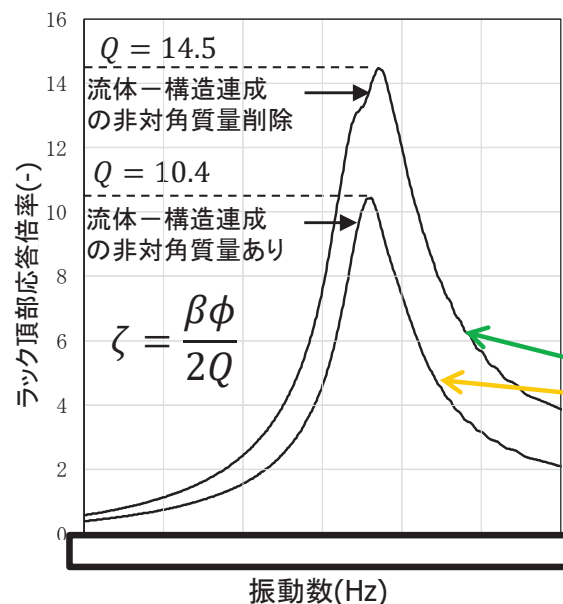
したがって(1)及び(2)の整理結果より、流体-構造連成による応答低減効果を含めた燃料ラックの解析モデルは妥当であること、また、応答倍率法*1を適用した減衰定数の算出方法は流体-構造連成による応答低減効果は含まれず、減衰定数の算出方法として妥当であることを確認した。なお、加振試験結果を用いた減衰定数の算出も同様の方法を用いており妥当である。



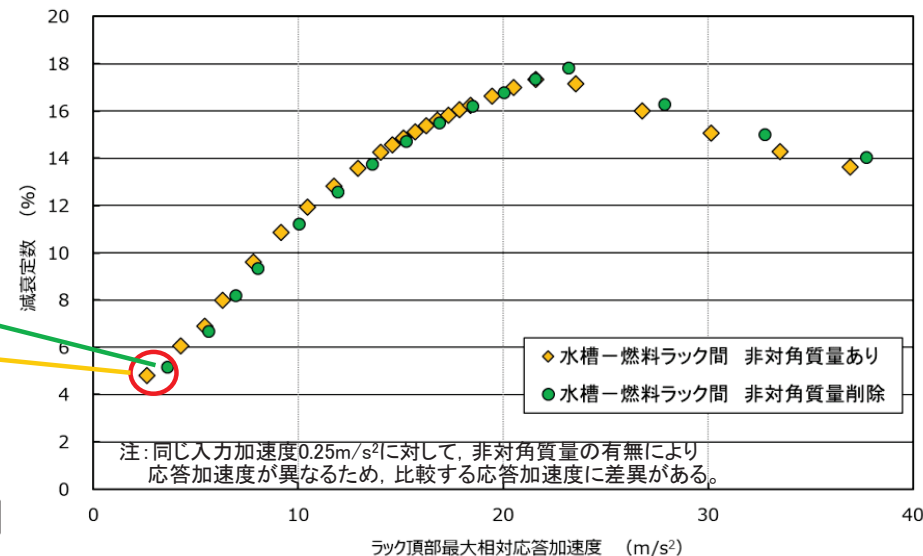
注記*1: 評価対象物の共振振動数における応答倍率 Q 及び振動特性を示す刺激関数 $\beta\phi$ との比から減衰定数 ζ を算出する方法

| | 流体-構造連成の非対角質量あり | 流体-構造連成の非対角質量削除 |
|-----------------------|-----------------|-----------------|
| 応答倍率 $Q(-)$ | 10.4 | 14.5 |
| 応答加速度 (m/s^2) | 2.6 | 3.6 |
| 刺激係数 $\beta(-)$ | 0.97 | 1.55 |
| 固有ベクトル $\phi(-)^{*2}$ | 1.0 | 1.0 |
| 減衰定数 $\zeta(\%)$ | 4.7 | 5.3 |

注記*2: 固有ベクトルは1.0で正規化している



ラック頂部の応答倍率比較



注: 同じ入力加速度 $0.25m/s^2$ に対して、非対角質量の有無により応答加速度が異なるため、比較する応答加速度に差異がある。

非対角質量の影響(減衰定数-応答加速度線図)

減衰定数に対する流体-構造連成による応答低減効果の影響検討結果

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4. 指摘事項①－2に対する回答(1/7)

【減衰定数の詳細解析に係る解析条件(入力値)の妥当性】

(1) 解析条件(入力値)の分類

- 減衰定数の詳細解析に係る解析条件(入力値)は、下表のとおり、試験条件等から一意に定まるもの(10項目)、試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)の2つに分類される。
- このうち、試験条件等から一意に定まるもの(10項目)については、理論式、燃料ラックの構造及び試験結果に基づき設定する入力値である(詳細は、別紙2参照)。
- 試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)については、次頁以降で詳細を説明する。

| 記号 | 解析条件(入力値) | 試験条件等から一意に定まるもの | 試験結果との整合性を考慮して設定するもの |
|------------|--------------------------|-----------------|----------------------|
| M_r | 燃料ラック質量 | ○ | — |
| M_f | 燃料質量 | ○ | — |
| M_t | 水槽質量 | ○ | — |
| M_{r-f} | 燃料ラック－燃料間連成質量 | ○ | — |
| M_{t-r} | 水槽－燃料ラック間連成質量 | ○ | — |
| Kb_{max} | 締結ボルト剛性 | — | ○ |
| EI_r | 燃料ラック剛性(曲げ剛性) | — | ○ |
| EI_f | 燃料の剛性(曲げ剛性) | ○ | — |
| EI_t | 水槽の剛性(曲げ剛性) | ○ | — |
| K_θ | 燃料ラック－燃料間の回転ばね | ○ | — |
| Cr | 燃料ラックの構造減衰 | ○ | — |
| Fb_{max} | ボルト締結面摩擦力 | — | ○ |
| CD_{r-f} | 燃料ラック－燃料間流体減衰 | ○ | — |
| δf | 摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位 | — | ○ |
| 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 | — | ○ |

4. 指摘事項①－2に対する回答(2/7)

【減衰定数の詳細解析に係る解析条件(入力値)の妥当性】

(2) 試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)

- 減衰定数の詳細解析に係る解析条件(入力値)のうち、試験結果との整合性を考慮して設定する解析条件(入力値)は、燃料ラックの構造、試験結果等を考慮すると、**一定の範囲内で変動し得ることから、「解析条件(入力値)の考え方」、「入力値の変動範囲」及び「入力値の設定(基準ケース)」の設定について、以下のとおり整理した。**

a. ボルト締結面摩擦力 Fb_{max}

- 解析条件(入力値)の考え方:

燃料ラック下端のボルト締結面には、押付け力として燃料ラック及び燃料の水中質量 W とボルト締付力 Pb が加わるため、ボルト締結面の摩擦力 Fb_{max} は、

$$Fb_{max} = \mu (W + Pb)$$

ここで、ボルト締付力 Pb は、締結ボルトの締付トルク T 、トルク係数 K 、呼び径 D 、本数 Nb により表される。

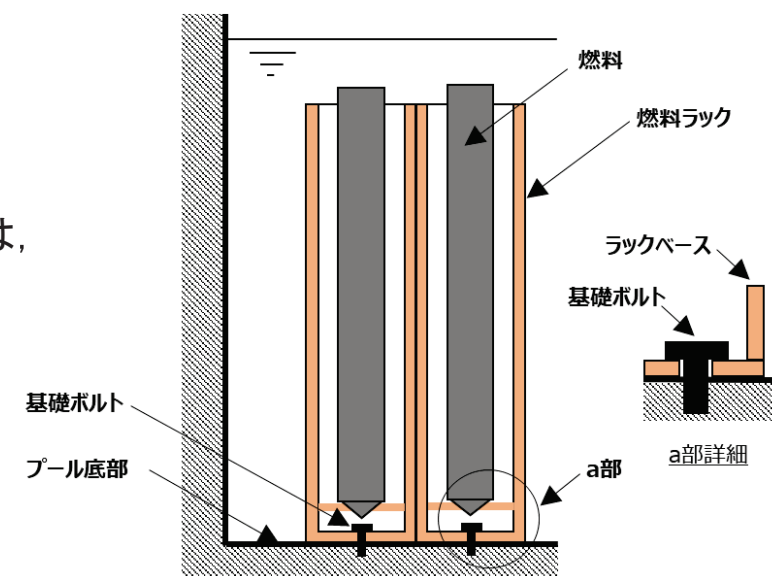
$$Pb = NbT / KD$$

- 入力値の変動範囲:

ボルト締付力 Pb は、締結ボルトの締付トルク T の管理値が であるため、入力値の変動範囲はこれによる上限値及び下限値と設定した。

- 入力値の設定(基準ケース):

締結ボルトの締付トルク T は管理値 、トルク係数 K は燃料ラック据付時の条件(潤滑なし)を考慮した値 * 1、呼び径 D と本数 Nb は締結ボルトの呼び径 と本数 、及び摩擦係数 μ は燃料ラックが水中に設置されることによる水膜効果を考慮 * 1,2,3 した から、ボルト締結面摩擦力 Fb_{max} を と設定した。



燃料ラック概略構造

注記 * 1:「機械工学便覧 A3編 力学・機械力学」, 日本機械学会編, 日本機械学会

* 2:「金属便覧」, 日本金属学会編, 日本金属学会

* 3:「機械工学便覧 B1編 機械要素設計・トライボロジ」, 日本機械学会編, 日本機械学会

4. 指摘事項①－2に対する回答(3/7)

【減衰定数の詳細解析に係る解析条件(入力値)の妥当性】

b. 摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位 δf

- 解析条件(入力値)の考え方:

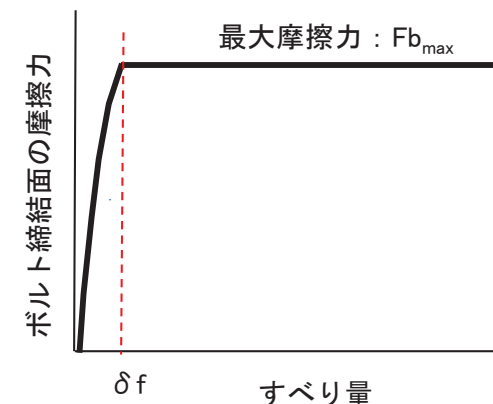
ボルト締結面に作用する力が最大摩擦力 $F_{b_{max}}$ に到達してすべり始める(主すべりの発生)前から、微小すべり(予すべり)が先行的に発生する考え方*1~3を導入する。ボルト締結面に作用する摩擦力は、すべり量の増加に伴い増加し(低振幅側)、 δf を境に高振幅側では最大摩擦力 $F_{b_{max}}$ で一定となる(右図)。

- 入力値の変動範囲:

ボルト締結面の微小すべりは、既往の知見*2,3において、1mmに満たない事象を取り扱った事例であるが、摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位 δf は構造の相違等で多少前後することも考慮して、それを参考に の変動範囲を設定した。

- 入力値の設定(基準ケース):

既往の知見*2,3における事例及び試験結果との整合性を考慮して、摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位 δf は と設定した。



注記*1:「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)

*2:「任意方向の微小すべりを考慮した摩擦継手のすべり強度解析」, 長嶋ら, 土木学会第44回年次学術講演会, 平成元年10月

*3:「東神戸大橋の主構トラス格点部の設計」, 北沢ら, 阪神高速道路株式会社 技術報告(技報)第9号, 論文13, 平成2年4月

4. 指摘事項①-2に対する回答(4/7)

【減衰定数の詳細解析に係る解析条件(入力値)の妥当性】

c. 燃料ラックの剛性(曲げ剛性) EI_r

- 解析条件(入力値)の考え方:

