

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-他-F-19-0040_改2 |
| 提出年月日 | 2021年 9月 10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 (指摘事項に対する回答)

2021年9月10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。 |

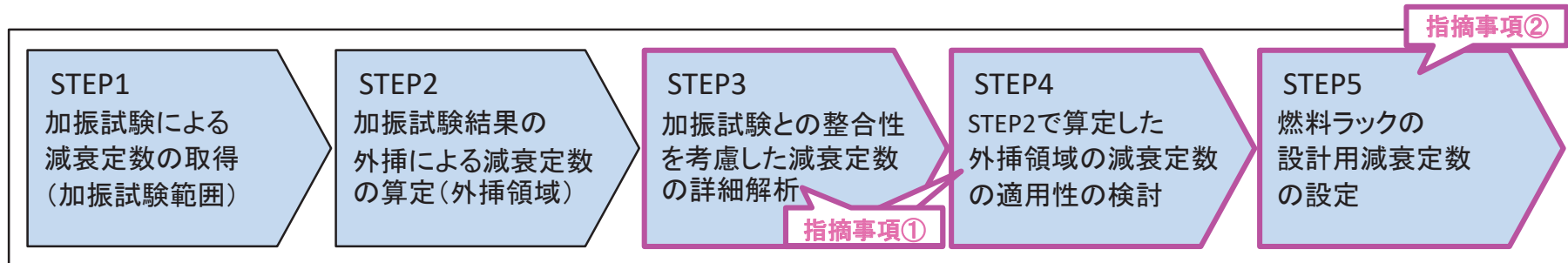
前回審査会合(7/6)における指摘事項及び回答概要

| 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)を考慮して多質点系モデルとし, 解析条件は試験結果との整合性を考慮して設定しているため, 解析は妥当なものと判断した。 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)を有することを踏まえ, これに適した応答倍率法を適用しているため, 妥当なものと判断した。 | P5 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"> 流体－構造連成による燃料ラックの応答低減効果と減衰定数の関係は独立であり, 応答低減効果は減衰定数の算出に直接影響しないため, 応答低減効果は減衰として扱わないこととした。 | P6, 7 |
| 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しているため, 妥当と判断した。 <p>*: 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</p> | P8-14 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"> 解析条件(入力値)のうち, 値に幅をもつ5項目(上記と同じ)について, 現実的に取り得る範囲内で値を変動させた場合, 試験の外挿領域で減衰定数は急減せず, その低下量は最大でも2.36%となることから, 影響はほとんどない。 | P15, 16 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た各種設備の設定事例を調査し, 下記4項目の着眼点で妥当性を整理して女川2号機の燃料ラックと比較・検討した。その結果, いずれの着眼点に対しても女川2号機の設計用減衰定数の設定は各種設備の設定事例と同等であり妥当なものと判断した。 <ul style="list-style-type: none"> －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 | P17-22 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を踏まえ, 外挿領域の減衰定数の適用性を検討し, 更に一定の余裕を考慮した燃料ラックの設計用減衰定数として, 基準地震動 S_s には10%, 弾性設計用地震動 S_d には設置許可段階と同じ7%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% | 基準地震動 S_s : 10% 弾性設計用地震動 S_d : 7% |



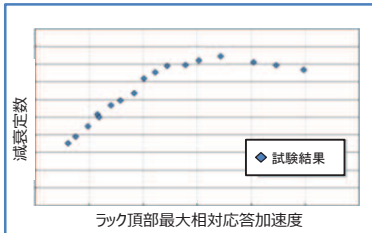
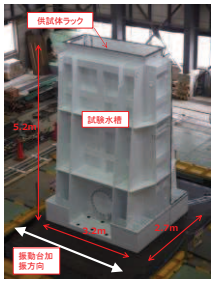
燃料ラックの設計用減衰定数設定に係る検討フロー

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。

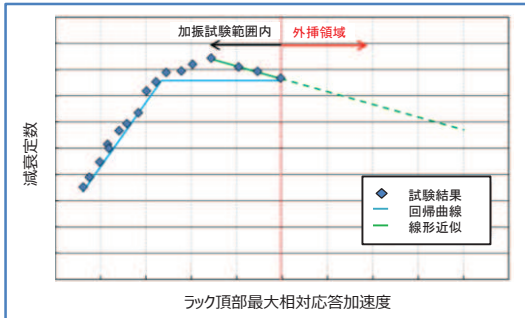
STEP1: 実物大加振試験による減衰定数の取得

- 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: 加振試験結果及び外挿による減衰定数の算定

- 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。



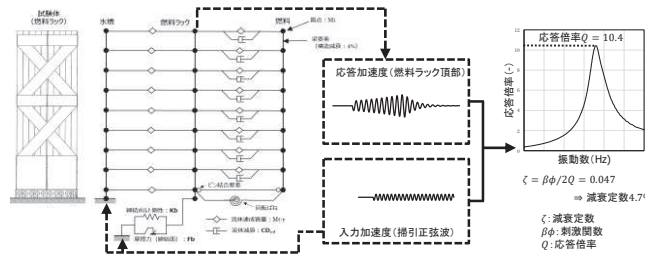
| 応答加速度 | 減衰定数算定(統計処理)方法 |
|---------------|------------------|
| 加振試験範囲内 | 実施範囲の回帰直線(-2σ) |
| 加振試験範囲外(外挿領域) | 減衰定数低下部分の線形近似の外挿 |

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(引用者注:設計用減衰定数の一覧表)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: 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) 指摘事項①

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、加振試験体を多質点系モデル化し、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」

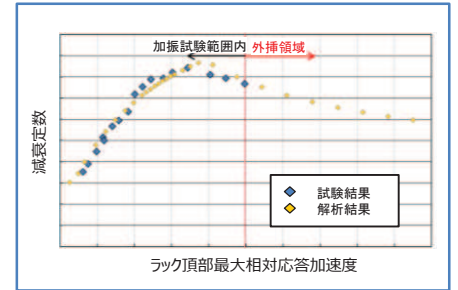


減衰定数算出方法の妥当性

- 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。

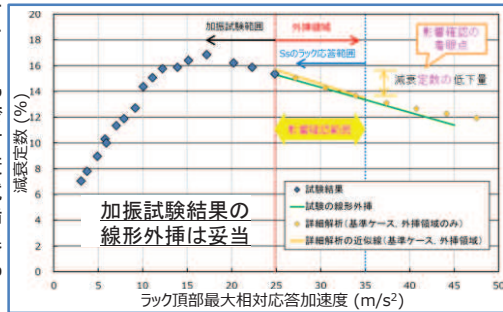
詳細解析による減衰定数算出結果

- 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いることを確認。



STEP4: STEP2で算定した減衰定数の適用性検討 指摘事項①

- 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(減衰低下傾向の変化, 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する傾向はなく、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】

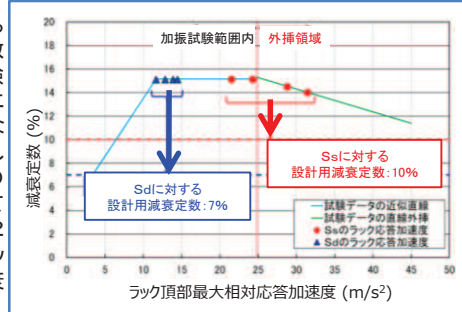


注記*2 詳細解析の目的
加振試験の外挿領域における燃料ラックの減衰定数が急減するものでないこと及び減衰定数の程度感を確認することにより、実物大加振試験データの外挿によるSsの応答範囲における減衰定数の適用性を示す。

STEP5: 設計用減衰定数の設定 指摘事項②

- 個別の設計用減衰定数の設定にあたり、指針・規格を策定した際(JEAG4601/JEAC4601)の各種設備の設定事例を調査・分析。
①減衰定数の取得方法: 加振試験, 加振試験及び試験データの外挿, 加振試験及び減衰推算法(他手法の組合せ)による設定事例
②減衰定数とパラメータの相関関係: 相関関係がある場合, パラメータ(応答振幅, 振動数)に応じた設定もしくは一律の設定事例
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, 統計処理(回帰線の平均値)からの設定事例
④対象設備の汎用性: 汎用設備の場合, 減衰定数の下限値に一定の余裕を見込む傾向

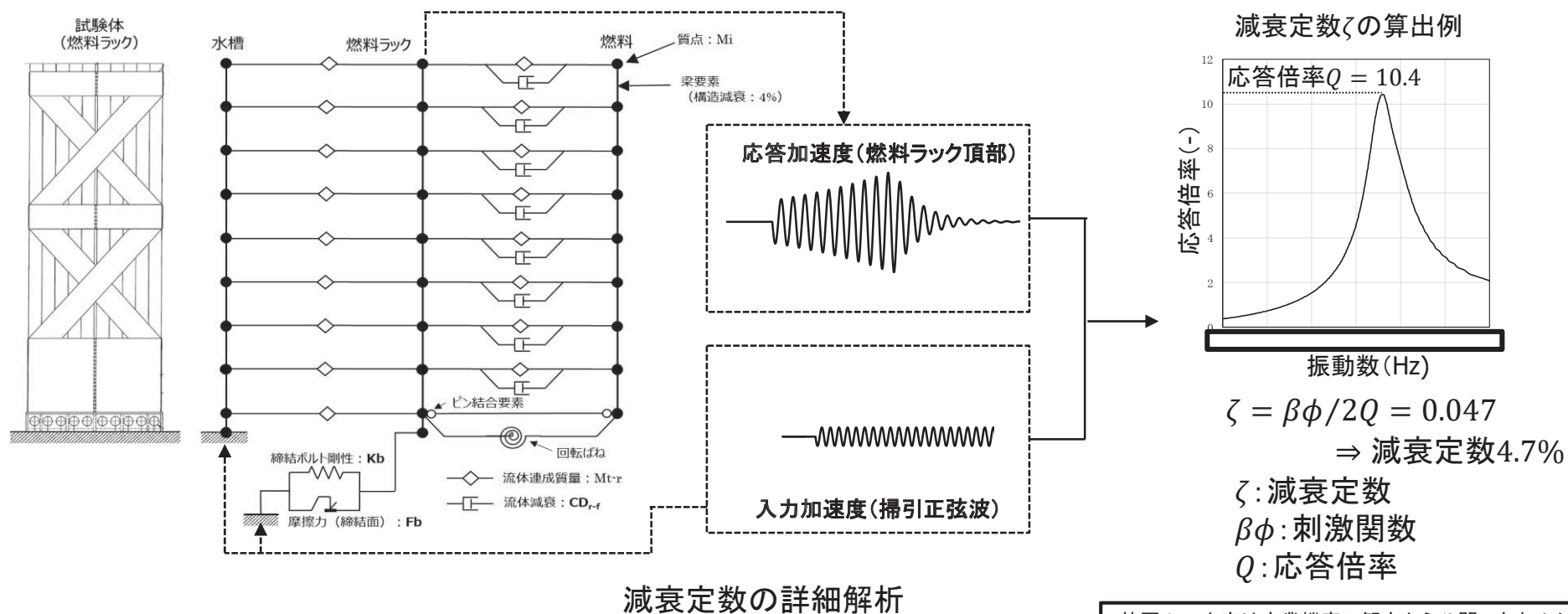
- 加振試験で得られた減衰定数及び加振試験の外挿領域に対する解析的な検討結果に対し、さらに一定の余裕を考慮して設定した女川2号機の燃料ラックの設計用減衰定数は妥当。



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が急激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、実物大加振試験データの外挿による S_s 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)を考慮して解析モデルを作成するとともに、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)。**



3. 指摘事項①-1に対する回答(1/2)

