

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉審査資料	
資料番号	KK67-0100 改12
提出年月日	平成28年8月18日

## 柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉

地震による損傷の防止について  
(補足説明資料)

平成28年8月

東京電力ホールディングス株式会社

## 目次

- I. 耐震評価対象の網羅性，既工認との手法の相違点の整理について
  - I-1 耐震評価対象の網羅性について
    - 1. 申請施設の網羅性，代表性について
  - I-2 既工認との手法の相違点の整理について
    - 1. 建屋及び原子炉の地震応答解析モデルの高度化について
      - 別紙1 原子炉建屋の地震応答解析におけるコンクリート実剛性の採用について
      - 別紙2 地震応答解析モデルにおける補助壁の評価方法について
      - 別紙3 建屋側面地盤回転ばねを考慮することの妥当性について
      - 別紙4 原子炉本体基礎の復元力特性について
    - 2. 既工認実績のない規格・手法の適用性について
      - 2-1 原子炉格納容器コンクリート部の応力解析における弾塑性解析の採用について
      - 2-2 土木構造物の解析手法および解析モデルの精緻化について
      - 2-3 使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数について
    - 3. その他手法の相違点等について
      - 3-1 原子炉建屋屋根トラス及び排気筒の評価モデルについて
      - 3-2 機器・配管系の減衰定数について
    - 4. 機器・配管系の設備の既工認からの構造変更について
- II. 下位クラス施設の波及的影響の検討について

下線部：今回ご提出資料

## 2-3 使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数について

## 目次

1. はじめに .....	1
2. 燃料ラックの概要および耐震設計手法の既工認と今回手法の比較 .....	1
2.1 燃料ラックの構造と燃料プール内の配置 .....	1
2.2 燃料ラックの耐震設計手法について .....	6
2.3 既工認と今回工認の耐震設計手法の比較 .....	8
2.4 減衰定数を変更する目的と効果 .....	8
3. 格子ラックおよび市松ラックの減衰定数の設定 .....	10
3.1 減衰特性の確認試験 .....	10
3.1.1 実物大試験供試体の概要 .....	10
3.1.2 燃料ラックの水中加振試験装置および試験手法について .....	10
3.1.3 試験結果 .....	22
3.2 試験結果に基づく燃料ラックの設計用減衰定数の設定 .....	23
3.2.1 試験結果の実機燃料ラックへの適用性 .....	23
3.2.2 試験結果に基づく燃料ラックの設計用減衰定数の設定 .....	23
4. 角管ラックの減衰定数の設定 .....	29
4.1 減衰特性の確認試験 .....	29
4.1.1 実物大試験供試体の概要 .....	29
4.1.2 燃料ラックの水中加振試験装置および試験手法について .....	31
4.1.3 試験結果 .....	38
4.2 試験結果に基づく燃料ラックの設計用減衰定数の設定 .....	39
4.2.1 試験結果の実機燃料ラックへの適用性 .....	39
4.2.2 試験結果に基づく燃料ラックの設計用減衰定数の設定 .....	39
5. 結論 .....	41
別紙－1 試験水槽の形状決定方法（市松ラック） .....	42
別紙－2 試験における水深の影響について .....	45
別紙－3 減衰定数の算出方法 .....	49
別紙－4 ハーフパワー法について .....	51
別紙－5 自由振動波形からの減衰定数の算出方法 .....	53
別紙－6 正弦半波加振試験における振動台の影響について .....	54
別紙－7 スロッシングによる減衰への影響について .....	55
別紙－8 プール水および燃料集合体の体数が減衰定数に与える影響 .....	56
別紙－9 試験水槽の形状決定方法（角管ラック） .....	58
別紙－10 応答倍率による減衰比の算出方法と燃料ラック耐震評価への適用性 .....	61
別紙－11 減衰の応答依存性を考慮した燃料ラックの減衰定数の確認方法 .....	70
別紙－12 燃料集合体の体数が減衰定数へ与える影響 .....	72

## 1. はじめに

柏崎刈羽原子力発電所6号および7号炉（以下「柏崎刈羽6号および7号炉」という）の既工認では、使用済燃料貯蔵ラック(以下「燃料ラック」という)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）に規定される溶接構造物の設計用減衰定数1.0%を用いている。

しかし、実際の燃料ラックは使用済燃料貯蔵プール（以下「燃料プール」という）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、地震時には燃料ラックと燃料集合体間の摩擦や、燃料ラックおよび燃料集合体の流体中での振動により、運動エネルギーの散逸が大きくなり、減衰定数1.0%より大きな減衰があると考えられる。

そのため、柏崎刈羽6号および7号炉における今回の工認の耐震設計において、燃料ラックの設計用減衰定数は実物大加振試験の結果に基づき設定している。

本資料は、加振試験結果に基づき設定した今回の工認の耐震設計に適用する設計用減衰定数について纏めたものである。

## 2. 燃料ラックの概要および耐震設計手法の既工認と今回手法の比較

### 2.1 燃料ラックの構造と燃料プール内の配置

柏崎刈羽原子力発電所6号炉（以下「柏崎刈羽6号炉」という）の燃料プールには、格子型燃料ラック（以下「格子ラック」という）および角管並列型燃料ラック（以下「角管ラック」という）を設置し、柏崎刈羽原子力発電所7号炉（以下「柏崎刈羽7号炉」という）の燃料プールには、角管市松型燃料ラック（以下「市松ラック」という）を設置している（図1）。

格子ラックは、ボロン添加ステンレス鋼（以下「B-SUS」という）製の板材を格子状に溶接し、市松ラックは、B-SUS製の角管を市松模様に配列することで燃料集合体を貯蔵する格子状のセルを構成する溶接構造物である。

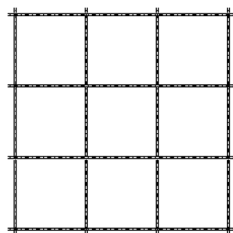
角管ラックはB-SUS製の角管をステンレス鋼板の補強板で束ねた溶接構造物である。

また、格子ラック、市松ラックおよび角管ラックは、ともにベースを燃料プールの底部に基礎ボルトにより固定している。

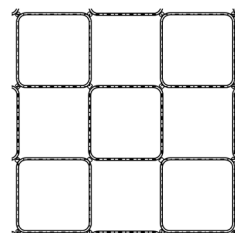
柏崎刈羽6号および7号炉の燃料ラック種別と貯蔵体数を表1に示す。また、燃料プール内における燃料ラックの配置を図2および図3に示す。

表 1 ラック種別とラックサイズ

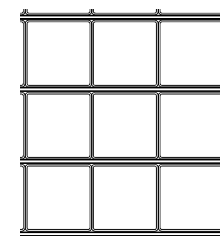
設置場所	ラック種別	ラックサイズ	貯蔵体数
柏崎刈羽 6 号炉 燃料プール	格子ラック	120 体	6 列×10 列×2 台
		187 体	9 列×10 列+8 列×11 列
		210 体	10 列×10 列+10 列×11 列
	角管ラック	176 体	11 列×16 列
		187 体	11 列×17 列
柏崎刈羽 7 号炉 燃料プール	市松ラック	77 体	7 列×11 列
		100 体	10 列×10 列
		110 体	10 列×11 列
		121 体	11 列×11 列



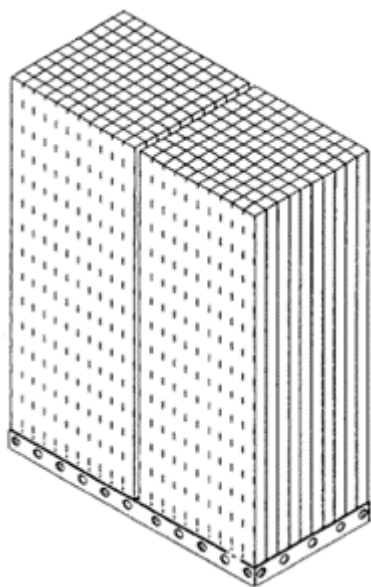
格子ラック断面図



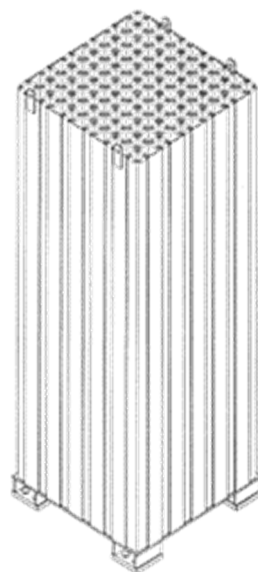
市松ラック断面図



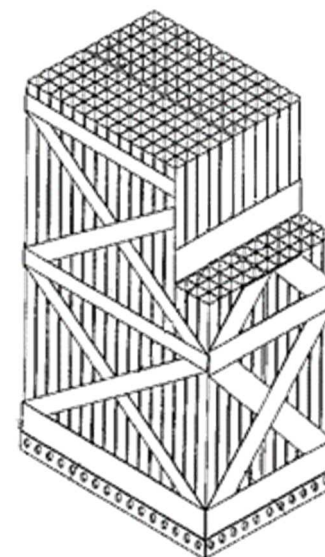
角管ラック断面図



(a) 格子ラック

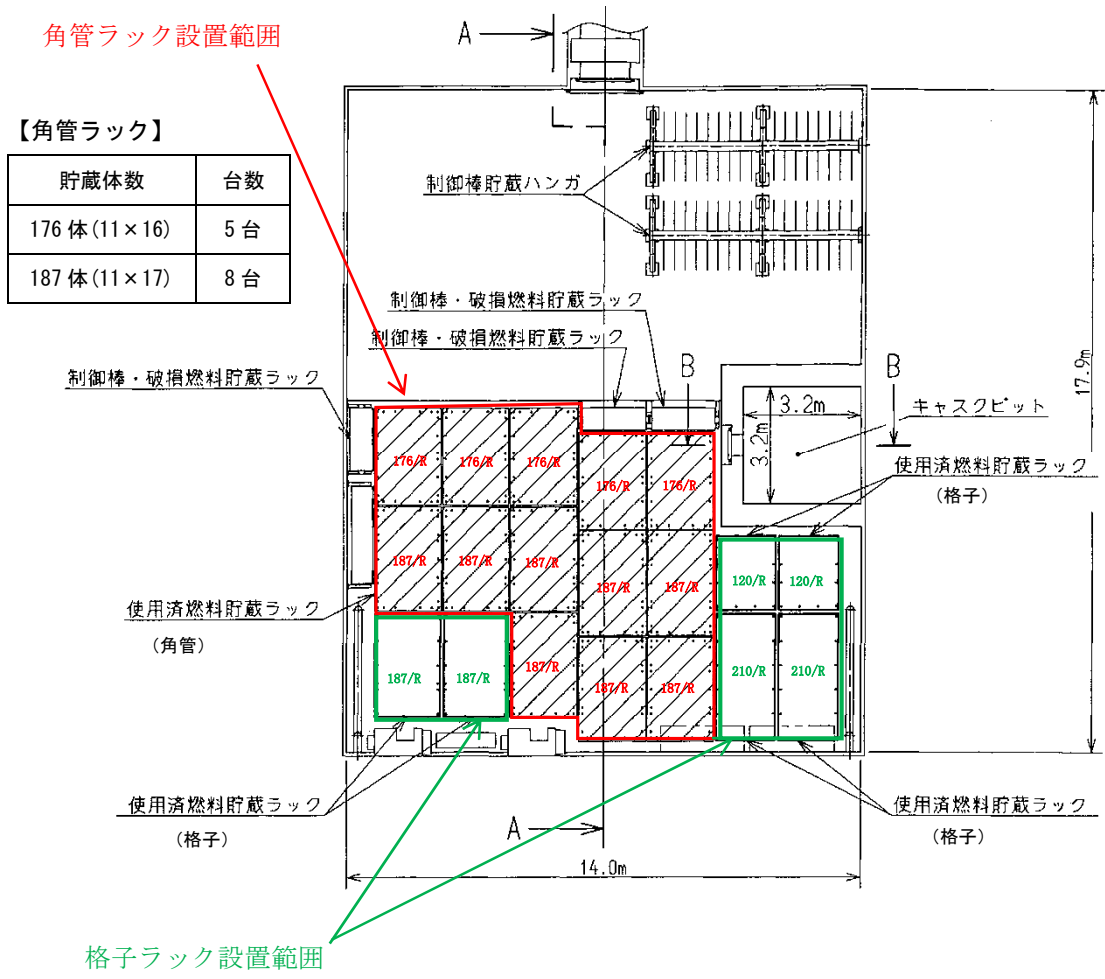


(b) 市松ラック



(c) 角管ラック

図 1 燃料ラックの構造図 (概要)



【格子ラック】

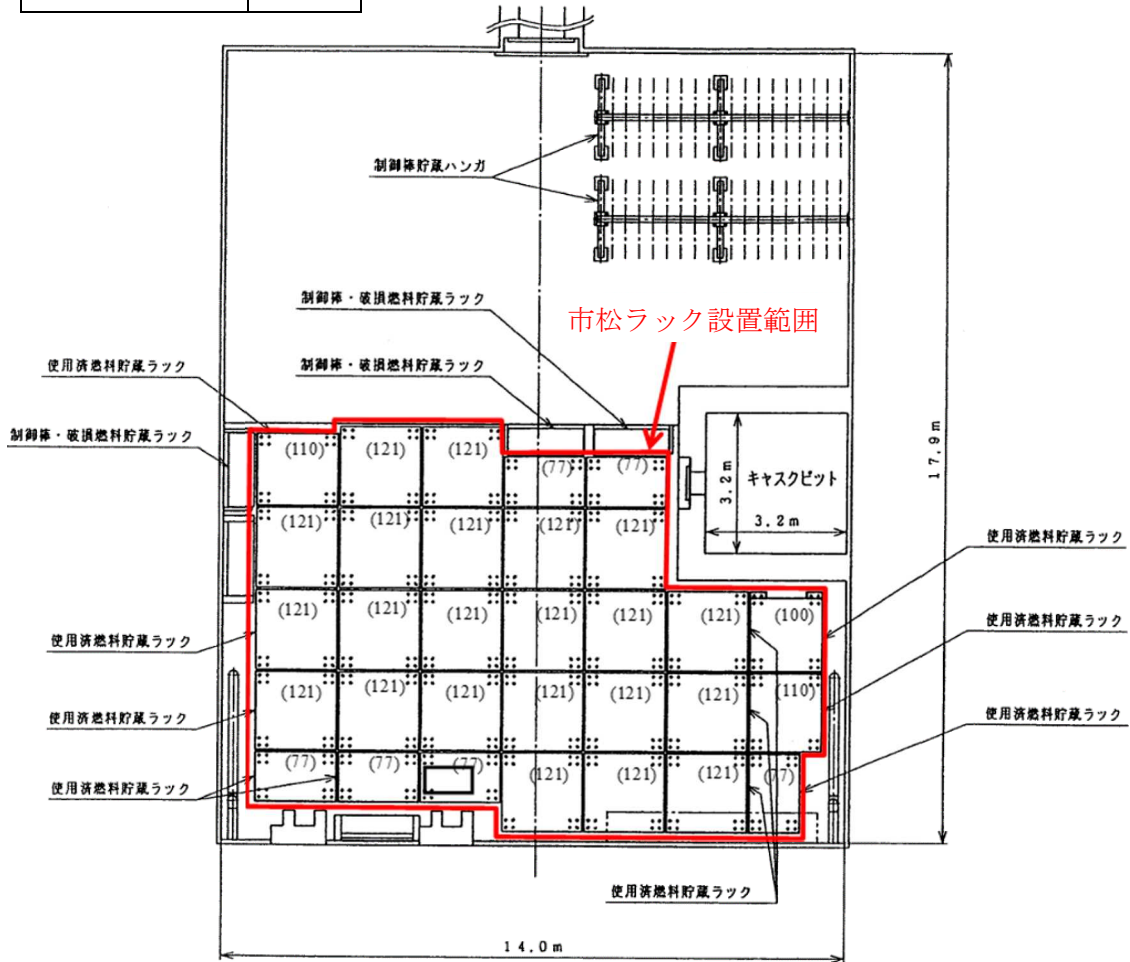
貯蔵体数	台数
120 体 (10×6×2)	2 台
187 体 (11×8+11×9)	2 台
210 体 (10×10+10×11)	2 台

図 2 燃料ラック配置図 (柏崎刈羽 6 号炉)



【市松ラック】

貯蔵体数	台数
77 体 (7×11)	6 台
100 体 (10×10)	1 台
110 体 (11×10)	2 台
121 体 (11×11)	22 台



※( )内の数字はラックの貯蔵体数

図 3 燃料ラック配置図 (柏崎刈羽 7号炉)

## 2.2 燃料ラックの耐震設計手法について

既工認の耐震設計において、格子ラックおよび市松ラックは、燃料ラックをシェル要素でモデル化した3次元有限要素モデル（FEMモデル）としている（図4）。

一方、角管ラックは、はり要素とシェル要素でモデル化した3次元有限要素モデル（FEMモデル）としており、角管と補強板はそれぞれ等価な断面を持つ1本のはり要素、一部の補強板およびベースはシェル要素でモデル化している（図4）。

燃料ラックの質量には、燃料ラック自身の質量、燃料集合体の質量、燃料ラックに含まれる水の質量および水中の機器の形状により排除される機器周囲の流体の質量である付加質量を考慮している。これら燃料集合体および燃料ラックに含まれる水の質量ならびに付加質量は角管および板の全長にわたって等分布に与えている。

既工認の応力評価は、部材（角管、格子状の鋼板、補強板）および基礎ボルトに対しておこなっており、部材の応力は図4の解析モデルを用いて、スペクトルモーダル解析による最大応答加速度から、部材に作用する最大荷重を算出し応力を評価している。基礎ボルトの応力は、燃料ラック設置位置における水平・鉛直震度を用いて、ラック基礎に生じるモーメントとせん断力から基礎ボルトに作用する最大荷重を算出し、評価している。

なお、各部の許容応力は「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601・補-1984」に規定されている「その他支持構造物」の許容応力を用いている。

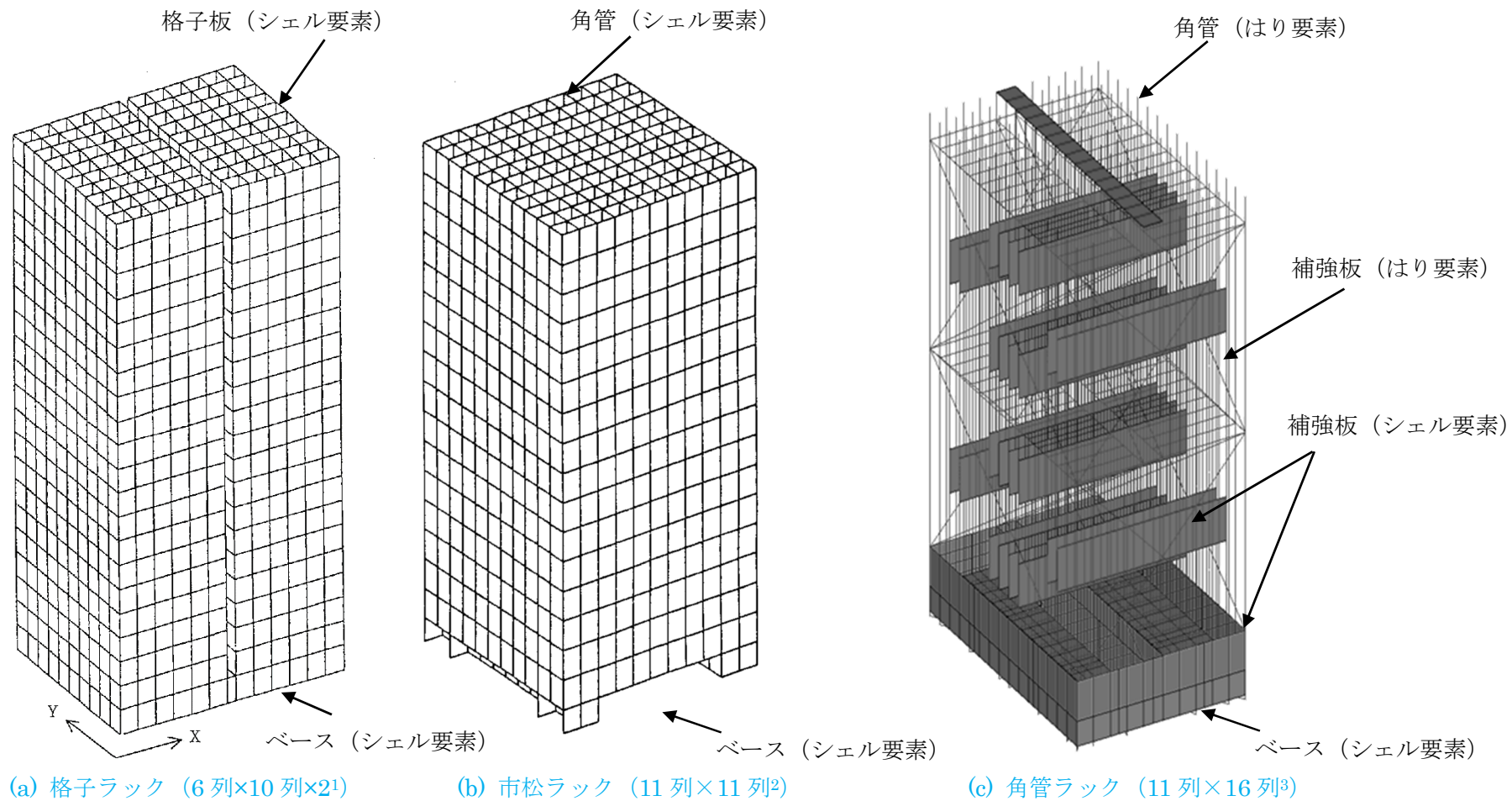


図 4 燃料ラックの解析モデル例

1 既工認では 120 体と表記  
 2 既工認では 121 体と表記  
 3 既工認では 176 体と表記

### 2.3 既工認と今回工認の耐震設計手法の比較

柏崎刈羽 6 号および 7 号炉の燃料ラックの耐震設計における既工認と今回手法の比較を表 2 に示す。既工認からの変更は設計用減衰定数のみである。

表 2 柏崎刈羽 6 号および 7 号炉 燃料ラックの耐震設計法の既工認と今回手法の比較

		既工認手法	今回手法
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	静的設計*	同左（剛構造のため）
設計用減衰定数	水平方向	1.0%	Ss : 7.0% Sd : 5.0%
	鉛直方向	—	—
許容応力		JEAG4601	同左
地盤・建屋等の不確かさの考慮		床応答スペクトルの周期方向への ±10%拡幅	同左
モデルの考え方		剛性は燃料ラック本体の寸法およ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体、水および付加質量を考慮	同左

※静的地震力による評価。

### 2.4 減衰定数を変更する目的と効果

既工認における設計用減衰定数は、JEAG4601 に規定される溶接構造物の設計用減衰定数 1.0%を採用していた。しかし、実際の燃料ラックは、燃料プール内の水中に設置されることや、燃料集合体を貯蔵していることから、地震時には燃料ラックと燃料集合体の摩擦や、燃料ラックおよび燃料集合体が流体中を振動することにより、運動エネルギーの散逸が大きくなり、1.0%より大きな減衰があると考えられる。

したがって、地震時の燃料ラックの挙動を把握するため、実機を模擬した加振試験を行った結果、既工認では考慮されていなかった、より大きな減衰効果が見込まれることが確認された。

これらの知見に基づいて、より現実に近い燃料ラックの挙動を模擬して評価を行うことを目的に、今回の工認の耐震設計では、実物大加振試験の結果に基づいた燃料ラックの設計用減衰定数として、基準地震動 Ss に対しては減衰定数 7.0%、弾性設計用地震動 Sd に対しては減衰定数 5.0%を採用する。

なお、本設計用減衰定数を用いて、既工認で許容値に対する裕度が最も小さい柏崎刈羽7号炉における燃料ラックの構造強度評価を実施する場合、応力の発生値が低減すると考える（表 3、図 5）。

表 3 基準地震動 Ss における市松ラック（77 体）の試評価結果

ラック種類	評価部位	応力分類	計算値		評価基準値
			減衰定数 1.0%	減衰定数 7.0% (今回工認)	
市松ラック (77 体)	基礎ボルト	引張応力	165*MPa	122*MPa	153MPa