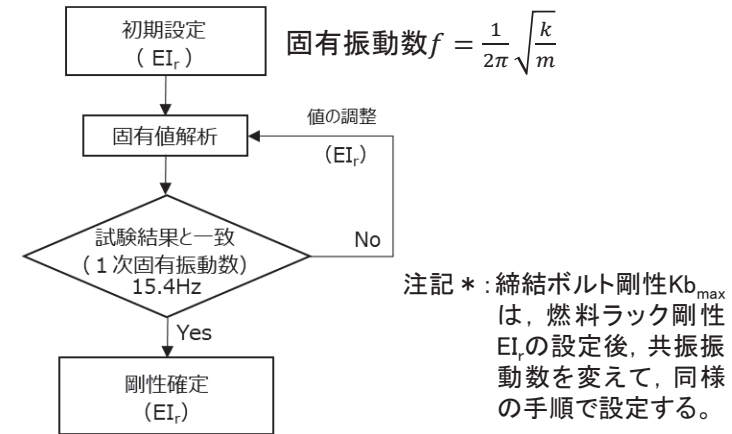
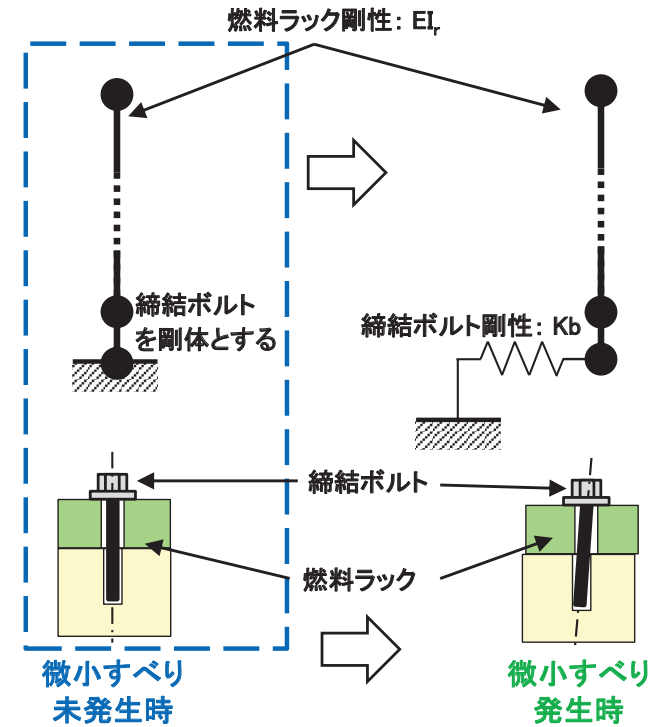
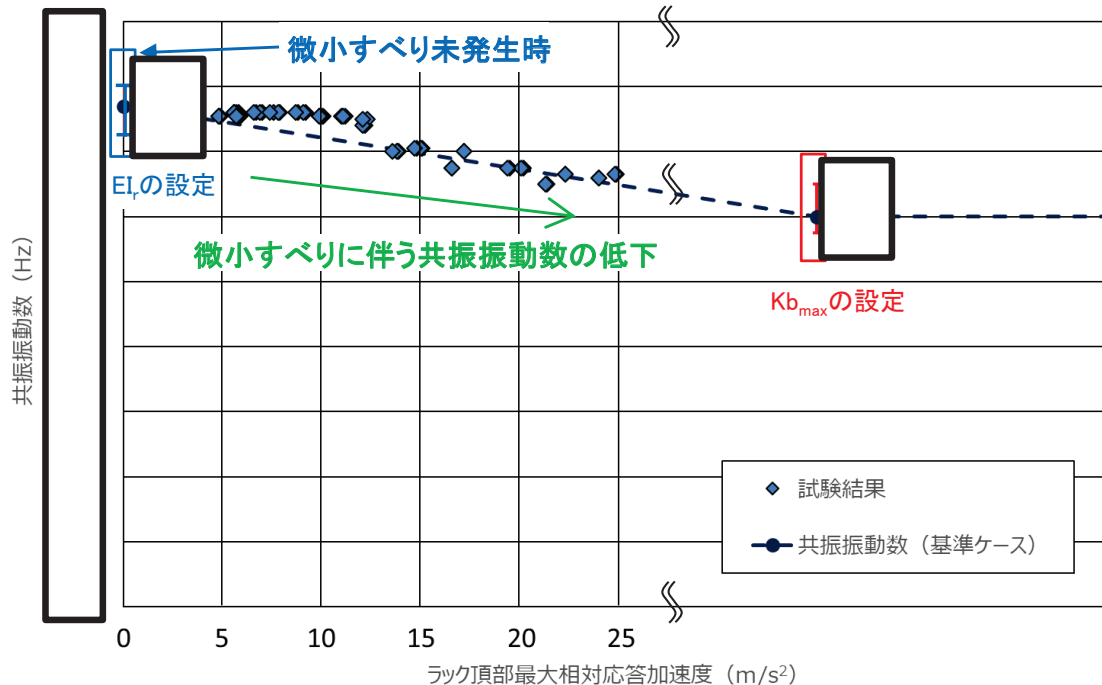
燃料ラックの剛性は、燃料ラックの微小すべり未発生時は締結ボルトを剛体として燃料ラック自体の剛性のみが作用し、燃料ラック下端の締結面の微小すべり発生時には、締結ボルトの剛性と合計した剛性(直列ばね)として作用する。また、燃料ラックの剛性は、試験結果の共振振動数を考慮し、微小すべり未発生時において設定する(右図)。

- 入力値の変動範囲:

加振試験結果の全体的な傾向は、応答加速度の増加につれて発生する微小すべりに伴い共振振動数が低下傾向を示す(下図)。微小すべり未発生時(応答加速度ゼロ)の共振振動数は、加振試験結果の全体的な傾向(下図点線)に対する振れ幅を考慮して、上限値 、下限値 の変動範囲を設定した。

- 入力値の設定(基準ケース):

燃料ラックの剛性 EI_r は、試験結果との整合性を考慮して、燃料ラックの共振振動数が となる と設定した。



燃料ラック剛性 EI_r の設定フロー*

4. 指摘事項①-2に対する回答(5/7)

【減衰定数の詳細解析に係る解析条件(入力値)の妥当性】

d. 締結ボルト剛性 Kb_{max}

- 解析条件(入力値)の考え方:

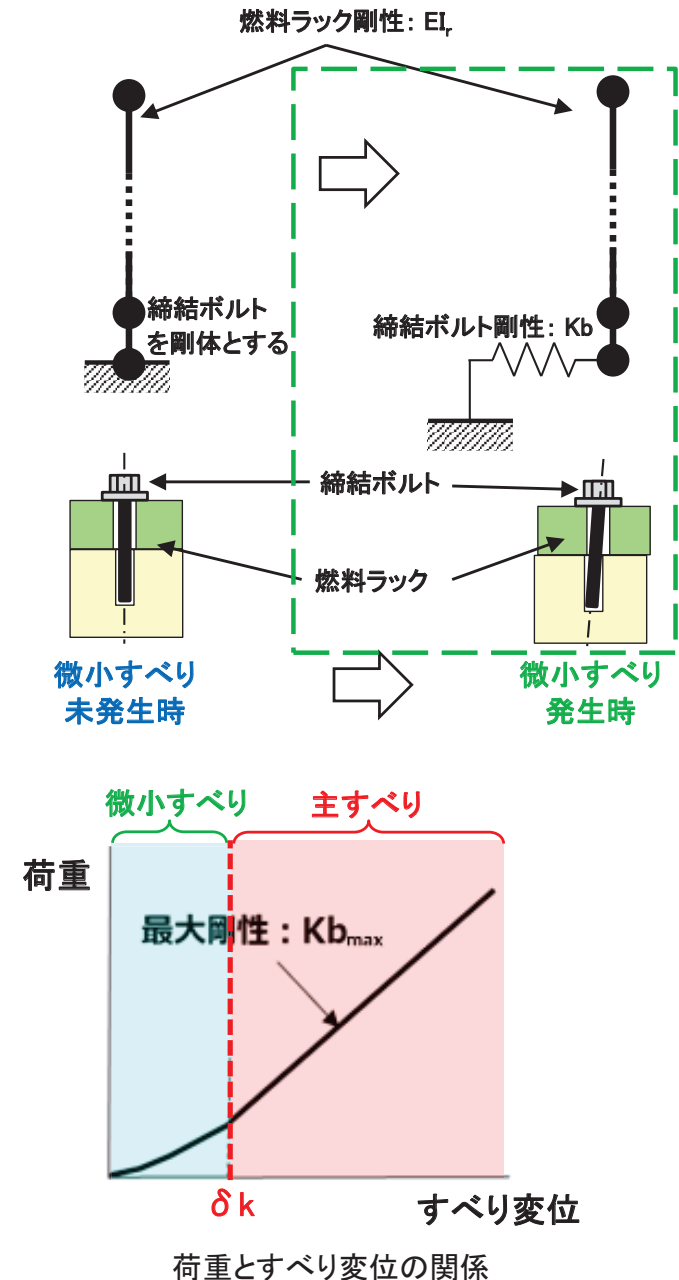
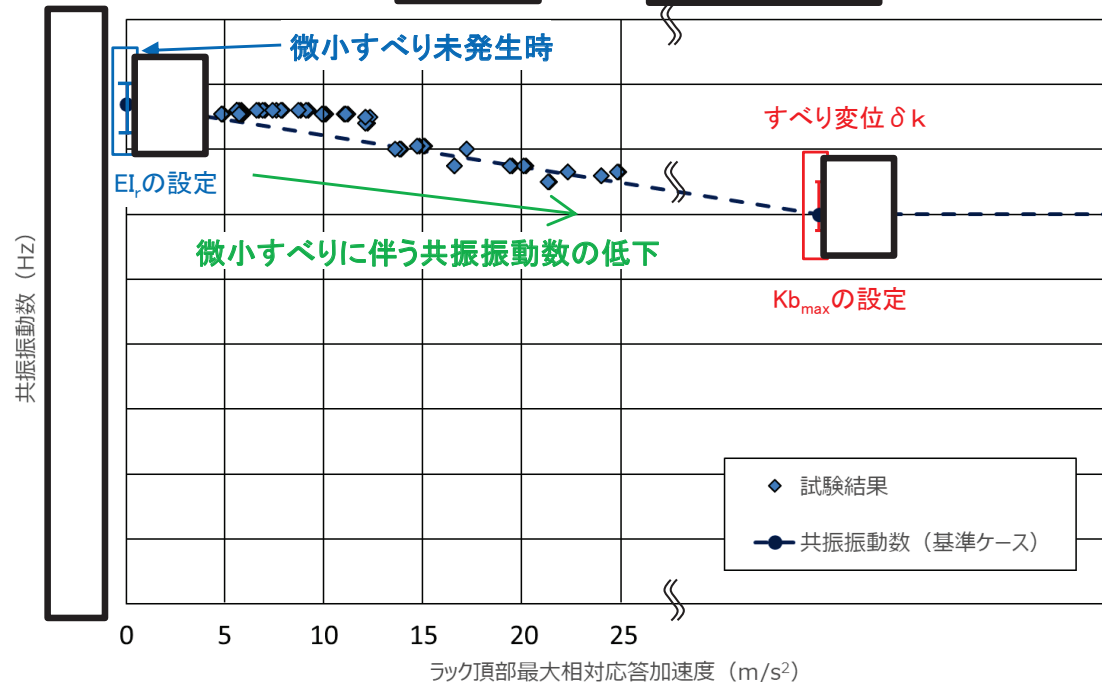
締結ボルトの剛性は、燃料ラックの微小すべり未発生時は剛体として扱い、燃料ラック下端の締結面の微小すべり発生時には、燃料ラックの剛性と合計した剛性(直列ばね)として作用する(右図)。

- 入力値の変動範囲:

加振試験結果の全体的な傾向として、応答加速度の増加につれて発生する微小すべりに伴い共振振動数が低下傾向を示す(下図)。微小すべり発生時の共振振動数は、締結ボルトばね剛性の振幅依存性を定義する最大変位 δk 以上のすべり変位で一定とし、加振試験結果の全体的な傾向(下図点線)に対する振れ幅を考慮して、上限値 、下限値 の変動範囲を設定した。

- 入力値の設定(基準ケース):

締結ボルト剛性 Kb_{max} は、試験結果との整合性を考慮して、すべり変位が δk 以上となる領域での共振振動数が となる に設定した。

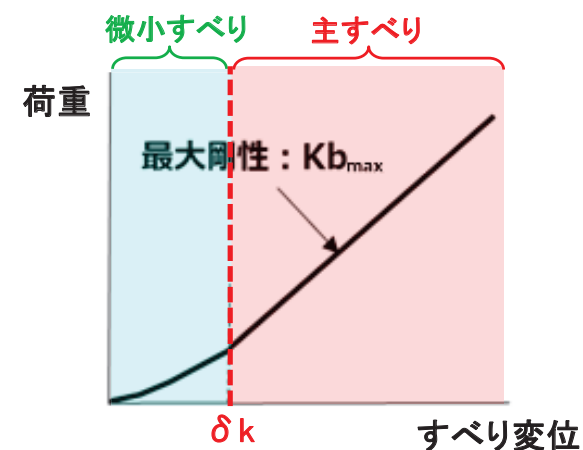
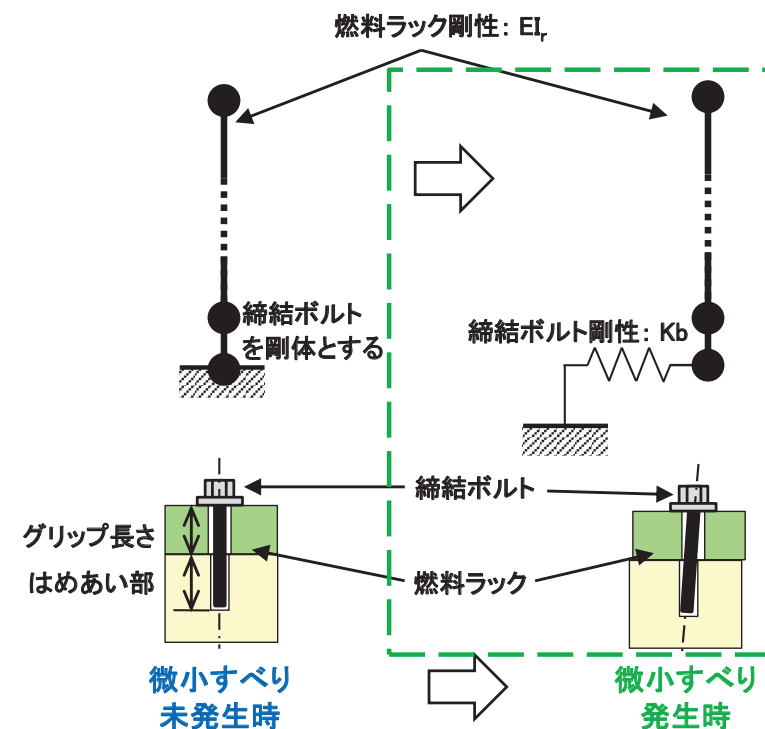


