

BWR使用済燃料貯蔵ラックの減衰特性評価

Damping Characteristic Evaluations of BWR Spent Fuel Storage Racks

東北電力(株)	草階 達朗	Tatsuo KUSAKAI	Member
東北電力(株)	飯田 純	Jun IIDA	Member
(株)東芝	長坂 直	Naoshi NAGASAKA	Member
(株)東芝	渡邊 和	Urara WATANABE	Member
(株)東芝	前田 学	Manabu MAEDA	Member

The damping constant of the BWR spent fuel storage racks have been applied 1 % to evaluate seismic resistance, based on “Technical Guide for Seismic Design of Nuclear Power Plants” (JEAG 4601-1991) published by Japan Electric Association. Although some of nuclear operators in Japan that own similar racks have been applied 7% based on the past experiments results, the acceleration levels given to the racks were not high enough considering the scale of the current ground motion. Therefore, in order to confirm damping characteristics under conditions of higher acceleration and evaluate seismic resistant of the racks, we performed underwater shake tests using the simulant racks and fuels. As a result of the tests, we confirmed that there are tendency that the damping constant of the racks become bigger depending on the increase of the response acceleration, and it is more than 7% under the current ground motion conditions.

Keywords: BWR, Nuclear, Seismic, Shake test, Damping Constant, Spent Fuel Storage Rack

1. はじめに

BWR の使用済燃料貯蔵ラック（以下、「燃料ラック」という）の耐震性評価に用いる設計用減衰定数は、従来、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」に示されている溶接構造物の設計用減衰定数 1% を適用している。

既往の加振試験に基づき 7% を適用している事例もあるものの、現状の設計用地震動の増大を考慮すると、既往の試験よりも大きな加振条件での減衰特性を確認することは耐震安全性向上の観点から有効である。

本稿では、実機を模擬した 2 種類の燃料ラック（角管型、格子型）に対する、大加速度による水中加振試験の結果を報告する。

2. 実機の燃料ラックの構造

実機の燃料ラックは、Fig.1 に示すとおり、水深約 12m の使用済燃料プール内に燃料集合体を貯蔵するための設備であり、プール底部にボルト固定にて設置されている。

燃料ラックは、複数の金属製のセルで構成されており、セル内に燃料集合体を貯蔵し、適切な間隔に維持することで燃料集合体の臨界防止および冷却する機能を有している。

東北電力 女川原子力発電所および東通原子力発電所に設置される燃料ラックの種類には、角管をセルとする角管型ラックと、鋼板を格子状に組み合わせてセルを構成する格子型ラックの 2 種類がある。

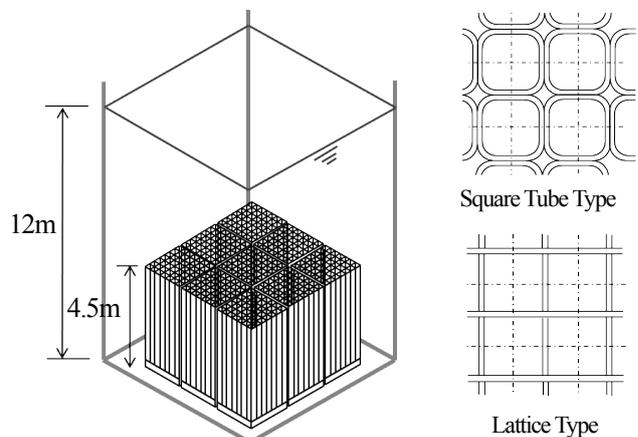


Fig.1 Actual Fuel Racks in the Spent Fuel Pool

3. 試験装置

3.1 試験水槽

燃料ラックの実機使用状態である水中を模擬するため、振動台上に水槽を設置して、内部に試験用燃料ラックを設置した。

なお、試験水槽は試験用燃料ラックと共振しないよう、十分に剛な構造として製作した。

連絡先：草階達朗、〒980-8550 宮城県仙台市青葉区
本町1丁目7番1号 東北電力(株)原子力部
E-mail: kusakai.tatsuo.wr@tohoku-epco.co.jp