\*：暫定条件による概算値。

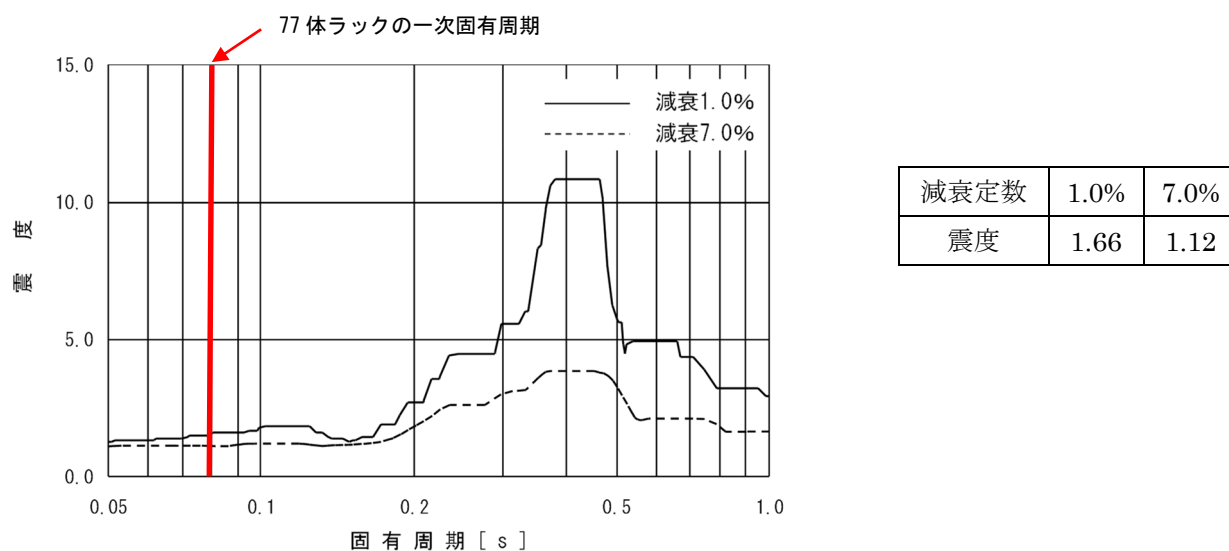


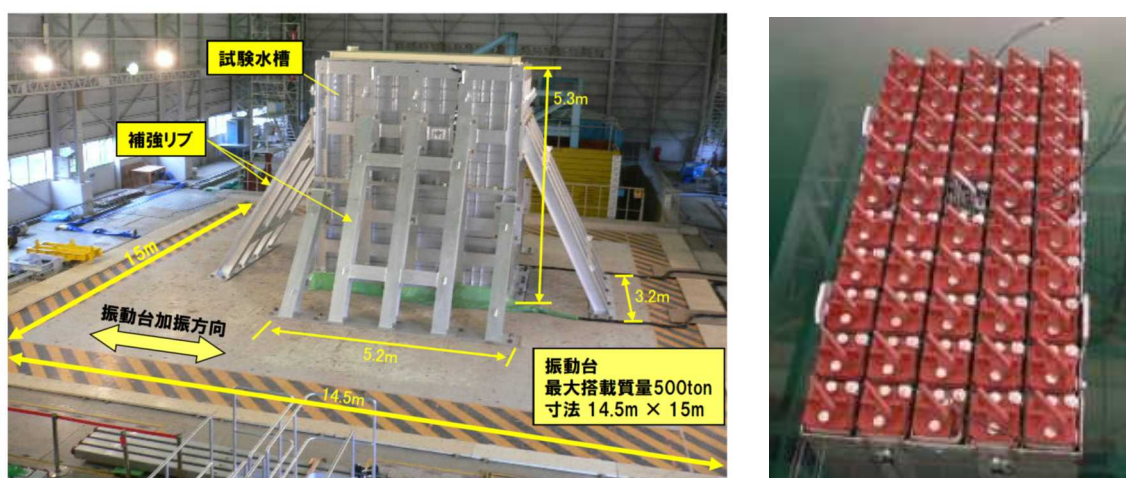
図 5 基準地震動 Ss, 燃料ラック設置位置における水平床応答スペクトル比較  
(R/B, T.M.S.L 23,500 mm)

### 3. 格子ラックおよび市松ラックの減衰定数の設定

#### 3.1 減衰特性の確認試験

##### 3.1.1 実物大試験供試体の概要

燃料プール内の環境（水中）および使用状態（燃料集合体貯蔵）において、燃料ラックが加振された際の減衰特性を確認することを目的に、模擬燃料集合体を設置した模擬燃料ラック（以下「供試体ラック」という）の水槽内での加振試験を実施した（図 6）。試験は、振動台上に、供試体ラックを設置した試験水槽を据え付け、長辺および短辺方向に加振した。供試体ラックは、燃料プール床との固定状態と同一とするために、水槽床に基礎ボルトで固定した自立式とした。



(1) 試験状況 [2]

(2) 供試体の水槽内設置状態

図 6 加振試験の実施状況

##### 3.1.2 燃料ラックの水中加振試験装置および試験手法について

燃料ラックは多数の燃料集合体を貯蔵していることおよび水中に設置されていることにより、以下の減衰が大きく作用すると考えられる。

- ① ラックの部材間摩擦、燃料集合体とラック間の摺動・衝突による減衰効果
- ② 流体減衰等による減衰効果

このため、供試体ラック等の基本構造や寸法は、実機燃料ラックの基本構造、ラックセルの寸法等を考慮し設定する必要がある。

###### (1) 供試体ラック

柏崎刈羽 6 号炉の格子ラックおよび柏崎刈羽 7 号炉の市松ラックは、鋼板または角管を溶接することで燃料体を貯蔵する格子状のセルを構成している（図 7）。外形は、鋼板または角管を溶接している（図 8）。以上より前述の影響は格子ラックと市松ラックで差はないと考えられることから、水中加振試験は市松ラックを模擬した供試体ラックを代表させて実施した。供試体ラックの寸法等は、実機の市松ラックおよび格子ラックと同



等となるよう設定した。

また、燃料ラック全体の減衰効果は、燃料集合体の体数増加に伴い前述①および②の減衰効果が大きくなると考えられるため、実機の市松ラック（77体 [7列×11列] ～121体 [11列×11列]）および格子ラック（120体 [6列×10列,6列×10列] ～210体 [10列×11列,10列×10列]）に対して、体数が小さくなるよう、供試体ラックの貯蔵燃料集合体数は、50体 [5列×10列] とした（図 9）。



(1) 格子ラックの構造

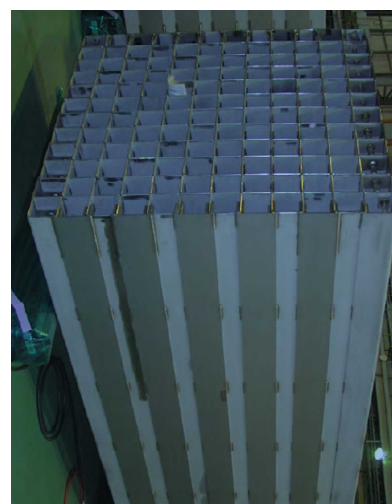


(2) 市松ラックの構造

図 7 格子ラックと市松ラックの構造



(1) 格子ラックの構造



(2) 市松ラックの構造

図 8 格子ラックと市松ラックの外形

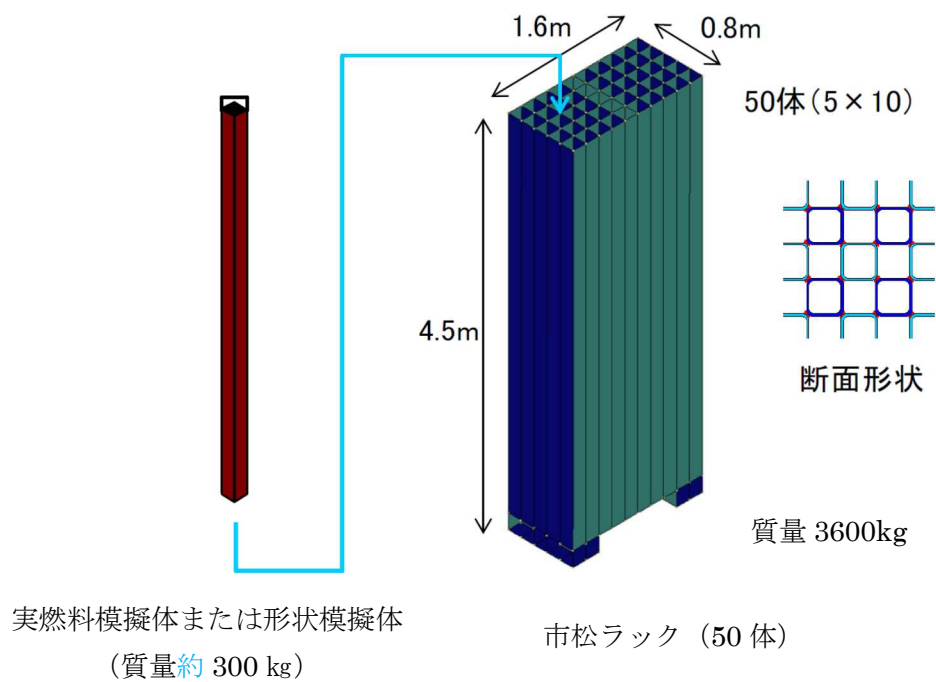


図 9 供試体の構造(市松ラック供試体) ㊦

## (2) 模擬燃料集合体

供試体ラックに設置する模擬燃料集合体には、実燃料模擬体と形状模擬体の 2 種類を用いた。実燃料模擬体は、チャンネルボックス等は実機と同様であり、燃料ペレットの代わりに鉛で質量を一致させたものである。形状模擬体は、実燃料模擬体の質量およびチャンネルボックス外形を模擬したものである (図 10, 表 4)。



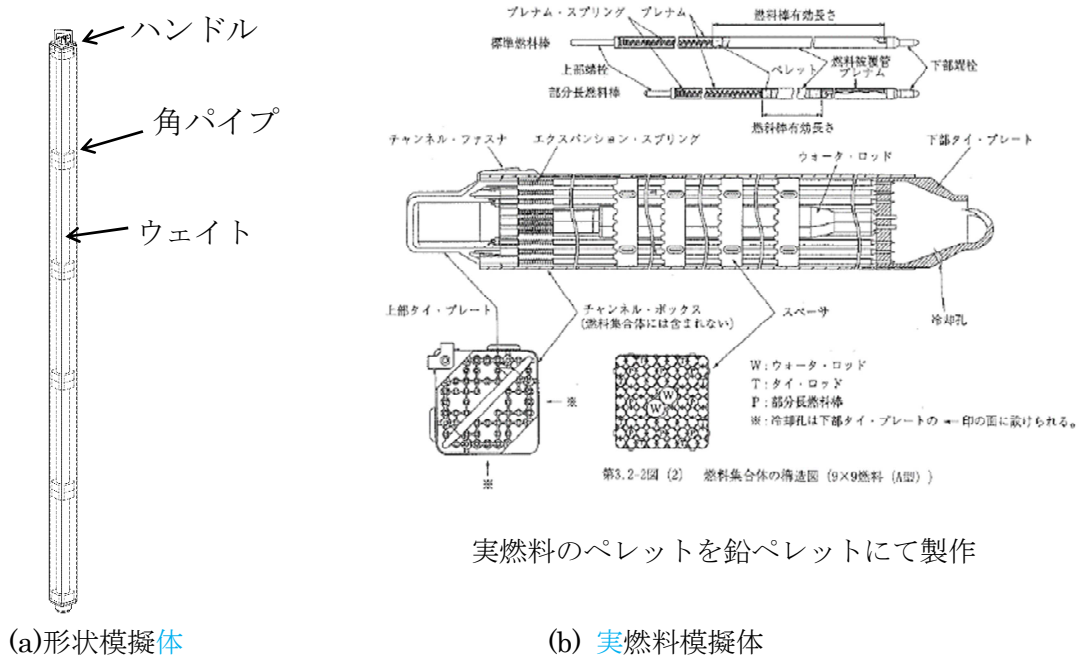


図 10 模擬燃料集合体の内部構造

表 4 実機燃料集合体と模擬燃料集合体仕様の比較

	模擬燃料集合体		柏崎刈羽 7号炉 8×8 燃料*2
	実燃料模擬体	形状模擬体	
長さ			4470mm
断面寸法*1			□139.14mm
質量	約 300kg	約 300kg	302kg
材質			SUS および Zr 材

\*1 チャンネルボックス外形寸法

\*2 柏崎刈羽 7号炉に貯蔵されている燃料集合体のうち、最も重量が大きいもの

### (3) 試験水槽

燃料プール内に設置されている状態を模擬するため、試験水槽は、流体によるラックへの付加質量が十分小さく、流体の影響が無限水中と同等となるような大きさに設定した(別紙-1)。

### (4) 実機と供試体等の主要諸元比較

供試体ラックおよび試験水槽等(以下「供試体等」という)と実機との主要諸元の比較を表 5に示す。

表 5 格子ラックおよび市松ラックと供試体等の主要諸元比較

項目		実機		供試体等	実機への適用性
燃料ラック	ラックセルの形式	格子型	角管市松型	同左	基本構造(燃料集合体を貯蔵する格子状のセル構成)が同一である。
	燃料ラックの支持形式	ボルトによる床固定式	同左	同左	
		自立型	同左	同左	
	貯蔵体数	120体(6×10,6×10) 187体(11×8,11×9) 210体(10×11,10×10)	77体(7×11) 100体(10×10) 110体(10×11) 121体(11×11)	50体(5×10)	供試体は流体および燃料集合体による減衰効果の実機よりも小さいと考えられるラックを選定したことから、本試験結果に基づく減衰定数は、実機の全ての燃料ラックに適用可能と考えられる。
	ラックセル頂部と燃料集合体の最小隙間				ラックセルと燃料集合体の隙間は実機とほぼ同等と考えられることから、その影響は小さいと考えられる(図 1 1)。
	燃料ラックから壁までの距離	約 290~970mm	約 250~900mm	約 450~1600mm	流体による減衰効果が最も小さくなるよう設定した(別紙-1)。
	ラックセル高さ				実機ラックとほぼ同等であることから、その影響は小さいと考えられる。
	ラックセルのピッチ				実機ラックとほぼ同等であることから、その影響は小さいと考えられる(図 1 2)。
	ラックセルの厚さ				実機と同一。
ラックセルの材質	B-SUS	同左	同左	実機と同一。	
燃料集合体	燃料タイプ	9×9 燃料 (ステップⅢ燃料)	8×8 燃料 (ステップⅠ燃料)	模擬燃料集合体	工認では、燃料プール共用化条件を考慮し、評価結果の厳しくなる質量が大きい燃料条件により評価している。
	質量	302kg	同左	300kg	実機とほぼ同等であることから、その影響は小さいと考えられる。
チャンネルボックス	最大外形寸法	148.4mm	同左	同左	実機と同一。
	材料	ジルカロイ-4	同左	同左	
	板厚				
燃料プール	水深	約 12m	同左	約 5m	高さ(水深)は実機と異なるが、燃料ラックの振動特性に与える影響が小さいことを確認した(別紙-2)。

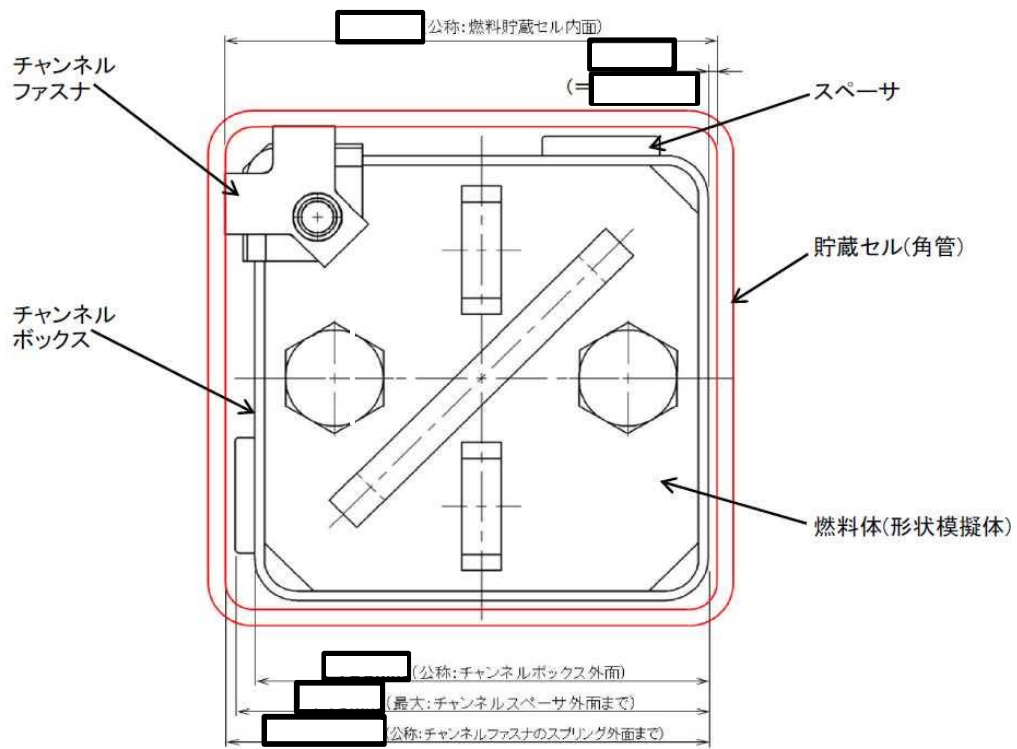
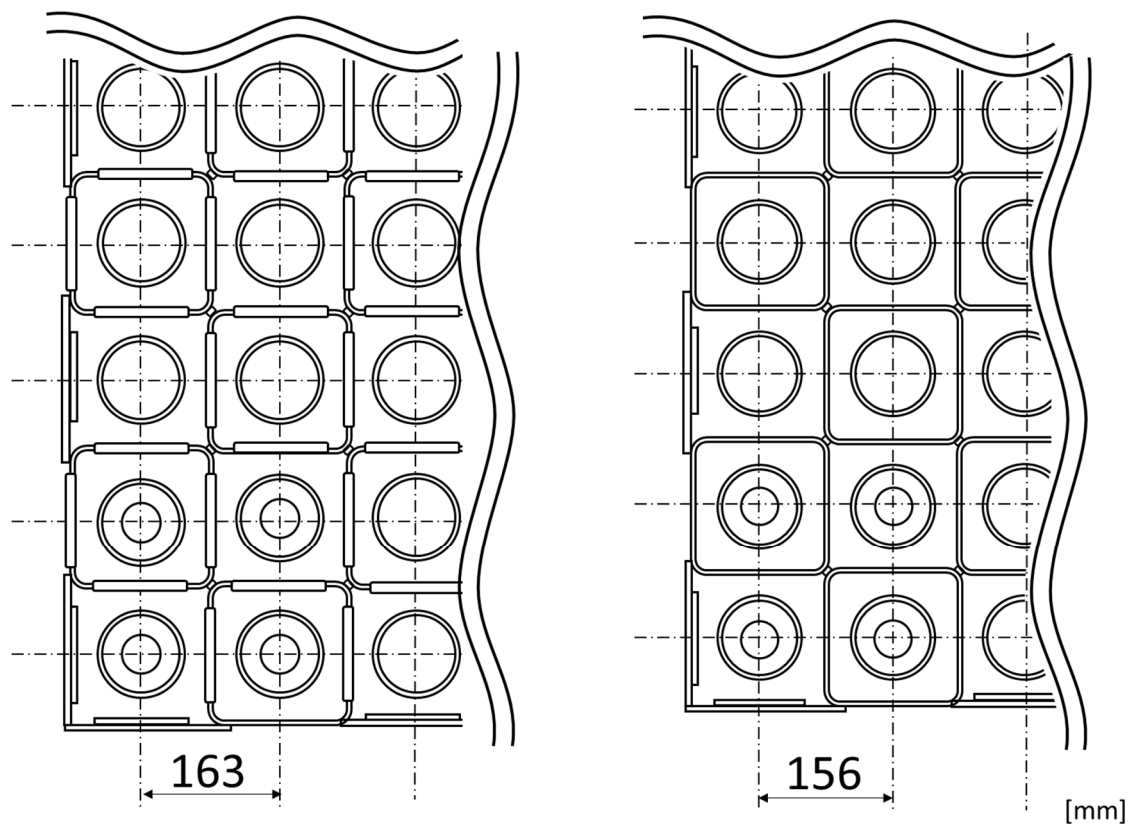


図 1 1 ラックセルと燃料集合体の隙間 (概念図)



(a) 市松ラック

(b) 供試体

図 12 ラックセルのピッチ (概念図)

### (5) 試験方法

供試体ラックに模擬燃料集合体を設置し、試験水槽に注水した状態において、加振試験を実施した。加振レベルの小さい範囲では正弦波による掃引試験を行い、得られた振動台上の加速度および供試体ラック頂部の加速度から求めた伝達関数より、ハーフパワー法を適用して減衰定数を評価した。また、加振レベルの大きい範囲では正弦半波の加振試験を行い、自由減衰波形から減衰定数を評価した (別紙-3~6)。

なお、正弦波掃引試験および正弦半波加振試験は、各々、供試体ラックの長辺方向および短辺方向で加速度\*を変えた3ケースを実施した (表 6)。

表 6 減衰定数の評価に用いた試験条件

No.	試験方法	加振方向	入力加速度※ (m/s <sup>2</sup> )	備考
1	正弦波掃引試験	短辺	0.62	減衰定数をハーフパワー法により算出（別紙－４）
2			0.91	
3			1.22	
4		長辺	0.72	
5			0.97	
6			1.22	
7	正弦半波加振試験	短辺	2.91	減衰定数を自由振動波形から算出（別紙－５）
8			3.98	
9			5.00	
10		長辺	2.96	
11			3.75	
12			4.50	

※振動台上の実測加速度（最大値）

## (6) 加速度の計測方法

供試体ラックの減衰定数を算出するため、供試体ラック頂部の加速度と、振動台上の加速度を計測した。燃料ラック頂部には、短辺方向の加速度を計測する加速度センサーを4台、長辺方向の加速度を計測する加速度センサーを4台の計8台を設置し、振動台上には短辺方向と長辺方向の加速度を計測する加速度センサーを4台設置した（図 13）。

また、燃料ラックの頂部、中間部および基部のひずみにより、燃料ラックが弾性範囲内で加振されていることを確認した。

なお、試験水槽は剛構造で設計しており、試験水槽が剛として挙動し、供試体ラックへ影響を与えないことを確認するため水槽周囲の加速度を計測した（図 14および図 15）。