4. 指摘事項①-2に対する回答(6/7)

【減衰定数の詳細解析に係る解析条件(入力値)の妥当性】

e. 締結ボルトばね剛性の振幅依存性を定義する最大変位 δk

- 解析条件(入力値)の考え方:
締結ボルトの締結部におけるすべり変位は、燃料ラック下部における締結ボルトの傾きによる水平方向変位を考慮する。
- 入力値の変動範囲:
締結ボルトのはめあい部では、外径公差(両側隙間の平均(0.338mm))の隙間によって締結ボルトが傾くことが想定される。この締結ボルトの傾き及び締結部のグリップ長さ(61.5mm)を考慮すると、締結ボルトの頭部下面における水平方向変位量は、最大 となるため、これを上限値とした。また、はめあい部には外径公差が必ず存在するが、極端なケースとして下限値は を設定した(右図)。
- 入力値の設定(基準ケース):
締結ボルトばね剛性の振幅依存性を定義する最大変位 δk は、上記の上限値が規格の公差に基づく標準的な値であること及び試験結果との整合性を考慮して、 と設定した。



荷重とすべり変位の関係

4. 指摘事項①－2に対する回答(7/7)

【減衰定数の詳細解析に係る解析条件(入力値)の妥当性】

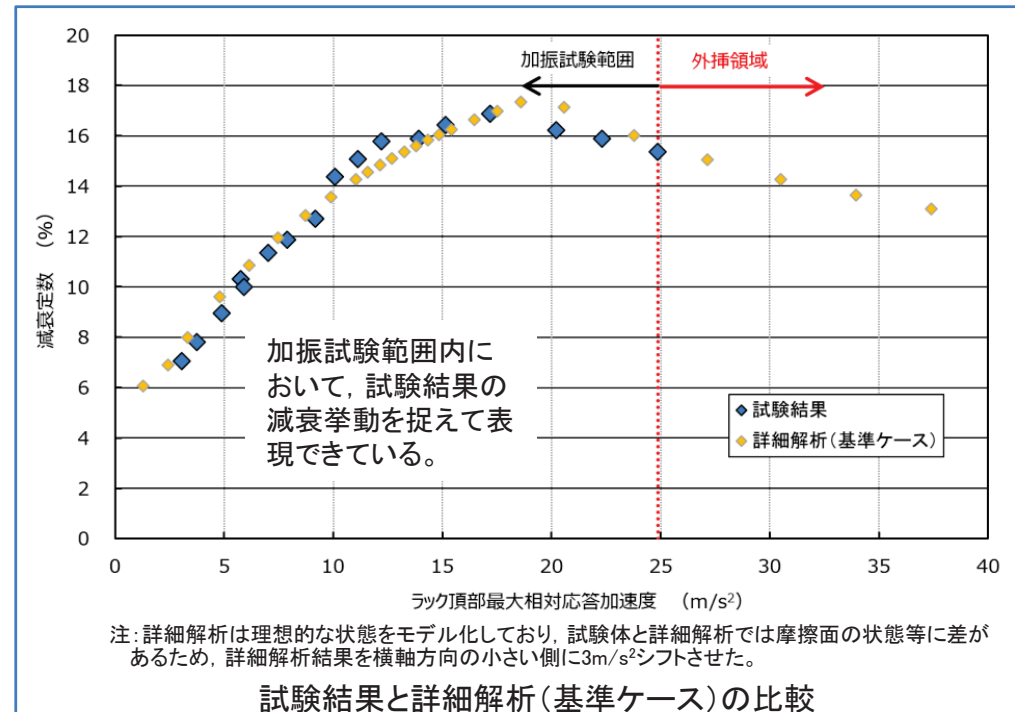
(3) 詳細解析の解析条件(入力値)の妥当性

- 詳細解析の解析条件(入力値)のうち、試験条件等から一意に定まるもの(10項目)については、理論式、燃料ラックの構造及び試験結果に基づき設定する入力値である。
- また、試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)については、入力値が変動し得るものであり、試験結果との整合性を考慮し現実的に取り得る範囲内で入力値(基準ケース)を設定している。(下表)
- 減衰定数の詳細解析には、減衰メカニズム(構造減衰, 流体減衰, 摩擦減衰)を考慮した解析モデル*に上記の解析条件(入力値)を適用している。(下図)

その結果は、加振試験範囲内において、試験結果の減衰挙動を捉えて表現できており、その外挿領域においても減衰挙動を概ね表現できているものと考えられることから、解析条件(入力値)は妥当と判断する。

試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)

| 記号 | 解析条件 (入力値) | 単位 | 基準ケース | 変動範囲 | |
|---------------|--------------------------|-----------------|-------|------|-----|
| | | | | 下限値 | 上限値 |
| $F_{b_{max}}$ | ボルト締結面摩擦力 | N | | | |
| δf | 摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位 | mm | | | |
| $K_{b_{max}}$ | 締結ボルト剛性 | N/m | | | |
| 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 | mm | | | |
| EI_r | 燃料ラックの剛性(曲げ剛性) | Nm ² | | | |



注記*: 今回の解析モデルでは、加振試験で接触痕が確認されなかったため衝突減衰はモデル化していない。加振試験の外挿領域においては、応答加速度(応答変位)が更に大きくなると、衝突減衰によって燃料ラックの減衰定数が大きくなると考えられる。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

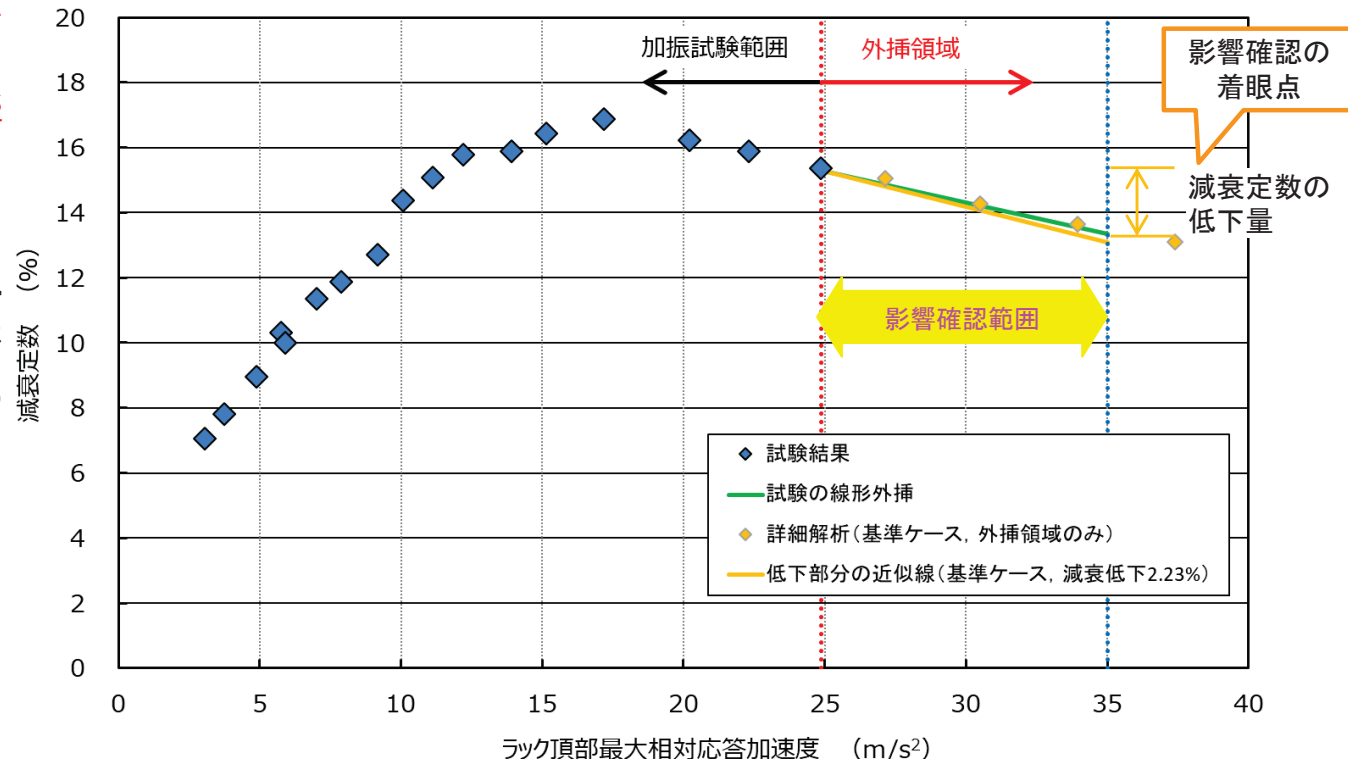
5. 指摘事項①-3に対する回答(1/2)

【減衰定数の詳細解析に係る影響検討】

(1) 解析条件(入力値)を変動させた場合の減衰定数への影響確認方針

- 試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)については、現実的に取り得る範囲内で入力値を変動させて詳細解析を実施し、加振試験の外挿領域における減衰定数に与える影響(減衰定数の低下傾向及び低下量)を確認する。
- 影響確認に適用する入力値は、前頁で整理した変動範囲の上限値及び下限値とする。なお、締結ボルトばね剛性の振幅依存性を定義する最大変位 δk は、基準ケースが上限値であるため、上限値と下限値の中間値を上限値とする。
- **影響確認の着眼点は、加振試験の外挿領域における燃料ラックの S_s 応答加速度を考慮した影響確認範囲* に対する減衰挙動であるため、影響確認範囲における減衰定数の低下量を算定・比較する。**
- 減衰定数の低下量は、各入力値に対する詳細解析結果を用いて影響確認範囲を直線近似して算出する(右図参照)。

注記* : 減衰定数の低下量を保守的に算定するため、加振試験の最大応答加速度(約 25m/s^2)を始点とし、 S_s 応答加速度の最大値(約 32m/s^2)よりも大きな加速度(35m/s^2)までの範囲とした。



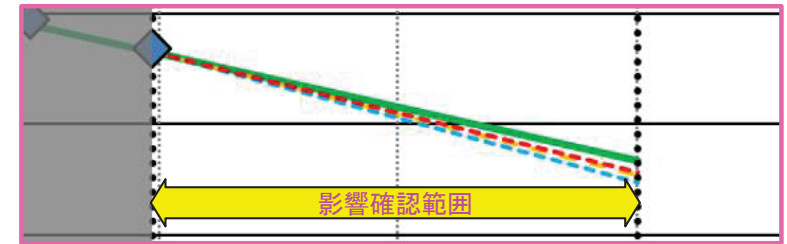
減衰定数-応答加速度の関係(外挿領域における減衰定数の低下量)

5. 指摘事項①-3に対する回答(2/2)

【減衰定数の詳細解析に係る影響検討】

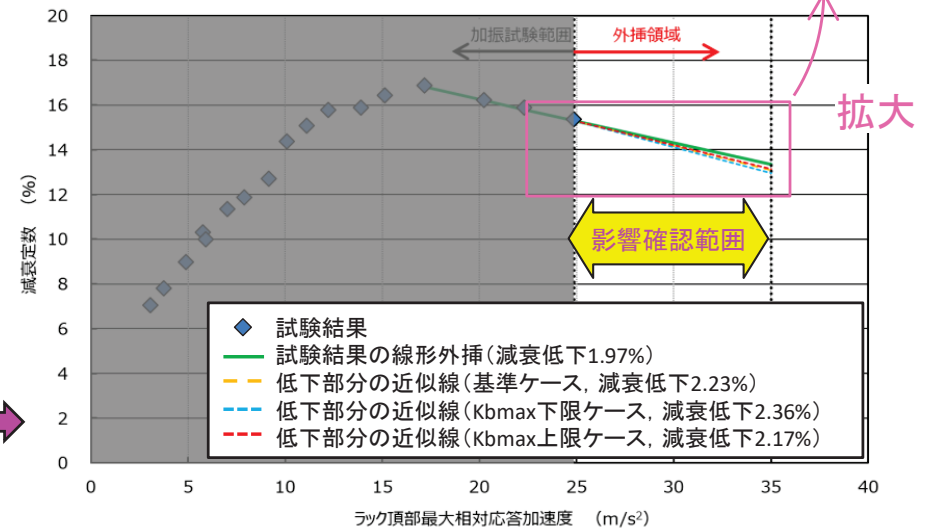
(2)解析条件(入力値)を変動させた場合の減衰定数への影響確認結果(まとめ)