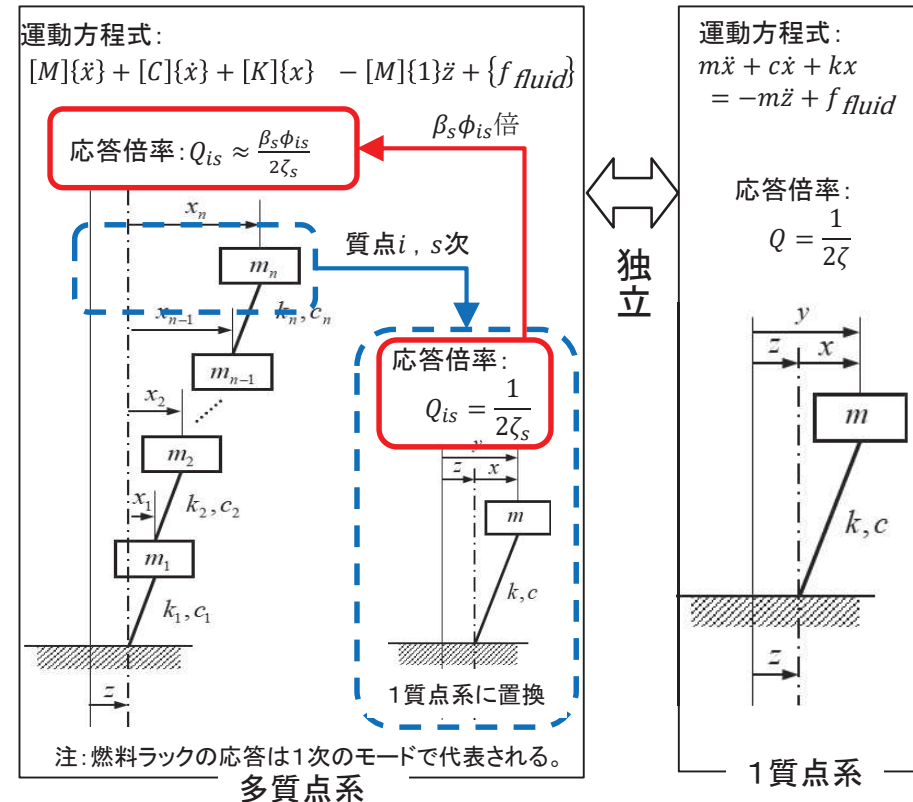
【減衰定数の詳細解析(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法の妥当性)】

流体-構造連成による応答低減効果の扱い(1/2)

- 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。
- 応答低減効果($[M] - [M_D]$)は $\beta_s \phi_{is}$ に含まれており、この応答低減効果と減衰定数 ζ の関係も独立であり、応答低減効果は減衰定数の算出に直接影響しないため、応答低減効果は減衰として扱わない。

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) | $\zeta_s \approx \frac{\beta_s \phi_{is}}{2Q_{is}}$ | $\zeta_s \approx \frac{\beta_s \phi_{is}}{2Q_{is}}$ |



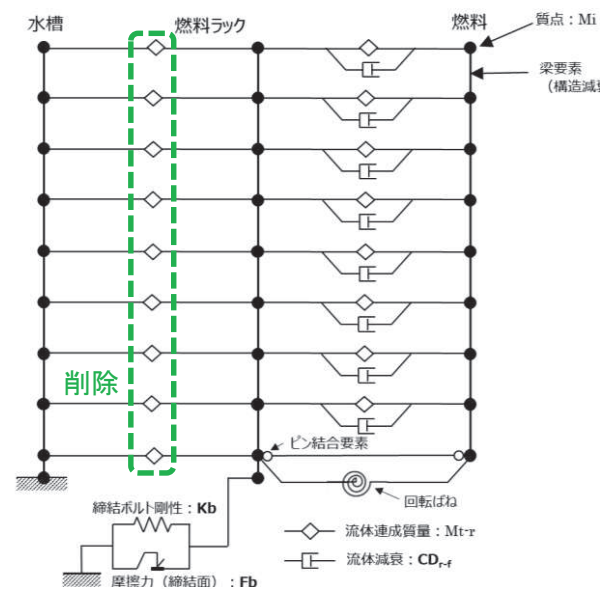
質点系振動モデルと運動方程式

3. 指摘事項①-1に対する回答(2/2)

【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)】

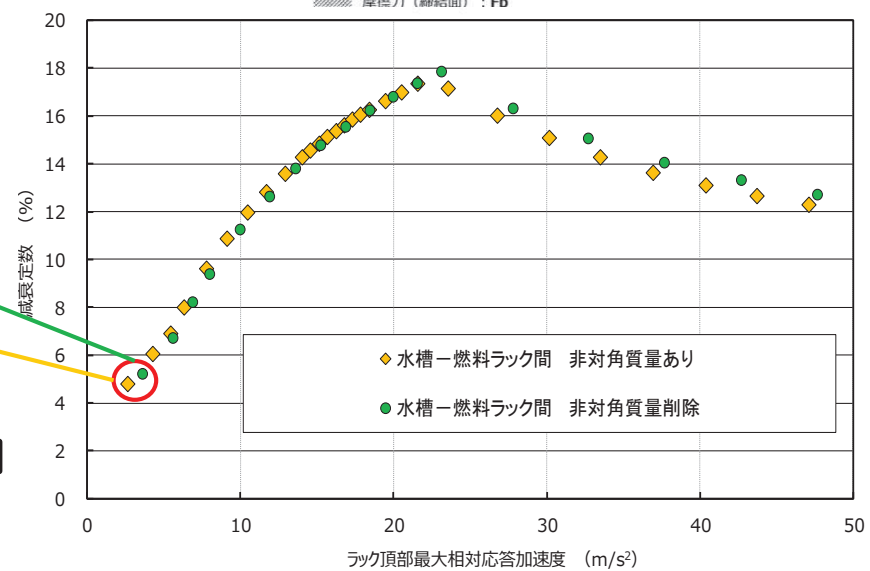
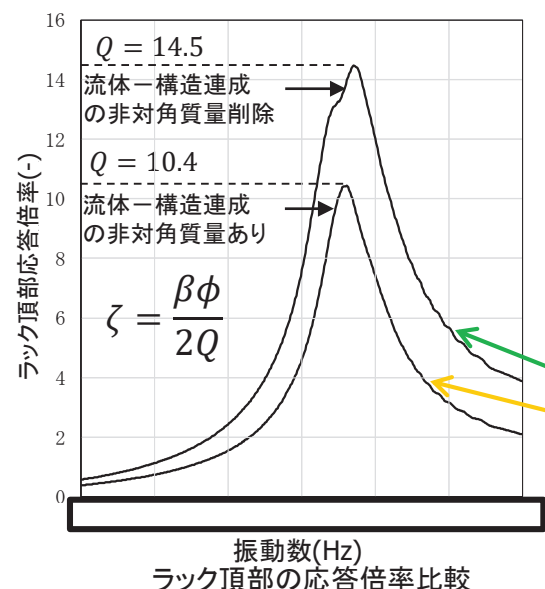
流体-構造連成による応答低減効果の扱い(2/2)

- 前述の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。
- 以上より、**応答低減効果は減衰定数の算出に直接影響しないため、応答低減効果は減衰として扱わない。**



| | 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 β(-) | 0.97 | 1.55 |
| 固有ベクトル φ(-)* | 1.0 | 1.0 |
| 減衰定数 ζ(%) | 4.7 | 5.3 |

注記*: 固有ベクトルは1.0で正規化している



応答低減効果の減衰に対する影響検討結果

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(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法の妥当性)】

解析条件(入力値)の分類

- 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)。

| 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(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法の妥当性)】

試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)

- 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 $F_{b_{max}}$

- 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 P_b が加わるため, ボルト締結面の摩擦力 $F_{b_{max}}$ は,

$$F_{b_{max}} = \mu (W + P_b)$$

ここで, ボルト締付力 P_b 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 N_b により表される(右図)。

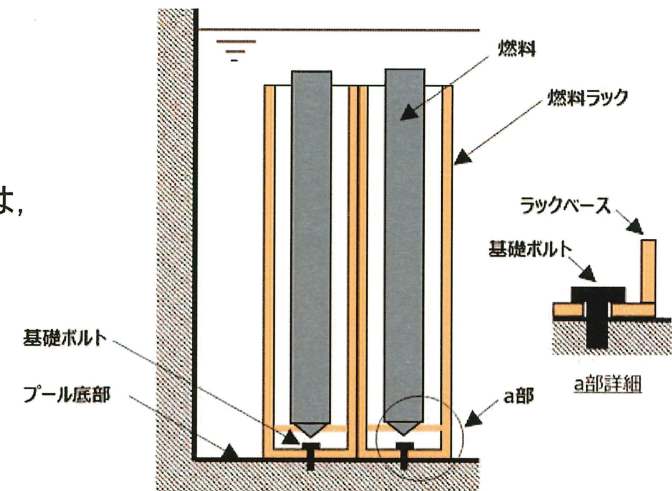
$$P_b = N_b T / K D$$

- 入力値の変動範囲:

ボルト締付力 P_b 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)から一般値 *1, 呼び径 D , 本数 N_b , 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 $F_{b_{max}}$ 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(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法の妥当性)】

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:

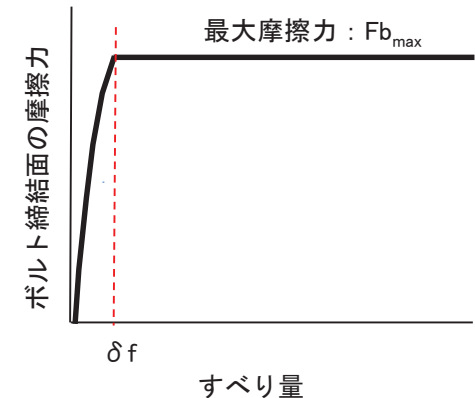
ボルト締結面に作用する力が最大摩擦力 $F_{b_{max}}$ に到達してすべり始める(主すべりの発生)前から, 微小すべり(予すべり)が先行的に発生する考え方*1~3を導入する。ボルト締結面に作用する摩擦力は, すべり量の増加に伴い増加し(低振幅側), δf を境に高振幅側では最大摩擦力 $F_{b_{max}}$ で一定となる(右図)。

- 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

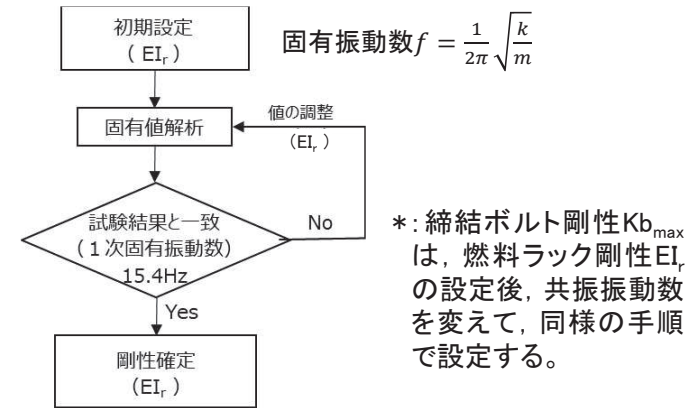
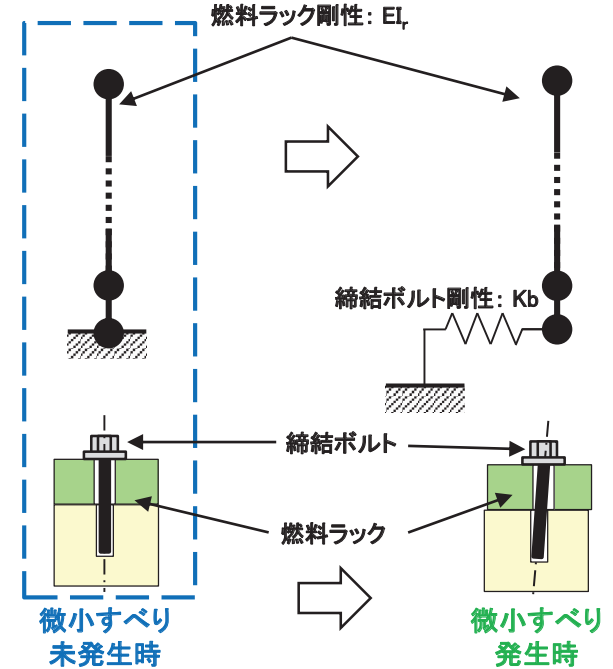
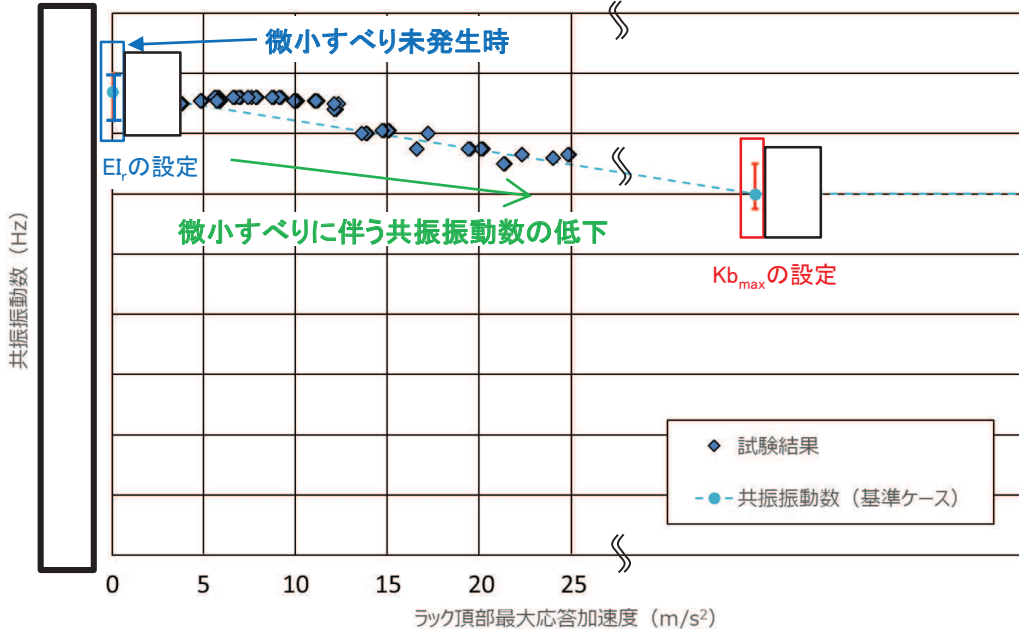
*3:「東神戸大橋の主構トラス格点部の設計」, 北沢ら, 阪神高速道路株式会社 技術報告(技報)第9号, 論文13, 平成2年4月