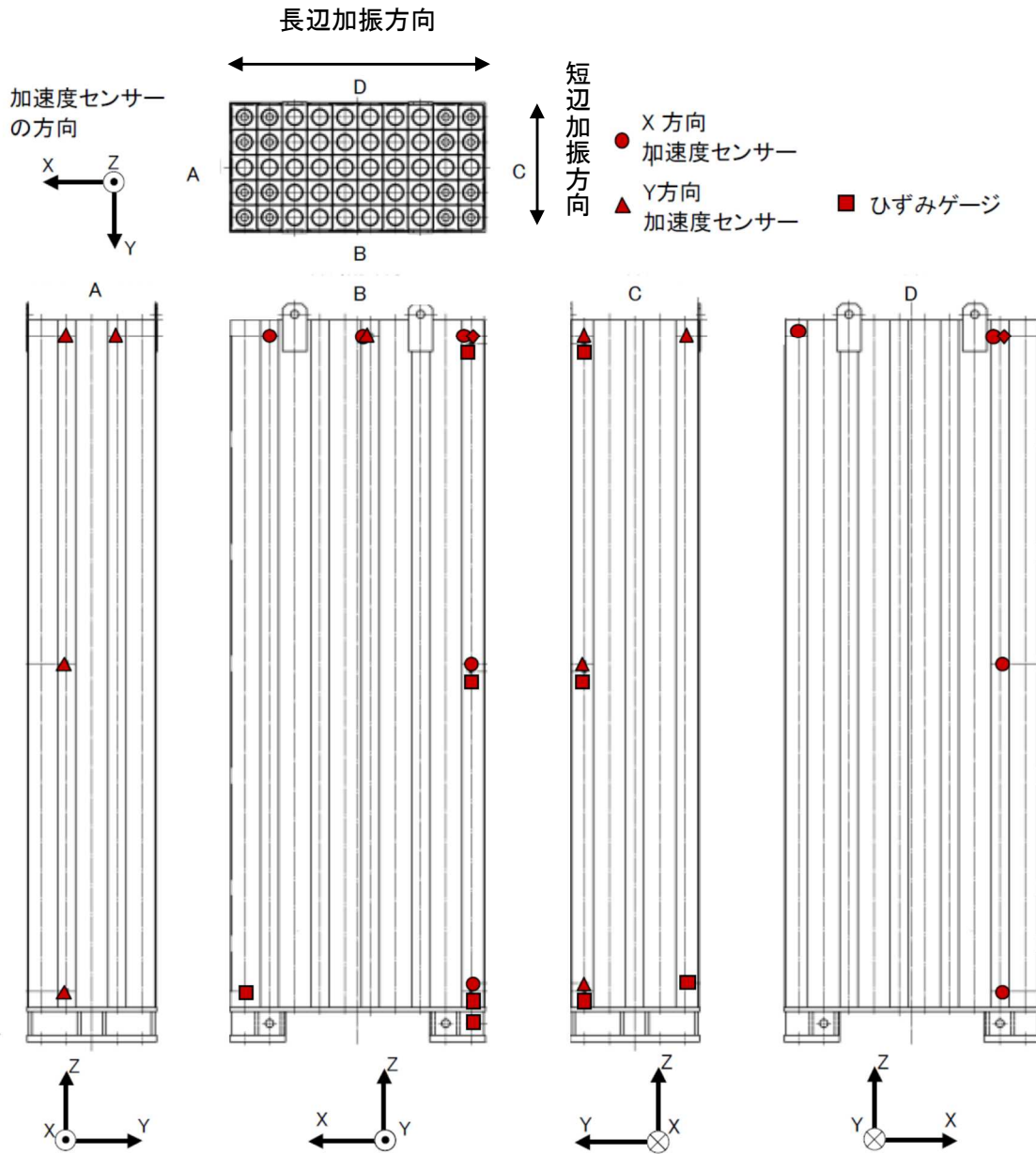


図 1 3 供試体の加速度とひずみの計測位置

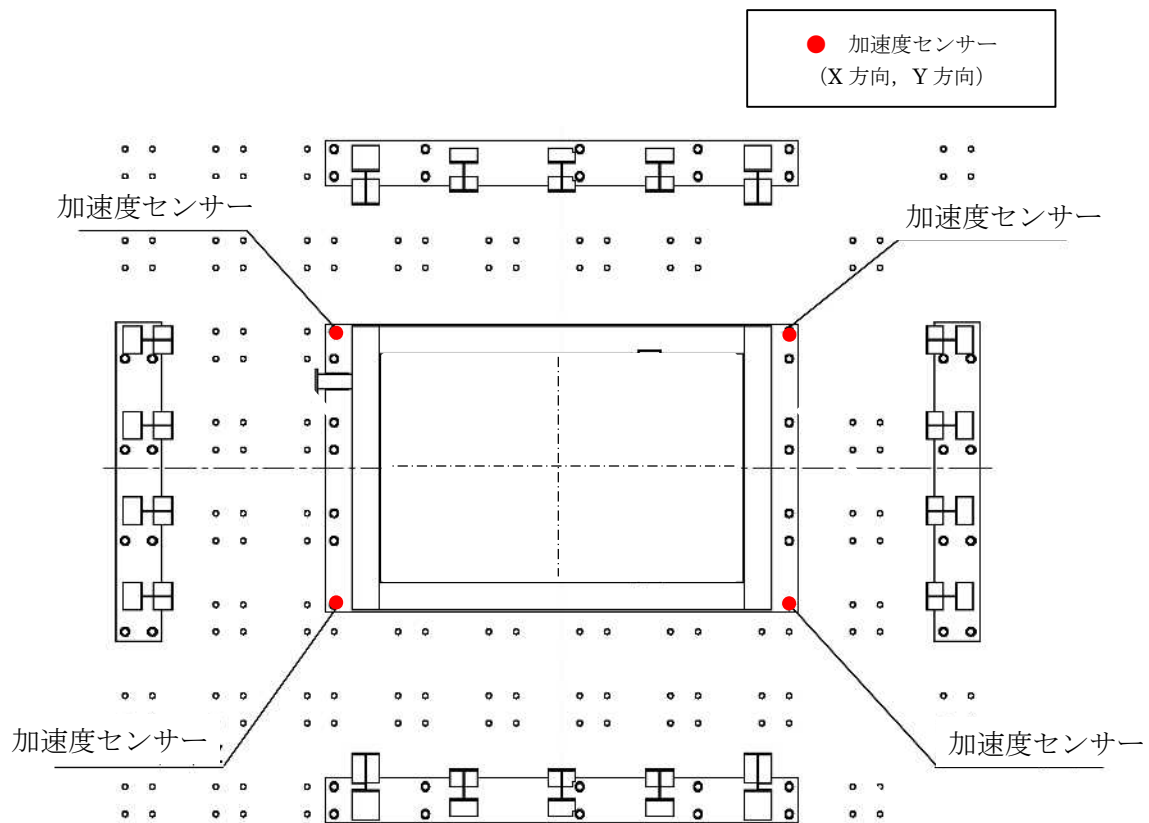
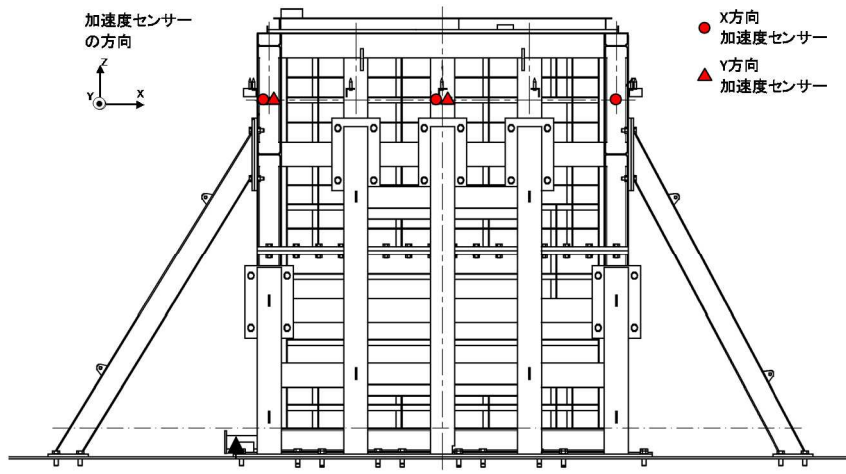
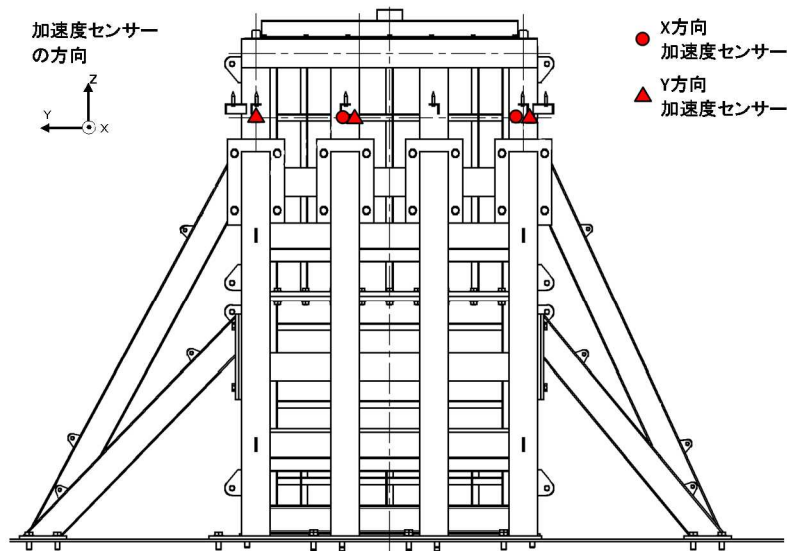


図 1 4 振動台上の加速度の計測位置





(a) 水槽長辺方向



(b) 水槽短辺方向

図 15 水槽の加速度計測位置

### 3.1.3 試験結果

正弦波掃引試験結果から算出した減衰定数と、正弦半波加振試験の自由減衰波形から得られた減衰定数について、横軸を燃料ラック頂部の応答加速度で整理した結果を図 16 に示す。

供試体ラック頂部の応答加速度と減衰の関係は、減衰定数は6~11%となっており、既工認で適用している設計用減衰定数の1%よりも大きな減衰効果を示すことを確認した。

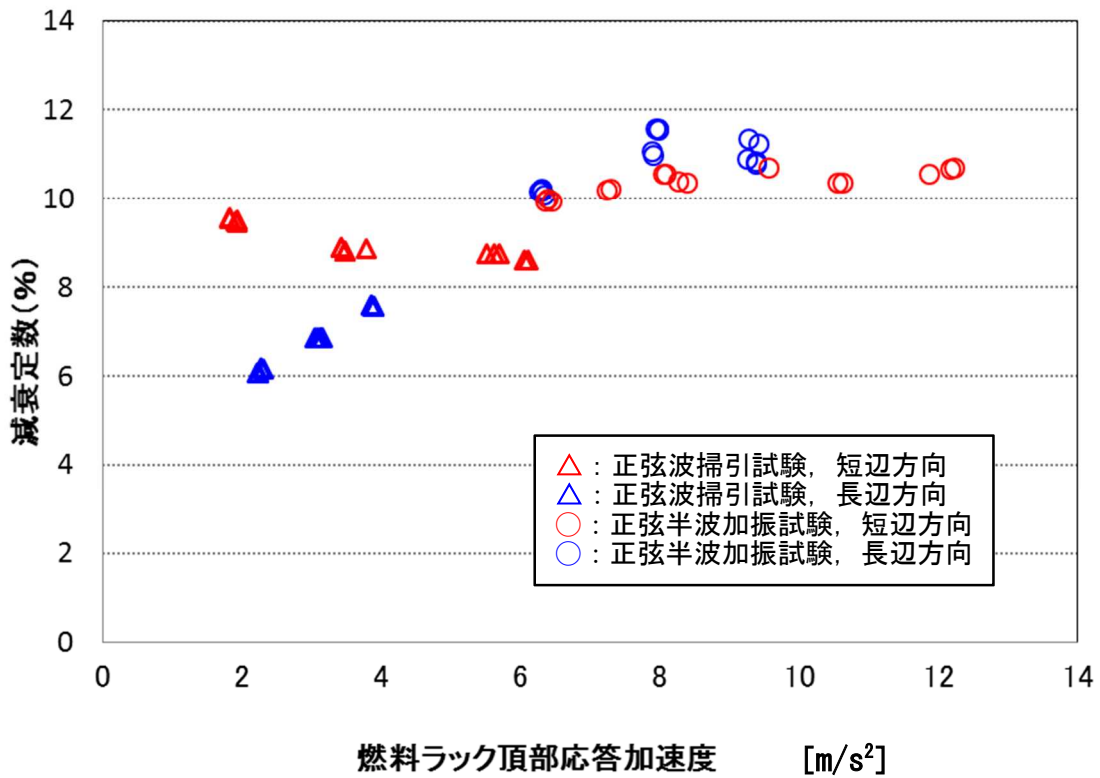


図 16 燃料ラック頂部最大応答加速度と減衰定数の関係

## 3.2 試験結果に基づく燃料ラックの設計用減衰定数の設定

### 3.2.1 試験結果の実機燃料ラックへの適用性

実物大試験供試体の加振試験は、実機燃料ラックの減衰傾向を把握することを目的とした試験であり、3.1.2 項で述べたように、供試体ラックの主要諸元および試験水槽の大きさは実機および実機環境と同等、または実機と比較して減衰定数が小さくなるように設定した。また、試験水槽の水深は実機とは異なるが、燃料ラックの振動特性に与える影響が小さいことを確認している（別紙－2）。試験水槽は剛構造とし、その寸法が供試体ラックの減衰定数に影響を与えないようにしている（別紙－1）。

試験は水槽内でスロッシングが励起されない条件で実施しており、スロッシングが供試体ラックの減衰定数に影響を与えないようにしている。実機では地震動の長周期成分の大きさによっては、使用済燃料プールでのスロッシングが励起される場合があるが、燃料プールの固有周期は実機ラックの固有周期に対して十分に大きいことから、スロッシングによる燃料ラックの減衰定数への影響は小さいと考えられる（別紙－7）。

以上より、本試験で得られた減衰定数を実機へ適用することは妥当と考えられる。

### 3.2.2 試験結果に基づく燃料ラックの設計用減衰定数の設定

#### (1) 実機応答と試験体応答の比較

実機への適用を検討するにあたり、「図 1 6 燃料ラック頂部最大応答加速度と減衰定数の関係」に、市松ラックおよび格子ラックの基準地震動  $S_s$ 、弾性設計用地震動  $S_d$  に対する応答加速度を追加したもの示す（図 1 7 および図 1 9）。基準地震動  $S_s$  に対する実機ラックの応答加速度レベルにおける減衰定数は、全て 10%以上であった。弾性設計用地震動  $S_d$  に対する減衰定数は、概ね 8～10%であった。なお、一部ラックの基準地震動  $S_s$  に対する応答加速度が、供試体の最大応答加速度を上回っているが、加速度が大きい領域では、ほぼ一定の減衰となっているため、これらのラックにおける減衰定数は 10%程度と考えられる。

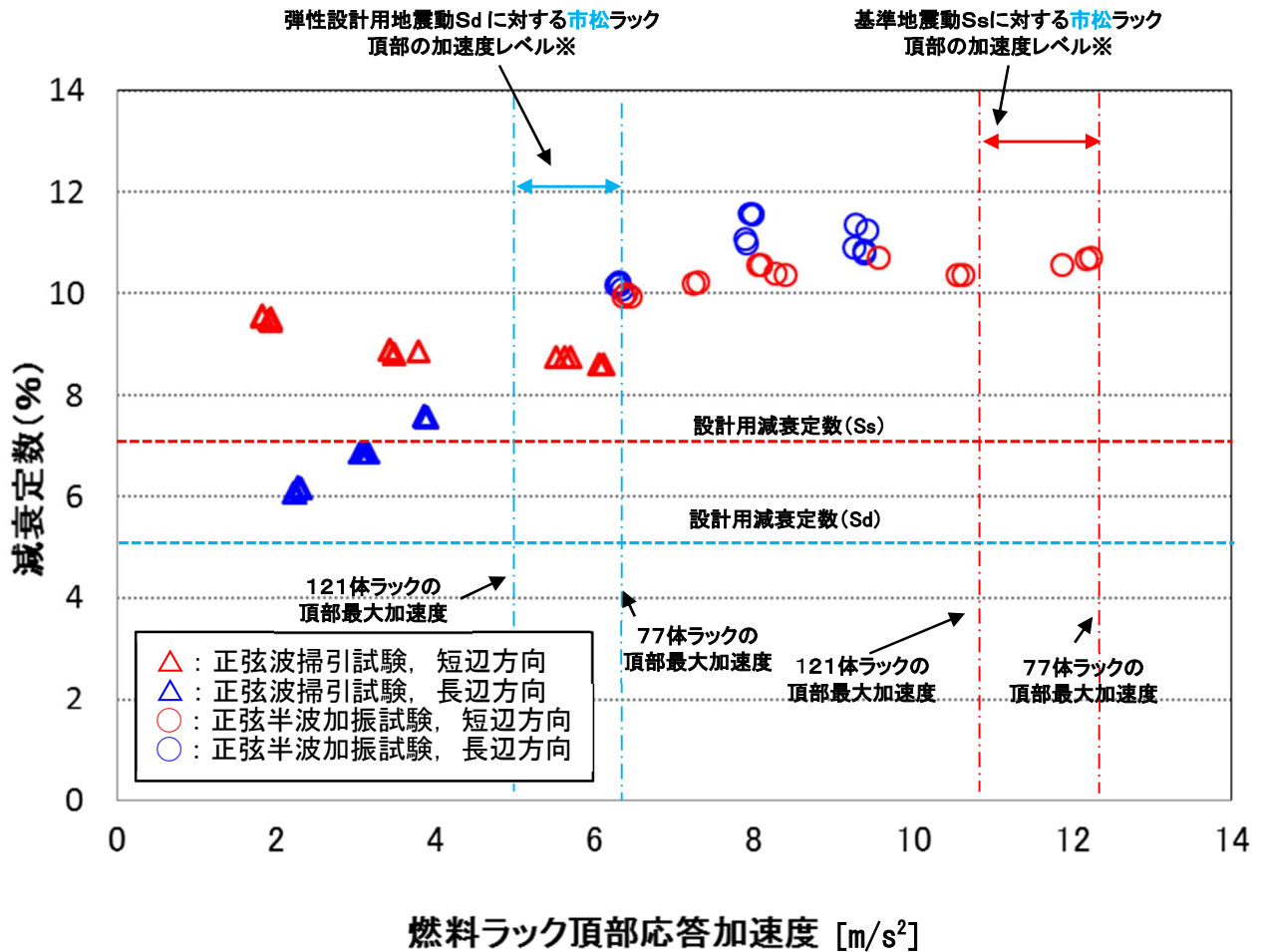
また、燃料ラック頂部応答加速度を近似的に変位に換算し、減衰定数との関係を検討した（図 1 8 および図 2 0）。基準地震動  $S_s$  に対する実機ラックの応答は試験体の応答範囲内であり、試験で得られた減衰定数を適用しても問題ないと考えられる。なお、応答変位が 1mm 付近までは減衰が増加し、以降は概ね一定となる傾向を示している（図 1 8 および図 2 0）。これは、変位が大きくなるとラックセル内部でチャンネルファスナがラックセルと衝突し、減衰効果が飽和するためと考えられ、短辺・長辺ともに同様の傾向を示すと考えられる。

#### (2) 設計用減衰定数の設定

前述(1)より、格子ラックおよび市松ラックの減衰定数は、燃料ラックの種類（貯蔵体数）によらず、基準地震動  $S_s$  では 7.0%以上、弾性設計用地震動  $S_d$  では 5.0%以上であることを確認した。ただし、耐震設計に適用する設計用減衰定数の設定は、耐震設計の簡便さと余裕

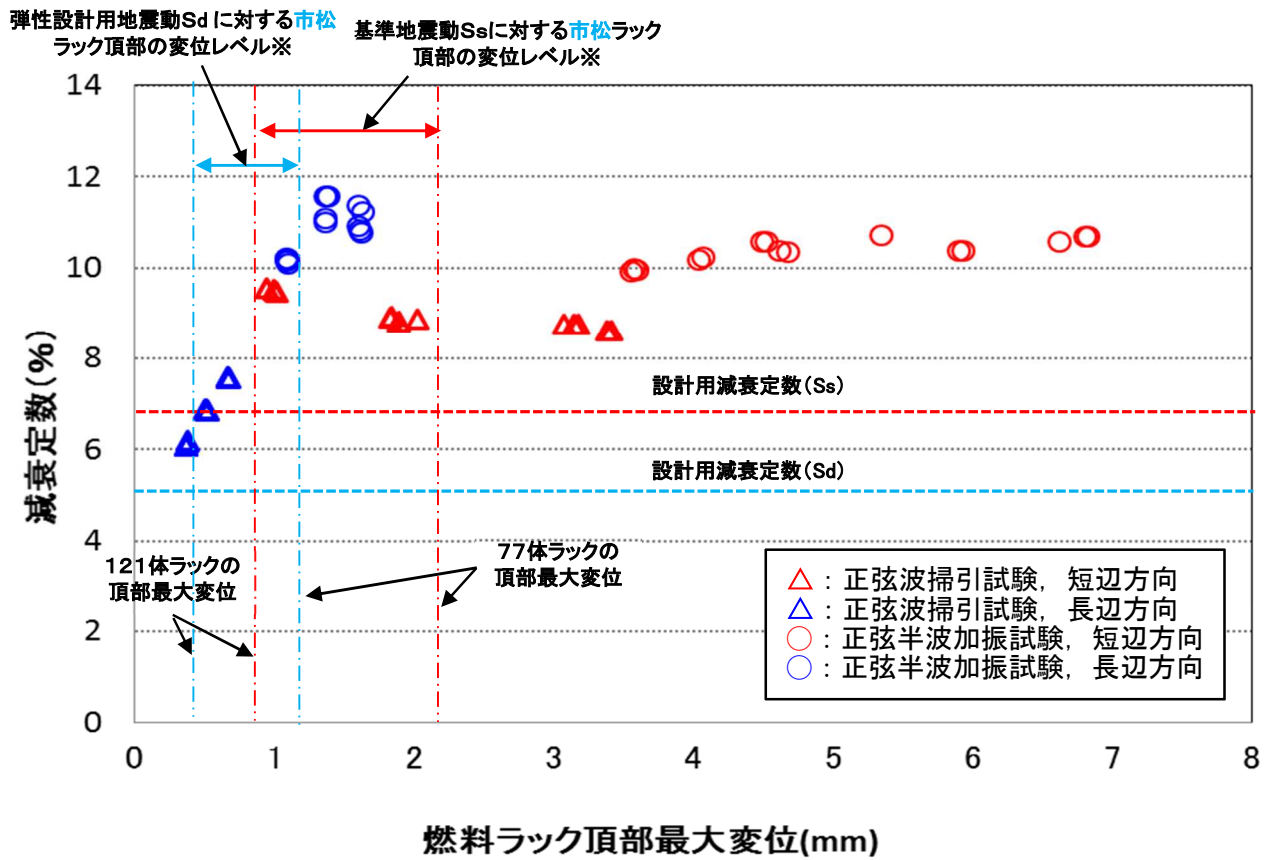
を考慮して、燃料ラックの種類（貯蔵体数）によらず、基準地震動 Ss では 7.0%，弾性設計用地震動 Sd では 5.0%を設定する。

なお、燃料ラックに燃料集合体が全数貯蔵された場合の耐震評価が最も厳しくなることから、燃料ラックの耐震設計は、全数貯蔵状態に対して実施する（別紙—8）。



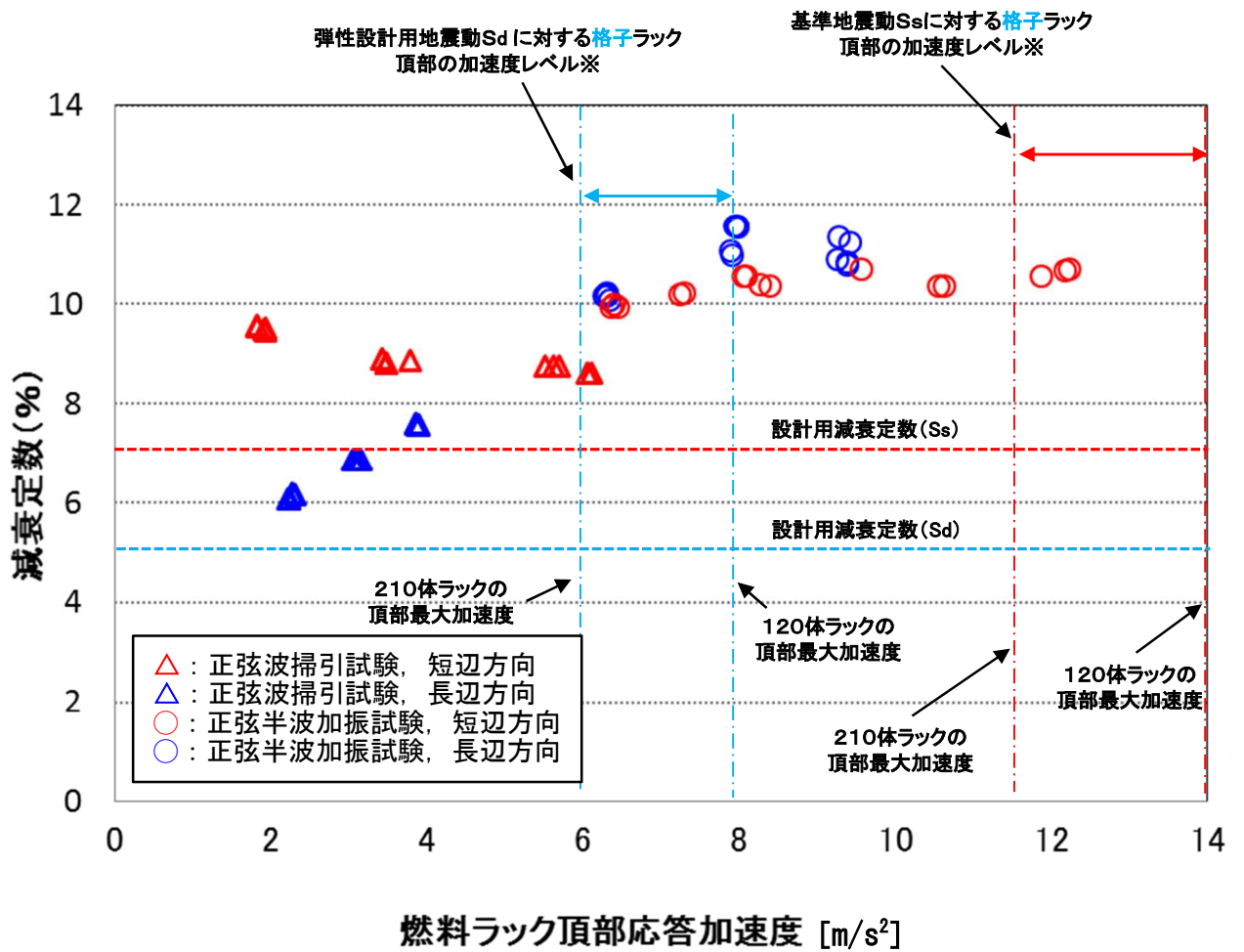
※床応答スペクトルと市松ラックの固有周期から求めた値（詳細は表 7 参照）。

図 1 7 市松ラック頂部の最大加速度と減衰定数の関係



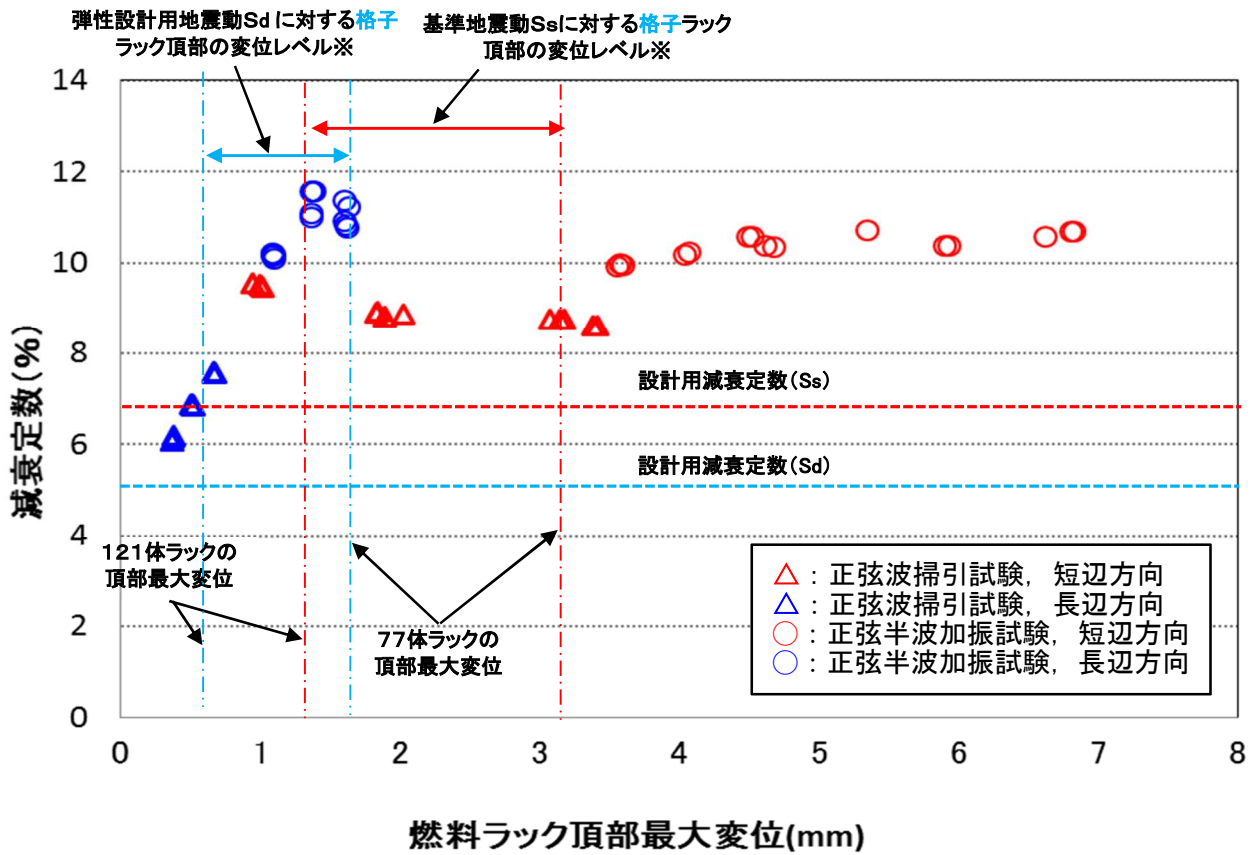
※床応答スペクトルと実機ラックの固有周期から求めた値（詳細は表 7 参照）。

図 18 市松ラック頂部の最大変位と減衰定数の関係



※床応答スペクトルと格子ラックの固有周期から求めた値 (詳細は表 8 参照)。

図 19 格子ラック頂部の最大加速度と減衰定数の関係



※床応答スペクトルと実機ラックの固有周期から求めた値（詳細は表 8 参照）。

図 20 格子ラック頂部の最大変位と減衰定数の関係

表 7 市松ラックの固有周期と加速度・変位の関係（実機）

評価用地震動	ラック型	①固有周期 (s)	②震度 (-)	③応答加速度 (m/s <sup>2</sup> )	④変位 (mm)
基準地震動 Ss-1~8 減衰 7.0%	77体タイプ I		1.26	12.4	2.1
	77体タイプ II		1.27	12.5	2.2
	100体		1.14	11.2	1.1
	110体タイプ I		1.14	11.2	1.1
	110体タイプ II		1.14	11.2	1.1
	121体		1.14	11.2	0.9
弾性設計用 地震動 Sd-1~8 減衰 5.0%	77体タイプ I		0.64	6.3	1.1
	77体タイプ II		0.64	6.3	1.1
	100体		0.58	5.7	0.6
	110体タイプ I		0.58	5.7	0.6
	110体タイプ II		0.57	5.6	0.5
	121体		0.56	5.5	0.5