- 試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)について, 入力値(基準ケース)を変動させた場合(影響確認ケース)の減衰定数の影響確認結果を下表に示す(詳細は別紙3参照)。
- 影響確認ケースの減衰定数は, 基準ケースと同様に緩やかな低下傾向(急減しないこと)を示し, 低下量は最大2.36%であった。これは, 基準ケースの低下量(2.23%)及び試験結果の外挿により算定した減衰定数の低下量(1.97%)と同程度であることを確認した。
- 以上のことから, 試験結果の外挿により算定した減衰定数(緑線)は, 外挿領域における燃料ラックの減衰挙動を表現できているものと判断した。



減衰定数の影響確認結果(まとめ)

| 解析条件(入力値) | | 基準ケース | 影響確認ケース | | 減衰低下量 |
|-------------------|--------------------------|-------|---------|-----|-------|
| | | | 下限値 | 上限値 | |
| Fb _{max} | ボルト締結面摩擦力 | | | | 2.19% |
| | | | | | ~ |
| δf | 摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位 | | | | 2.25% |
| | | | | | 2.02% |
| Kb _{max} | 締結ボルト剛性 | | | | 2.15% |
| | | | | | 2.17% |
| 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 | | | | 2.36% |
| | | | | | 0.81% |
| EI _r | 燃料ラックの剛性 | | | | 1.67% |
| | | | | | 2.12% |
| | | | | | 2.35% |



締結ボルト剛性Kb_{max}の入力値を変動させた場合の減衰定数算定結果
 ⇒ 減衰定数の低下量: 2.36%(下限ケース)

6. 指摘事項②に対する回答(1/2)

【設計用減衰定数設定の妥当性】

(1) 女川2号機の燃料ラックに対する設計用減衰定数設定の考え方

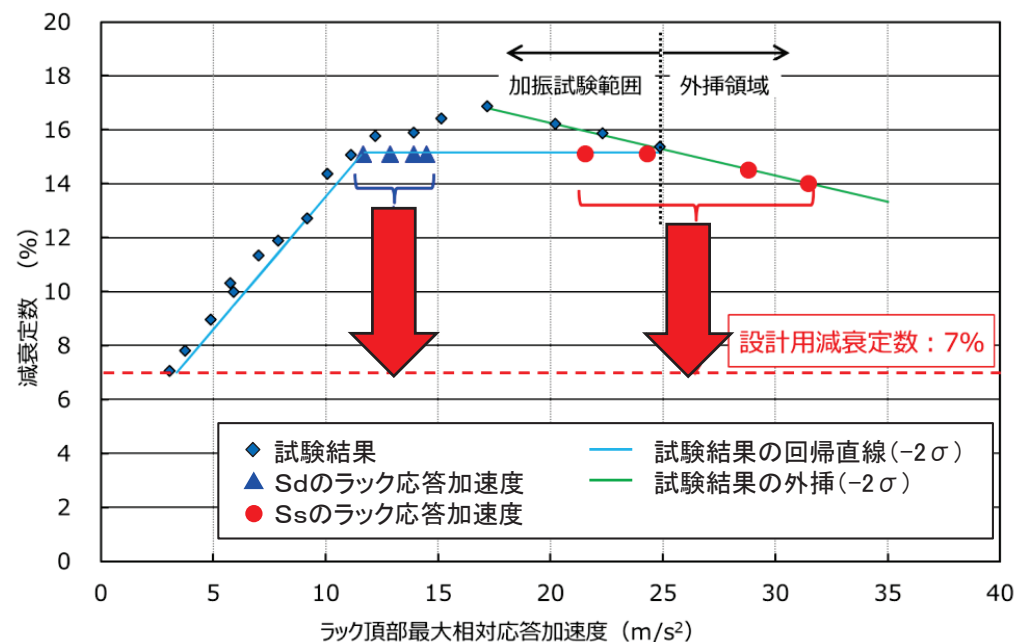
- 今回工認では、女川2号機の燃料ラックの試験結果及び減衰要因を考慮した解析的な確認を加え、試験範囲及び外挿領域の減衰定数を算定した。その上で設置許可段階の考え方を踏襲して、試験結果のばらつき及び外挿領域における緩やかな低下傾向等に対する設計余裕の確保と、耐震設計の簡便さの観点から設計用減衰定数を設定している。

具体的には、以下の通り。

- 燃料ラックの試験及び試験結果の外挿により試験範囲及び外挿領域における減衰定数を取得した。
- 外挿領域における減衰定数については、試験体構造及び燃料ラックの減衰メカニズム(構造減衰, 流体減衰, 摩擦減衰)を考慮した詳細解析により適用性を確認した。なお、外挿領域においては減衰定数が急減しないものの、緩やかな低下傾向を示すことを解析的にも確認した。
- 設計用減衰定数の設定に当たっては、試験結果のばらつき及びSd応答範囲の一部が減衰定数が増加する領域に掛かることや外挿領域の低下傾向を考慮し、試験範囲及び外挿領域における減衰定数の下限値より十分低く設定することで設計余裕を確保する。また、耐震設計の簡便さも踏まえて、弾性設計用地震動Sd及び基準地震動Ssに対して、**外挿領域を含めて一律7%(設置許可段階と同じ)と設定した。**

女川2号機の燃料ラックの設計用減衰定数

| 設計用減衰定数 | |
|------------|---------|
| 弾性設計用地震動Sd | 基準地震動Ss |
| 7% | |



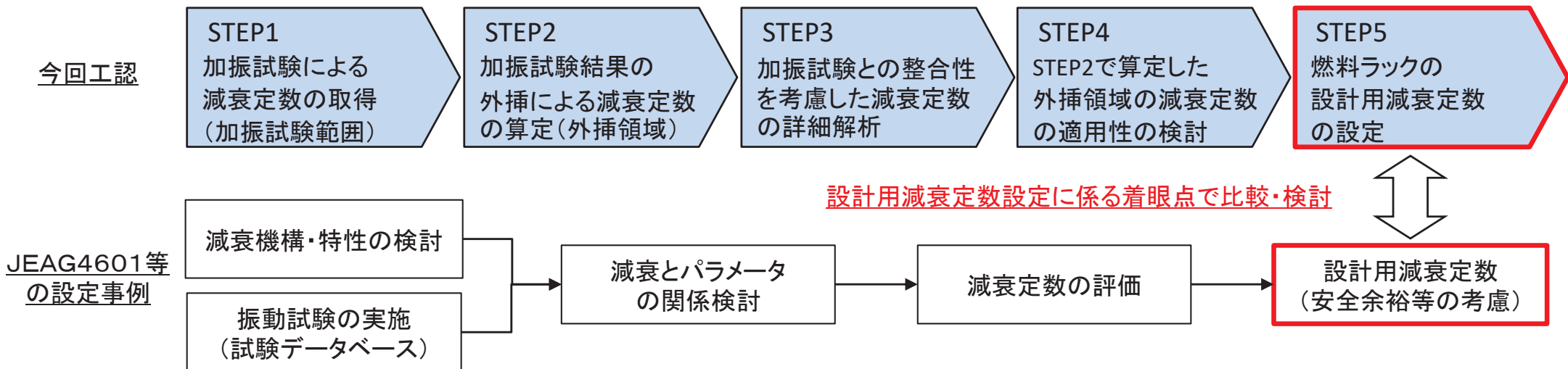
女川2号機の燃料ラックの設計用減衰定数設定の考え方

6. 指摘事項②に対する回答(2/2)

【設計用減衰定数設定の妥当性】

(2) 女川2号機の燃料ラックに対する設計用減衰定数設定の妥当性確認

- 機器・配管系の設計用減衰定数が規定されるJEAG4601等には、それらを規定した際の設定事例が記載されていることから、これを考慮して改めて女川2号機の燃料ラックに対する設計用減衰定数設定の妥当性を確認した。
- JEAG4601等における設定事例では、対象設備の減衰機構・特性の検討、振動試験の実施、減衰とパラメータの関係検討等を踏まえ、減衰定数を評価した上で、安全余裕等を考慮して設計用減衰定数を設定する手順となっており、今回工認における燃料ラックの設計用減衰定数設定に係る検討手順とも概ね整合している。
- このため、設計用減衰定数設定に係る4項目(① 減衰定数の取得方法、② 減衰定数とパラメータの相関関係、③ 減衰定数に対する余裕の取り方、④ 対象設備の汎用性*)を着眼点として、JEAG4601等に規定される各種設備の設計用減衰定数の設定事例を調査・整理し、女川2号機の燃料ラックと比較・検討した。
- その結果、JEAG4601等に規定される各種設備の設定事例で同様の対応を行っているため、女川2号機の燃料ラックに対する設計用減衰定数の設定方法は妥当であると判断した(詳細は別紙4参照)。



今回工認及びJEAG4601等の設定事例における設計用減衰定数設定の検討

注記*: 構造・形状等に幅がある設備を汎用設備(例:空調用ダクト)、構造・形状等が限定された設備を固有設備(例:PWR蒸気発生器伝熱管)と定義する。

➤ 前回審査会合(第988回審査会合, 2021年7月6日)において, 女川2号機の燃料ラックの減衰定数に係る詳細解析(解析モデル, 解析条件及び減衰定数の算出方法)の妥当性及び設計用減衰定数設定の妥当性を整理して説明するよう指摘を受けたことに対し, 以下のとおり回答した。

- 解析モデルは試験体構造と燃料ラックの減衰メカニズム(構造減衰, 流体減衰, 摩擦減衰)及び流体-構造連成による応答低減効果を考慮して適切に設定した。解析条件(入力値)は試験結果との整合性を考慮して適切に設定した。また, 減衰定数の算出方法は燃料ラックの非線形特性を考慮してそれに適した応答倍率法を適用した。

その結果, 減衰定数の詳細解析は外挿領域を含めて減衰挙動が概ね表現できており, 妥当なものと判断した。

- 今回工認では, 女川2号機の燃料ラックに対する基準地震動 S_s の応答加速度が加振試験の範囲を超えること及び指摘事項に対する検討結果を踏まえ, 試験結果のばらつき及び外挿領域における緩やかな低下傾向等に対する設計余裕の確保と, 耐震設計の簡便さの観点から, 外挿領域を含めて, 設置許可段階と同じ一律7%の設計用減衰定数を設定した。
- 上記設計用減衰定数の設定については, JEAG4601等に設計用減衰定数が規定される各種設備の設定事例を調査・整理して女川2号機の燃料ラックと比較・検討した。

その結果, JEAG4601等に規定される各種設備の設定事例で女川2号機と同様の対応を行っているため, 女川2号機の燃料ラックに対する設計用減衰定数の設定方法は妥当なものと判断した。

(別紙)

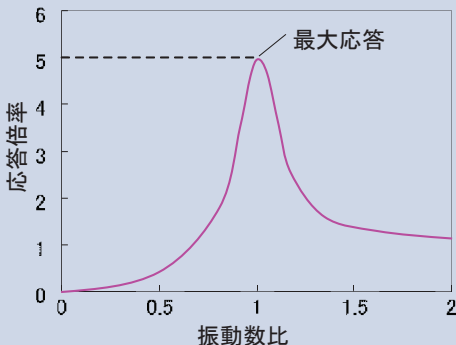
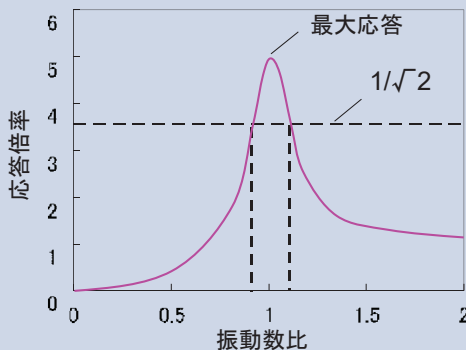
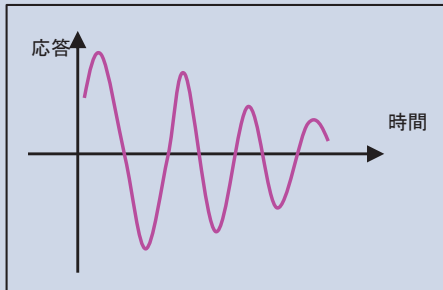
- 別紙1 応答倍率法による減衰定数の算出方法の妥当性
- 別紙2 減衰定数の詳細解析モデルの解析条件の詳細
- 別紙3 解析条件(入力値)を変動させた場合の減衰定数への影響確認結果
- 別紙4 各種設備の設計用減衰定数の設定事例との比較・検討による妥当性確認

(参考資料)