4. 指摘事項①-2に対する回答(4/7)

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

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、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(曲げ剛性)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:
微小すべり未発生時の共振振動数は、応答加速度がゼロ時点となることから、試験結果の共振振動数が応答加速度が増加するにつれて低下傾向(応答加速度がする方向に対しては増加傾向)を示すことを考慮して、上限値 、下限値 の範囲で変動すると考えられる。
- 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(全体的な傾向)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*

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(5/7)

【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)】

d. 締結ボルト剛性 Kb_{max}

- 解析条件(入力値)の考え方:

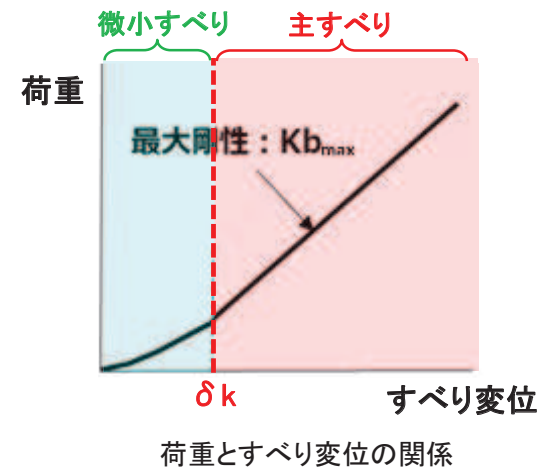
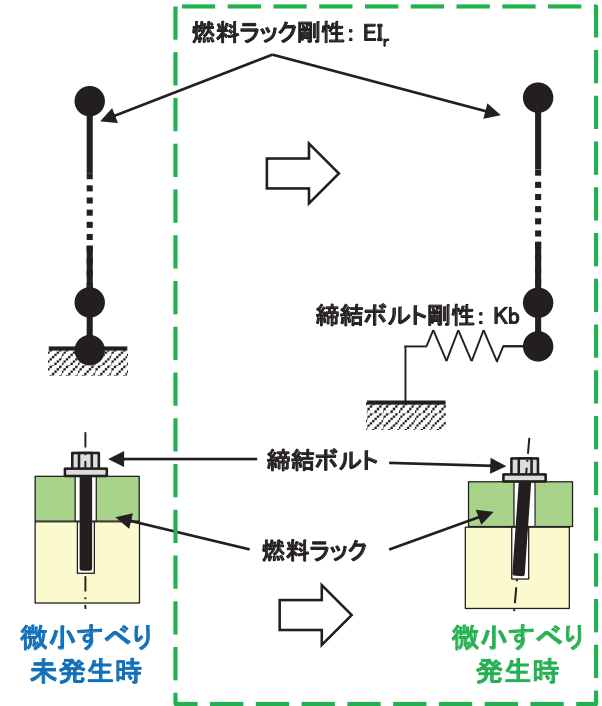
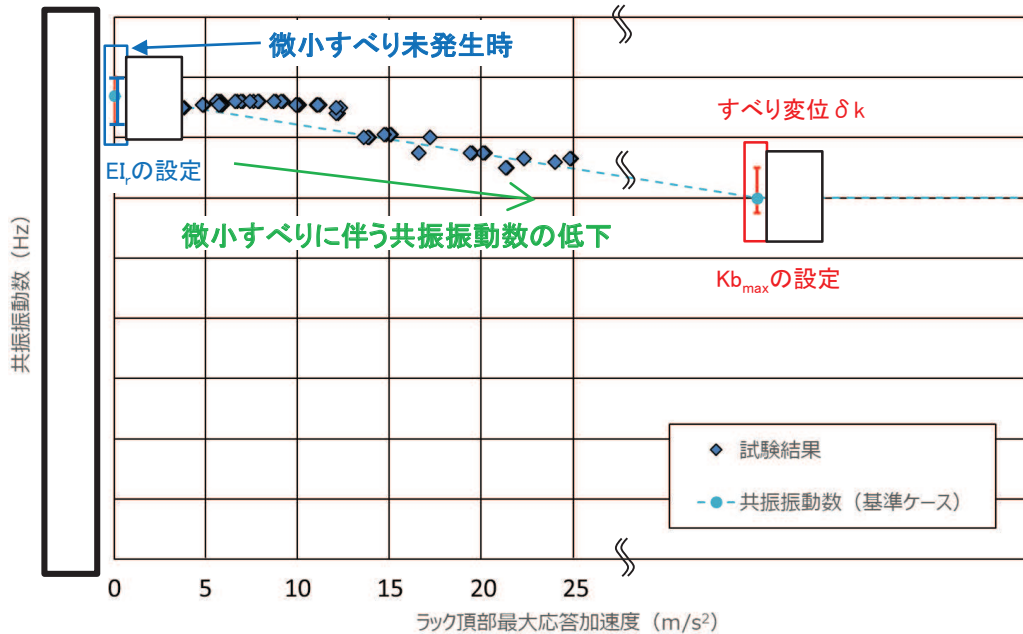
締結ボルトの剛性は、燃料ラックの微小すべり未発生時は剛体として扱い、燃料ラック下端の締結面の微小すべり発生時には、燃料ラックの剛性と合計した剛性(直列ばね)として作用する(右図)。

- 入力値の変動範囲:

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であり、試験結果の共振振動数が応答加速度が増加するにつれて低下傾向を示すことから、上限値 、下限値 の範囲で変動すると考えられる(下図)。

- 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(全体的な傾向)を考慮して、 Ss の応答領域で共振振動数が となる に設定した。



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

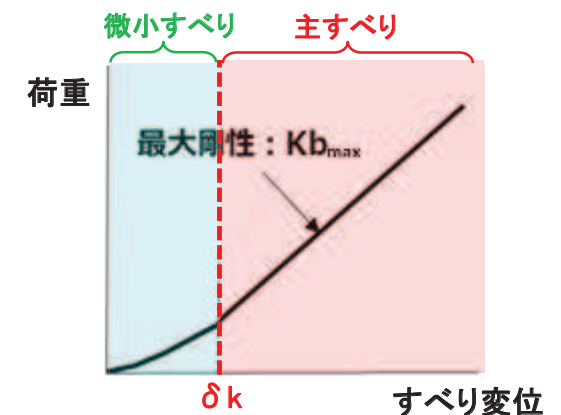
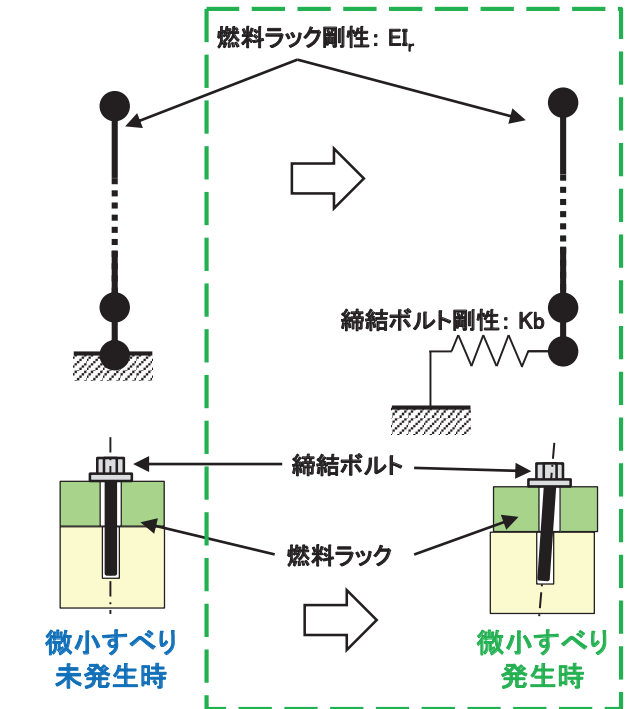
4. 指摘事項①-2に対する回答(6/7)

【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)】

STEP1 STEP2 STEP3 STEP4 STEP5

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:
締結ボルト締結部のすべり変位は、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ボルト締結部のグリップ長さ(61.5mm)を考慮すると、締結ボルト頭部下面の水平方向変位量は、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

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(7/7)

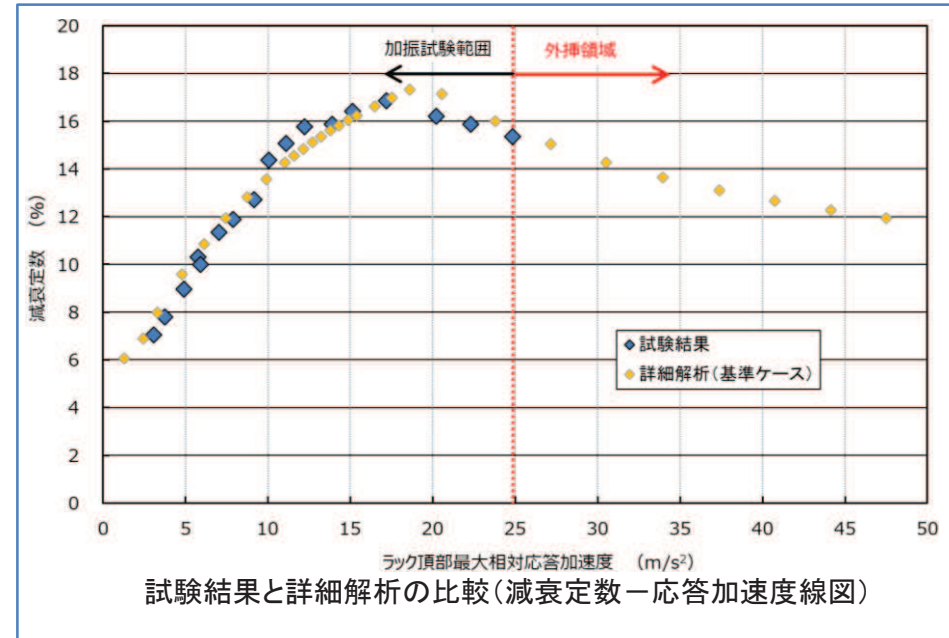
【減衰定数の詳細解析(解析モデル, 解析条件, 減衰定数の算出方法の妥当性)】

減衰定数の詳細解析の妥当性

- 詳細解析の解析条件(入力値)について, 試験条件等から一意に定まるもの(10項目)及び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・整理した結果, 設定方法及び入力値に加えて, 入力値が変動し得るものは, 試験結果との整合性を考慮した設定で現実的に取り得る範囲内となる。
- 減衰定数の詳細解析の結果は, 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)を考慮して解析モデル及び上記の入力値(基準ケース)を適用したものである(下表)。
- 解析結果(基準ケース)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いることから, その外挿領域においても減衰挙動を概ね表現している(下図)。