$$\text{③} = \text{②} \times g \text{ (m/s}^2\text{) (重力加速度)}$$

$$\text{④} = \{\text{③}/(2\pi f)^2\} \times 1000$$

$$f = 1/\text{①}$$

表 8 格子ラックの固有周期と加速度・変位の関係（実機）

評価用地震動	ラック型	①固有周期 (s)	②震度 (-)	③応答加速度 (m/s <sup>2</sup> )	④変位 (mm)
基準地震動 Ss-1~8 減衰 7.0%	120体		1.43	14.0	3.1
	187体		1.23	12.1	2.0
	210体		1.17	11.5	1.2
弾性設計用地震動 Sd-1~8 減衰 5.0%	120体		0.82	8.0	1.8
	187体		0.65	6.4	1.1
	210体		0.61	6.0	0.6

$$\text{③} = \text{②} \times g \text{ (m/s}^2\text{) (重力加速度)}$$

$$\text{④} = \{\text{③}/(2\pi f)^2\} \times 1000$$

$$f = 1/\text{①}$$

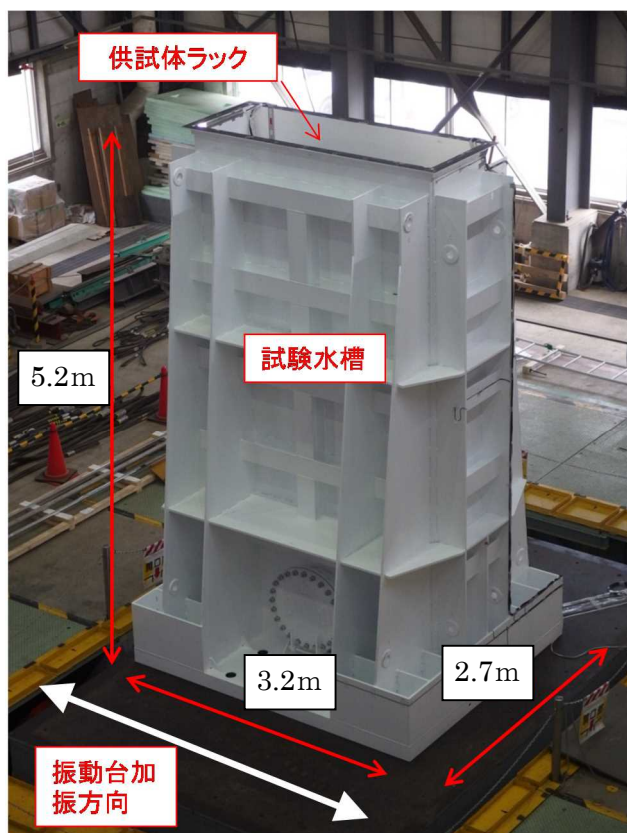


#### 4. 角管ラックの減衰定数の設定

##### 4.1 減衰特性の確認試験

###### 4.1.1 実物大試験供試体の概要

燃料プール内の環境（水中）および使用状態（燃料集合体貯蔵）において、燃料ラックが加振された際の減衰特性を確認することを目的に、模擬燃料集合体を設置した供試体ラックの水槽内での加振試験を実施した（図 2 1）。試験は、振動台上に、供試体ラックを設置した試験水槽を据え付け、長辺方向に加振した（図 2 2）。供試体ラックは、燃料プール床との固定状態と同一とするために、水槽床に基礎ボルトで固定した自立式とした。



(1) 試験状況<sup>3)</sup>



(2) 供試体の水槽内設置状況

図 2 1 加振試験の実施状況

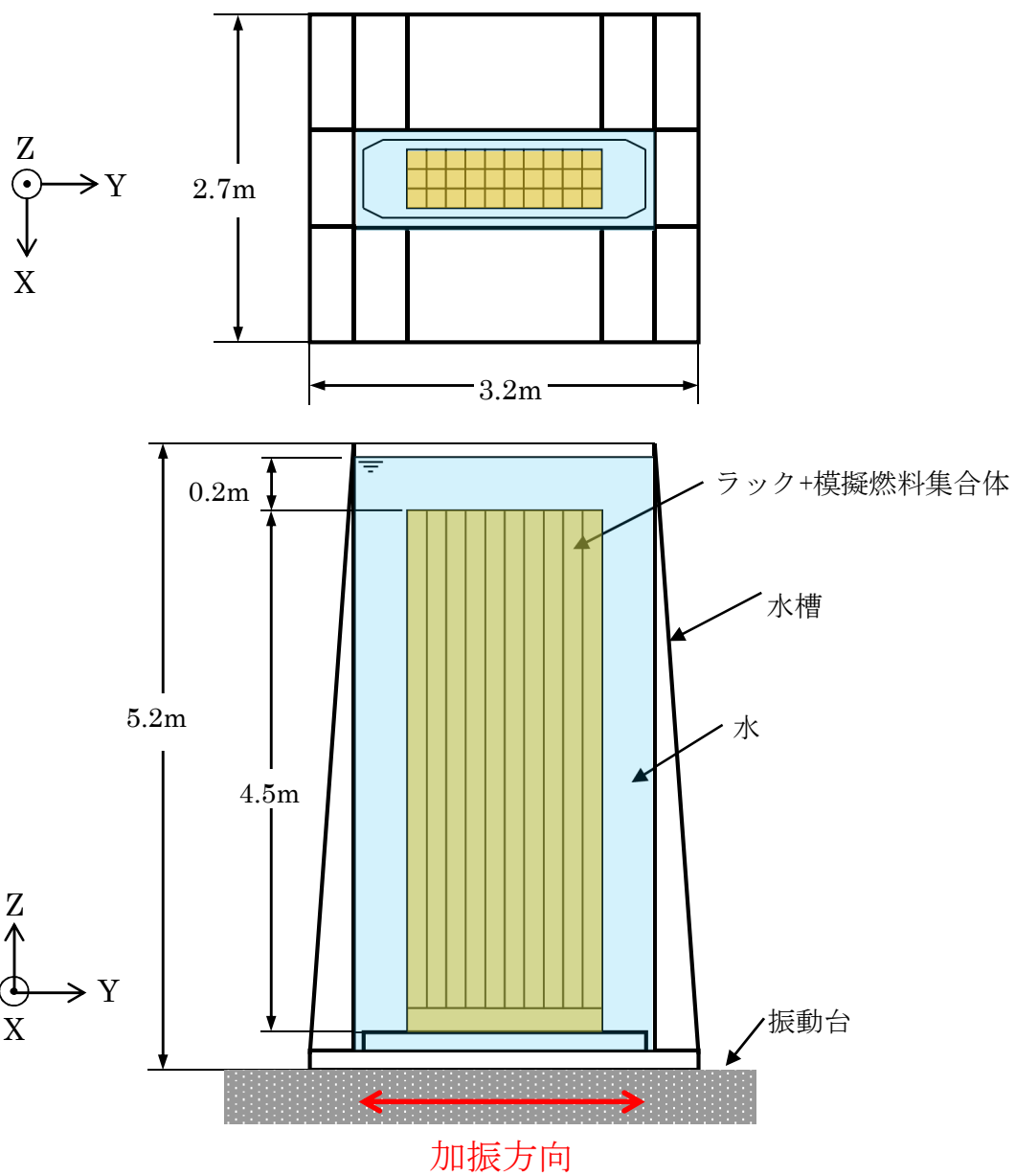


図 2 2 実物大試験供試体概要

#### 4.1.2 燃料ラックの水中加振試験装置および試験手法について

燃料ラックは多数の燃料集合体を貯蔵していることおよび水中に設置されていることにより、以下の減衰が大きく作用すると考えられる。

- ① ラックの部材間摩擦，燃料集合体とラック間の摺動・衝突による減衰効果
- ② 流体減衰等による減衰効果

このため，供試体ラック等の基本構造や寸法は，実機燃料ラックの基本構造，ラックセルの寸法等を考慮し設定する必要がある。

##### (1) 供試体ラック

柏崎刈羽 6 号炉の角管ラックは 176 体[11 列×16 列]および 187 体[11 列×17 列]の 2 種類の燃料ラックがある。

供試体ラックの寸法等は，柏崎刈羽 6 号炉の実機燃料ラックと同等に設定されている。また，燃料ラック全体の減衰効果は，燃料集合体の体数増加に伴い前述の減衰効果が大きくなると考えられるため，供試体ラックの加振方向の貯蔵体数は，柏崎刈羽 6 号炉の実機燃料ラック（角管ラック）に対して，体数が少ない 30 体[10 列×3 列]に設定されている。

供試体ラックおよび柏崎刈羽 6 号炉の実機燃料ラックの構造を図 2-3 に示す。

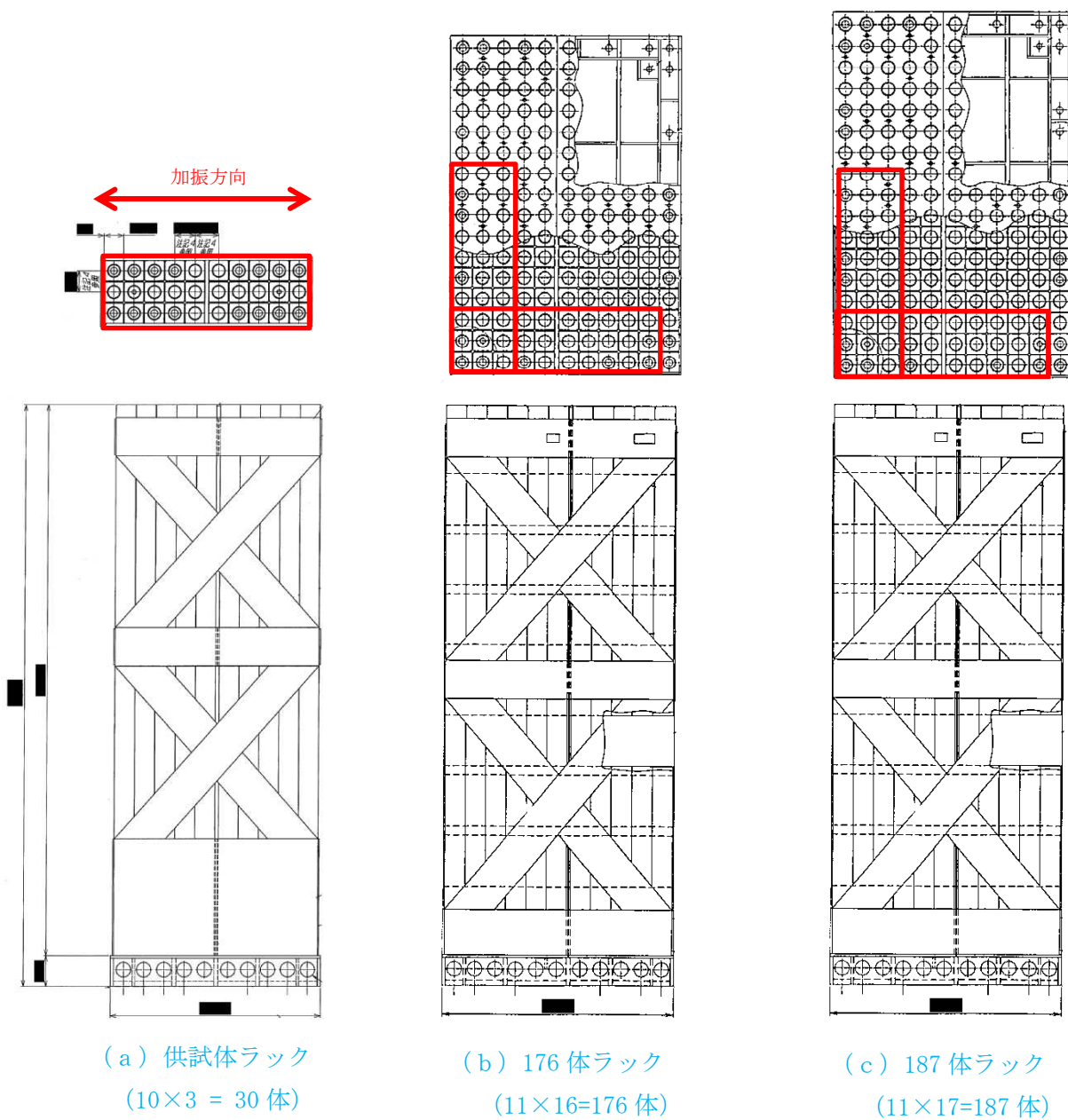


図 2 3 柏崎刈羽 6 号炉燃料ラックと供試体ラック構造

## (2) 模擬燃料集合体

供試体ラックに設置する模擬燃料集合体には、実燃料模擬体と形状模擬体の 2 種類を用いた。実燃料模擬体は、チャンネルボックス等は実機と同等であり、燃料ペレットの代わりに鉛で質量を一致させたものである。形状模擬体は、実燃料模擬体の質量およびチャンネルボックス外形を模擬したものである（表 9、図 24 および図 25）。

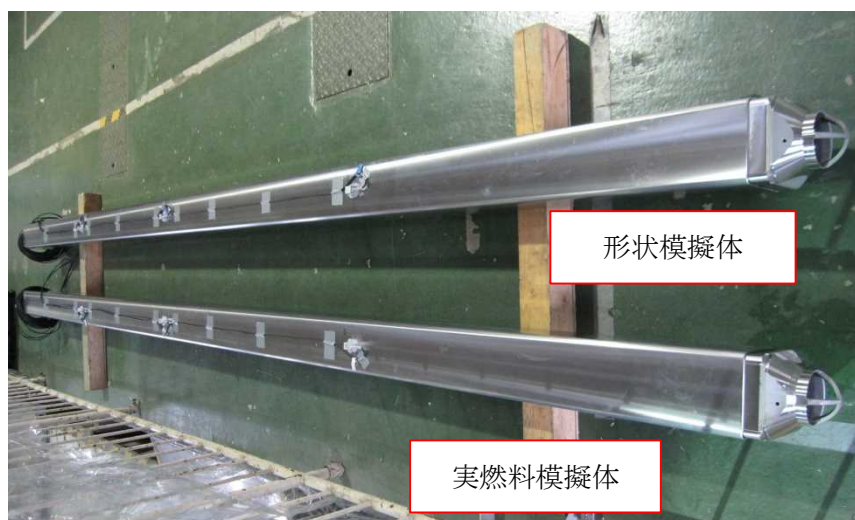


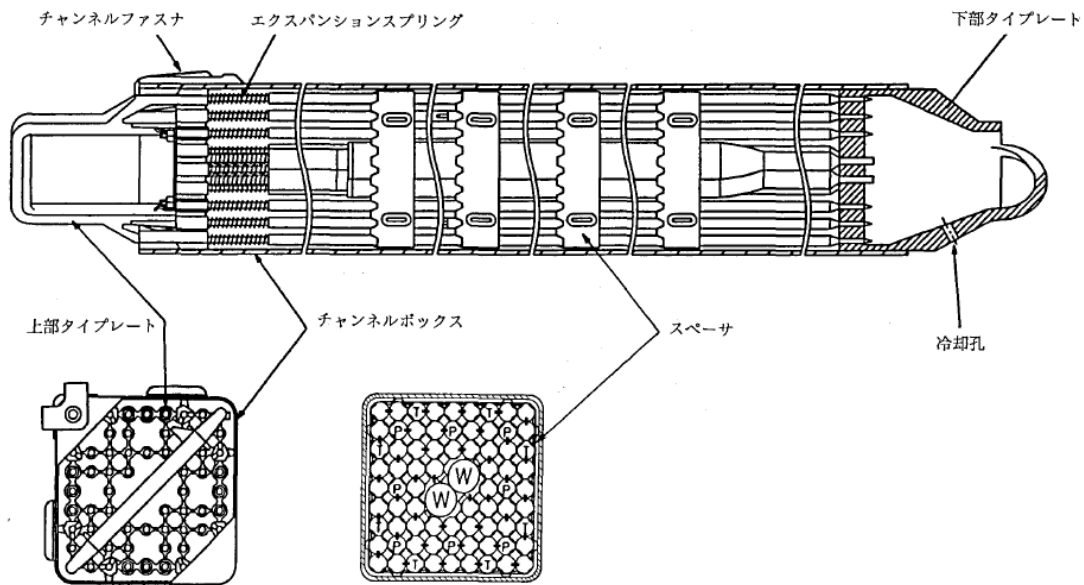
図 24 模擬燃料集合体の外観

表 9 実機燃料集合体と模擬燃料集合仕様の比較

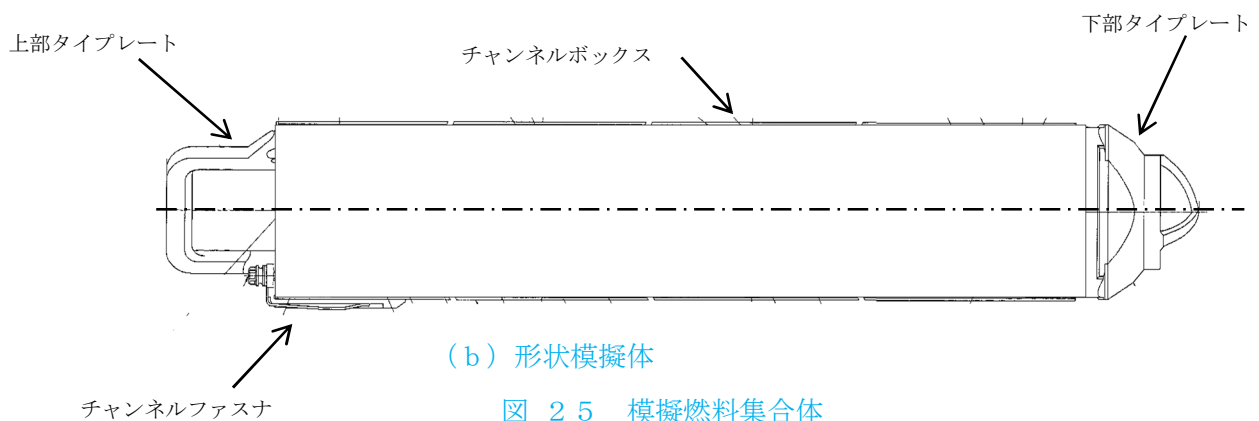
	模擬燃料集合体		柏崎刈羽 6号炉
	実燃料模擬体	形状模擬体	9×9 燃料*2
長さ			4468mm
断面寸法*1			□139.14mm
質量	約 300kg	約 300kg	約 300kg
材質			SUS および Zr 材

\*1 チャンネルボックス外形寸法

\*2 柏崎刈羽 7 号炉に貯蔵されている燃料集合体のうち、最も重量が大きいもの



(a) 実燃料模擬体



(b) 形状模擬体

図 25 模擬燃料集合体

### (3) 試験水槽

試験水槽は剛構造とし、燃料プール内に設置されている状態を模擬するため、試験水槽の大きさは、流体減衰の効果が影響しないような隙間を設定した。(別紙-9)。

### (4) 実機と供試体の主要諸元比較

供試体ラックおよび試験水槽等の試験供試体（以下「供試体等」という。）と実機との主要諸元の比較を表 10 に示す。

表 10 角管ラックと供試体等の主要諸元比較

項目	実機	供試体等	実機への適用性	
燃料ラック	ラックセルの型式	角管並列型	同左	実機と同一。
	燃料ラックの支持形式	ボルトによる床固定式	同左	実機と同一。
		自立型	同左	実機と同一。
	貯蔵体数	176 体 (11×16) 187 体 (11×17)	30 体 (10×3)	供試体は流体および燃料集合体による減衰効果が実機よりも小さいと考えられるラックを選定したことから、本試験結果に基づく減衰定数は、実機の全ての燃料ラックに適用可能と考えられる。
	ラックセル頂部と燃料集合体の最小隙間			ラックセル頂部と燃料集合体の隙間は実機とほぼ同等であることから、その影響は小さいと考えられる。
	燃料ラックから壁までの距離	約 200～950mm	約 150～430mm	流体による減衰効果が最も小さくなるよう設定した (別紙-9)。
	ラックセル高さ			実機と同一。
	ラックセルのピッチ			実機と同一。
ラックセルの厚さ			実機と同一。	
ラックセルの材質	B-SUS	SUS304	材料特性はほぼ同等であり、材料自身の内部減衰も小さいと考えられるため、ラック全体の減衰効果へ与える影響は小さいと考えられる。	
燃料集合体	燃料タイプ	9×9 燃料 (ステップⅢ燃料)	模擬燃料集合体	工認では、燃料プール供用化条件を考慮し、評価結果の厳しくなるもっとも質量が大きい燃料条件にて評価している。
	質量	約 300kg	同左	実機と同一。
チャンネルボックス	外形寸法	148.4mm	同左	実機と同一。
	材質	ジルカロイ-4	同左	実機と同一。
	厚さ			実機と同一。
燃料プール	水深	約 12m	約 5m	高さ (水深) は実機と異なるが、燃料ラックの振動特性に与える影響が小さいことを確認した (別紙-2)。



(5) 試験方法

供試体ラックに模擬燃料集合体を設置し、試験水槽に注水した状態において、加振試験を実施した。振動台からの加振入力には、加速度振幅一定で振動数を時間比例で変化、振幅を上昇させてゆく正弦波を入力し、振動台加速度と供試体ラック頂部の応答加速度との伝達関数から、共振振動数や応答倍率等の振動特性を分析評価した（図 26）。

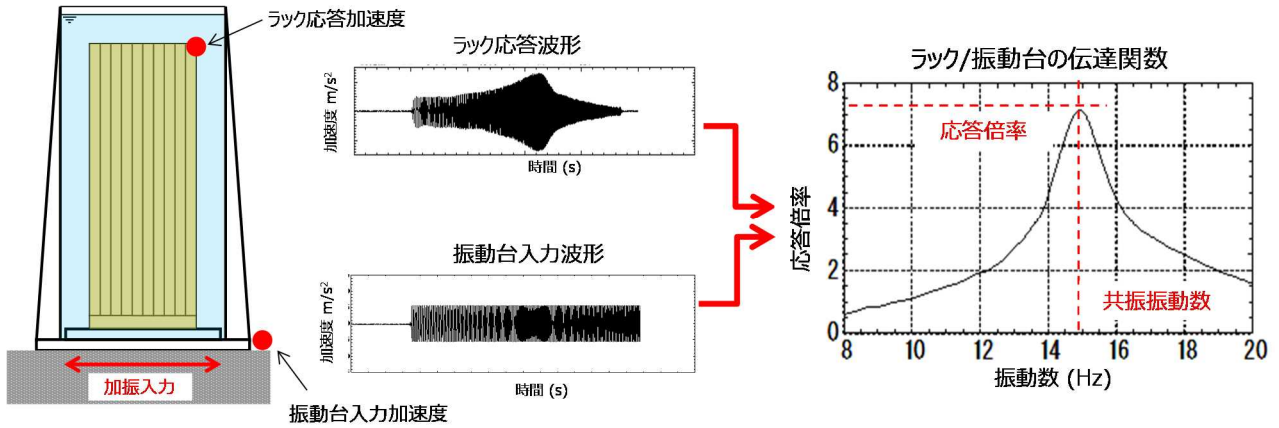


図 26 加振試験方法概要

加振試験条件は供試体ラックの応答加速度に対する減衰特性の変化を確認するため、振動台からの入力加振加速度をパラメータとした（表 11）。

表 11 加振試験条件

ラック種類	試験方法	振動数範囲 (Hz)	入力加速度※ (m/s <sup>2</sup> )	入力加速度ケース数
角管ラック	正弦波 掃引加振試験	8~20	0.42~7.09	17