- 参考1 燃料ラックにおける減衰要因の抽出
- 参考2 各減衰要因の応答依存性の分類
- 参考3 燃料ラックの減衰要因と応答依存性
- 参考4 先行BWRプラント燃料ラックの減衰定数との比較

別紙1. 応答倍率法による減衰定数の算出方法の妥当性

- 加振試験や解析の結果から減衰定数を算出する際に一般的に使われる、応答倍率法、ハーフパワー法及び自由減衰法の3つの手法について、これらの特徴を比較・検討した。
- 女川2号機の燃料ラックは、非線形性のある振動系であるため、応答倍率法を適用することが妥当である。

| | 応答倍率法 | ハーフパワー法 | 自由減衰法 |
|------------|---|---|--|
| 手法の概要 | <ul style="list-style-type: none"> 掃引正弦波加振試験から得られる共振曲線から共振状態の応答倍率を求め、応答倍率から減衰を求める。  | <ul style="list-style-type: none"> 掃引正弦波加振試験から得られる共振曲線の共振振動数と共振曲線の幅（共振応答倍率の$1/\sqrt{2}$の位置における共振曲線の振動数幅）の比から減衰比を求める。  | <ul style="list-style-type: none"> 供試体の対象とするモードの共振振動数付近の正弦波加振で供試体を共振応答させ、振動台を急停止し供試体を自由振動させる。自由振動波形（減衰波形）から減衰比を求める。  |
| 手法の特徴 | <ul style="list-style-type: none"> 共振曲線のピーク位置を対象とするモードにおける線形状態（定常状態）とし、その応答倍率から等価線形な減衰を求める手法であり、非線形性のある振動系の減衰推定に適用可能である。 | <ul style="list-style-type: none"> 非線形性のある振動系のように共振曲線の形状が理論的な1質点系の形状と相違した場合では、減衰の推定誤差が大きくなる。 減衰が小さい場合の近似式から求める手法であるため、減衰が大きい場合には推定誤差が大きくなる。* | <ul style="list-style-type: none"> 振動台性能の影響を受ける場合がある。 減衰が大きな場合には、振動台停止とほぼ同時に供試体の応答振幅が低下してしまうため、安定した自由振動波形が得られず誤差が大きくなる。 振幅に応じて減衰が変化するような非線形な減衰の場合は誤差が大きくなる。 |
| 女川2号機への適用性 | <ul style="list-style-type: none"> 燃料ラックは非線形性のある振動系であるため、適用することにした。 | <ul style="list-style-type: none"> 燃料ラックは非線形性のある振動系であるため、適用しないことにした。 女川2号機の燃料ラックの減衰定数が大きいため、適用しないことにした。 | <ul style="list-style-type: none"> 燃料ラックの減衰は応答振幅の依存性があるため、適用しないことにした。 女川2号機の燃料ラックの減衰定数は大きいため、適用しないことにした。 |

詳細解析モデルの解析条件一覧

| 記号 | 解析条件 | 入力値 | 設定方法 |
|------------|--------------------------|-----|--|
| M_r | 燃料ラック質量 | | 一意に定まる 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 | | 一意に定まる 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 | | 一意に定まる 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 | | 一意に定まる 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 | | 一意に定まる 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 | | 試験結果との整合性を考慮して補正する 試験結果(微小すべり発生後の、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) | | 試験結果との整合性を考慮して補正する 試験結果(微小すべり発生前の、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) | | 一意に定まる 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) | | 一意に定まる 試験結果(水槽固有振動数)から設定。 |
| K_θ | 燃料ラック-燃料間の回転ばね | | 一意に定まる 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値を設定。 |
| Cr | 燃料ラックの構造減衰 | | 一意に定まる 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 | | 試験結果との整合性を考慮して補正する 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 | | 一意に定まる 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 | | 試験結果との整合性を考慮して補正する 摩擦力 Fb_{max} 以下で先行的に微小な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。 |
| 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 | | 試験結果との整合性を考慮して補正する 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。 |

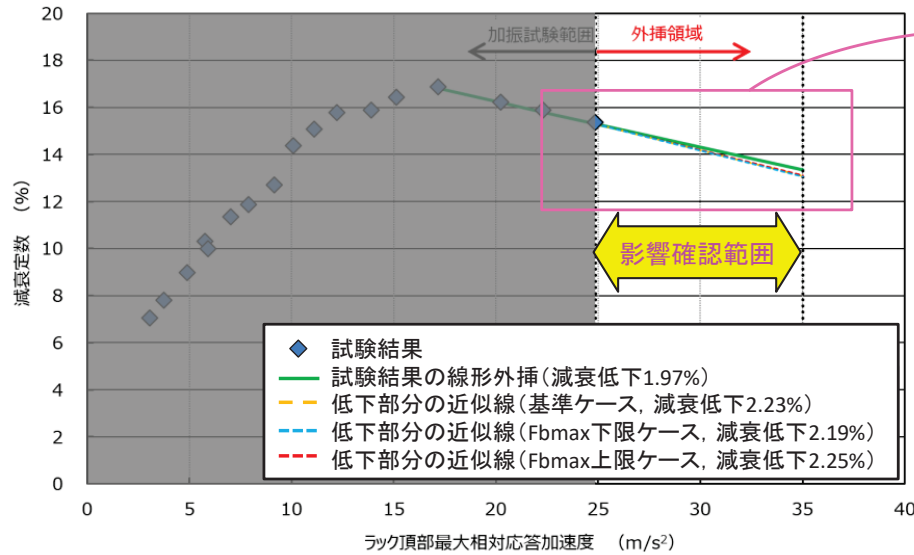
解析条件の入力値を変動させた場合の減衰定数への影響確認結果のまとめ

| 解析条件 | | 入力値 (基準ケース) | 減衰低下量 (基準ケース) | 入力値 (影響確認ケース) | | 減衰低下量 (影響確認 ケース) |
|------------|--------------------------|----------------|------------------|------------------|--------|------------------------|
| | | | | 下限 | 上限(上側) | |
| Fb_{max} | ボルト締結面摩擦力 | | 2.23% | | | 2.19% |
| | | | | | | ~ |
| δf | 摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位 | | | | | 2.25% |
| | | | | | | 2.02% |
| Kb_{max} | 締結ボルト剛性 | | | | | ~ |
| | | | | | | 2.15% |
| 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 | | | | | 2.17% |
| | | | | | | ~ |
| EI_r | 燃料ラックの剛性 | | | | | 2.36% |
| | | | | | | 0.81% |
| | | ~ | | | | |
| | | 1.67% | | | | |
| | | 2.12% | | | | |
| | | ~ | | | | |
| | | 2.35% | | | | |

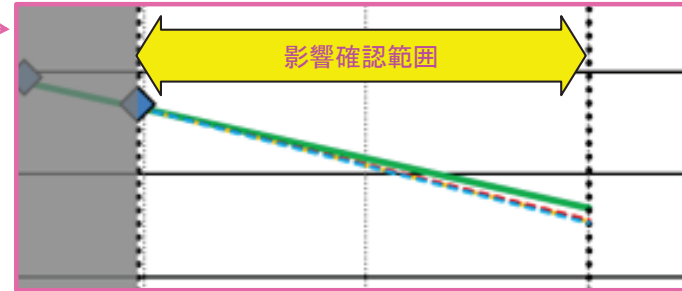
注記*1: 変動幅が小さいため、想定を超えた範囲を極端なケースとして設定している。

*2: 基準ケースが上限値のため、上限と下限の中間値を上側のケースとして設定している。

a. ボルト締結面摩擦力 $F_{b,max}$ の入力値を変動させた場合

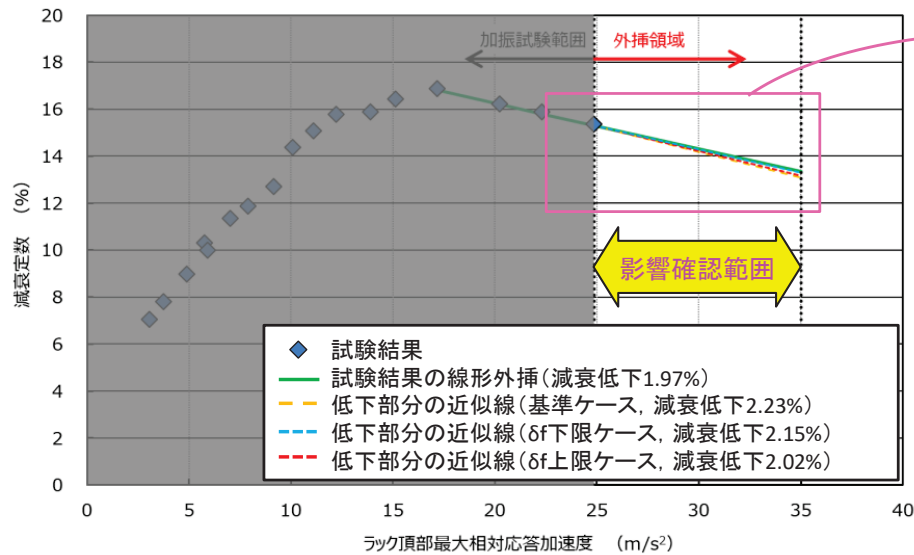


拡大

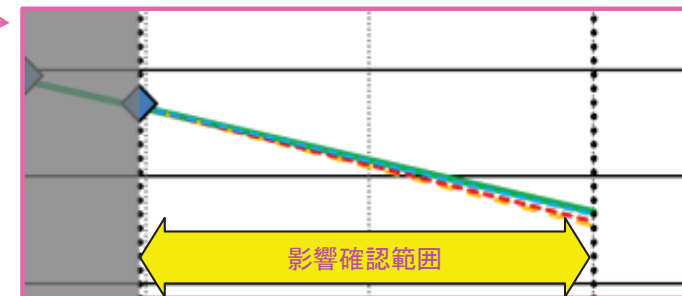


最大の減衰低下量: 2.25%(上限ケース)

b. 摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位 δf の入力値を変動させた場合

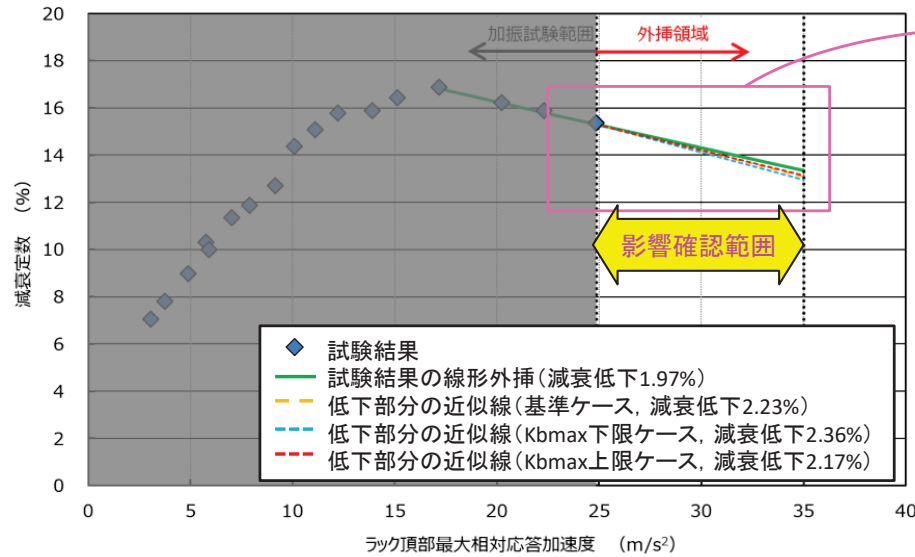


拡大

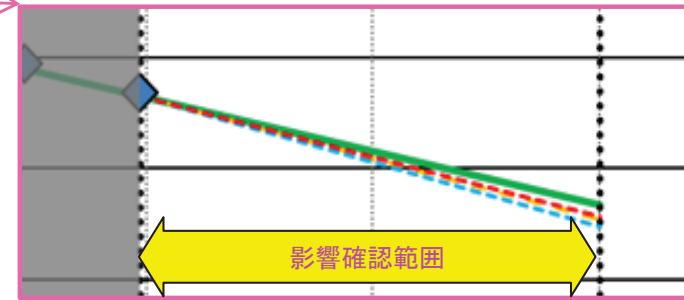


最大の減衰低下量: 2.23%(基準ケース)