試験結果との整合性を考慮して設定したもの(5項目)

| 記号 | 解析条件 (入力値) | 単位 | 入力値 | | |
|------------|--------------------------|-----------------|-------|------|-----|
| | | | 基準ケース | 変動範囲 | |
| | | | | 下限値 | 上限値 |
| Fb_{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 | | | |
| Kb_{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 | | | |



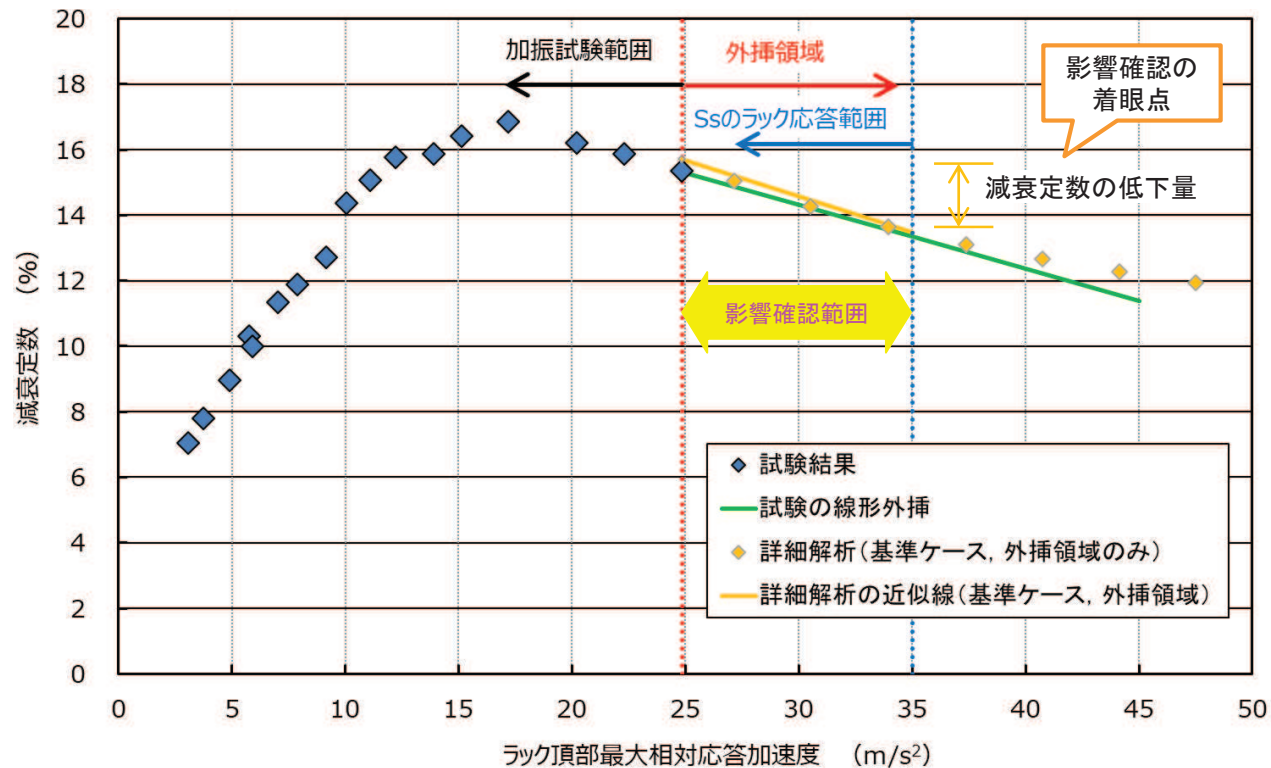
5. 指摘事項①-3に対する回答(1/2)

【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)】

STEP1 STEP2 STEP3 STEP4 STEP5

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, 入力値の変動範囲において詳細解析を実施し, 試験の外挿領域における減衰定数とラック頂部相対応答加速度の関係に与える影響(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, 前項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 応答加速度範囲(以下, 「影響確認範囲」という。)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で表し(右図参照), 加振試験の最大応答加速度点を始点とする。



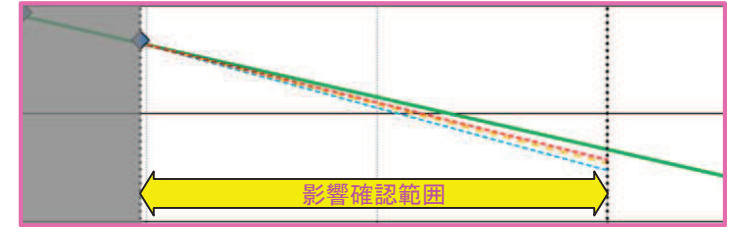
減衰定数-応答加速度線図(外挿領域における減衰低下量)

5. 指摘事項①-3に対する回答(2/2)

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

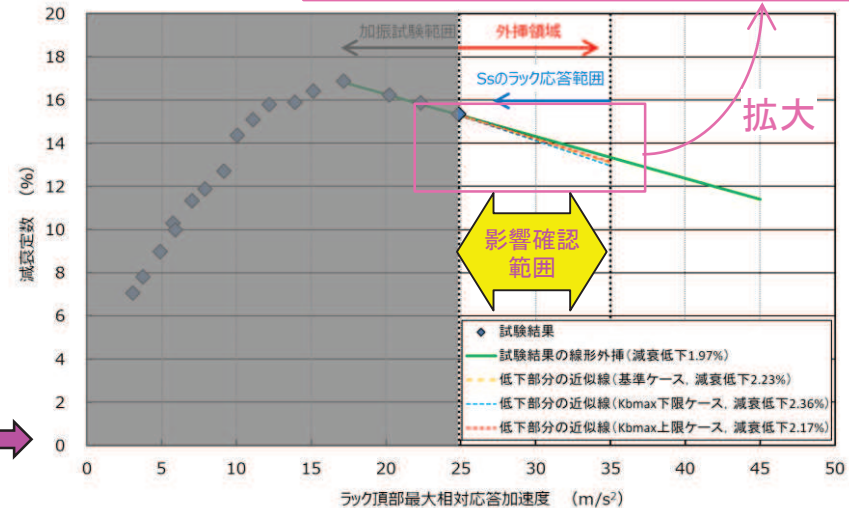
解析条件(入力値)を変動させた場合の減衰定数への影響確認結果(まとめ)

- 試験結果との整合性を考慮して設定するもの(5項目)の入力値(基準ケース)を変動させた場合(上限値及び下限値)の影響確認範囲における減衰定数について, 各解析条件(入力値)及び算定結果を下表に示す(詳細は別紙3参照)。
- 影響確認範囲における減衰定数は, 基準ケースと同様な低下傾向(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%)と同程度であり, 燃料ラックのSs応答加速度範囲における減衰定数への影響が軽微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は, 試験結果の外挿領域における燃料ラックのSs応答加速度範囲の減衰挙動を表現できていると判断した。



減衰定数の影響確認結果(まとめ)

| 解析条件(入力値) | 入力値(基準ケース) | 入力値(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% |
| | | | | ~ |
| Kb _{max} | 締結ボルト剛性 | | | 2.02% |
| | | | | ~ |
| 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 | | | 2.15% |
| | | | | ~ |
| EI _r | 燃料ラックの剛性 | | | 2.17% |
| | | | | ~ |
| | | | | 2.36% |
| | | | | ~ |
| | | | | 0.81% |
| | | | | ~ |
| | | | | 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)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

6. 指摘事項②に対する回答(1/6) 【設計用減衰定数設定の妥当性】

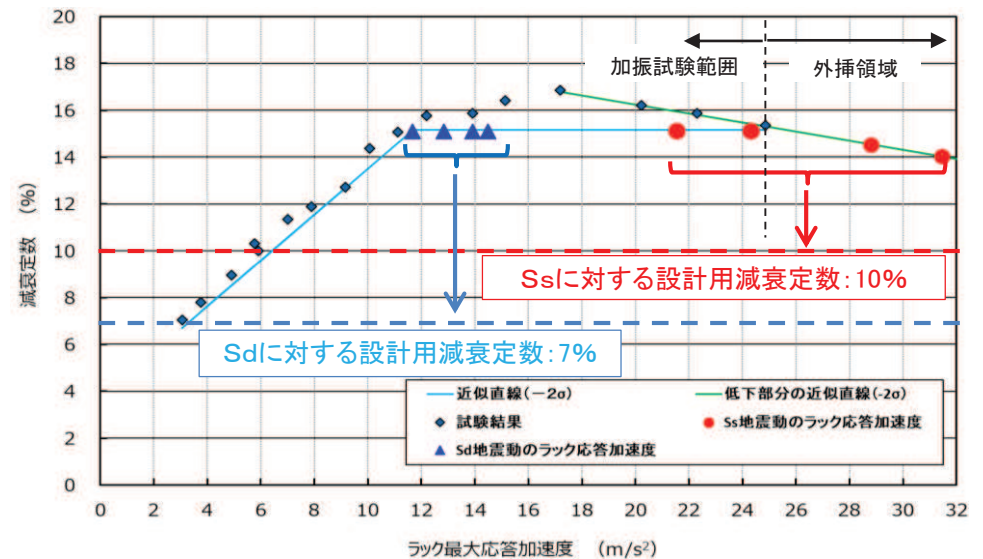
(1) 女川2号機の燃料ラックに対する設計用減衰定数設定の考え方

- 今回工認では、女川2号機の燃料ラックの加振試験結果及び減衰要因を考慮した解析的な確認を交えて、加振試験範囲及び外挿領域(S_s 応答範囲)の燃料ラックの減衰定数と応答加速度の関係を把握した上で、更に余裕を考慮して設計用減衰定数を設定している。具体的には、以下の通り。
- 燃料ラックの減衰定数は、加振試験及び試験データの外挿により取得し、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。
 - 燃料ラックの減衰定数は、燃料ラックの最大応答加速度と相関関係(応答加速度依存性)があるため、弾性設計用地震動 S_d 及び基準地震動 S_s のそれぞれの加速度レベルに応じた設定とした。
 - 加振試験及び試験データの外挿により取得した減衰定数に対する設計余裕として、加振試験範囲及び外挿領域における減衰定数の下限値(回帰直線 -2σ)に対して、更に余裕を確保した。
 - 弾性設計用地震動 S_d 及び基準地震動 S_s に対する設計用減衰定数として、それぞれ7%及び10%を設定した。

ここで、弾性設計用地震動 S_d の設計用減衰定数を7% (設置許可段階と同じ)と設定した理由は、弾性設計用地震動 S_d の応答範囲の一部で減衰定数が増加する(右肩上がり)領域に掛かっているため、耐震設計が持つ保守性(地震応答解析による応答が大きめに算出される)によって実際の燃料ラックの最大応答加速度が小さいことを考慮したものである。

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 S_d | 基準地震動 S_s |
| 7.0 | 10.0 |

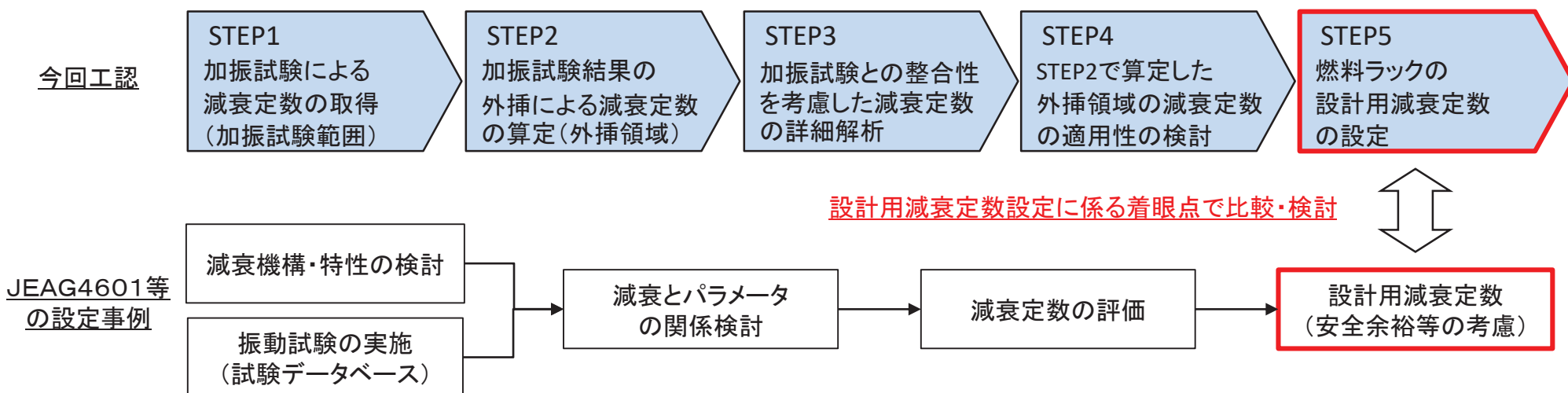


女川2号機の燃料ラックの設計用減衰定数設定の考え方

6. 指摘事項②に対する回答(2/6) 【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方針

- 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の妥当性を確認する。
- 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下記の4項目を着眼点として、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・検討する。
 - 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