※振動台上の実測加速度（最大値）

(6) 加速度の計測方法

加速度を計測し供試体ラックの伝達関数を求めるため、供試体ラック頂部と振動台上に加速度計を設置した。また、供試体ラックの全体の振動特性を計測するために、供試体ラックの高さ方向の異なる各位置に加速度計を設置した（図 27）。

また、燃料ラックの頂部、中間部および基部のひずみにより、燃料ラックが弾性範囲内で加振されていることを確認した。

なお、試験水槽が剛構造として挙動し、供試体ラックへ影響を与えないことを確認するため、水槽周囲に加速度計を設置した（図 28）。



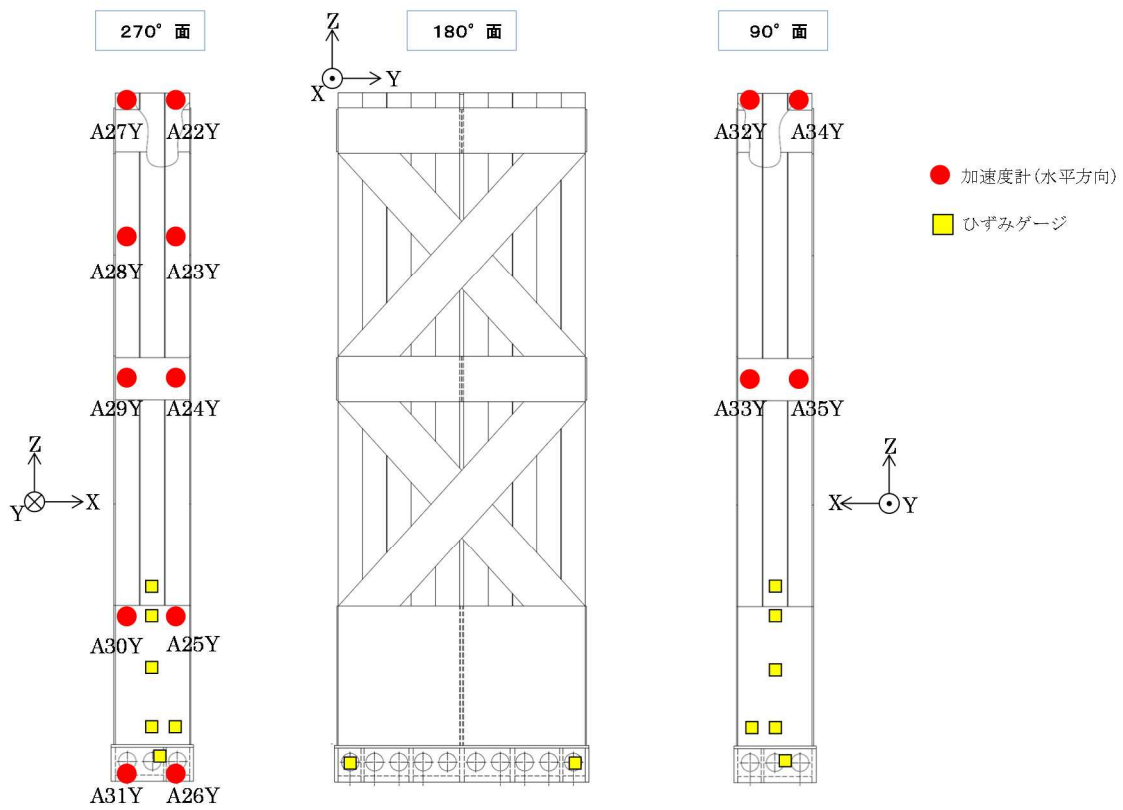


図 27 供試体ラックの加速度計測位置

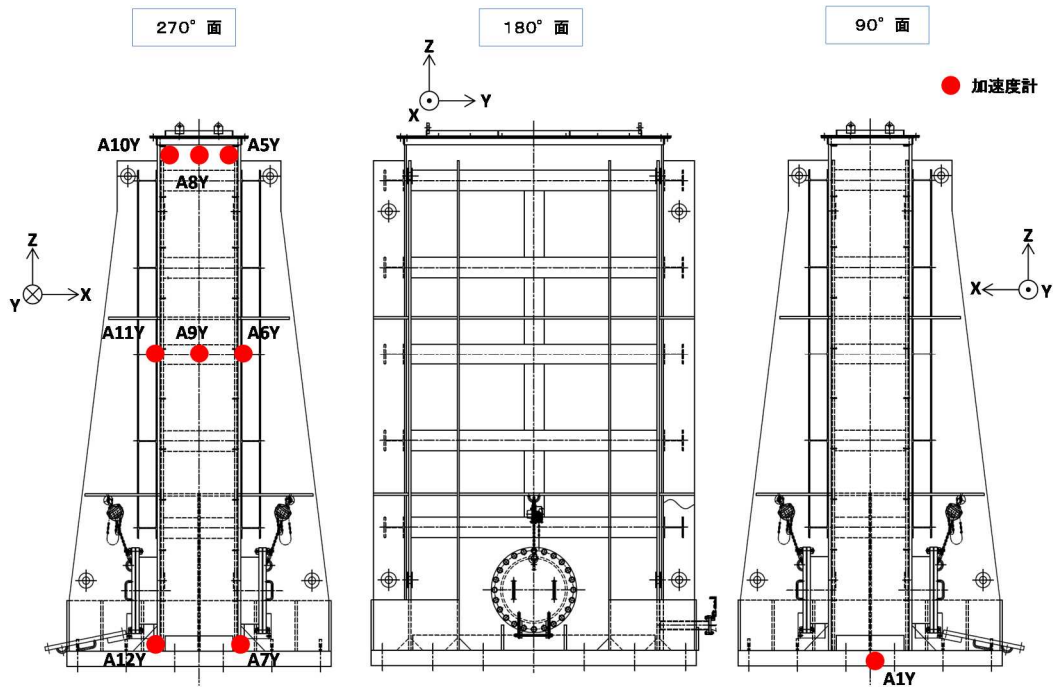


図 28 水槽の加速度計測位置

#### 4.1.3 試験結果

##### (1) 試験結果に基づく減衰の算出方法

各入力加速度ケースの正弦波掃引試験における供試体ラック頂部の加速度（計測点：A22Y(\*1)）と振動台上面の加速度（計測点：A1Y）の伝達関数に基づき、供試体ラックの共振振動数における応答倍率から、減衰定数を評価した。応答倍率から減衰を求める方法は、理論式より、1 質点系の応答倍率が  $1/2\zeta$ （ $\zeta$ ：減衰比）となることから、同様に供試体ラックの多質点系の理論式に展開し、以下の式より減衰比を求めた（別紙-10）。

$$\zeta = \beta \phi / 2\mu \quad [\beta : \text{刺激係数}, \phi : \text{固有モードベクトル}, \mu : \text{応答倍率}]$$

\*1 ラック頂部に設置した4点の加速度計（A22Y, A27Y, A32Y, A34Y）で有意な差異が無いことを確認した上で、A22Y で計測した1点の加速度を使用した。

##### (2) 減衰特性結果

供試体ラック頂部の応答加速度から得られた減衰定数について、横軸をラック頂部の最大応答加速度で整理した結果を図 29 に示す。

供試体ラック頂部の応答加速度と減衰の関係は、供試体ラック頂部の応答加速度の増加に伴い減衰定数が直線的に増大し、減衰定数は最大で約 17% となっており、既工認で適用している設計用減衰定数の 1% よりも大きな減衰効果を示すことを確認した。

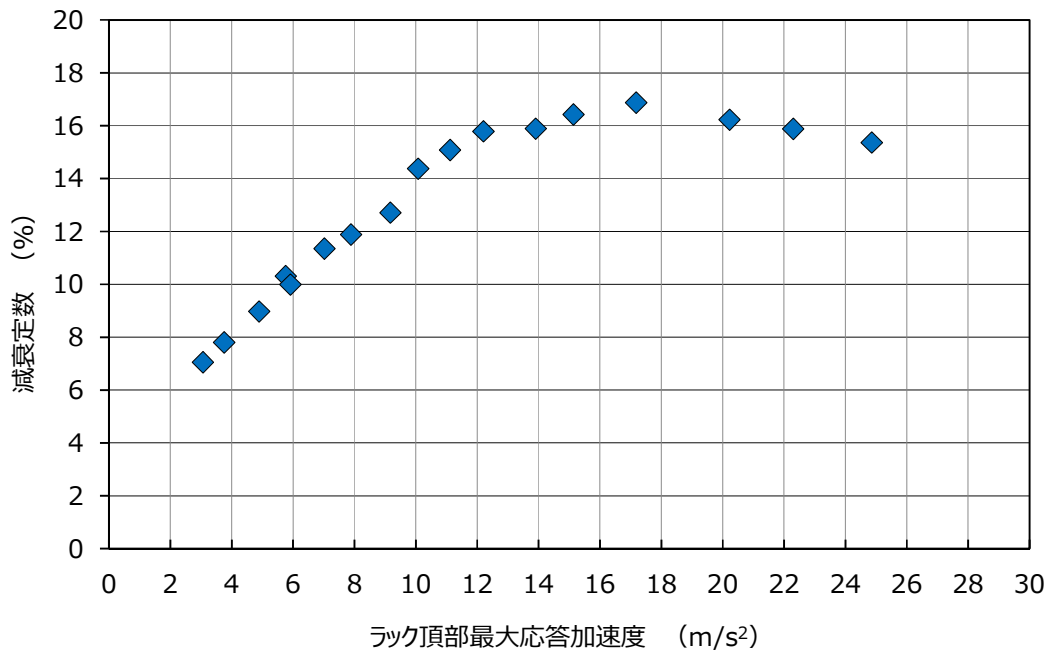


図 29 ラック頂部最大応答加速度と減衰定数の関係

## 4.2 試験結果に基づく燃料ラックの設計用減衰定数の設定

### 4.2.1 試験結果の実機燃料ラックへの適用性

実物大試験供試体の加振試験は、実機燃料ラックの減衰傾向を把握することを目的とした試験であり、4.1.2 項で述べたように、供試体ラックの主要諸元は実機燃料ラックと同等となるよう設定した（表 10）。試験水槽は剛構造とし、その寸法が供試体ラックの減衰定数に影響を与えないようにしている（別紙—9）。

試験は水槽内でスロッシングが励起されない条件で実施しており、スロッシングが供試体ラックの減衰定数に影響を与えないようにしている。実機では地震動の長周期成分の大きさによっては、使用済燃料プールでのスロッシングが励起される場合があるが、スロッシングによる実機ラックの減衰定数への影響は小さいと考える（別紙—7）。

以上より、供試体ラックの主要諸元および試験水槽は、実機と同等の条件であり、本試験結果で得られた減衰定数を実機の燃料ラックへ適用することは妥当であると考えられる。

### 4.2.2 試験結果に基づく燃料ラックの設計用減衰定数の設定

加振試験結果から、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伴い減衰定数が増大する応答依存性があることを確認した。

このため、燃料ラックの耐震設計に適用する設計用減衰定数を設定するにあたっては、試験結果から得られた燃料ラックの最大応答加速度と減衰定数の関係を踏まえ、評価用地震動に対する燃料ラックの応答加速度に対応する減衰定数を確認し、余裕を考慮した設計用減衰定数を設定する（別紙—11）。

柏崎刈羽 6 号炉の基準地震動  $S_s$  および弾性設計用地震動  $S_d$  による地震力を受けた場合の、燃料ラックの種類（貯蔵体数）に対して確認した減衰定数を図 30 に示す。

この結果から、柏崎刈羽 6 号炉の燃料ラック\*1の減衰定数は、燃料ラックの種類によらず、基準地震動  $S_s$  では 7.0%以上、弾性設計用地震動  $S_d$  では 5.0%以上であることを確認した。ただし、耐震設計に適用する設計用減衰定数の設定は、耐震設計の簡便さと余裕を考慮して、燃料ラック種類（貯蔵体数）によらず、基準地震動  $S_s$  では 7.0%、弾性設計用地震動  $S_d$  では 5.0%を設定する。

なお、燃料ラックに燃料集合体が全数貯蔵された場合の耐震評価が最も厳しくなることから、燃料ラックの耐震設計は、全数貯蔵状態に対して実施する（別紙—12）。

\*1：角管ラック（176 体ラックおよび 187 体ラック）のの最大応答加速度

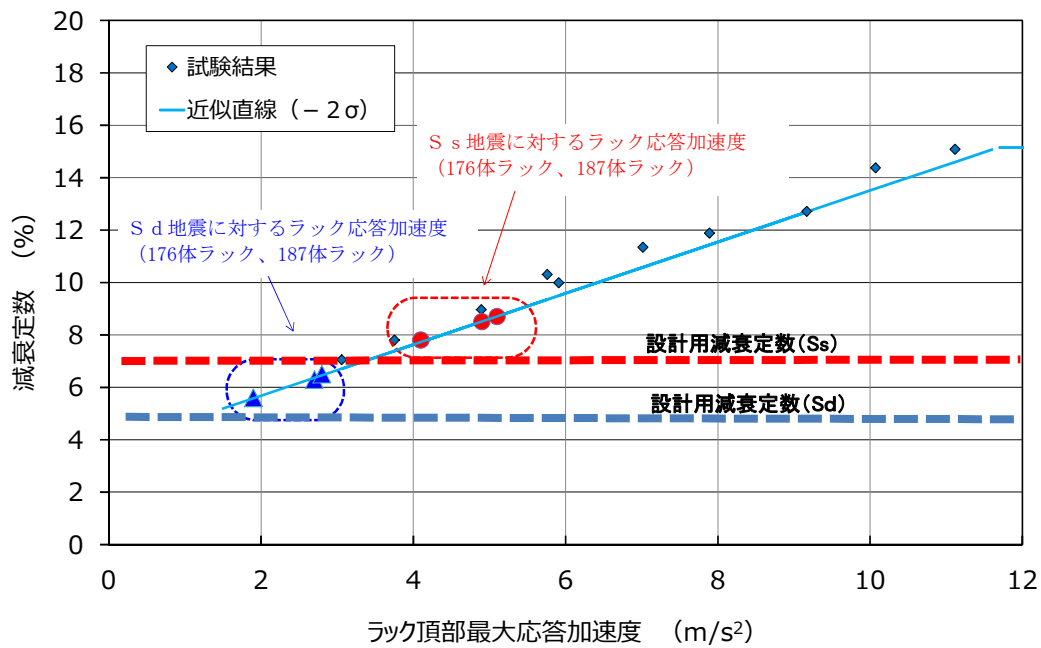


図 30 柏崎刈羽 6 号炉の燃料ラックで想定される減衰定数

## 5. 結論

今回の工認で柏崎刈羽 6 号炉の格子ラックおよび角管ラックならびに柏崎刈羽 7 号炉の市松ラックに採用予定の水平方向の設計用減衰定数（基準地震動  $S_s$  : 7.0%, 弾性設計用地震動  $S_d$  : 5.0%）は、実機燃料ラックと同等な試験体を用いて、実機と同等な試験条件によりおこなわれた加振試験で得られた結果に対して余裕を考慮した上で設定した値であることから、設計用減衰定数として妥当であることを確認した。

## 引用文献

- [1] 大型耐震実験施設(LARGE-SCALE EARTHQUAKE SIMULATOR)パンフレット，独立行政法人 防災科学技術研究所
- [2] 浪田他，「水中振動試験による BWR 使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数」，日本機械学会〔No.10-8〕 Dynamics and Design Conference 2010 論文集 No.417
- [3] 長坂他，「BWR 使用済燃料貯蔵ラックの減衰特性評価」，日本原子力学会「2015 年秋の大会」 No.B36

別紙－1 試験水槽の形状決定方法（市松ラック）

市松ラックの試験水槽は，流体によるラックへの付加質量が十分小さく，流体の影響が無限水中と同等となるような大きさに設定した。

ラックの付加質量については，二重円筒の間に流体が存在する系の振動に関する運動方程式(1-1)式<sup>[1]</sup>の内筒をラック，外筒を試験水槽とみなし，内筒の自己付加質量 $M_{11}$ に着目し検討した。試験水槽は長方形断面であるため，表－別紙1－1<sup>[2]</sup>より  $a/b=2$  として二重円筒の自己付加質量 $M_{11}$ を1.36倍した。

円筒であるラック寸法  $r_1$  はすでに決まっているため，外筒である試験水槽の寸法  $r_0$  を変化させた場合のラックの付加質量 $M_{11}$ との関係を図－別紙1－1に示す。この図より，試験水槽を大きくしても付加質量 $M_{11}$ がほとんど変化しない  $r_0$  の範囲は，無限水中と同等とみなせると考えられることから，中心から1250mm離すことで，ラックが壁の影響を受けないという結果を得た。この結果を反映した試験水槽の大きさを図－別紙1－2に示す。

$$\left( \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

ここに

$M_1, M_2$  : 内筒および外筒の質量

$$M_{11} = \pi r_1^2 \rho \left( \frac{r_0^2 + r_1^2}{r_0^2 - r_1^2} \right) \quad \text{: 内筒の自己付加質量}$$

$$M_{12} = M_{21} = -2\pi r_1^2 \rho \left( \frac{r_0^2}{r_0^2 - r_1^2} \right) \quad \text{: 相互影響による付加質量}$$

$$M_{22} = \pi r_0^2 \rho \left( \frac{r_0^2 + r_1^2}{r_0^2 - r_1^2} \right) \quad \text{: 外筒の自己付加質量}$$

$r_1$  = 内筒の外半径

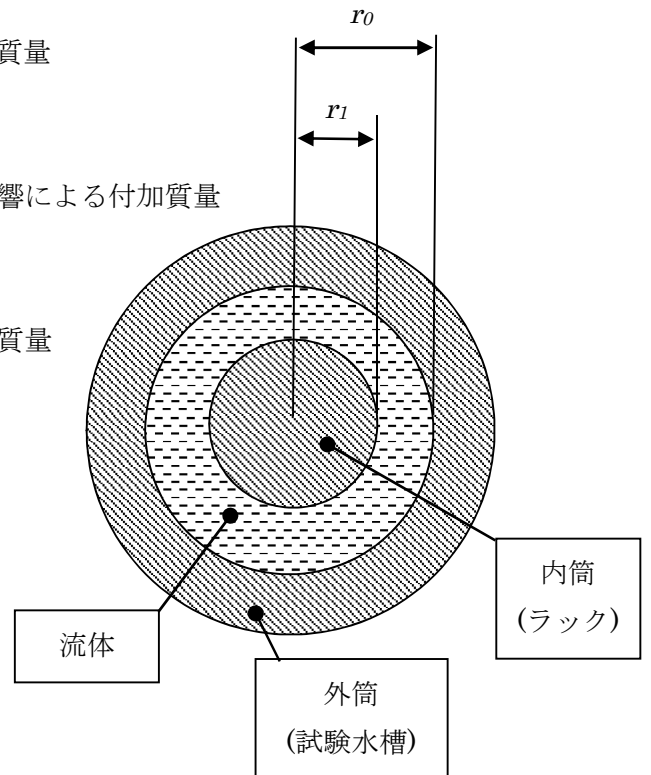
$r_0$  = 外筒の内半径

$\ddot{u}_1, \ddot{u}_2$  = 内筒、外筒の絶対加速度

$x_1, x_2$  = 内筒、外筒の相対変位

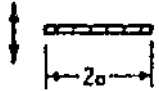
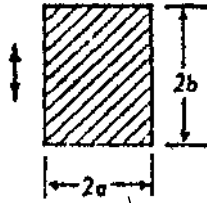
$k_1, k_2$  = 内筒、外筒の剛性

$\rho$  = 流体の密度



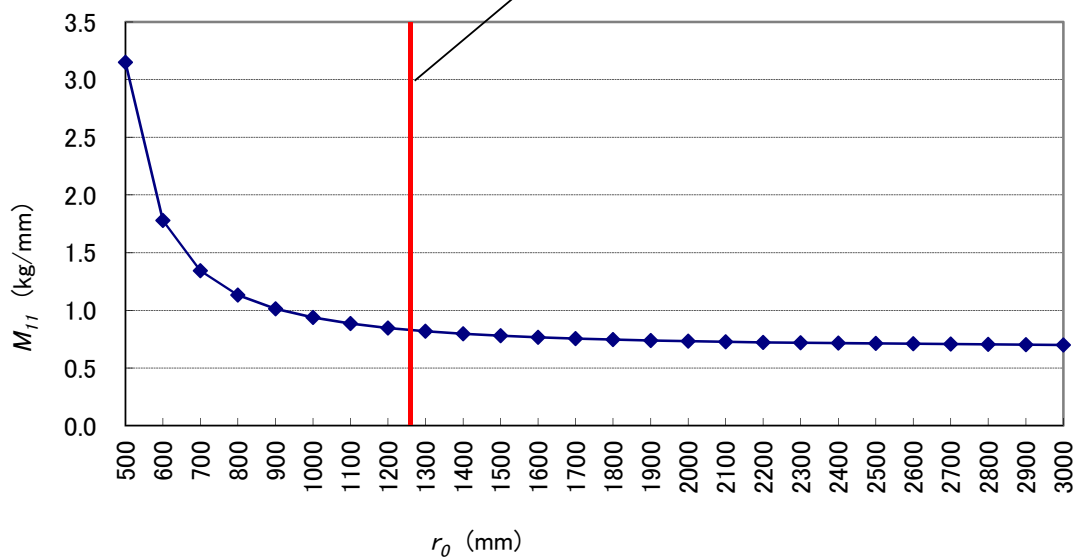
表一別紙 1 - 1 2次元断面形状における付加質量<sup>[2]</sup>

TABLE 1  
TWO-DIMENSIONAL BODIES

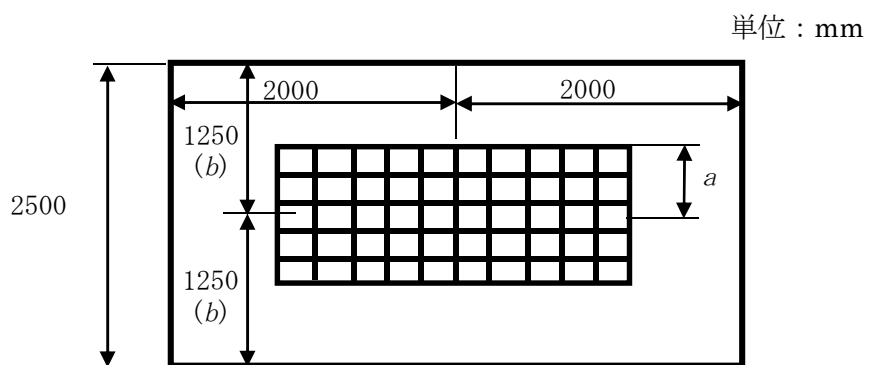
SECTION THROUGH BODY	TRANSLATIONAL DIRECTION	HYDRODYNAMIC MASS PER UNIT LENGTH	SOURCE
	Vertical	$m_h = 1 \pi \rho a^2$	(4) t (6) c
	Vertical	$m_h = 1 \pi \rho a^2$	(4) t
	$a/b = 10$	$m_h = 1.14 \pi \rho a^2$	(4) t
	$a/b = 5$	$m_h = 1.21 \pi \rho a^2$	(4) t
	$a/b = 2$	$m_h = 1.36 \pi \rho a^2$	(4) t
	$a/b = 1$	$m_h = 1.51 \pi \rho a^2$	(4) t
	$a/b = 1/2$	$m_h = 1.70 \pi \rho a^2$	(4) t
	$a/b = 1/5$	$m_h = 1.98 \pi \rho a^2$	(4) t
	$a/b = 1/10$	$m_h = 2.23 \pi \rho a^2$	(4) t

試験水槽の形状

試験水槽として採用した値



図一別紙 1 - 1 ラックとプールの隔壁間の距離とラックの付加質量



図一別紙 1 - 2 試験水槽形状図

参考文献[1] : 「Seismic Analysis of Safety Related Nuclear Structures」  
(Standards ASCE 4-98)

[2] : 「Table of Hydrodynamic Mass Factors for Translational Motion」 (ASME)



## 別紙－2 試験における水深の影響について

実機ラックは水深 11.5m のところに設置されているが，試験では試験設備の関係から試験水槽の水深は 4.8m とした。試験水槽の水深 4.8m の試験で，実機ラックの振動特性に影響を与えないか検討するため，解析モデルを作成し NASTRAN の MFLUID 機能<sup>※1</sup>を用いて水深が異なる場合の振動特性を検討した。

なお，水深の影響は，ラックの種類による相違がほとんどないことから，市松ラックを代表して検討を行った。

### (1) 検討方法

市松ラックの水中の振動特性に与える水深の影響を評価した。なお，試験における地震動入力はスロッシングの影響を回避するような波を使用しており，本解析においてもスロッシング効果は考慮していない。

市松ラックの代表寸法は，幅 1584mm，奥行き 804mm，高さ 4493mm である。NASTRAN の MFLUID 機能を用いて試験水槽の水深 4.8m の場合と実機水深 11.5m の場合の固有振動数と周波数応答を算出した。ラック外側の水平方向は無限水中とした。