c. 締結ボルト剛性 Kb_{max} の入力値を変動させた場合

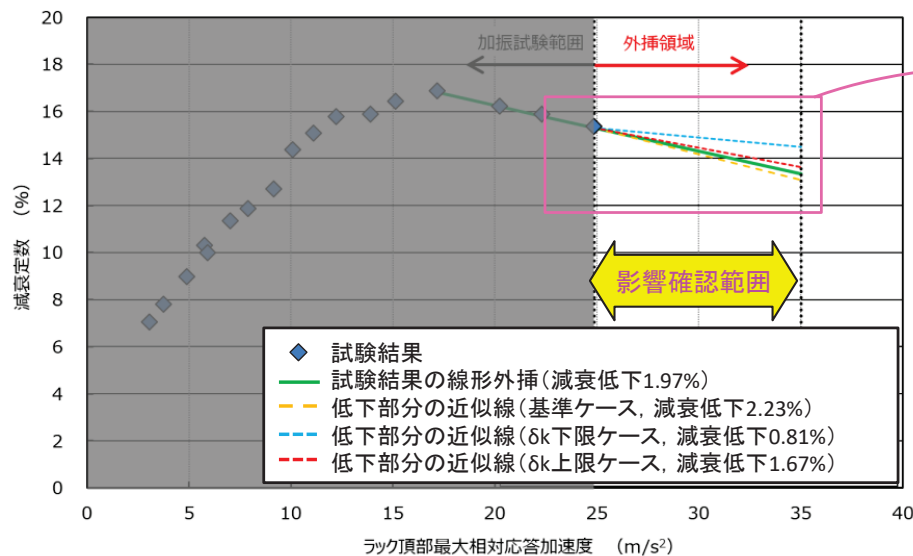


拡大

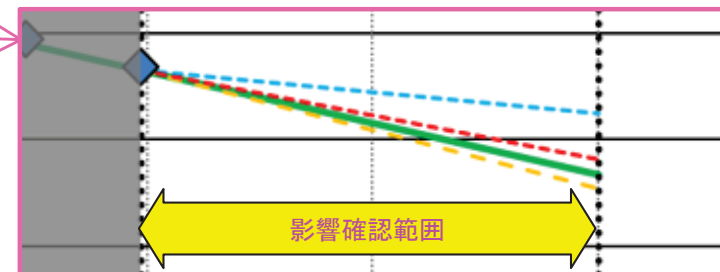


最大の減衰低下量: 2.36%(下限ケース)

d. 締結ボルト剛性の振幅依存性を定義する最大変位 δk の入力値を変動させた場合

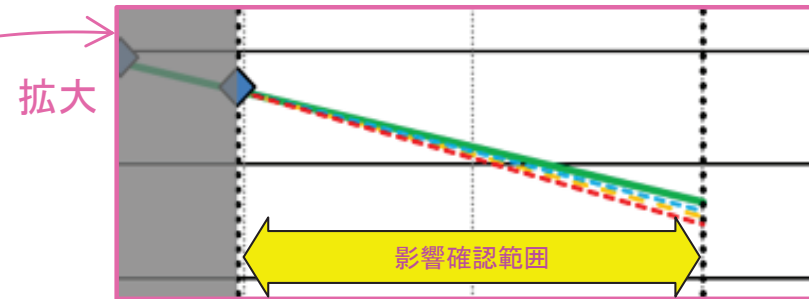
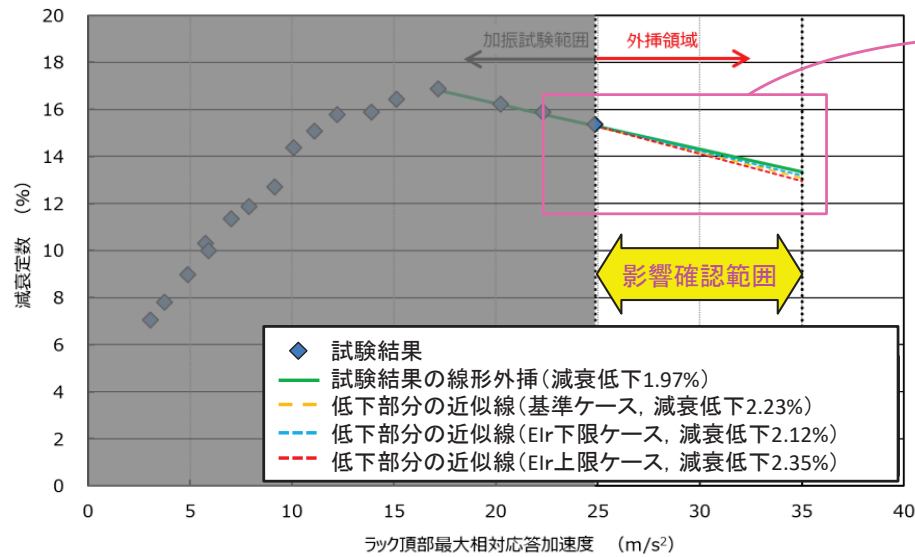


拡大



最大の減衰低下量: 2.23%(基準ケース)

e. 燃料ラックEIrの剛性解析条件の入力値を変動させた場合



最大の減衰低下量: 2.35%(上限ケース)

(1) JEAG4601等に規定される各種設備の設計用減衰定数の設定事例の調査・整理結果

➤ 設計用減衰定数設定にあたっての着眼点(4項目)について, JEAG4601等に規定される各種設備の設計用減衰定数の設定事例に対する調査・整理を行った結果, 以下の通り, いくつかの対応方法等があり, 女川2号機と同等の内容が含まれることを確認した。

- ① 減衰定数の取得方法: 加振試験, **加振試験及び試験結果の外挿**, 加振試験及び減衰推算法(他手法の組合せ)といった方法がある。
- ② 減衰定数とパラメータの相関関係: **減衰定数がパラメータ(応答振幅等)に依存**する設備がある(一律またはパラメータ依存の設計用減衰定数を設定)。
- ③ 減衰定数に対する余裕の取り方: 下限値, **下限値に一定の余裕を見込む**等の方法がある。
- ④ 対象設備の汎用性: 固有設備と汎用設備がある(汎用設備の場合, 構造・形状等の幅を考慮して, 減衰定数の下限値に一定の余裕を見込む傾向あり)。

JEAG4601等に規定される各種設備の設計用減衰定数の設定事例の調査・整理結果

: 女川2号機と同等の設定事例

| 対象設備 | 設計用減衰定数設定にあたっての着眼点(4項目) | | | | 設計用減衰定数の設定結果 | |
|----------------------------|--|------------------------|---------------------------------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | ①減衰定数の取得方法 | ②減衰定数とパラメータの相関関係 | ③減衰定数に対する余裕の取り方 | ④対象設備の汎用性*1 | 減衰定数(下限値) | 設計用減衰定数の設定値 |
| 空調用ダクト, ケーブルトレイ, 電気盤 | 加振試験 | 明確な相関関係なし | 下限値に一定の余裕を見込む | 汎用設備 | 2.8% 8% 4.3% | 2.5% 5% 4% |
| PWR蒸気発生器伝熱管 | 加振試験 | 明確な相関関係なし | 下限値 | 固有設備 | 8.0%(面外方向) 15.0%(面内方向) | 8.0%(面外方向) 15.0%(面内方向) |
| PWR燃料集合体 | 加振試験 | 相関関係あり(応答振幅依存) | 記載なし | 固有設備 | ・応答振幅依存 記載なし | ・応答振幅依存 10~15% |
| PWR使用済燃料貯蔵ラック (キャン型の例) | 加振試験 | 相関関係あり(振動数依存) | 下限値 及び 下限値に一定の余裕を見込む | 固有設備 | ・振動数依存 8%(<20Hz) 5%(20Hz~30Hz) | ・振動数依存 7%(<20Hz) 5%(20Hz~30Hz) |
| クレーン類 (BWR燃料取替機の例) | 加振試験及び 試験結果の外挿 | 相関関係あり(応答振幅依存) | 統計処理 | 固有設備*2 | ・応答振幅依存 3.1% | ・一律 2.0% |
| 配管系 (Uボルト支持の例) | 加振試験及び 減衰推算法 (他手法の組合せ) | 相関関係あり(応答振幅依存) | 下限値に一定の余裕を見込む | 汎用設備 | ・応答振幅依存 2.0% | ・一律 2.0% |
| 女川2号機 使用済燃料貯蔵ラック | 加振試験及び 試験結果の外挿 (解析的な確認) | 相関関係あり(応答加速度依存) | 下限値(回帰直線に -2σ考慮)に一定の余裕を見込む | 固有設備 | ・応答加速度依存 14%(Sd,Ss) | ・一律 7% |

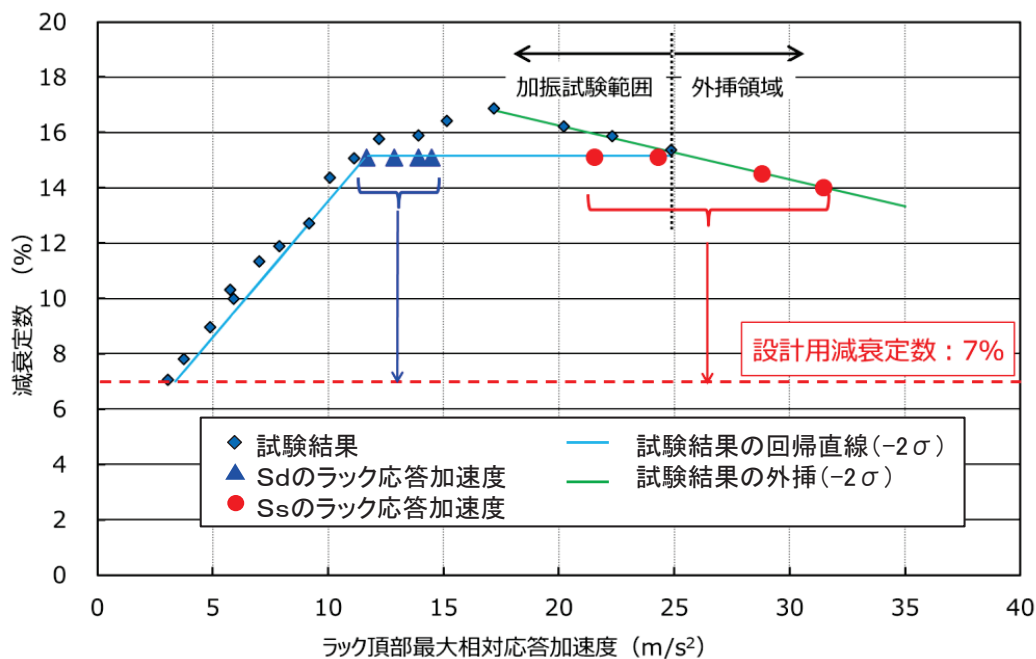
注記*1: 構造・形状等に幅がある設備を汎用設備(例:空調用ダクト), 構造・形状等が限定された設備を固有設備(例:PWR蒸気発生器伝熱管)と定義する。

*2: 本設定事例は固有設備であるBWR燃料取替機を対象としている。

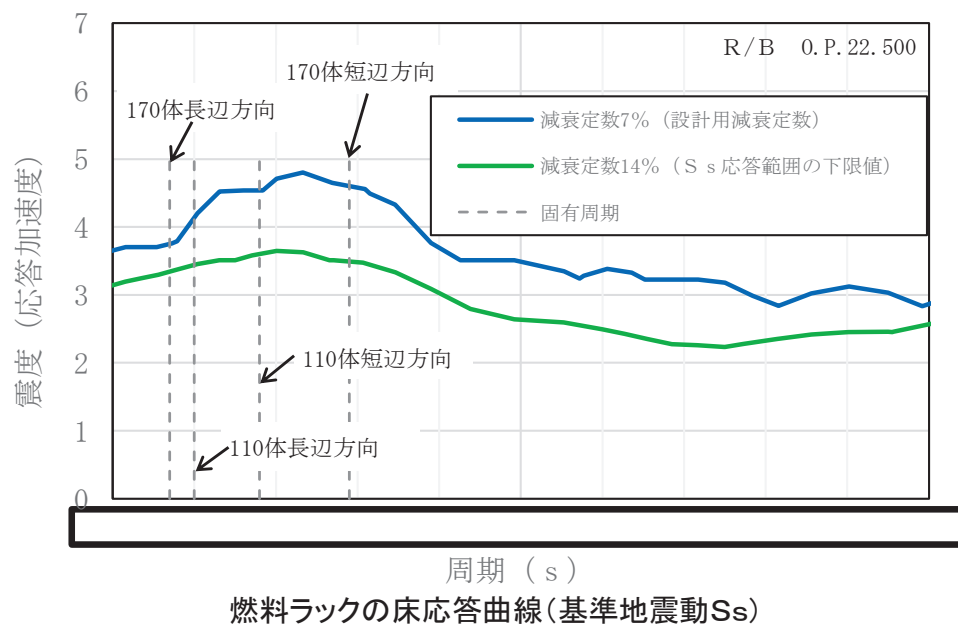
(2) 女川2号機の燃料ラックとJEAG4601等の設計用減衰定数設定事例との比較を踏まえた検討結果

➤ 設計用減衰定数設定にあたっての着眼点(4項目)について、以下に示す通り、JEAG4601等に規定される各種設備の設定事例で同様の対応を行っているため、女川2号機の燃料ラックに対する設計用減衰定数の設定方法は妥当であると判断した。