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

6. 指摘事項②に対する回答(3/6) 【設計用減衰定数設定の妥当性】

(3) 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)に係る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は、以下の通り、それぞれ複数の対応方法があることを確認した。

- ① 減衰定数の取得方法: 加振試験, **加振試験及び試験データの外挿**, 加振試験及び減衰推算法(他手法の組合せ)による設定事例
- ② 減衰定数とパラメータの相関関係: **相関関係がある場合, パラメータ(応答振幅, 振動数)に応じた設定**もしくは一律の設定事例
- 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**, 統計処理(回帰直線の平均値)からの設定事例
- ④ 対象設備の汎用性: 汎用設備の場合, 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 | 減衰定数(下限値) | 設計用減衰定数の設定値 | 余裕(最小値) |
| 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*1 | 2.8~8.0% 8~10% 4.3~16.0% | 2.5% 5% 4% | 0.3% 3% 0.3% |
| 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 応答振幅に 応じて設定 | 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% | 記載なし |
| 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 振動数に 応じて設定 | 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 7.0%(<20Hz) 5.0%(20Hz~30Hz) | 1%(<20Hz) —(20Hz~30Hz) |
| クレーン類 (BWR燃料取替機の例) | 加振試験及び 試験データの 外挿 | 相関関係あり (一律設定) | 統計処理 (回帰直線の平均) | 固有設備*1,2 | ・応答振幅依存 3.1% | ・一律 2.0% | 1.1% |
| 配管系 (Uボルト支持の例) | 加振試験及び 減衰推算法 (他手法での確認) | 相関関係あり (一律設定) | 下限値に一定の 余裕を見込む | 汎用設備*1 | ・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 試験データの 外挿 (解析的な確認) | 相関関係あり 応答加速度に 応じて設定 | 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 14~15%(S _s) 14~15%(S _d) | ・応答加速度依存 10%(S _s) 7%(S _d) | 4%(S _s) 7%(S _d) |

注記*1: 減衰機構・特性が共通であるものの、構造・形状等が限定された固有設備ではなく、構造・形状等に幅がある設備。 注記*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。

6. 指摘事項②に対する回答(4/6) 【設計用減衰定数設定の妥当性】

(4) 設計用減衰定数設定に係る女川2号機の燃料ラックとJEAG4601等の設定事例との比較・検討結果

➤ 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、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と同等であるため妥当であると判断した。

① 減衰定数の取得方法:

・ 女川2号機の燃料ラックでは、加振試験及び試験データの外挿(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号機の燃料ラックでは、減衰定数と最大応答加速度に相関関係があることを踏まえ、外挿領域における減衰定数の算出、弾性設計用地震動Sd及び基準地震動Ssの応答範囲に対する設計用減衰定数を設定している。

③ 減衰定数に対する余裕の取り方:

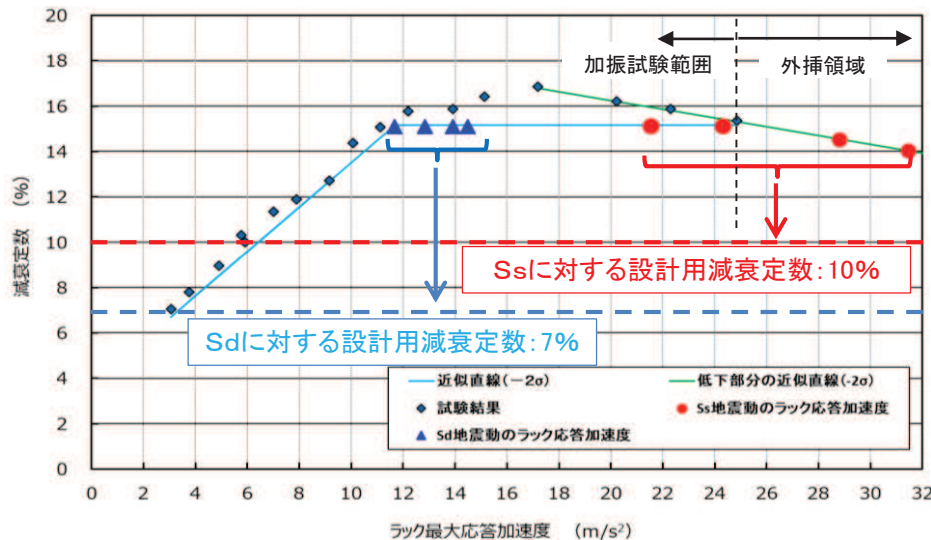
・ 女川2号機の燃料ラックでは、試験データを統計処理した減衰定数の下限値(回帰直線 -2σ)に対して、更に余裕を考慮し、弾性設計用地震動Sd及び基準地震動Ssに対する設計用減衰定数をそれぞれ7%及び10%と設定している。

・ 弾性設計用地震動Sdの応答範囲の一部は、減衰定数が増加する(右肩上がり)領域に掛かっていることから、耐震設計における保守性(地震応答解析による応答が実際よりも大きく算出される)を考慮し、設置許可段階と同じ7%としている。

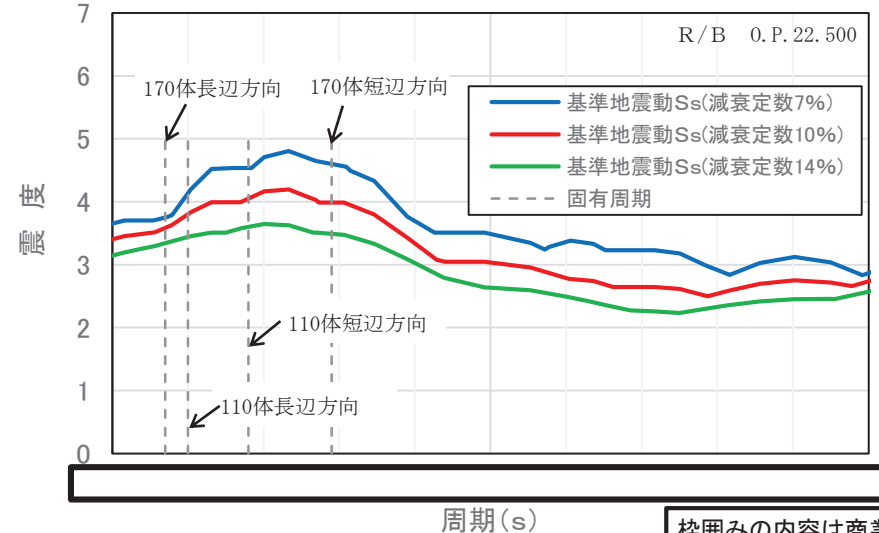
・ なお、基準地震動Ssの応答範囲における減衰定数(下限値)14%に対して更に余裕を考慮すること(設計用減衰定数を10%と設定すること)によって、燃料ラックの床応答曲線において1割程度の保守性を確保している。

④ 対象設備の汎用性:

・ 女川2号機の燃料ラックは、固有設備であるものの、減衰定数の下限値に対して更に余裕を考慮している。



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

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

6. 指摘事項②に対する回答(5/6) 【設計用減衰定数設定の妥当性】

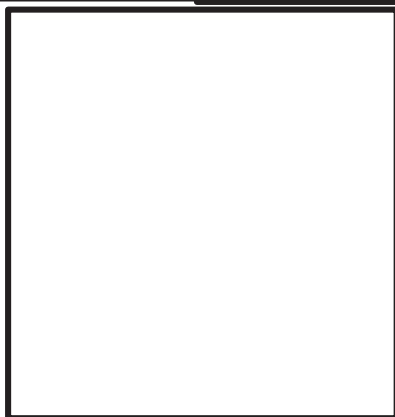
(5) 先行BWRプラントとの比較(1/2)

- 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

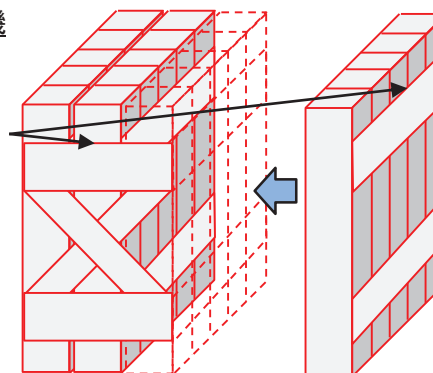
| | 先行BWRプラント | 女川2号機 |
|---------------------|-----------|--|
| 試験体の構造・型式, 貯蔵体数(配列) | | ・角管型: <u>30体(3×10)</u> |
| 支持方式 | | ・ボルトによる床固定式 |
| 実機の貯蔵体数(配列) | | ・110体(10×11), <u>170体(10×17)</u> |
| 加振方向 | | ・ <u>長辺方向</u> |
| 減衰定数の取得方法 | | ・加振試験及び試験データの外挿(解析的な確認含む) ・ <u>正弦波掃引加振に基づく応答倍率法</u> |
| 減衰定数とパラメータの相関関係 | | ・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: <u>8%程度</u> ・基準地震動Ss: <u>4~5%程度</u> |
| 設計用減衰定数 | | ・弾性設計用地震動Sd: <u>7%</u> ・基準地震動Ss: <u>10%</u> |

先行BWRプラント



女川2号機

(角管型)
補強板と
角管を溶接



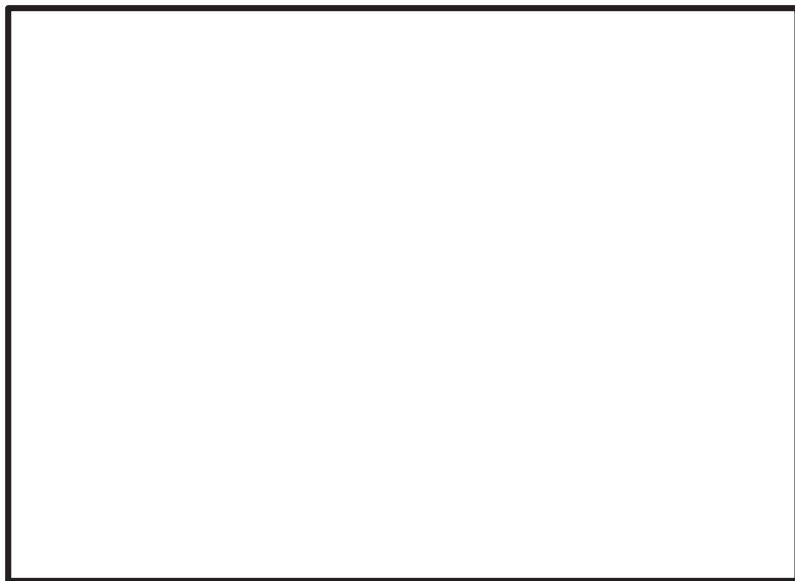
燃料ラックの構造概要

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。

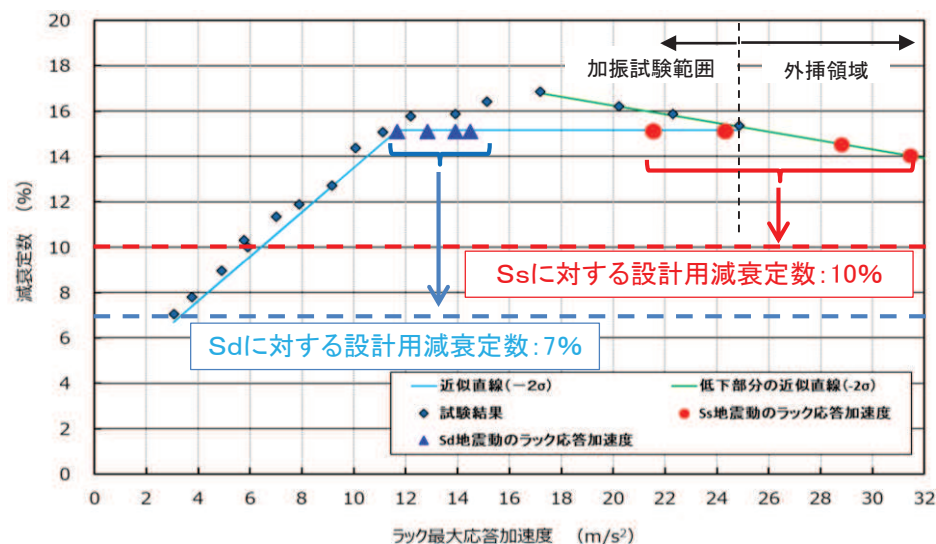
6. 指摘事項②に対する回答(6/6) 【設計用減衰定数設定の妥当性】

(5) 先行BWRプラントとの比較(2/2)