### (2) 検討結果

#### (a) 固有振動数

水深 4.8m の場合と水深 11.5m の場合の固有振動数および固有振動モードを図一別紙 2－1 に示す。

試験水槽の水深 4.8m の場合と実機水深 11.5m の場合の固有振動数の差異は小さいことがわかった。

表一別紙 2－1 固有振動数の比較

次数	水深4.8m		水深11.5m	
	固有振動数 [Hz]	振動モード	固有振動数 [Hz]	振動モード
1	10.25	Y方向変形	10.20	Y方向変形
2	22.43	X方向変形	22.40	X方向変形

※1 解析モデル上考慮している流体の付加質量を計算する機能

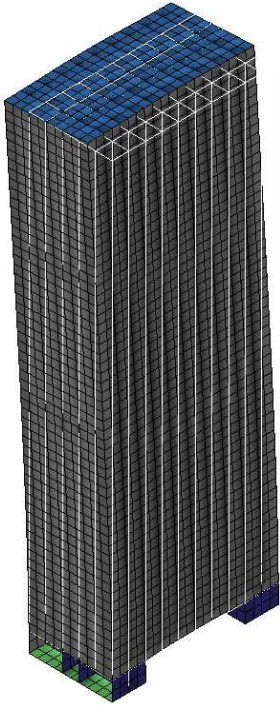
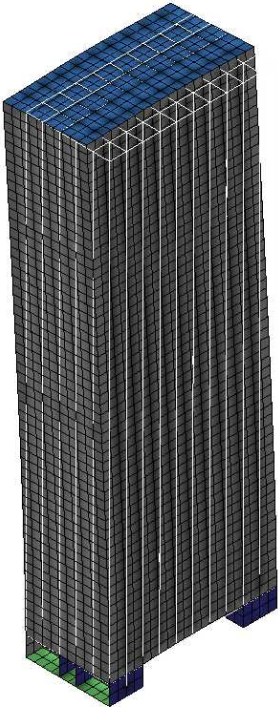
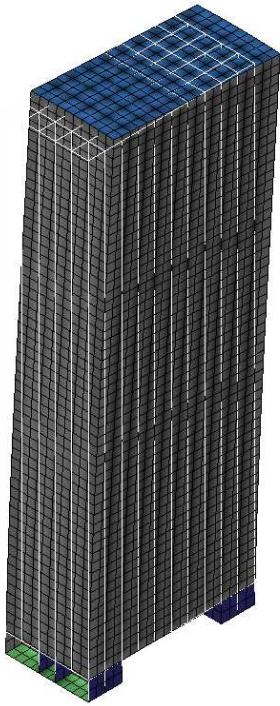
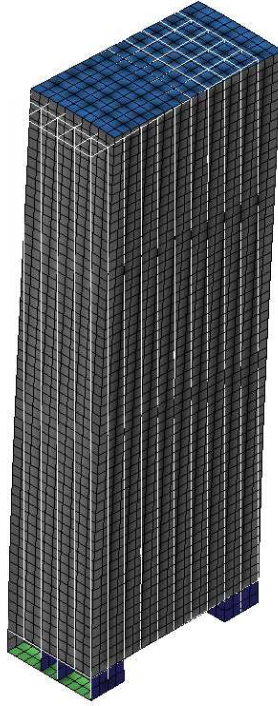
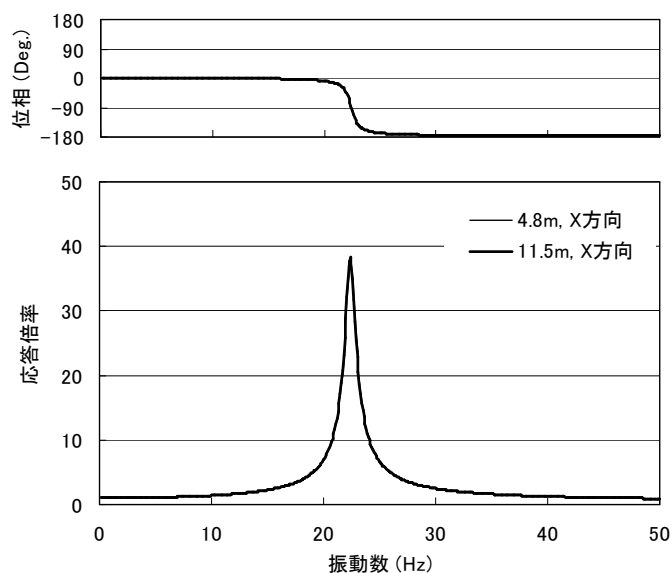
	試験：水深 4.8m	実機：水深 11.5m
1次 モード	 <p>10.25Hz</p>	 <p>10.20Hz</p>
2次 モード	 <p>22.43Hz</p>	 <p>22.40Hz</p>

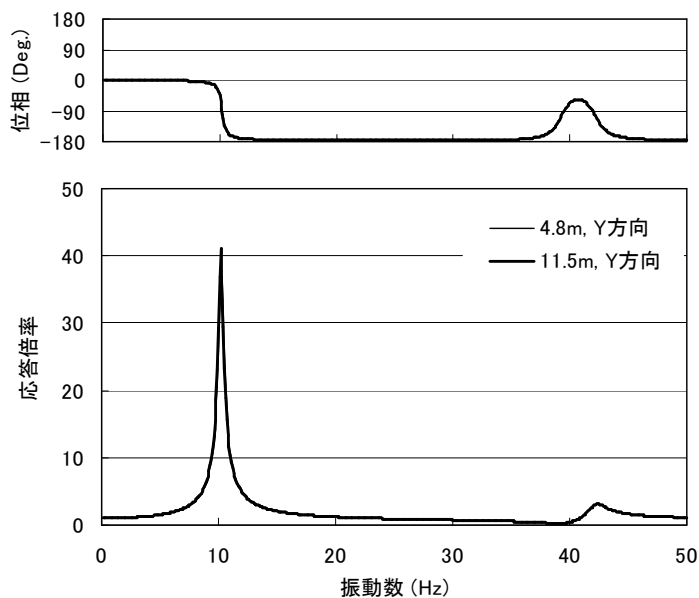
図-別紙 2-1 水深 4.8m と 11.5m のラック振動モード

(b) 周波数応答

固有振動数の違いは小さいことがわかったが、応答特性の違いも小さいことを確認するために、上記の解析モデルを用いて周波数応答計算を行った。図一別紙2-2にX方向加振時の周波数応答、Y方向加振時の周波数応答を示す。水深が4.8mの場合と11.5mの場合で違いはほとんどないことがわかる。なお、減衰定数は2%と仮定した。



(1) X方向加振時



(2) Y方向加振時

図一別紙2-2 周波数応答解析結果

### (3) 検討結果のまとめ

実機ラックは水深 11.5m のところに設置されているが、試験では試験設備の関係から試験水槽の水深は 4.8m とした。試験水槽の水深 4.8m の試験で、実機ラックの振動特性に影響を与えないか検討するため、解析モデルを作成し NASTRAN の MFLUID 機能を用いて水深が異なる場合の振動特性を検討した。その結果、水深 4.8m および水深 11.5m の条件において、水位は付加質量に対して影響を与えないため、固有振動数および周波数応答に差異がなく、水深 4.8m の試験水槽を用いた試験で実機の振動特性を模擬できることを確認した。

なお、水位をラック高さ以下に変化させることでラックに掛かる付加質量を変化させて、本解析モデルで指定した水深が付加質量に影響していることを確認した検討結果を以下に示す。

### (4) 水深の影響によるラックの固有値解析

本検討では水深 11.5m と水深 4.8m の固有値解析結果に対して、水位高さ 4.473m (ラック高さ) と 2m (ラック高さ以下の水位) の 2 ケースの固有値解析を追加実施した。本解析では、付加質量を考慮した計算を実施している。

表一別紙 2-2 に市松ラックの短辺方向および長辺方向について、水深と固有振動数の関係を示す。表より、水深 11.5m の固有振動数に対してラック高さと同等の水深 4.473m の固有振動数はほぼ変化しないが、ラック高さ以下の水深 2m の固有振動数では変化率が大いことがわかる。ラック高さ以下のケースとして実施した水深 2m の固有値解析ではラック高さの半分程度が水中にないため、ラックに対して付加質量を受けない部分があり、固有振動数が高くなったといえる。すなわち、本解析結果においてラック高さ以上の水位ではラックに与える付加質量は変わらず、試験計画の水深 4.8m で実機プラントでの水深 11.5m の振動特性を模擬できているといえる。

表一別紙 2-2 水深と固有振動数

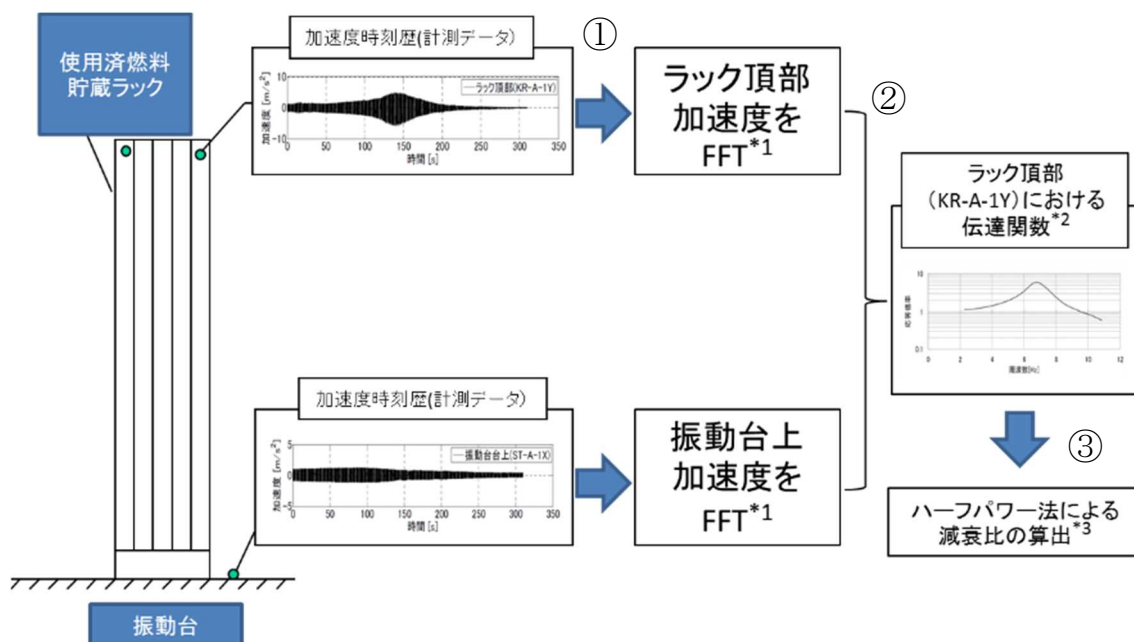
No.	水深[m]	固有振動数[Hz]		備考
		短辺方向	長辺方向	
1	11.5	10.20	22.40	
2	4.8	10.25	22.43	
3	4.473	10.31	22.46	ラック高さ
4	2	12.10	23.86	ラック高さ以下の水位

別紙－3 減衰定数の算出方法

a. 正弦波掃引試験

正弦波掃引試験にて、ハーフパワー法を適用し減衰定数を算定するまでのデータ処理の流れは以下の通り。

- ① 正弦波掃引試験において取得したラック頂部の加速度時刻歴データおよび振動台上加速度時刻歴データの振動数解析を行う。
- ② 振動台上加速度の振動数解析データとラック頂部の振動数解析結果から、伝達関数を計算する。
- ③ ラック頂部の加速度計測点それぞれに対応する伝達関数に対しハーフパワー法を適用し減衰定数を算定する（詳細は別紙－4参照）。



\*1:高速フーリエ変換処理にて、振動数に対する加速度最大値を算出する（FFT：Fast Fourier Transform, 高速フーリエ変換）。

\*2:伝達関数：ラック頂部加速度 FFT 結果／振動台上加速度 FFT とした結果をプロットしたもの。

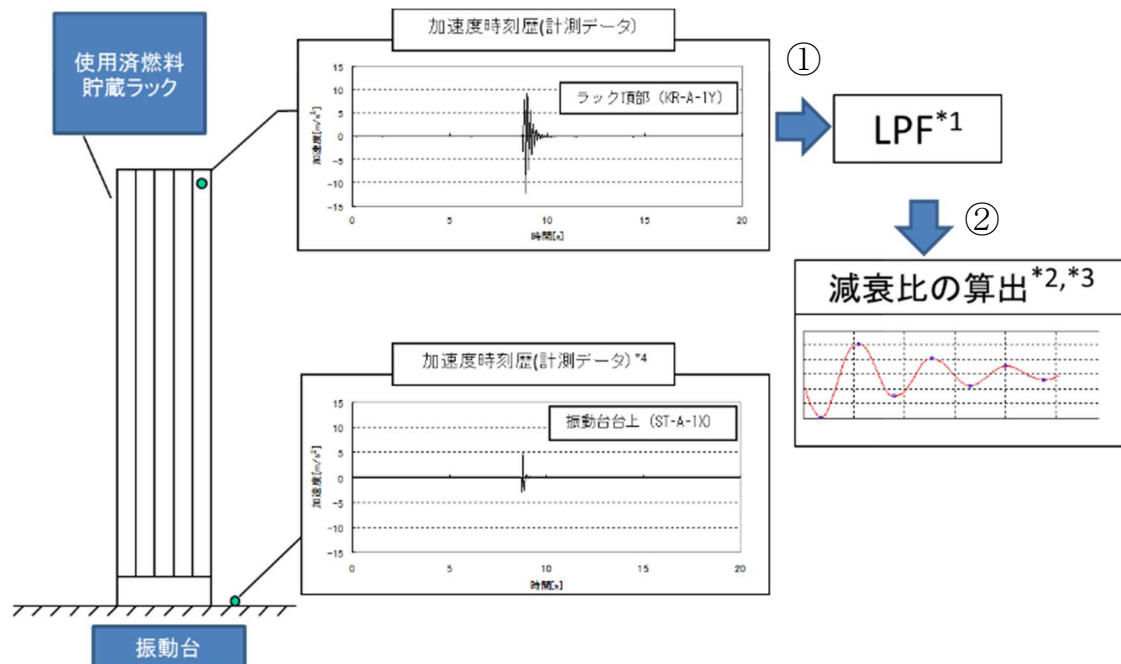
\*3:ラック頂部の加速度計測点 4 点 (KR-A-1Y~4Y)について KR-A-1Y と同様の処理を実施

図－別紙 3－1 正弦波掃引試験データの処理の例（短辺方向，目標入力加速度 1.00m/s<sup>2</sup>）

b. 正弦半波加振試験

正弦半波加振試験にて、自由減衰波形から減衰定数を算定するまでのデータ処理の流れは以下の通り。

- ① 正弦半波加振試験にて取得したラック頂部の加速度時刻歴データを，試験体の一次モードで評価するため，ローパスフィルタ（LPF）により高周波成分を除去する。
- ② フィルタ処理後の加速度波形に対し，振動台加振時間帯を除く加速度のピーク値より減衰比を求める（詳細は別紙－5および別紙－6参照）。



\*1:ローパスフィルタにて最低次数のモードだけの応答で評価するため，高周波成分を除去する（LPT : Low-pass Filter : ローパスフィルタ）。

\*2:振動台加振時間帯を除く加速度波形のピーク値より減衰比を算定する。

\*3:ラック頂部の加速度計測点4点（KR-A-1Y~4Y）についてKR-A-1Yと同様の処理を実施する。

\*4:振動台上加速度が小さいことを確認する。

図－別紙3－2 正弦半波加振試験データ処理の例（短辺方向，振動台上加速度  $5.00\text{mm/s}^2$ ）

別紙-4 ハーフパワー法について

加振力  $Fe^{i\omega t}$  を受ける 1 自由度系の振動方程式は式(1)で表される。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = Fe^{i\omega t} \quad (1)$$

上式の解を  $x = Ae^{i\omega t}$  とし、式(1)に代入すると、

$$A = \frac{F}{-m\omega^2 + ic\omega + k} = \frac{F}{k \left\{ \left( 1 - \frac{m}{k} \omega^2 \right) + i \frac{c}{k} \omega \right\}}$$

ここで、固有周期  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 、減衰定数  $\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{mk}} = \frac{c\omega_0}{2k}$  とおくと

$$A = \frac{F}{k \left[ \left\{ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right\} + i 2\zeta \frac{\omega}{\omega_0} \right]}$$

よって、

$$x = \frac{1}{k \left[ \left\{ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right\} + i 2\zeta \frac{\omega}{\omega_0} \right]} Fe^{i\omega t}$$

となる。

よって、加振力  $Fe^{i\omega t}$  に対する変位の振動伝達特性の振幅は式(2)で与えられる。

$$A = \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{\left( 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right)^2 + \left( 2\zeta \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}} \quad (2)$$

いま  $\zeta \leq 1$  とすると式(2)の振幅曲線はピーク値付近で  $\omega = \omega_p$  に対しほぼ対称である。

そこで  $\omega_p$  より少し低い  $\omega_L$  点の振幅を  $A_L$  とする。

$$\Delta\omega/2 = \omega_p - \omega_L = \omega_0 - \omega_L \quad (\omega_p \approx \omega_0) \text{ より}$$

$$A_L = \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - (\omega_0 - \Delta\omega/2)^2 / \omega_0^2\right)^2 + 4\zeta^2 (\omega_0 - \Delta\omega/2)^2 / \omega_0^2}}$$

$$\approx \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{(\Delta\omega / \omega_0)^2 + 4\zeta^2}}$$

一方,

$$A_{\max} = \frac{1}{2k\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \approx \frac{1}{2\zeta k}$$

となる。 $A_{\max}$ と $A_L$ の比 $R$ は

$$R = \frac{A_{\max}}{A_L} = \frac{\sqrt{(\Delta\omega / \omega_0)^2 + 4\zeta^2}}{2\zeta}$$

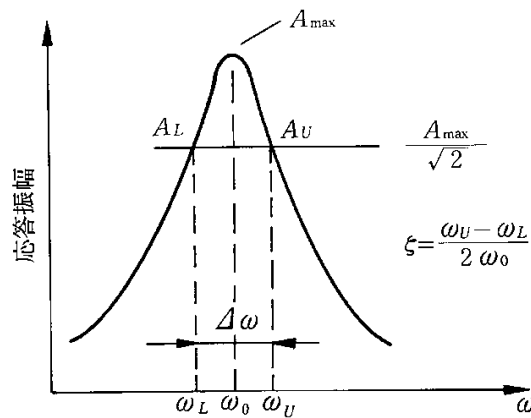
となり, 整理すると

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega / \omega_0}{\sqrt{R^2 - 1}}$$

となる。 $R = \sqrt{2}$  とすると以下のように簡単になる。

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{2} \frac{\omega_U - \omega_L}{\omega_0} = \frac{f_U - f_L}{2f_0}$$

よって, 周波数応答の $A_{\max} / \sqrt{2}$ を示す周波数 $f_U$ と $f_L$ および固有振動数 $f_0$ を計測すれば減衰定数 $\zeta$ を求めることができる。この減衰定数測定方法をハーフパワー法という(図一別紙4-1)。

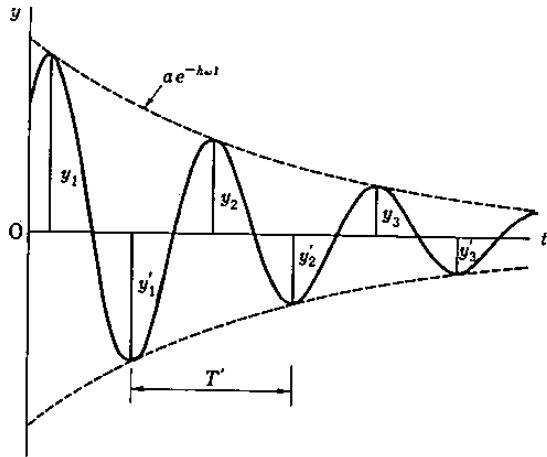


図一別紙4-1 ハーフパワー法



別紙－5 自由振動波形からの減衰定数の算出方法

自由減衰振動波形は、指数関数的に減衰することから、隣り合う振幅の比の対数をとると常に一定の値となり、この隣り合う振幅の比の自然対数から対象とする構造の減衰定数を求めることができる（図－別紙5－1）。



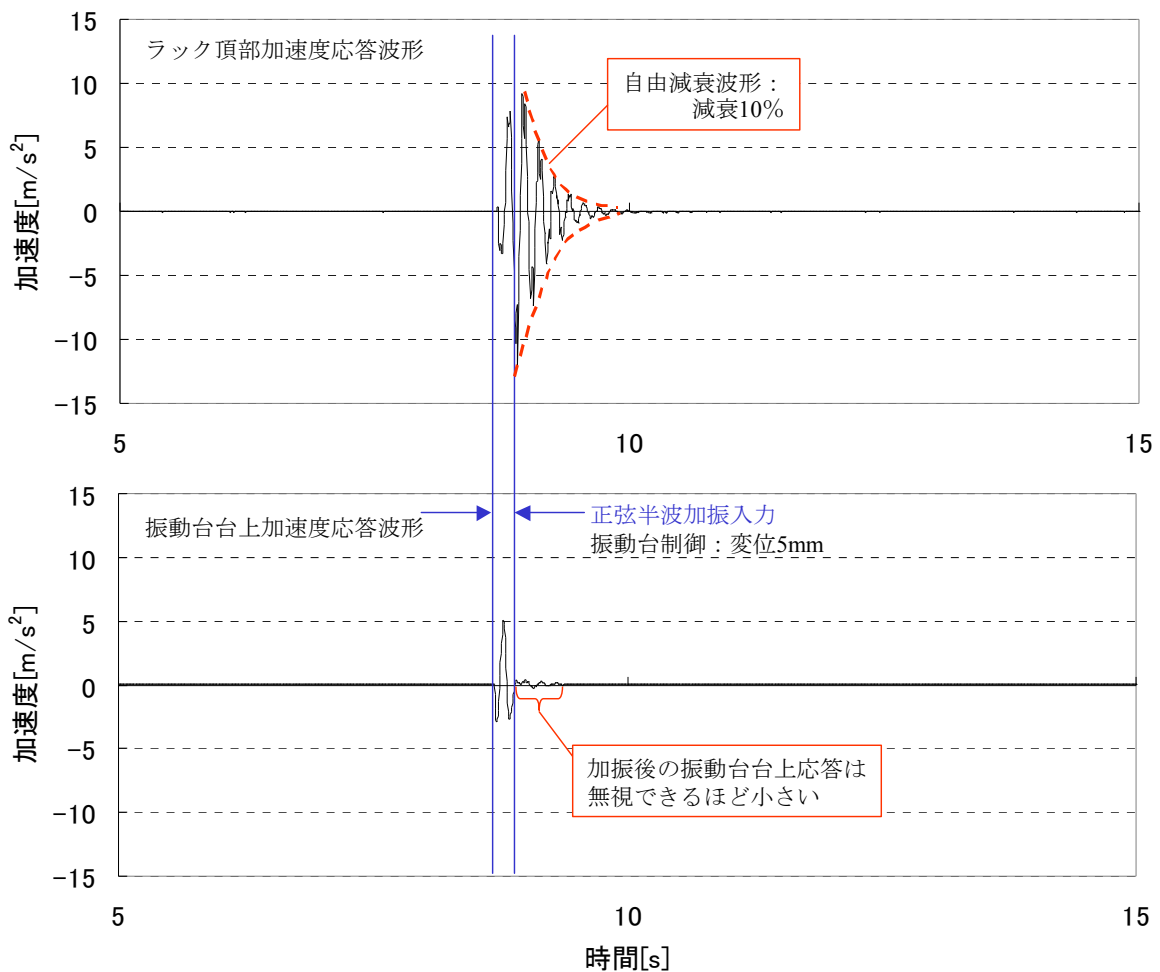
$$\text{(振幅比)} d = \frac{y_1}{y_2} = \frac{y_2}{y_3} = \dots$$

$$h = \left( \frac{\ln d}{2\pi} \right) / \sqrt{1 + \left( \frac{\ln d}{2\pi} \right)^2}$$

図－別紙5－1 減衰定数の算出方法(自由振動波形からの減衰定数の算定方法)

別紙－6 正弦半波加振試験における振動台の影響について

正弦半波加振におけるラック頂部および振動台上の加速度時刻歴波形を図－別紙6－1に示す。振動台上加速度応答波形において、正弦半波加振入力後の台上応答加速度は、ラック頂部加速度に比べて無視できるほど小さいことがわかる。なお、振動台上応答加速度がほぼゼロとなる時点からラック頂部応答加速度の自由減衰波形として減衰定数を求めている。



図－別紙6－1 燃料ラックの自由振動波形と減衰定数  
(正弦半波加振試験，短辺方向，振動台上加速度 5.00m/s<sup>2</sup>)

別紙-7 スロッシングによる減衰への影響について

本試験は、供試体ラックの固有周期を含む振動数範囲で加振試験を行なっている。試験水槽のスロッシングの固有周期は入力振動数範囲に対し十分大きい試験条件にて試験を行なっているため、本試験ではスロッシングが励起されない（表-別紙7-1）。一方、実機では、地震動の長周期成分の大きさによっては燃料プールのスロッシングが励起される可能性が考えられるため、その影響を検討する。

実機燃料プールのスロッシングの固有周期は、実機燃料ラックの固有周期に対し十分に大きい（表-別紙7-1）。地震によって実機燃料プールにスロッシングが励起された場合、燃料ラックの振動速度に対して、スロッシングによるプール水の流速はほぼ一定とみなせる状態であると考えられ、流速一定の流れの中で物体が振動する場合、流速に依存して減衰定数が大きくなる可能性があるが<sup>[1]</sup>、今回設定する設計用減衰定数はこの影響を考慮せず設定した減衰定数であるため、スロッシングの影響が無い試験条件で取得した減衰定数を実機の燃料ラックの耐震設計に適用出来ると考える。

表-別紙7-1 試験および実機の固有周期

	試験		実機	
	試験水槽のスロッシング	入力加速度の周期	実機燃料プールのスロッシング	実機ラック
格子ラック	1.8~2.3 秒	振動台振動 0.050~0.500 秒	4.3~4.9 秒	0.065~0.093 秒
市松ラック				0.057~0.082 秒
角管ラック*	1.8 秒	振動台振動 0.050~0.125 秒		0.077~0.092 秒

\*試験は長辺方向のみ加振しているため、長辺方向の値を記載

参考文献[1] : Robert D. Blevins, "Flow-Induced Vibration Second Edition", (1990), Van Nostrand Reinhold.