- ① 減衰定数の取得方法：
 - ・ 女川2号機の燃料ラックは、クレーン類と同様、試験及び試験結果の外挿(解析的な確認含む)によって減衰定数を取得している。
- ② 減衰定数とパラメータの相関関係：
 - ・ 女川2号機の燃料ラックは、クレーン類と同様、減衰定数とパラメータ(応答)に相関関係があるものの、設計用減衰定数は応答に依らず一律に設定している。
- ③ 減衰定数に対する余裕の取り方：
 - ・ 女川2号機の燃料ラックは、空調用ダクト等と同様、下限値(回帰直線に -2σ 考慮)に一定の余裕を見込んでいる。
 - ・ ここで、減衰定数(下限値)14%に対して十分低く設定すること(設計用減衰定数を7%に設定)によって、 S_s 評価に用いる燃料ラックの床応答曲線による応答加速度が1~3割程度大きくなる(保守的な評価)。(右下図)
- ④ 対象設備の汎用性：
 - ・ 女川2号機の燃料ラックは、PWR使用済燃料貯蔵ラック等と同様の固有設備であり、汎用設備に比べて減衰定数のばらつきは小さいと考えられるものの、減衰定数の下限値に対して一定の余裕を見込んでいる。



女川2号機燃料ラックの設計用減衰定数の設定



燃料ラックの床応答曲線(基準地震動 S_s)

(3) JEAG4601等の設計用減衰定数設定事例

a. 空調用ダクトの例(JEAG4601-1991 追補版より引用, 一部加筆)

減衰定数の取得方法

減衰定数

減衰定数に対する余裕の取り方

設計用減衰定数の設定値

b. PWR蒸気発生器伝熱管の例(JEAC4601-2008より引用, 一部加筆)

減衰定数の取得方法

減衰定数に対する余裕の取り方

減衰定数

設計用減衰定数の設定値

出典1: 中村友道, 日下部隆也, 柴田碧, 原文雄, 加藤宗明, 辻倉米蔵「蒸気発生器U字型伝熱管群の高減衰性に関する実験研究」
日本機械学会論文集(C集)65巻637号
2: 社団法人 日本電気協会「水平・上下地震動に対する設計用減衰定数の検討に関する調査報告書」(平成11年3月)

c. PWR使用済燃料貯蔵ラック(キャン型)の例(JEAC4601 -2008より引用, 一部加筆)

減衰定数の取得方法

減衰定数

減衰定数に対する余裕の取り方

設計用減衰定数の設定値

出典1: 猫本義統, 中村友道, 佐藤郁夫, 奥野大作, 鶴一隆, 原文雄「PWR使用済燃料ラックの合理的な耐震設計手法の開発」
日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2002, Paper No.632 (2002)
2: 社団法人 日本電気協会「PWR使用済燃料貯蔵ラックの設計用減衰定数の適正化に関する調査報告書」(平成14年3月)

d. クレーン類(BWR燃料取替機)の例(JEAC4601 -2008より引用, 一部加筆)

減衰定数の取得方法

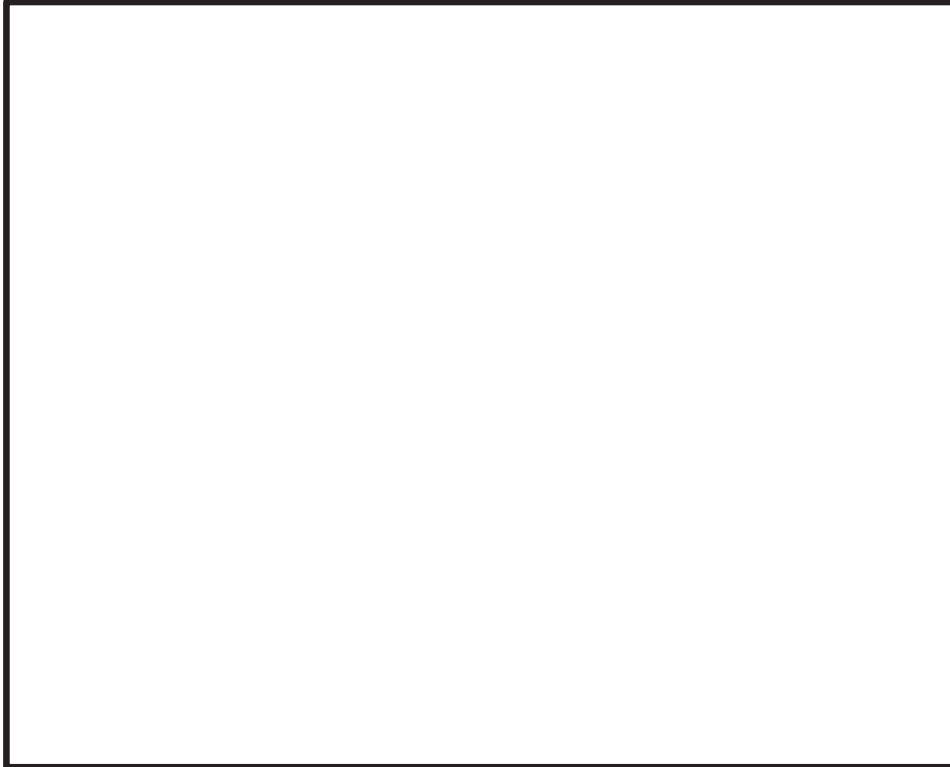
減衰定数

減衰定数に対する余裕の取り方

設計用減衰定数の設定値

e. 配管系(Uボルト支持)の例(JEAC4601 -2008より引用, 一部加筆)

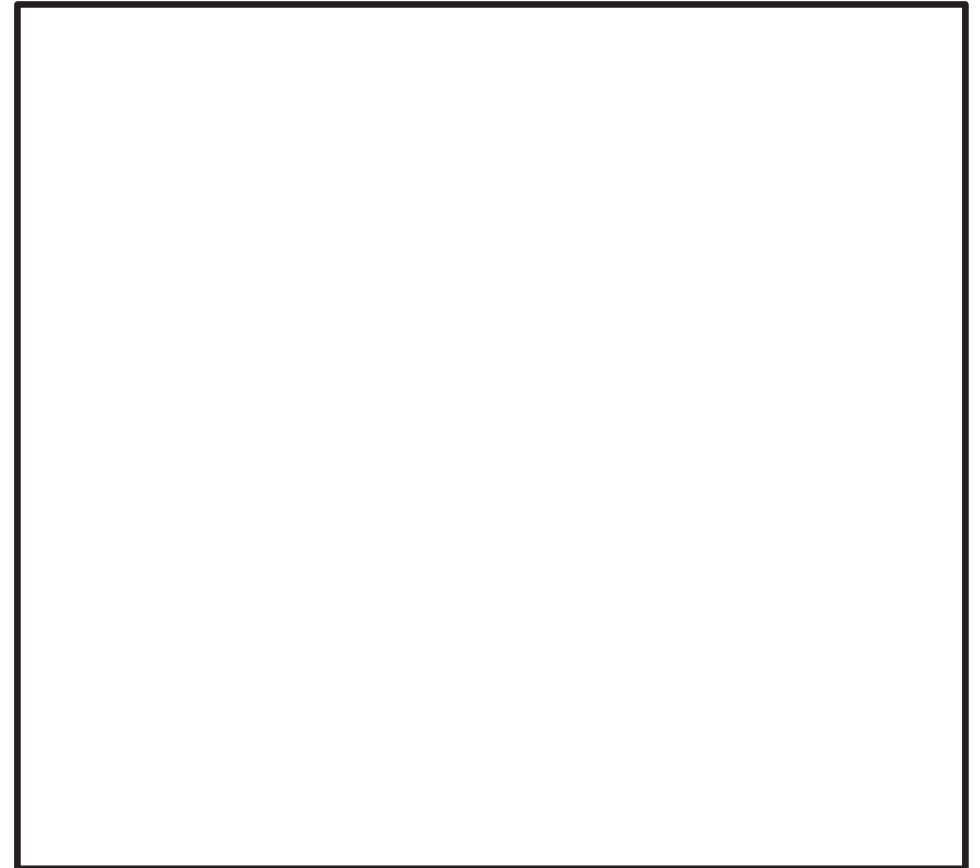
減衰定数の取得方法



減衰定数に対する余裕の取り方



減衰定数



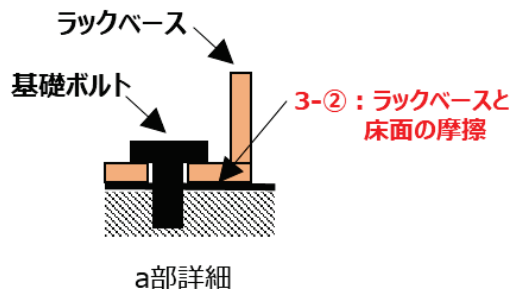
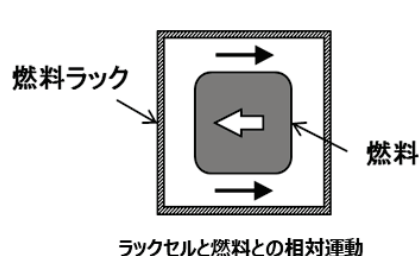
設計用減衰定数の設定値