- 先行BWRプラントにおける燃料ラックの加振試験は、女川2号機の燃料ラックに対して、**試験体の構造・型式、貯蔵体数、支持方式等が類似であるため、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で概ね同様な挙動を示している。**ただし、先行BWRプラントの試験データのうち [] を比較対象とした。
- 女川2号機の加振試験では、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)により入力地震動が大きくなるため、先行BWRプラントよりも応答加速度が大きい範囲までの試験データがあり、この範囲では、減衰定数が一定となった後、次第に低下する挙動となっている。
- 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挙動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それぞれ余裕を確保した設定となっており、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は遜色のないもの**になっている。



先行BWRプラント



女川2号機

燃料ラックの試験データ及び設計用減衰定数の比較

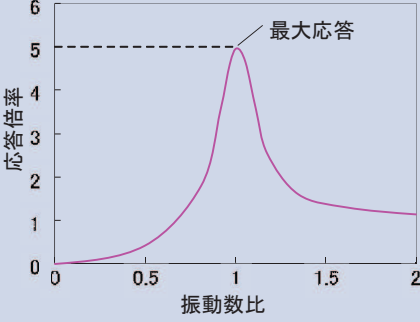
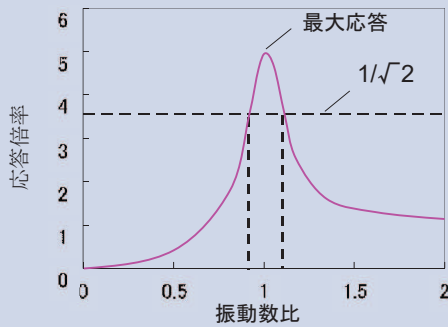
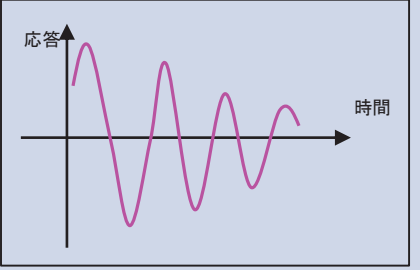
枠囲みの内容は他社の機密事項を含む可能性があるため公開できません。

7. まとめ

- 女川2号機の燃料ラックの水平方向の設計用減衰定数について、設置許可段階では、加振試験等に基づき一律7%と設定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 S_s 応答加速度の一部が加振試験範囲を超えるため、女川2号機の燃料ラックの加振試験結果及び減衰要因を考慮した解析的な確認を交えて、加振試験範囲及び外挿領域(S_s 応答範囲)の燃料ラックの減衰定数と応答加速度の関係を把握した上で、更に余裕を考慮して設計用減衰定数を設定した。(弾性設計用地震動 S_d :7%, 基準地震動 S_s :10%)
- これに対し、前回審査会合(第988回審査会合, 2021年7月6日)において、解析的な確認や設計用減衰定数設定等の妥当性を整理して説明するよう指摘を受けた。
指摘事項に対する回答の概要は以下のとおり。
 - 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)を考慮して多質点系モデルとし、解析条件は試験結果との整合性を考慮して設定しているため、解析は妥当なものと判断。
 - 解析結果より、解析条件(入力値)を現実的に取り得る範囲内で変動させた場合でも、試験の外挿領域で減衰定数は急減せず、その低下量は最大2.36%となることを確認。
 - 設計用減衰定数の設定については、下記4項目を着眼点としてJEAG4601等に設計用減衰定数が規定された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。その結果、いずれの着眼点に対しても女川2号機の設計用減衰定数の設定は各種設備の設定事例と同等であり妥当なものと判断。
 - 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

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に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いため、適用しないことにした。 |

別紙2. 詳細解析モデルの入力諸元の詳細

詳細解析モデルの入力諸元一覧

| 記号 | 解析モデルの入力諸元 | 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} | 燃料ラックー燃料間連成質量 | | 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} | 水槽ー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} | 燃料ラックー燃料間流体減衰 | | 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。 |

別紙3. 解析入力値を変動させた場合の減衰定数への影響確認結果(1/4)

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

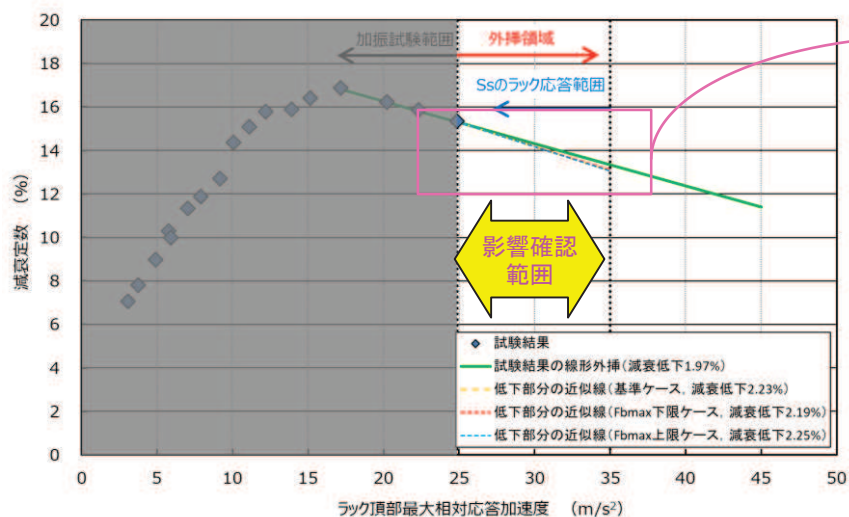
| 入力諸元 | 入力値 (基準ケース) | 変動範囲 | 入力値 (影響検討ケース) | | 減衰定数への影響 (入力諸元の値を大きくした場合として記載) | | | | 減衰低下量 |
|---------------|--------------------------|---------------------------------|------------------|--------|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------------|------------------------------|---------------------|
| | | | 下限 | 上限(上側) | ①漸増傾向の 勾配(減衰の立 上り領域) | ②減衰定数の 最大値 | ③漸減傾向の 勾配(減衰の低 下領域) | ④減衰-加速 度の曲線形状 (グラフの概形) | |
| $F_{b_{max}}$ | ボルト締結面摩擦力 | 締結ボルトの締付トルク管理値の上限と下限 | | | 漸増傾向(右肩上がり)の勾配が若干低下する | 減衰定数の最大値はほとんど変わらない | 漸減傾向(右肩下がり)の勾配はほとんど変わらない | グラフの概形は同様である | 2.19% ~ 2.25% |
| δf | 摩擦力の振幅依存性を定義する最大変位 | 試験結果を表現する微小すべり変位量(1mm以下を目安) | | | 漸増傾向(右肩上がり)の勾配が増加する | 減衰定数の最大値はほとんど変わらない | 漸減傾向(右肩下がり)の勾配はほとんど変わらない | グラフの概形はほぼ同様である | 2.02% ~ 2.15% |
| $K_{b_{max}}$ | 締結ボルト剛性 | 微小すべり発生後の共振振動数が試験範囲内と範囲外 | | | 漸増傾向(右肩上がり)の勾配はほとんど変わらない | 減衰定数の最大値が低下する | 漸減傾向(右肩下がり)の勾配はほとんど変わらない | グラフの概形は同様である | 2.17% ~ 2.36% |
| 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 | ボルト締結部の隙間による傾きで発生し得る最小値と中間値の変位量 | | | 漸増傾向(右肩上がり)の勾配が増加する | 減衰定数の最大値が増加する | 減衰定数の最大値が増加することで漸減傾向(右肩下がり)の勾配が増加する | グラフの概形が大きく変化する | 0.81% ~ 1.67% |
| EI_r | 燃料ラックの剛性 | 微小すべり未発生時の共振振動数が試験範囲内と範囲外 | | | 漸増傾向(右肩上がり)の勾配はほとんど変わらない | 減衰定数の最大値が増加する | 漸減傾向(右肩下がり)の勾配はほとんど変わらない | グラフの概形はほぼ同様である | 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。

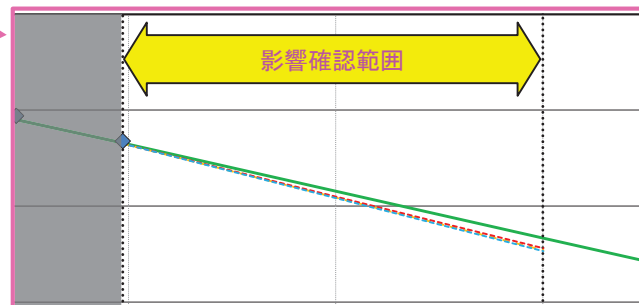
*2: 基準ケースが上限値のため、上限と下限の中間値を上側のケースとして設定している。

別紙3. 解析入力値を変動させた場合の減衰定数への影響確認結果(2/4)

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

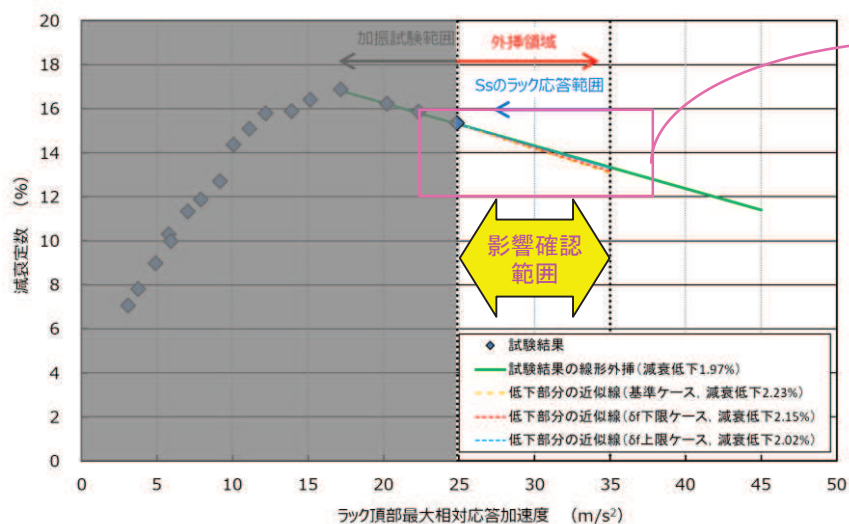


拡大

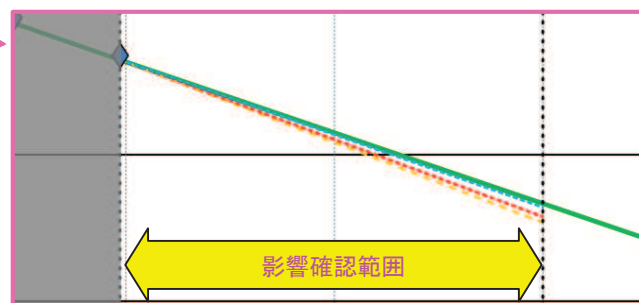


最大の減衰低下量: 2.25%(上限ケース)