別紙－8 プール水および燃料集合体の体数が減衰定数に与える影響

(1) 燃料集合体の体数と減衰定数の関係

燃料集合体の体数による減衰定数への影響を確認するため、**模擬燃料集合体の貯蔵率を変えて水中での加振試験を行った。**また、**プール水の減衰定数への影響を確認するため、市松ラック単体（燃料集合体 0%）で気中と水中それぞれで、加振試験を行った。**

試験条件を表－別紙 8－1 に示す。

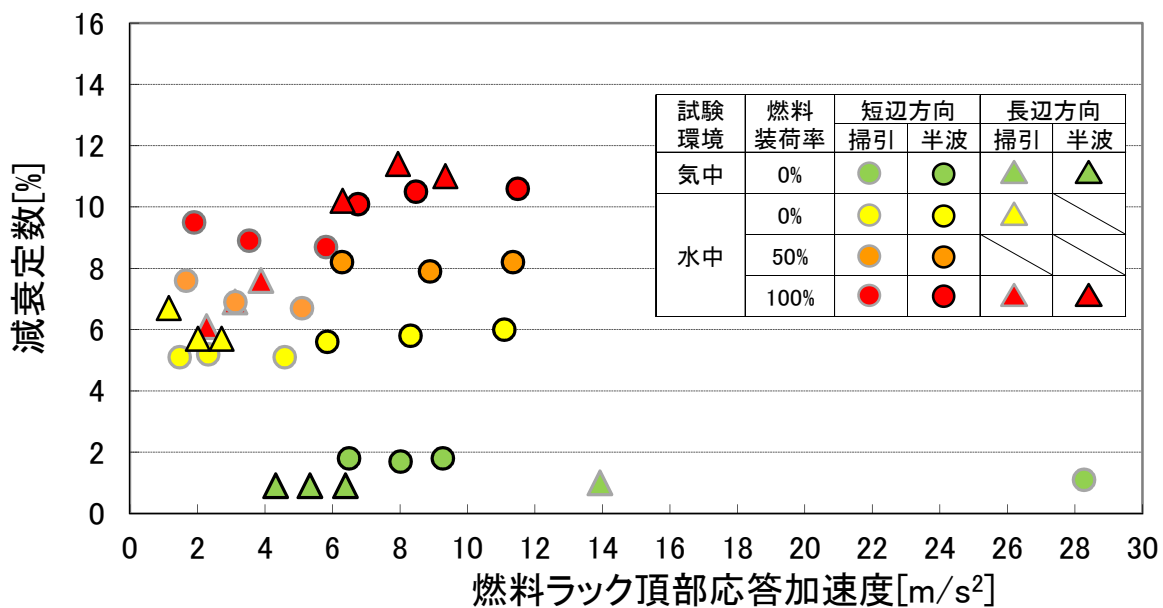
表－別紙 8－1 水および燃料集合体数の影響評価に用いた試験条件

試験方法	方向	入力加速度* (m/s <sup>2</sup> )	気中/水中	燃料貯蔵率 (%)	備考
正弦波掃引試験	短辺	0.71	気中	0	減衰定数をハーフパワー法により算出 (別紙－4)
		0.61, 0.61, 0.62	水中	0, 50, 100	
		0.89, 0.89, 0.91	水中	0, 50, 100	
		1.19, 1.22, 1.22	水中	0, 50, 100	
	長辺	0.36	気中	0	
		0.45, 0.72	水中	0, 100	
		0.73, 0.97	水中	0, 100	
		0.98, 1.22	水中	0, 100	
半波加振試験	短辺	3.38,4.25,5.22	気中	0%	減衰定数を自由振動波形より算出(別紙－5)
		3.13,4.06,5.10	水中	0%	
		3.05,3.74,4.91	水中	50%	
		2.91,3.98,5.00	水中	100%	
	長辺	3.09,3.85,4.67	気中	0%	
		2.96,3.75,4.50	水中	100%	

※振動台上の実測加速度（最大値）。

試験結果から、試験を実施したいずれの燃料ラック頂部応答加速度の範囲においても、貯蔵される燃料集合体の貯蔵率の増加に伴い、減衰定数が増加する傾向があることがわかる(図－別紙 8－1)。これは、燃料の貯蔵体数の増加により、ラックセル内部での各燃料集合体とラック間の摩擦、衝突、流体減衰等による振動エネルギーの散逸が大きくなることで、減衰が大きくなったと考えられる。

また、燃料貯蔵率 0%における気中および水中の試験結果を比較すると、流体付加減衰効果により減衰定数が大きくなることがわかる。



図一別紙 8-1 燃料装荷率と減衰定数の関係

(2) 燃料集合体の体数と減衰定数および発生応力の関係

燃料ラックの減衰定数は、模擬燃料集合体の貯蔵率の増加に伴い変化することから、燃料ラックの耐震評価で考慮すべき貯蔵率と減衰定数および発生応力について確認した。

発生応力が許容応力に最も近い 77 体ラック対象にした評価結果を表一別紙 8-2 に示す。

評価の結果、発生応力は燃料ラック重量による依存性が高く、100%設置の状態が最も厳しい設計条件となることから、設計上は燃料集合体 100%設置を仮定して評価すれば良いと考えられる。

表一別紙 8-2 燃料貯蔵率と発生応力の関係※

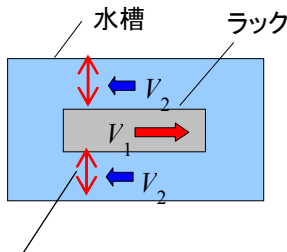
貯蔵率(%)	減衰定数(%)	総重量(ton)	発生応力(MPa)	許容応力(MPa)
0	3	13.9	48	153
50	5	24.3	87	153
100	7	34.3	122	153

※基礎ボルトの応力

別紙－9 試験水槽の形状決定方法（角管ラック）

燃料ラックの減衰効果には，燃料ラックが流体中を振動することによる流体減衰の効果の影響が考えられ，燃料ラックと水槽間の隙間が小さいほど流速が速くなり，より大きな流体減衰効果が生じる。そのため，試験水槽の大きさは，流体減衰の効果が影響しないような隙間として設定した。

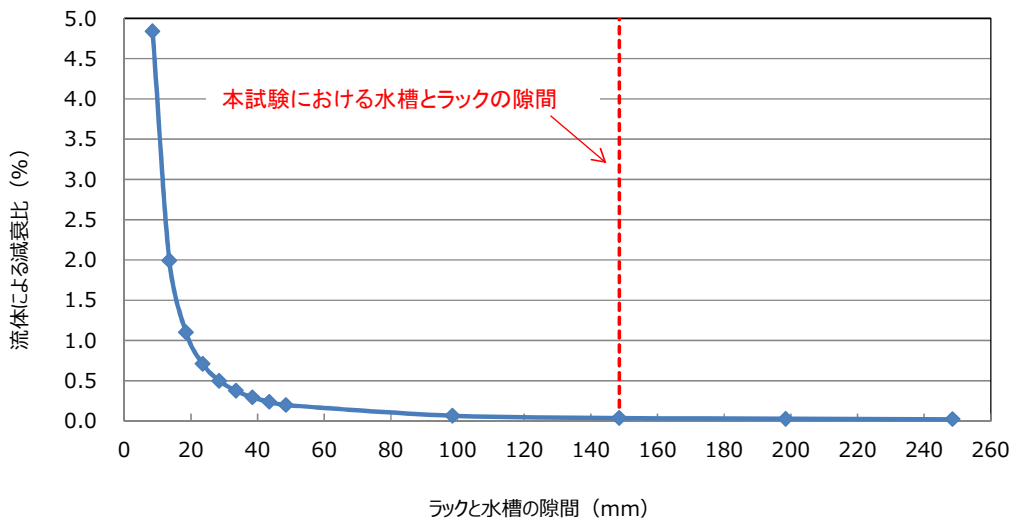
図－別紙9－1に水槽とラックの隙間を変化させた場合の，ラックが流体から受ける減衰比を示す。今回の実物大試験供試体における水槽と試験ラックの隙間は，約150mmと設定したため，流体による減衰効果は，0.1%以下であり，試験で得られた供試体ラックの減衰に影響を与えるものではないことを確認した。



V<sub>1</sub>: 振動中のラック自身の速度

V<sub>2</sub>: 水槽とラック間隙間の流速

水槽とラックの隙間



図－別紙9－1 水槽とラック間隙間が与える流体減衰

なお，試験水槽内で振動する供試体ラックに与える流体減衰は以下の式<sup>1)</sup>に従い算出した。

燃料ラックが水中を振動することによって生じる流体抵抗力によるエネルギー消費は，ラックの単位高さあたりの流体抵抗力は速度の二乗に比例し，次のように表される。

$$F = \frac{1}{2} \pi C_D \rho d \int_0^L |V| V dz \quad \cdots (1)$$

ここで,

$$V = \alpha_m \dot{X}$$

$$X = ag(z) \sin(\omega t)$$

$$\alpha_m = \frac{d}{D-d} + 1$$

$g(z)$  : ラックの高さ方向振動モードベクトル

流体力が一周期あたりに消費されるエネルギーは式 (1) を用いると,

$$E = \int_0^T F \dot{X} dt \quad \cdots (2)$$

$$E = \frac{4}{3} C_D \rho d \alpha_m^2 a^3 \omega^2 \beta L \quad \cdots (3)$$

ここで,

$C_D$  : 角柱の流体抗力係数

$\rho$  : 流体密度

$d$  : ラックの振動方向幅

$L$  : ラックの高さ

$a$  : ラックの変位振幅

$\omega$  : ラックの固有円振動数

$\alpha_m$  : ラック自身の速度とラックから見た流体の相対速度の比

$D$  : 水槽の振動方向の幅

$\beta$  : 高さ方向の流速分布に関する係数

等価減衰として速度比例型減衰力を考えれば, 減衰力によって一周期あたりに消費されるエネルギーは次のように表される。

$$E_0 = C_{eq} \pi \alpha^2 \omega \quad \cdots (4)$$

ここで, 流体減衰と等価な減衰として, 式 (3) と (4) が等しいとして等価減衰比を求めると,

$$\zeta_{eq} = \frac{C_{eq}}{2(m+m_v)\omega} = \frac{2\beta}{3\pi} \frac{1}{(m+m_v)} C_D \rho d L \alpha_m^2 a \quad \cdots (5)$$

ここで,

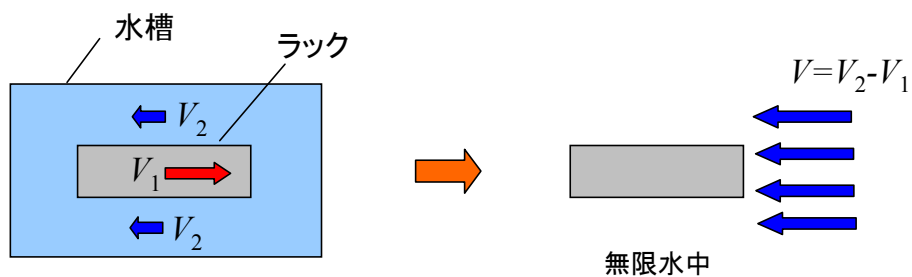
$m$  : ラックの質量

$m_v$  : 水中におけるラックの付加質量

以上の計算式から, 水槽内で振動するラックの流体減衰と等価な減衰は以下となり, 燃料ラックの減衰に対し, ラックと水槽の隙間による流体減衰の影響は非常に小さい。

角管ラックの等価減衰比  $\zeta_{eq} = 0.038\%$

ここで、流体による抗力の計算における一様流の流速  $V$  はラックから見た流体の相対速度  $V=V_2+V_1$  を用いた (図一別紙9-2)。ここで、 $V_1$  はラック自身の速度、 $V_2$  は流路内の流速である。



一様流中に置かれた角柱で近似

図一別紙9-2 一様流の流速の考え方

参考文献[1]：藤本他，「流体中で振動する角柱群の減衰特性」，日本機械学会論文集 (C編) 51 巻 471 号



1. 応答倍率による減衰比の算出方法<sup>1)</sup>

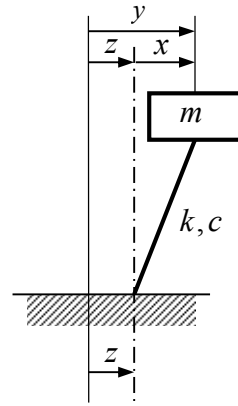
1. 1 地動に対する1自由度系の運動方程式と加速度共振曲線

1自由度系に地動変位が入力されるときの運動方程式を相対座標系で記述すると下記の式で表される。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{z} \quad (1)$$

ここで、

- $x$  : 質点の変位
- $y$  : 質点の地動を含めた変位 ( $x+z$ )
- $z$  : 地動変位
- $m$  : 質量
- $c$  : 減衰係数
- $k$  : ばね定数



ここで、固有周期  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ，減衰比  $\zeta = \frac{c}{2m\omega_0}$ ，振動数比  $\lambda = \frac{\omega}{\omega_0}$  とおくと、

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = -\ddot{z} \quad (2)$$

調和入力（正弦入力）として、

$$z = \frac{I}{\omega^2} e^{j\omega t} \quad (\ddot{z} = -Ie^{j\omega t} : \text{加速度振幅一定}) \quad (3)$$

とすれば、 $x$  も調和振動（正弦振動，単振動）となり、

$$x = Ae^{j\omega t}, \quad \ddot{x} = -A\omega^2 e^{j\omega t} \quad (4)$$

とすると、式(2)は、

$$Ae^{j\omega t}(-\omega^2 + 2\zeta\omega\omega_0 j + \omega_0^2) = Ie^{j\omega t} \quad (5)$$

したがって、応答加速度の周波数応答関数は、

$$\frac{\ddot{x}}{\ddot{z}} = \frac{A\omega^2}{I} = \frac{1}{\omega_0^2 \{(1-\lambda^2) + 2\zeta\lambda j\}} \omega^2 = \frac{\lambda^2}{(1-\lambda^2) + 2\zeta\lambda j} \quad (6)$$

この振動系の伝達関数（応答倍率）は以下の式で表される。

$$|H(\omega)| = \left| \frac{\ddot{x}}{\ddot{z}} \right| = \frac{\lambda^2}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad (7)$$

1. 2 地動に対する多自由度系の運動方程式と加速度共振曲線

地動に対する多自由度系の運動方程式は次式で表される。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{1\}\ddot{z} \quad (8)$$

ここで、

$[M]$  : 質量マトリックス

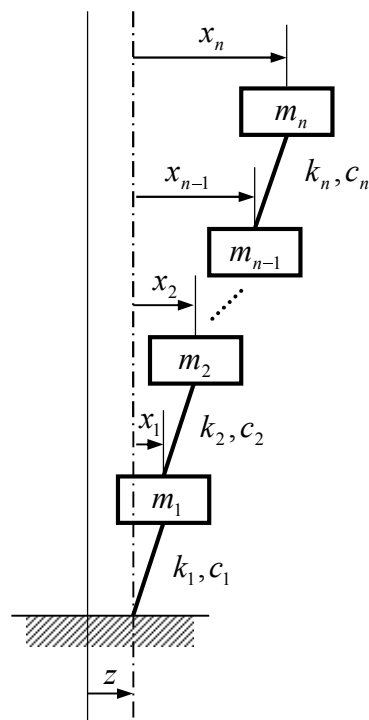
$[C]$  : 減衰マトリックス

$[K]$  : 剛性マトリックス

$\{x\}$  : 変位ベクトル

$\{1\} = \{1 \ \dots \ 1\}^T$  : 単位ベクトル

$z$  : 地動変位



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

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} = q_1 \begin{Bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \\ \vdots \\ \phi_{n1} \end{Bmatrix} + q_2 \begin{Bmatrix} \phi_{12} \\ \phi_{22} \\ \vdots \\ \phi_{n2} \end{Bmatrix} + \dots + q_n \begin{Bmatrix} \phi_{1n} \\ \phi_{2n} \\ \vdots \\ \phi_{nn} \end{Bmatrix} = \sum_{s=1}^n q_s \{\phi_s\} \quad (9)$$

ここで、

$q_s$  :  $s$  次のモード座標における変位 (時間の関数)

$\{\phi_s\}$  :  $s$  次の固有ベクトル (空間の関数)

(9)を(8)に代入し、さらに左側より基準関数の転置行列  $\{\phi_s\}^T$  を乗じて整理すると  $s$  次モードに

おける  $q_s$  の運動方程式は以下のようなになる。

$$\{\phi_s\}^T [M] \{\phi_s\} \ddot{q}_s + \{\phi_s\}^T [C] \{\phi_s\} \dot{q}_s + \{\phi_s\}^T [K] \{\phi_s\} q_s = -\{\phi_s\}^T [M] \{1\} \ddot{z} \quad (10)$$

(10)を整理すると,

$$\ddot{q}_s + \frac{\{\phi_s\}^T [C] \{\phi_s\}}{\{\phi_s\}^T [M] \{\phi_s\}} \dot{q}_s + \frac{\{\phi_s\}^T [K] \{\phi_s\}}{\{\phi_s\}^T [M] \{\phi_s\}} q_s = -\frac{\{\phi_s\}^T [M] \{1\}}{\{\phi_s\}^T [M] \{\phi_s\}} \ddot{z} \quad (11)$$

ここで,

$$M_s = \{\phi_s\}^T [M] \{\phi_s\} : \text{質量}$$

$$C_s = \{\phi_s\}^T [C] \{\phi_s\} : \text{減衰係数}$$

$$K_s = \{\phi_s\}^T [K] \{\phi_s\} : \text{ばね定数}$$

$$\beta_s = \frac{\{\phi_s\}^T [M] \{1\}}{\{\phi_s\}^T [M] \{\phi_s\}} : s \text{ 次の振動モードの刺激係数}$$

とおき, (11)式を変形すると,

$$\ddot{q}_s + \frac{C_s}{M_s} \dot{q}_s + \frac{K_s}{M_s} q_s = -\beta_s \ddot{z} \quad (12)$$

円固有振動数  $\omega_s$ , モーダル減衰比  $\zeta_s$  を用いて(12)式を変形すると

$$\omega_s = \frac{K_s}{M_s} : s \text{ 次の固有円振動数}$$

$$\zeta_s = \frac{C_s}{2M_s \omega_s} : s \text{ 次のモーダル減衰比}$$

$$\ddot{q}_s + 2\zeta_s \omega_s \dot{q}_s + \omega_s^2 q_s = -\beta_s \ddot{z} \quad (13)$$

1自由度系の運動方程式(2)と比較すると, (13)式は1自由度系の右边が係数倍されていることがわかる。

1つの固有振動モードだけが励振される場合,  $s$ 次モードの質点  $i$  の変位は次式で与えられる。

$$x_i = q_s \phi_{is} \quad (14)$$

よって,  $s$ 次モードの質点  $i$  の伝達関数 (応答倍率=質点  $i$  の応答加速度/地動加速度) は以下の式で表される。

$$|H(\omega)| = \left| \frac{\ddot{x}_i}{\ddot{z}} \right| = \frac{\beta_s \phi_{i_s} \lambda_s^2}{\sqrt{(1 - \lambda_s^2)^2 + (2\zeta_s \lambda_s)^2}} \quad (15)$$

なお、水中構造物については、質量マトリクス  $[M]$  に流体付加質量の効果が考慮されるため、

応答倍率の式 (15) では、流体付加質量の効果は  $\beta_s \phi_{i_s}$  に表れる。

### 1. 3 応答倍率による減衰比の算出方法

加速度共振曲線から、応答倍率の最大値 $|H(\omega)|_{\max}$  は $\lambda = \frac{\omega}{\omega_0} = 1$  近傍で生じる (図一別紙 1

0-1)。  $Q = |H(\omega)|_{\max}$  とすると、1 自由度系の場合、応答倍率の最大値は、(7)式より、

$$Q \cong \frac{1}{2\zeta} \quad (16)$$

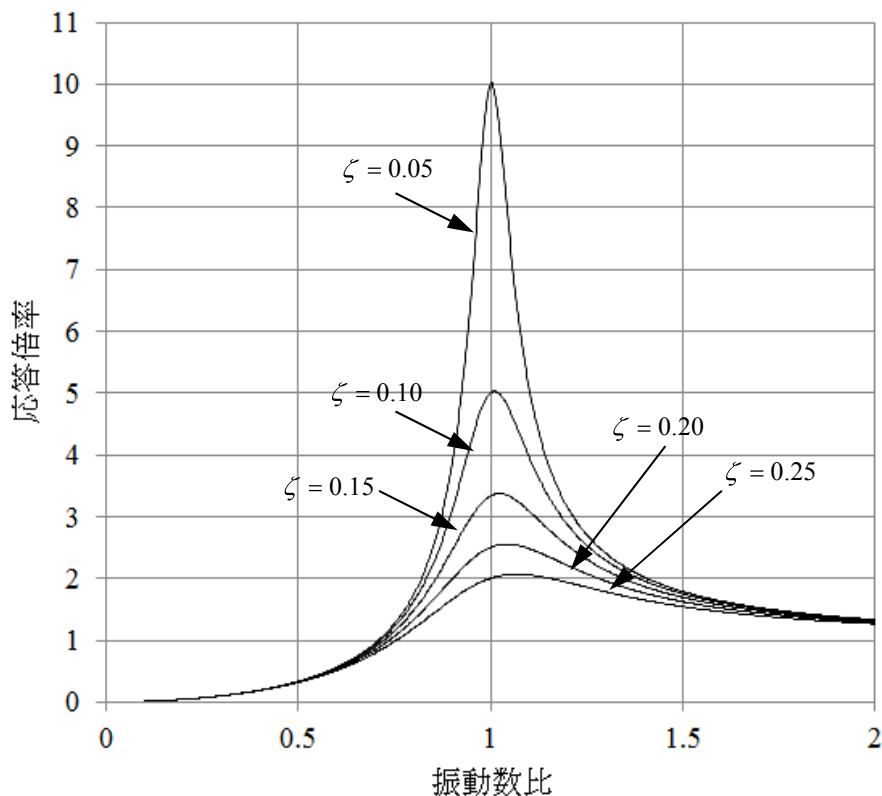
一方、多自由度系の場合、応答倍率の最大値は、(15)式より、

$$Q \cong \frac{\beta_s \phi_{is}}{2\zeta_s} \quad (17)$$

である。

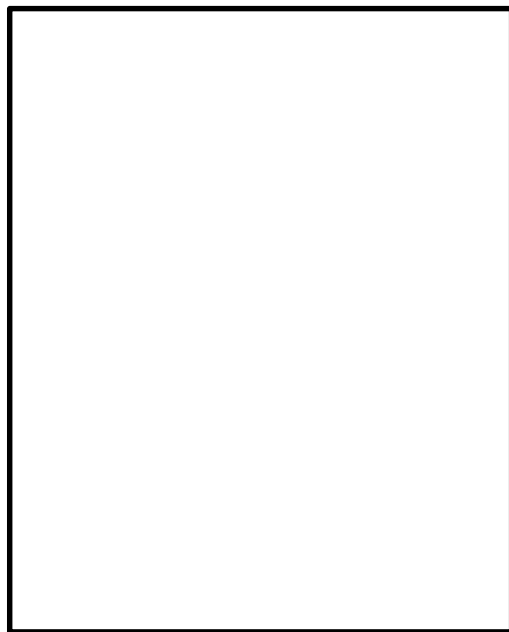
よって、正弦波掃引試験で得られる加速度の伝達関数にて、応答倍率が最大となる振動数 $\omega_p$

を $\omega_0$ とみなすと、応答倍率の最大値 $Q$ と刺激関数 $\beta_s \phi_{is}$ から減衰比 $\zeta_s$ を算出できる。



図一別紙 1 0-1 加速度の伝達関数

ここで、固有モードベクトル $\phi$ と刺激係数 $\beta$ は図一別紙10-2に示す供試体ラックと水槽のFEMモデルによる固有値解析より算出した値を用いる。