➤ 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。

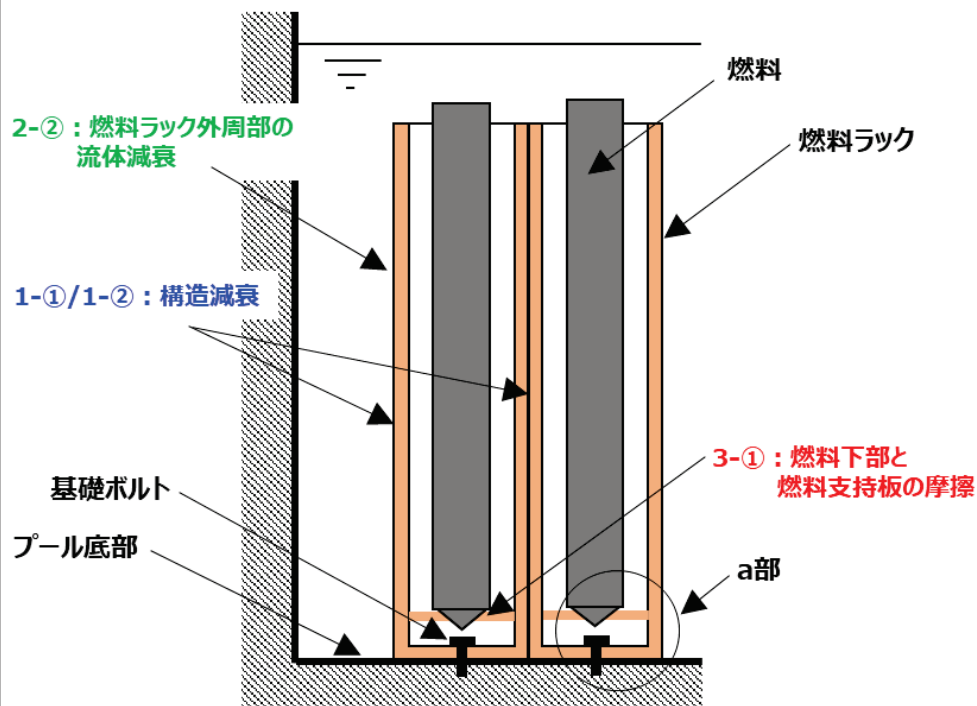
2-① : ラックセル内流動による流体減衰

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。

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

- また、減衰定数 ζ 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。

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

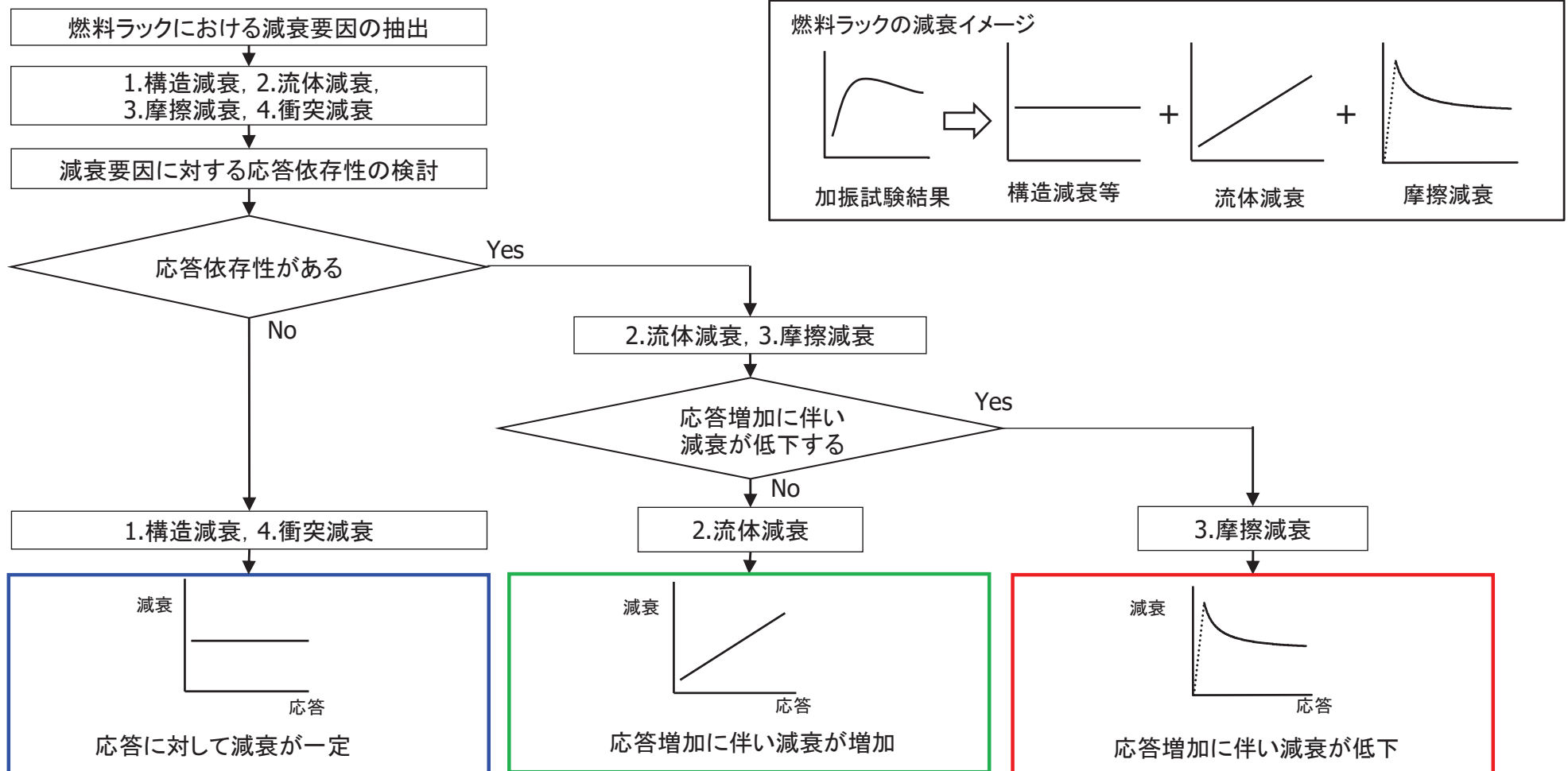
- したがって、流体-構造連成に関連する刺激関数 $\beta\phi$ と減衰定数 ζ (1自由度系の応答倍率 Q_1 に関連)は、各々独立した変数であるため、本検討では、流体-構造連成による応答低減効果を減衰として扱わない。

燃料ラックにおける減衰要因の抽出

【参考2】 各減衰要因の応答依存性の分類(1)

第988回審査会合(2021年7月6日)資料1-5抜粋

- 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

燃料ラックの減衰要因等に係る整理

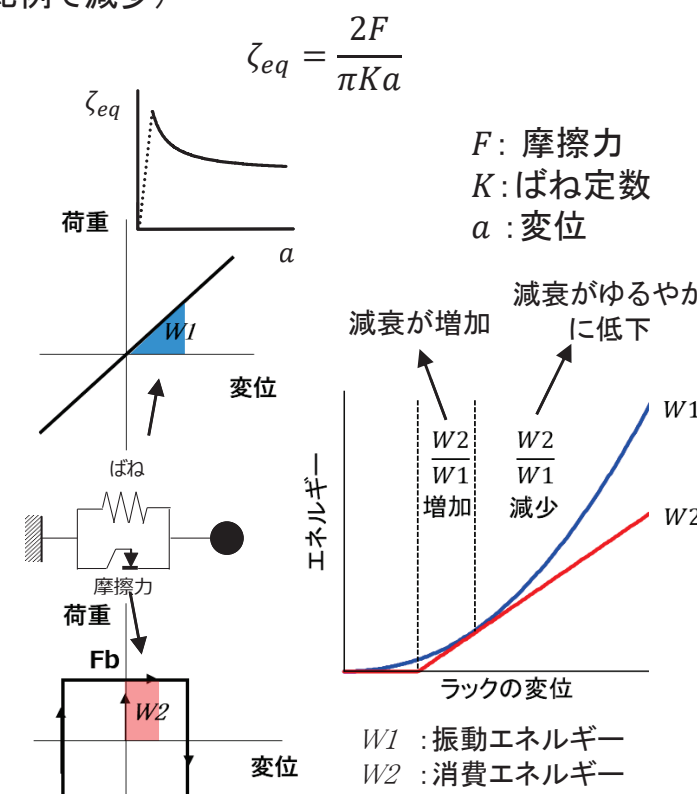
| 減衰要因 | 具体的要因 | 減衰の程度 | 詳細解析モデル |
|--------|-----------------------------------|--|---------|
| 1.構造減衰 | ①材料自体の減衰(内部減衰) | 加振試験結果から燃料ラックの応答がゼロの場合の減衰は約4%と想定される。 | ○ |
| | ②部材間(角管, 補強板)の摺動などによる減衰 | | |
| 2.流体減衰 | ①燃料ラック内に貯蔵された燃料(セル内流動)の流体抵抗力による減衰 | 燃料ラック内の狭い空間(セル内)における相対運動による流体減衰のため, 応答が大きくなるに従い, 減衰が増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。 | - |

➤ 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ζ_{eq}は変位によらず一定となり応答依存性はない。*1</p> <p style="text-align: center;">a a : 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ζ_{eq}は変位に比例して増加する。*1</p> $\zeta_{eq} = \frac{4C}{3\pi M} a$ <p style="text-align: center;">a</p> <p>C : 流体減衰の減衰係数 M : 質量 a : 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> |
| | ②燃料ラック外周部の流体抵抗力による減衰 | <p>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。</p> | |

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ζ_{eq}は変位に反比例して低下する。</p> <p>ただし、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ゆるやかに低下する。^{*2} (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> | <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($9.6 \times 10^5[N]$^{*4})に対して、試験燃料(30体)の自重($7.6 \times 10^4[N]$^{*5})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>F: 摩擦力 K:ばね定数 a:変位</p> <p>減衰が増加 減衰がゆるやかに低下</p> <p>エネルギー</p> <p>ラックの変位</p> <p>$W1$:振動エネルギー $W2$: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、$9.6 \times 10^5[N]$^{*4}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。^{*3}</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^{*6}。</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 = 9.6×10⁵ [N]

*5: (燃料質量×30体)×浮力×重力加速度= 7.6×10⁴ [N]

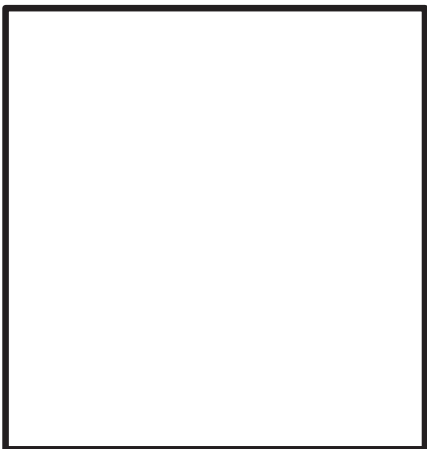
*6: 加振試験では接触痕が確認されず, 今回の詳細解析で衝突減衰はモデル化していないが, 加振試験の外挿領域において, 応答変位(応答加速度)が更に大きくなると, 衝突減衰によって大きな減衰効果を生じる。

- 先行BWRプラントにおける燃料ラックの加振試験による設計用減衰定数の設定事例があるため、燃料ラックの加振試験に係る実施内容について、女川2号機の燃料ラックと比較した。

燃料ラックの加振試験の比較結果

| | 先行BWRプラント | 女川2号機 |
|---------------------|-----------|--|
| 試験体の構造・型式, 貯蔵体数(配列) | | ・角管型: 30体(3×10) |
| 支持方式 | | ・ボルトによる床固定式 |
| 実機の貯蔵体数(配列) | | ・110体(10×11), 170体(10×17) |
| 加振方向 | | ・長辺方向 |
| 減衰定数の取得方法 | | ・加振試験及び試験データの外挿(解析的な確認含む) ・正弦波掃引加振に基づく応答倍率法 |
| 減衰定数とパラメータの相関関係 | | ・応答加速度依存 |
| 減衰定数に対する余裕の取り方 | | ・弾性設計用地震動Sd: 8%程度 ・基準地震動Ss: 7~8%程度 |
| 設計用減衰定数 | | ・弾性設計用地震動Sd: 7% ・基準地震動Ss: 7% |

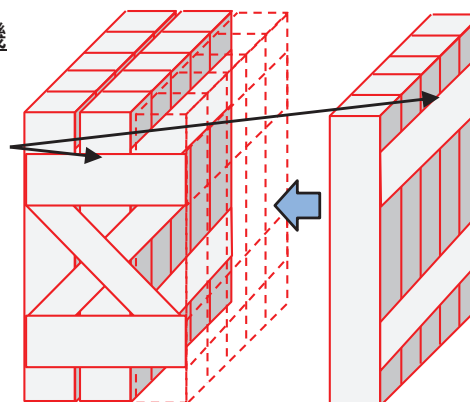
先行BWRプラント



出典: 工事計画に係る説明資料(機器・配管系の耐震性についての計算書等)
;KK7補足-028改1 2020年10月, 東京電力HD(株)

女川2号機
(角管型)

補強板と角管を溶接

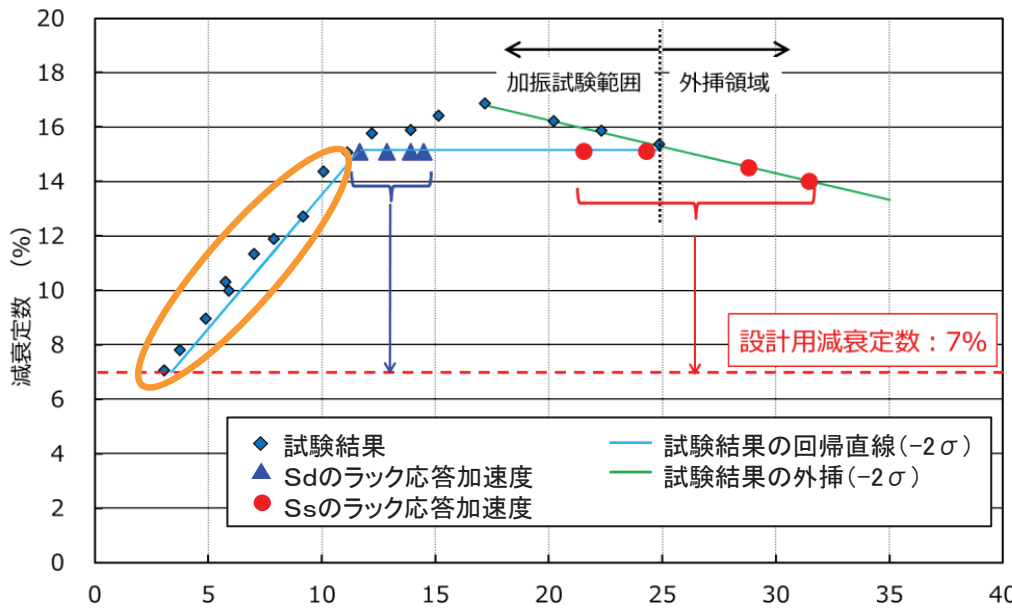


燃料ラックの構造概要

枠囲みの内容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。

- 先行BWRプラントの燃料ラックは、女川2号機と試験体の構造・型式、貯蔵体数、支持方式等が類似である。そのため、燃料ラックの減衰定数は、共に応答加速度と相関関係があり、燃料ラックの応答加速度が小さい範囲(橙色囲みの範囲)で同様な傾向を示す。ただし、先行BWRプラントの [] の試験結果のみを比較対象とした。
- 女川2号機は、サイト特性の違い(硬質岩盤のため短周期の応答が卓越する傾向)により設備への入力地震動が大きくなり、燃料ラックの応答加速度が大きい。このため、先行BWRプラントよりも応答加速度が大きい範囲まで試験データを取得している。応答加速度が大きい範囲では、減衰定数が一定となった後、緩やかな低下傾向を示す。
- 上記を踏まえると、先行BWRプラントの場合においても燃料ラックの応答加速度が大きい範囲まで加振試験を実施すれば、減衰定数が大きくなり、女川2号機と同様な減衰定数の傾向を示すものと推察される。
- 先行BWRプラントの弾性設計用地震動Sd及び基準地震動Ssに対する設計用減衰定数は、加振試験で得られた減衰定数に対して十分な余裕を確保した設定となっている。これに対して女川2号機の設計用減衰定数設定における余裕の取り方(試験範囲及び外挿領域で取得した減衰定数の下限値より十分低く設定)は同等である。

注記*: 先行BWRプラントの燃料ラックの []



出典: 工事計画に係る説明資料(機器・配管系の耐震性についての計算書等); KK7補足-028 改1 2020年10月, 東京電力HD(株)

先行BWRプラント

燃料ラックの試験データ及び設計用減衰定数の比較

女川2号機

枠囲みの内容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。