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

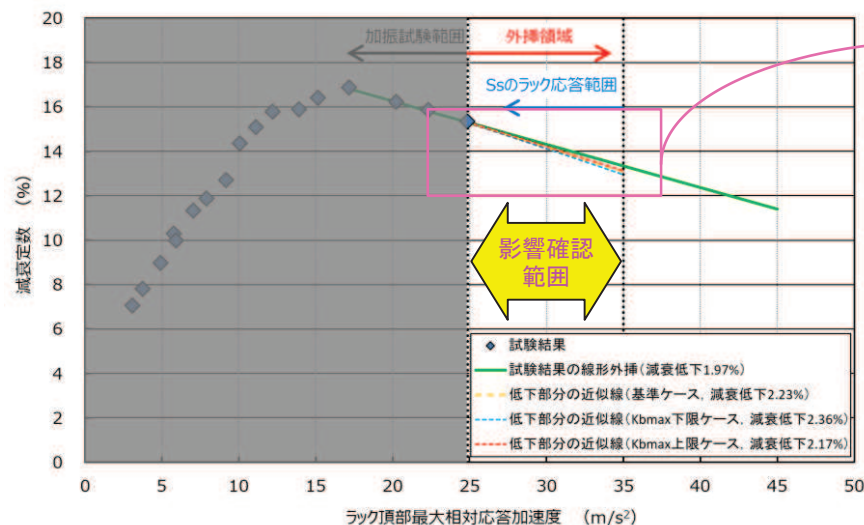


拡大

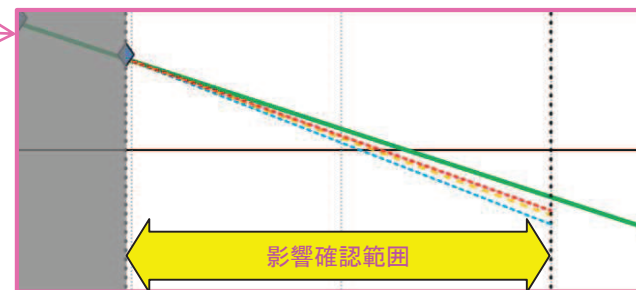


最大の減衰低下量: 2.23%(基準ケース)

c. 締結ボルト剛性 Kb_{max} の入力値を変動させた場合

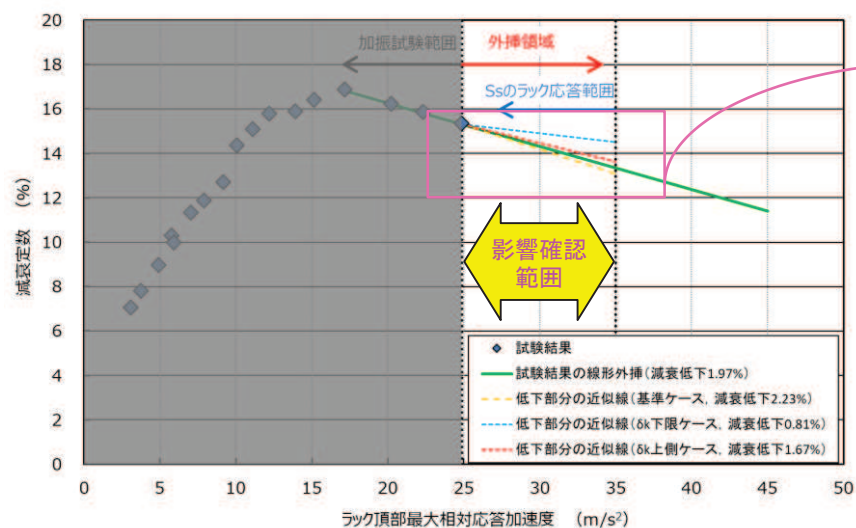


拡大

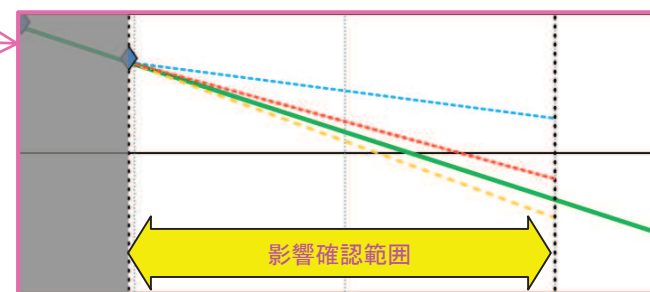


最大の減衰低下量: 2.36% (Kb_{max} 下限ケース)

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

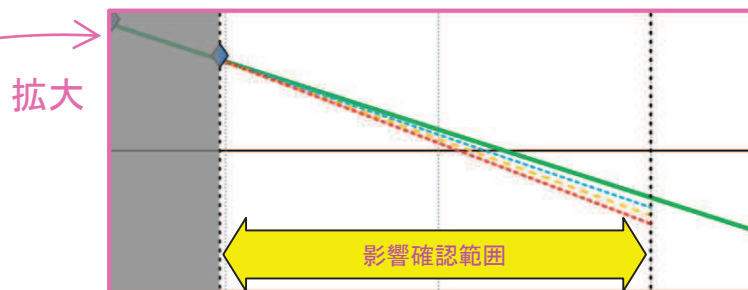
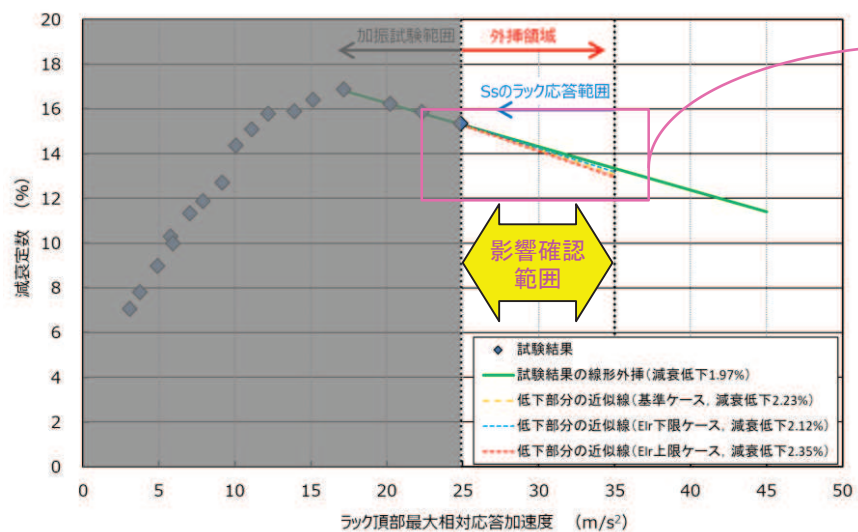


拡大



最大の減衰低下量: 2.23% (基準ケース)

e. 燃料ラックEI_r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)

空調用ダクトの例(JEAG4601-1991 追補版より引用)

減衰定数(減衰定数)の取得方法

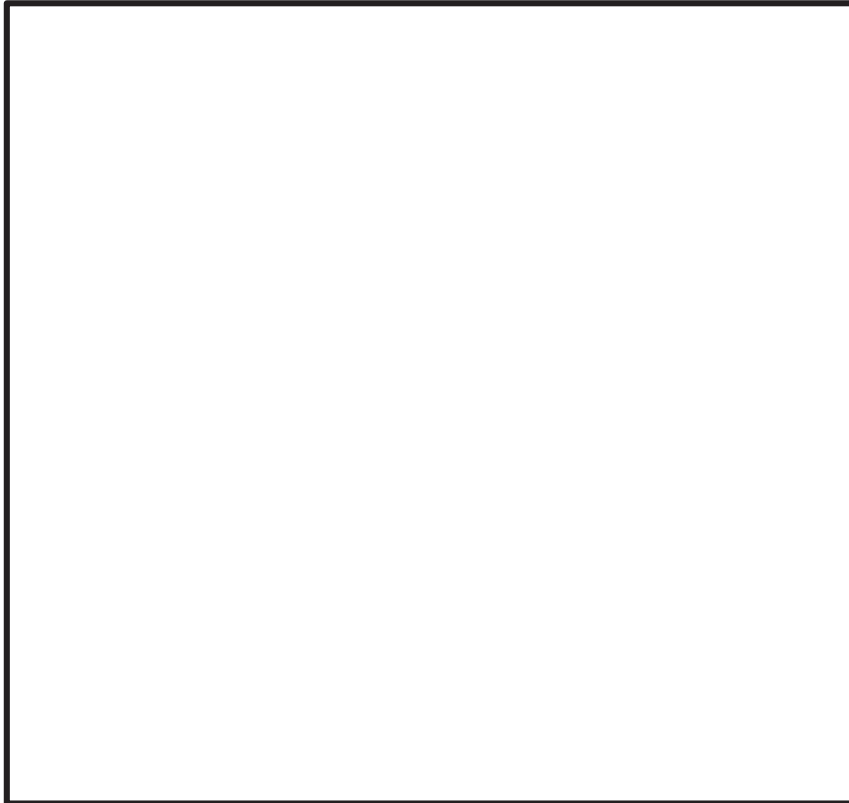
減衰定数

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

PWR蒸気発生器伝熱管の例(JEAC4601-2008より引用)

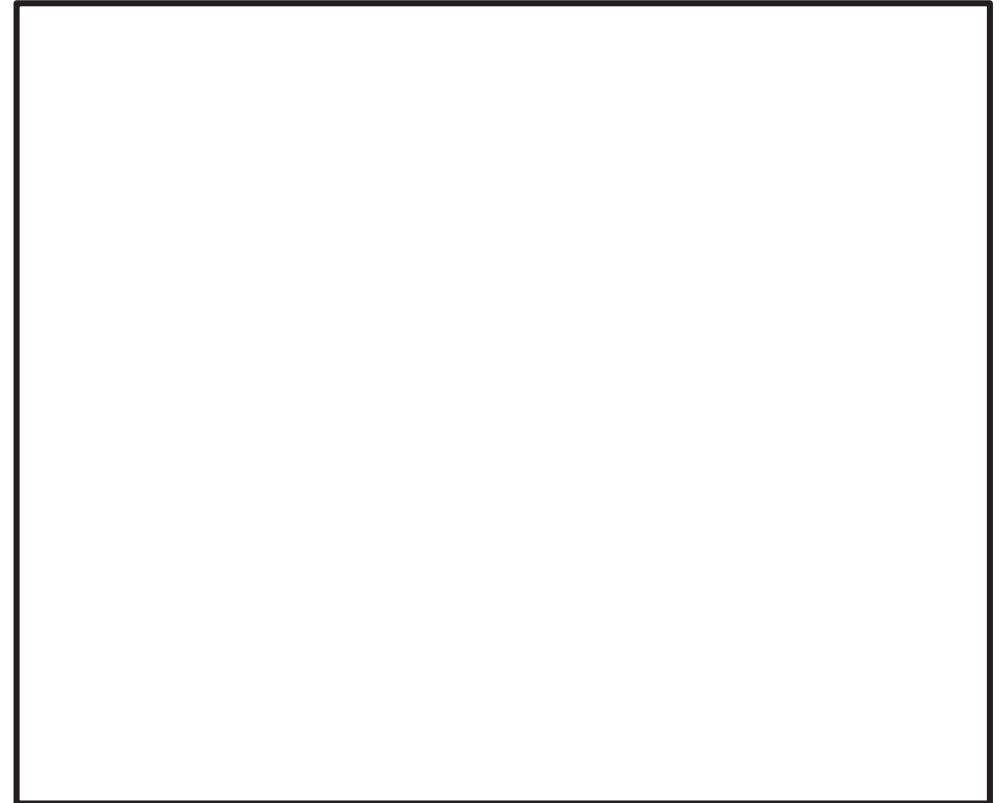
減衰定数(減衰定数)の取得方法



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

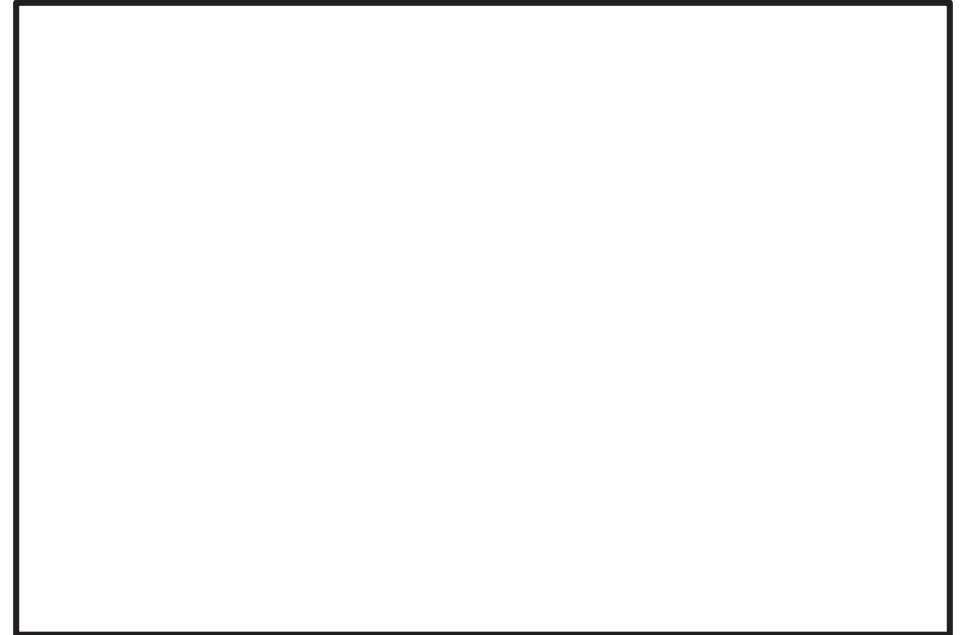


PWR使用済燃料貯蔵ラック(キャン型)の例(JEAC4601-2008より引用)