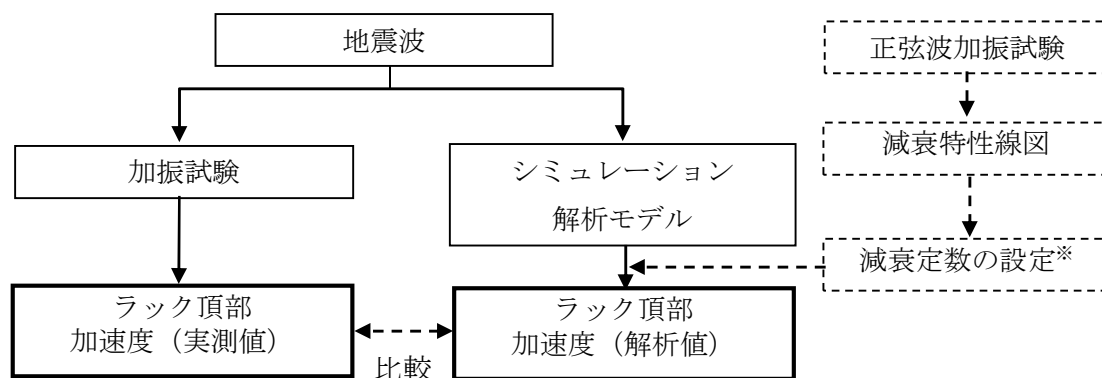


図一別紙10-2 角管ラックの解析モデルの例（試験水槽と供試体ラックの連成モデル）

## 2. 試験結果で得られた減衰定数の妥当性確認

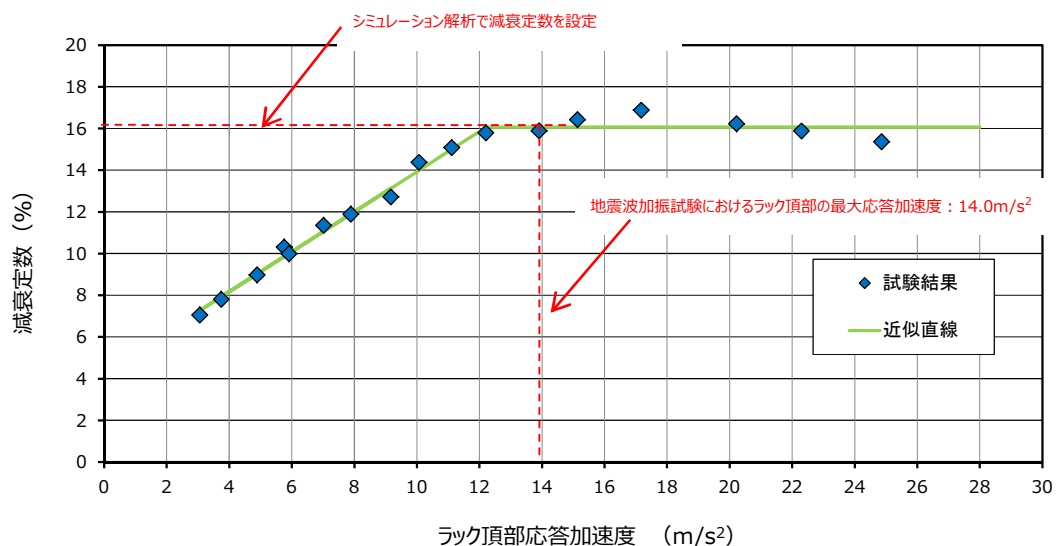
加振試験および減衰評価方法の妥当性確認として、地震波加振による試験結果と、解析モデルによるシミュレーション結果を比較した（図－別紙10－3）。

地震波加振による試験は、実機の基準地震動  $S_s$  の時刻歴波形を、入力倍率を変化させた6ケースで実施した。シミュレーション解析に適用する減衰定数は、地震波加振入力の加振試験で計測したラック頂部の最大応答加速度と、正弦波掃引試験で得られた減衰定数とラック頂部最大応答加速度の関係減衰特性線図（図－別紙10－4）に基づき設定した（別紙－11）。



※減衰の設定に当たっては、地震波加振試験のラック頂部加速度を利用

図－別紙10－3 シミュレーション解析による減衰定数の妥当性確認フロー

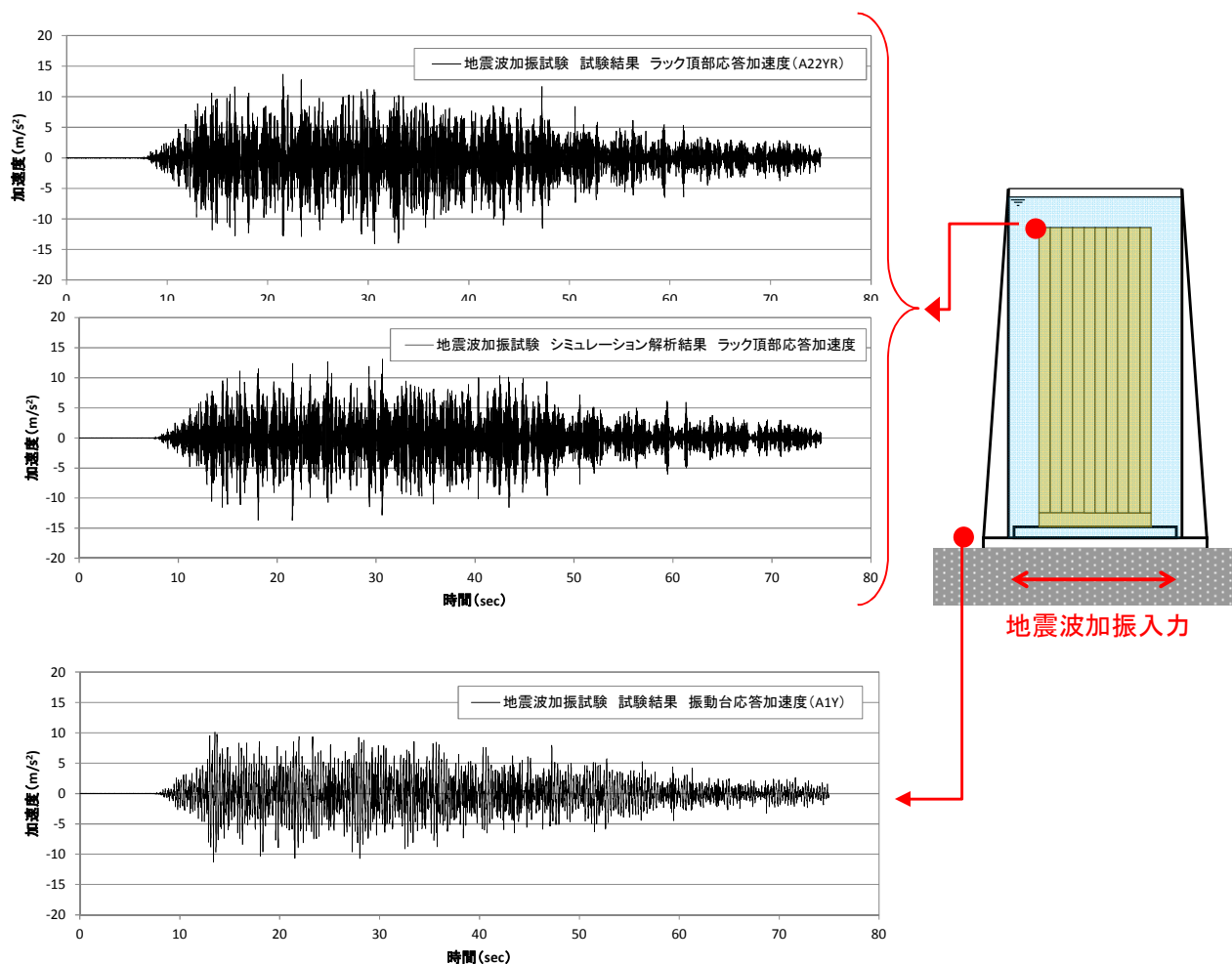


図－別紙10－4 解析に適用したラック頂部最大応答加速度と減衰定数  
（地震波加振 最大入力加速度  $11.3\text{m/s}^2$  の例）

試験結果とシミュレーション解析結果の比較を図一別紙10-5および図一別紙10-6に示す。

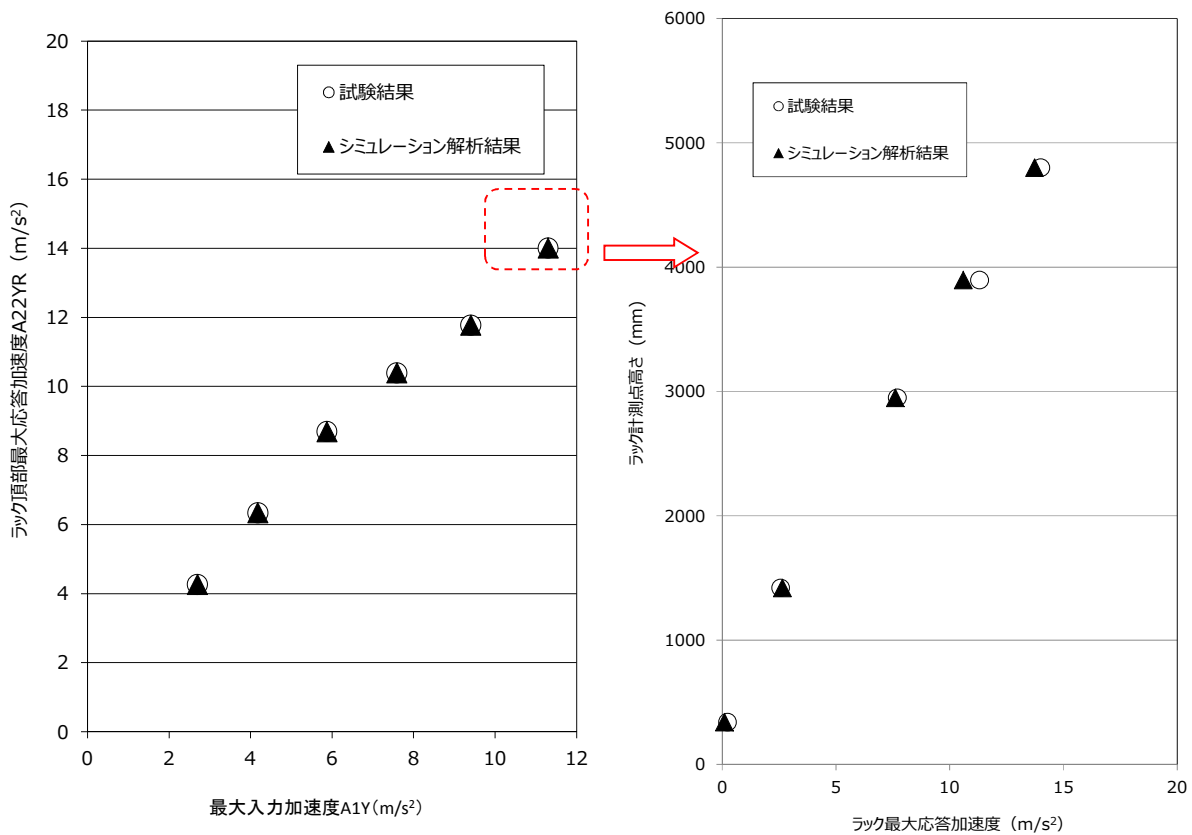
基準地震動  $S_s$  の時刻歴波形の入力倍率を変化させた6ケースにおけるラック頂部最大応答加速度は、いずれも試験とシミュレーション解析の結果がよく一致している(図一別紙10-6(a))。また、最大入力加速度が  $11.3\text{m/s}^2$  の入力ケースの、ラック頂部の最大加速度発生時刻におけるラックの各高さ位置の応答加速度についても、試験とシミュレーション解析の結果がほぼ一致している(図一別紙10-6(b))。

以上より、シミュレーション解析の結果からも、応答倍率から減衰定数を設定することは妥当であると考えられる。



図一別紙10-5 試験と解析の時刻歴波形 (最大入力  $11.3\text{m/s}^2$  の例)





(a) 最大入力加速度とラック頂部最大応答加速度 (b) ラック頂部最大応答における高さ方向分布図(最大入力 11.3m/s<sup>2</sup>)

図一別紙 10-6 地震波加振入力に対する試験結果とシミュレーション解析の比較

### 3. 応答倍率から算出した減衰定数の実機燃料ラック耐震評価への適用性

減衰定数は線形な振動系の共振状態における応答加速度の大きさを定める係数であることから、加振試験においても、燃料ラックの共振状態における最大応答の大きさ（最大応答倍率＝質点の加速度/入力加速度）から、理論式を用いて減衰定数を算出した。

また、燃料ラックの耐震評価に適用している応答解析手法は、線形な 3次元解析モデルによるスペクトルモーダル法であり、燃料ラックの共振時における最大応答加速度から、ラック各部位に作用する荷重を算出し、応力を算出するものである。

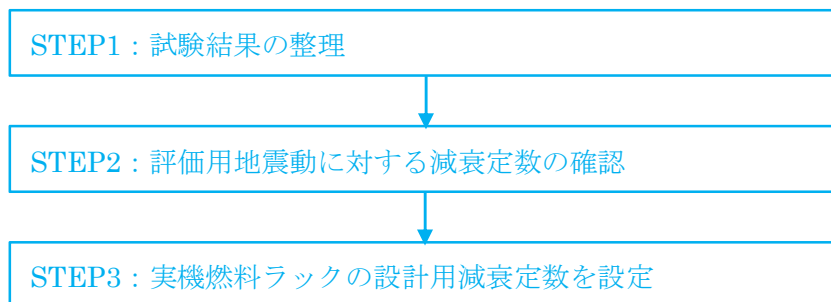
したがって、本手法は、供試体ラックの共振時の最大応答加速度を適切に再現できると考えられる。また、前述の通り、シミュレーション解析と試験結果が良く一致していることから減衰を評価する手法として妥当であると考えられる。

参考文献[1]：柴田明徳著、「最新耐震構造解析 第3版」森北出版株式会社

## 別紙－1 1 減衰の応答依存性を考慮した燃料ラックの減衰定数の確認方法

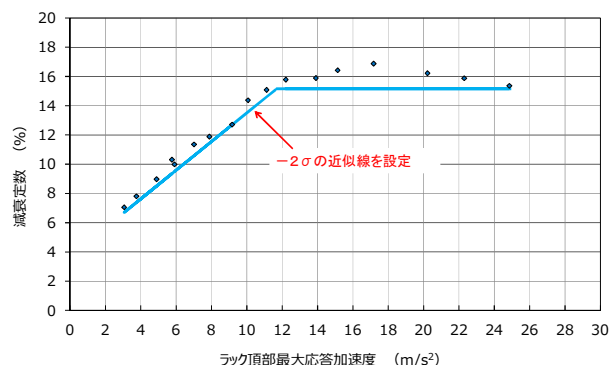
### (1) 試験結果に基づく燃料ラックの設計用減衰定数の設定手順

本試験の結果から、燃料ラックの減衰定数は、外部からの加振力による燃料ラック頂部の応答加速度が大きくなると減衰定数が漸増し、その後ほぼ一定となる減衰特性を確認したため、以下の手順により基準地震動  $S_s$  および弾性設計用地震動  $S_d$  (以下「評価用地震動」という) に対する設計用減衰定数を確認する。



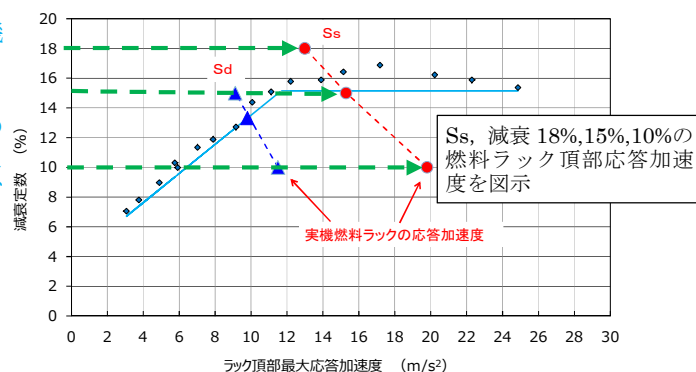
#### STEP1：試験結果の整理

本試験で得られた燃料ラックの減衰は、減衰定数が漸増する領域と、減衰定数が一定の領域に分けられると考えられるため、それぞれの領域に対し、試験結果のばらつき（測定器や試験条件による誤差）を考慮し、試験データに対して余裕（95%信頼区間： $-2\sigma$ ）を持たせた近似線を設定する。



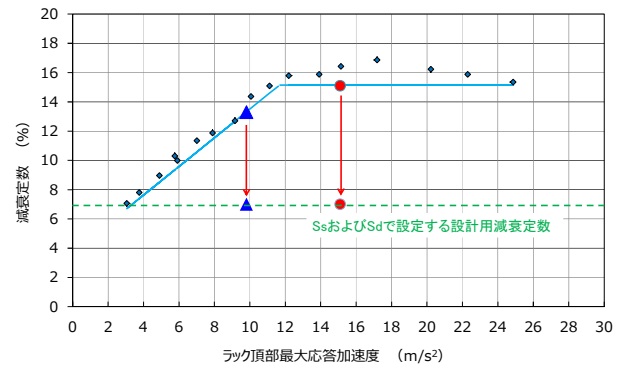
#### STEP2：評価用地震動に対する減衰定数の確認

減衰定数を変数にとり、評価用地震動に対する実機燃料ラックの最大応答加速度を、床応答スペクトルと燃料ラックの固有周期から算定し図示する。これらの点を結んだ直線と、STEP1で設定した近似線との交点における減衰定数が評価用地震動に対する実機燃料ラックの減衰定数である。



STEP3 : 実機燃料ラックの設計用減衰定数を設定

STEP2 で確認した減衰定数に対し，耐震評価での簡便性と余裕を考慮して設計用減衰定数を設定する。



別紙－1 2 燃料集合体の体数が減衰定数へ与える影響

(1) 燃料集合体の体数と減衰定数の関係

燃料集合体の貯蔵体数による減衰への影響を確認するため、模擬燃料集合体の貯蔵体数を変えて試験を行った。表－別紙1 2－1に試験条件を示す。なお、試験方法および減衰定数の評価方法は、前述した方法と同様である。

表－別紙1 2－1 加振試験条件

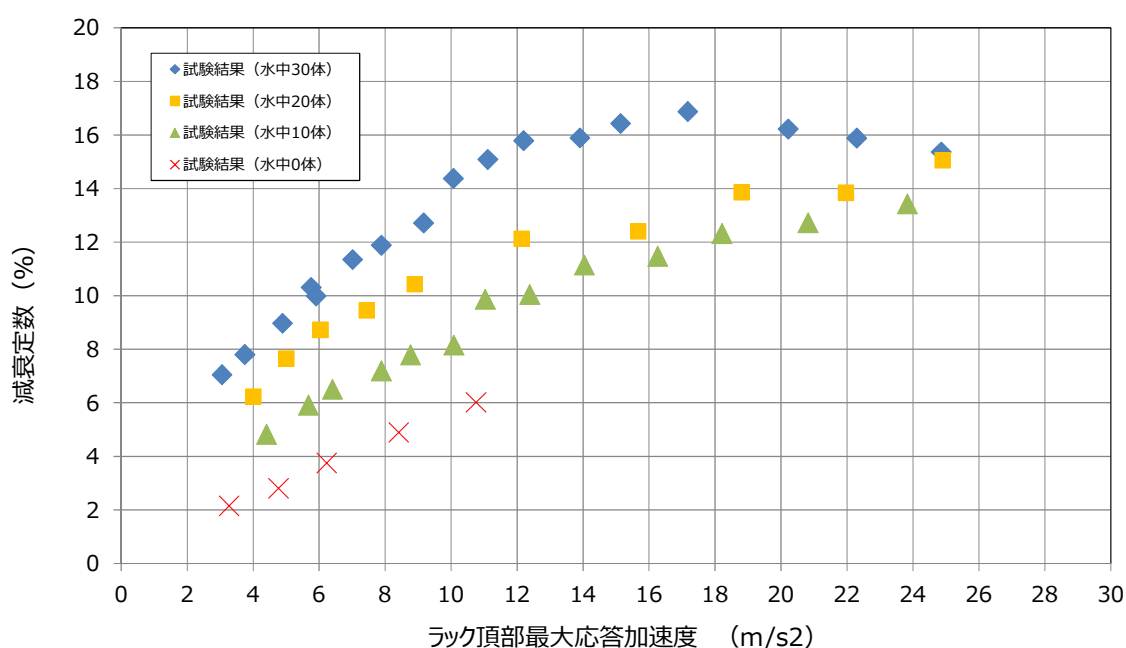
試験方法	燃料集合体 貯蔵数	入力加速度※ (m/s <sup>2</sup> )	水中/気中	入力加速度 ケース数	振動数範囲 (Hz)
正弦波掃引試験	0体	0.30～2.17	水中	5	15～19
	10体 (1/3貯蔵)	0.56～7.33	水中	13	10～22
	20体 (2/3貯蔵)	0.54～7.39	水中	10	8～20
	30体 (全貯蔵)	0.42～7.09	水中	17	8～20

※振動台上で計測した加速度の最大値

試験結果から得られた減衰定数とラック頂部の最大応答加速度の関係を図一別紙12-1に示す。

試験の結果から、燃料集合体の貯蔵体数によらず、燃料ラック頂部の応答加速度が大きくなると、減衰定数も大きくなること、燃料集合体の貯蔵体数の増加に伴い、減衰定数も大きくなることを確認した（図一別紙12-1）。

以上より、燃料ラック単体では顕著なエネルギーの散逸がないため減衰が小さく、燃料集合体の貯蔵体数の増加に伴い、ラックセル内部での燃料集合体とラック間の摩擦、衝突、流体減衰等による振動エネルギーの散逸により、減衰が増加すると考えられる。



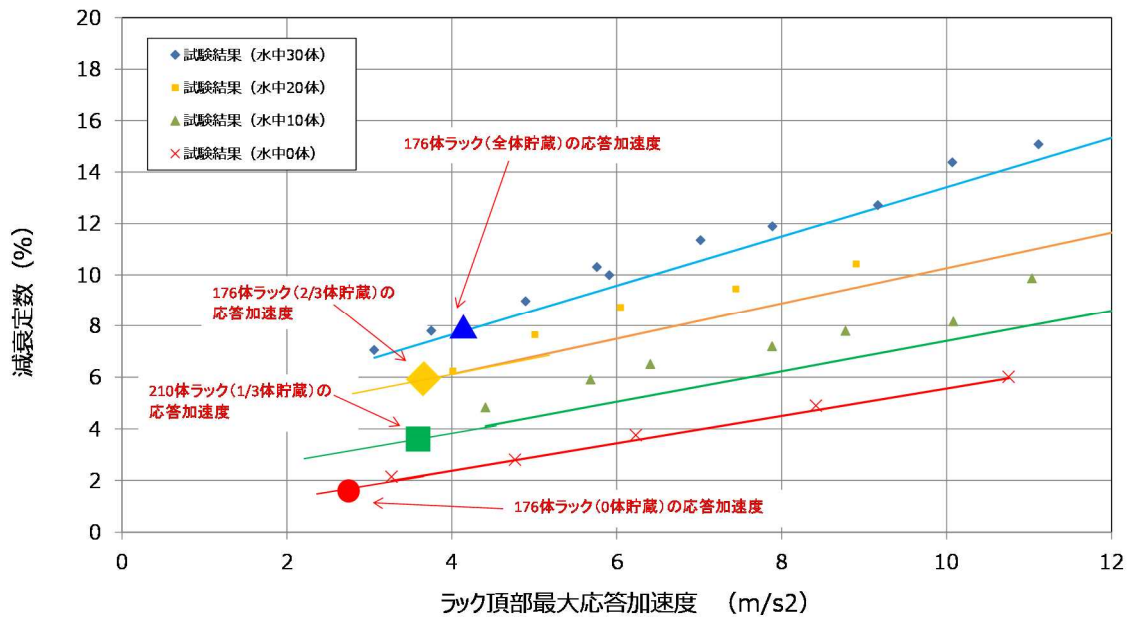
図一別紙12-1 角管ラックの燃料貯蔵体数と減衰定数の関係

## (2) 燃料集合体の体数と減衰定数および発生応力の関係

燃料ラックの減衰特性は、燃料集合体の貯蔵体数が大きくなると、減衰定数も大きくなることから、実機燃料ラックの耐震評価で考慮する燃料集合体の貯蔵体数を確認する。対象とする燃料ラックは、耐震評価における発生応力が最も大きい176体ラックを対象とした。

### a. 燃料集合体の貯蔵体数に対する設計用減衰定数

燃料集合体の貯蔵体数を変化させ、柏崎刈羽6号炉の基準地震動  $S_s$  に対する燃料ラックの最大応答加速度を確認した結果、全貯蔵で7%、2/3体で5%、1/3体では約3%、0体では約1%の減衰定数が得られるものと考えられる（図一別紙12-2）。



図一別紙 1 2 - 2 基準地震動  $S_s$  に対する応答加速度と減衰定数の関係\*

\*図一別紙 1 2 - 1 の 0~12m/s<sup>2</sup> の結果を拡大

b. 燃料集合体の貯蔵体数における発生応力

a. にて確認した燃料集合体の貯蔵数と減衰定数の関係を用い、燃料ラック補強板に発生する応力を比較すると、全数貯蔵の状態が最も厳しい設計条件であることから、設計上は燃料集合体の全数貯蔵条件で評価すれば良いことが分かる（表一別紙 1 2 - 2）。なお、補強板に発生する応力のうち、2/3 体未満の発生応力は、全数貯蔵の発生応力を、震度および総重量の比を用い比例倍した。

表一別紙 1 2 - 2 燃料貯蔵体数と発生応力\*の関係

貯蔵体数	減衰定数 (%)	総重量 (ton)	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
0 体貯蔵	1	36.1	33	205
1/3 体貯蔵	3	51.4	51	205
2/3 体貯蔵	5	66.8	67	205
全貯蔵	7	82.3	80	205

\*ラック補強板の組み合わせ応力