減衰定数(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



別紙4. 各種設備の設計用減衰定数の設定事例(4/6)

クレーン類(BWR燃料取替機)の例(JEAC4601-2008より引用)

減衰定数(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

配管系(Uボルト支持)の例(JEAC4601-2008より引用)

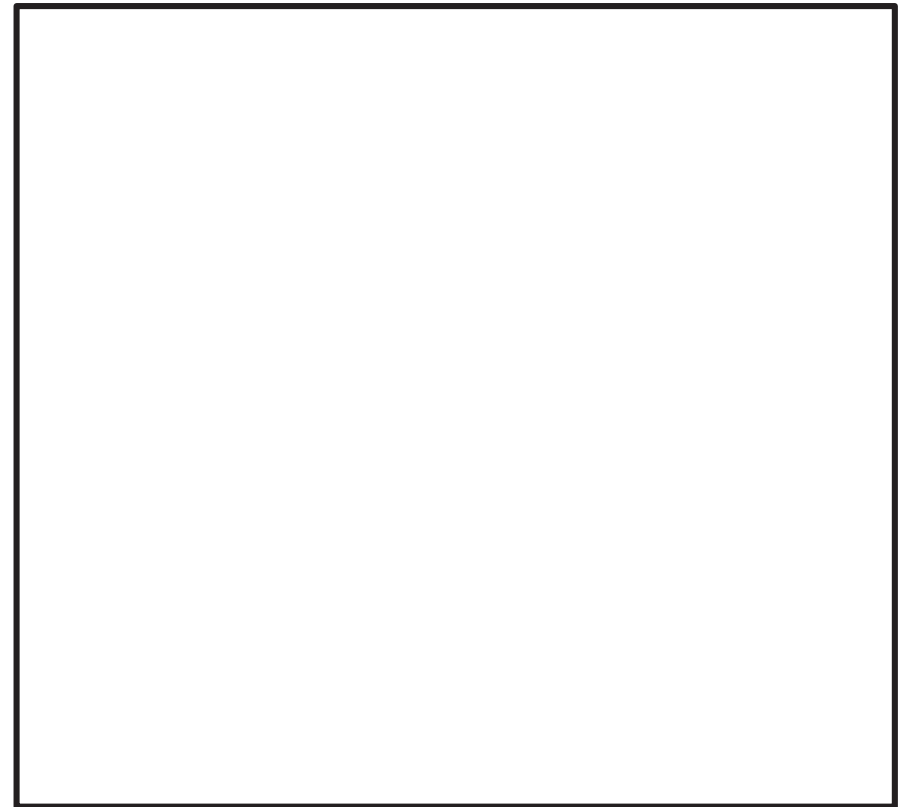
減衰定数(減衰定数)の取得方法



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



別紙4. 各種設備の設計用減衰定数の設定事例(6/6) (設計用減衰定数に関する海外規格の例)

米国Regulatory Guide 1.61の例

- 米国Regulatory Guide 1.61*では、米国の発電用原子炉施設の耐震設計に適用する設計用減衰定数を定義している(下表)。
- その中では、2つの異なる地震、Safe-Shutdown Earthquake (SSE, 安全停止地震)及びOperating-Basis Earthquake (OBE, 運転基準地震)に対して、それぞれに適用可能な設計用減衰定数が示されており、地震動レベルに応じた設計用減衰定数が規定されている。

注記*：“DAMPING VALUES FOR SEISMIC DESIGN OF NUCLEAR POWER PLANTS”, U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, REGULATORY GUIDE 1.61, Revision 1, March 2007.

Table 1. SSE Damping Values

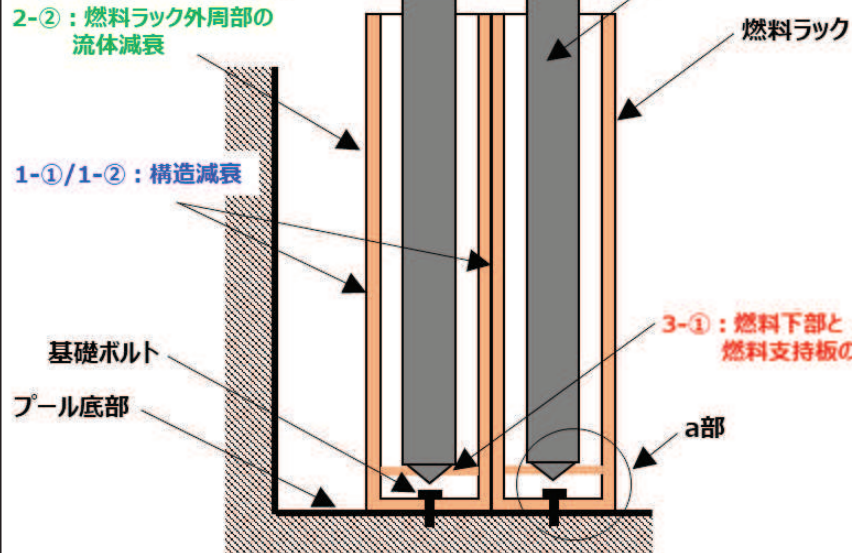
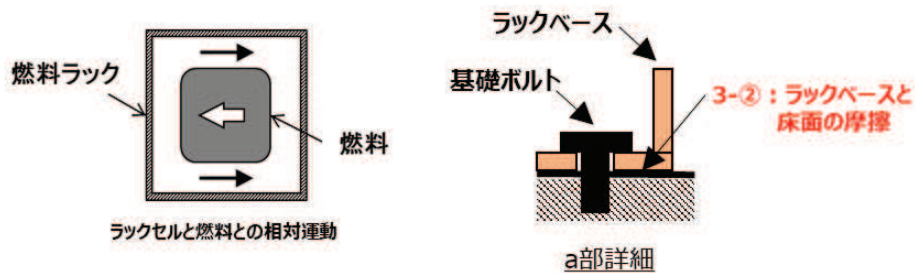
| Structural Material | Damping (% of Critical Damping) |
|---|--|
| Reinforced Concrete | 7% |
| Reinforced Masonry | 7% |
| Prestressed Concrete | 5% |
| Welded Steel or Bolted Steel with Friction Connections | 4% |
| Bolted Steel with Bearing Connections | 7% |
| Note: For steel structures with a combination of different connection types, use the lowest specified damping value, or as an alternative, use a “weighted average” damping value based on the number of each type present in the structure. | |

Table 2. OBE Damping Values

| Structural Material | Damping (% of Critical Damping) |
|--|--|
| Reinforced Concrete | 4% |
| Reinforced Masonry | 4% |
| Prestressed Concrete | 3% |
| Welded Steel or Bolted Steel with Friction Connections | 3% |
| Bolted Steel with Bearing Connections | 5% |

➤ 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



| 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 $\ddot{x}(t)$ 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。

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

- また、減衰定数 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。

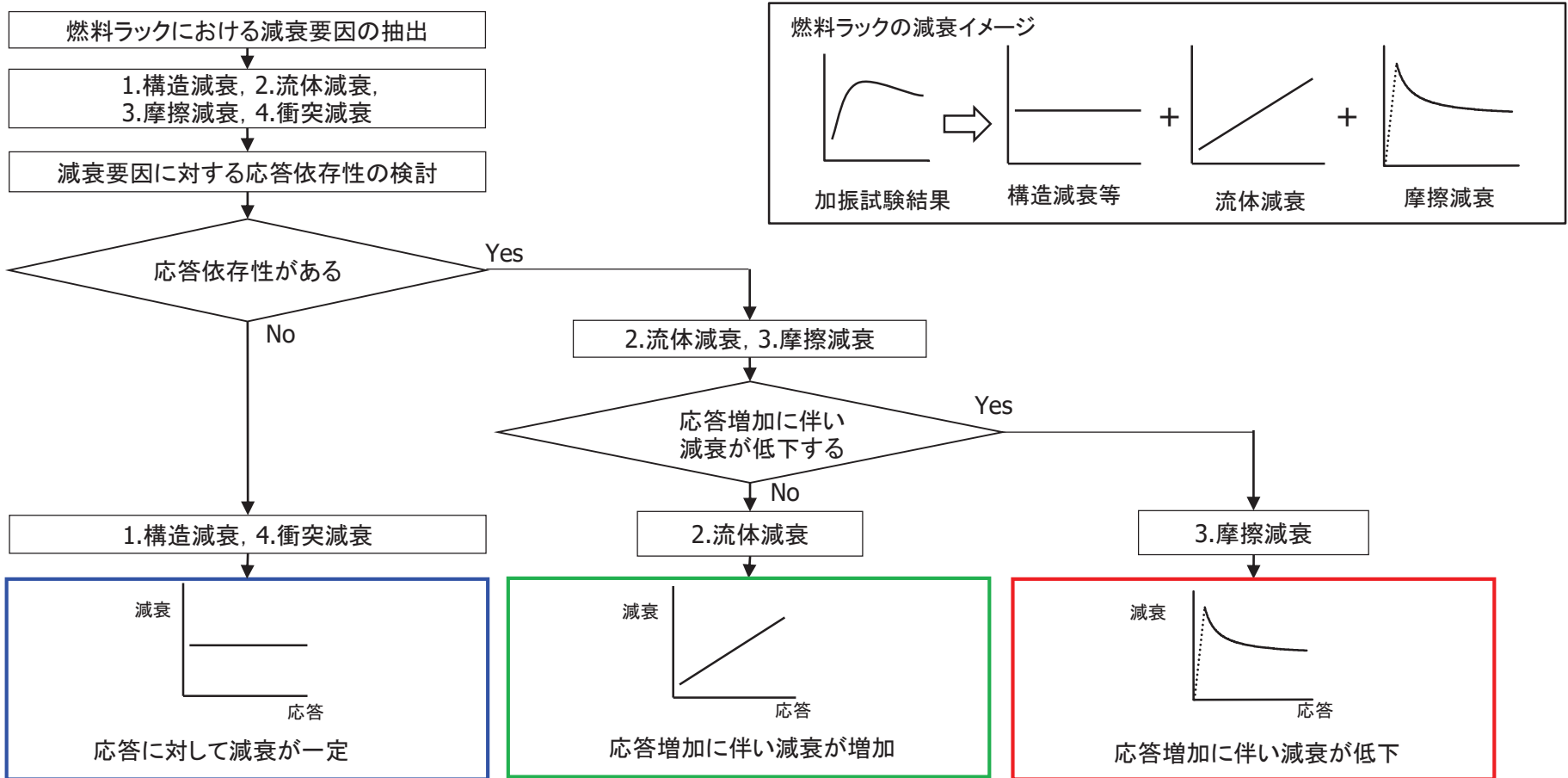
$$\zeta = \frac{1}{2Q_1}$$

- 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

- 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