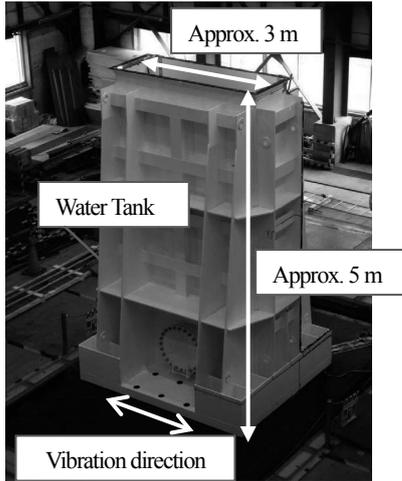


Fig.2 The Water Tank

3.2 模擬燃料集合体

試験用燃料ラックの内部には、模擬燃料集合体を装荷した。模擬燃料集合体は、実機燃料集合体と同一の構造、寸法、重量、材質（ UO_2 ペレットは鉛により重量を模擬）で構成した実機相当燃料集合体と、外形および重量を同一とした形状模擬燃料集合体の2種類を使用した。

なお、実機相当燃料集合体と形状模擬燃料集合体が同等の振動特性（共振振動数）を有することを模擬燃料集合体の単体試験で確認している。



Fig.3 The Simulant Fuel Assembly (Right : Simplified, Left : Detailed)

3.3 試験用燃料ラック

実機の燃料ラックの振動特性を模擬するため、実機の角管型ラック、および格子型ラックの構造・寸法を同一とした実物大相当の試験用燃料ラックを製作した。ただし、実機燃料ラックと同等の貯蔵体数を有する試験用燃料ラックでの加振試験は、加振設備の搭載質量や構造強度などの制約上困難であることから、本試験の試験用燃料ラックは、加振する方向を実機の燃料ラック最小列の貯蔵体数として模擬した部分模擬の試験用燃料ラックとし、試験用燃料ラックの長辺方向を加振方向とした。

以上より、本試験における試験用燃料ラックは、角管型ラックとして30体貯蔵ラック、格子型ラックとして33体貯蔵ラックとした。



Fig.4 The Test Fuel Rack (Square Tube Type)

Table.1 Comparison of the Actual and the Test Fuel Racks

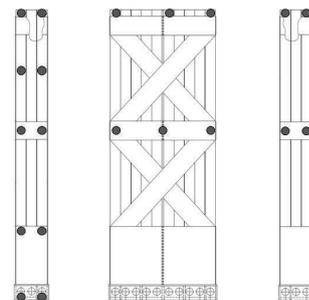
	Item	Actual Fuel Rack	Test Fuel Rack
Square Tube Type	Storage Capacity	$10 \times 11 = 110$ $10 \times 17 = 170$	$10 \times 3 = 30$
	Height	Approx. 4.5 (m)	Same as the left
	Material	Boron-SUS	SUS304
Lattice Type	Storage Capacity	$11 \times 11 = 121$ $11 \times 12 = 132$	$11 \times 3 = 33$
	Height	Approx. 4.5 (m)	Same as the left
	Material	Boron-SUS	SUS304

3.4 計測装置

試験用燃料ラックの共振振動数、応答倍率および振動モードを計測するために、振動台、試験水槽および試験用燃料ラック各部に加速度計を設置した。

さらに、加振試験により試験用燃料ラックの脚部構造や締結部に損傷や緩みなどが無いことを確認するため、ラック下部やボルト締結部付近などに、ひずみゲージを設置した。

角管型ラックに対する加速度計の設置位置を Fig.5 に示す。



● Accelerometer (Horizontal)

Fig.5 Location of the Accelerometer (Square Tube Type)

4. 加振試験方法および結果

4.1 加振試験方法

試験用燃料ラックに模擬燃料集合体を装荷し、試験水槽に水を注入した状態において、加振試験を実施した。

加振試験方法の概要を Fig.6 に、振動台から入力した加振条件を Table.2 に示す。振動台からの加振は、試験用燃料ラックの共振特性を精度良く計測することができるよう、加速度振幅一定で振動数を時間比例で変化、上昇させる正弦波掃引により入力し、振動台加速度と試験用燃料ラック各部の応答加速度との伝達関数から共振振動数、応答倍率、振動モード等の振動特性を分析評価した。

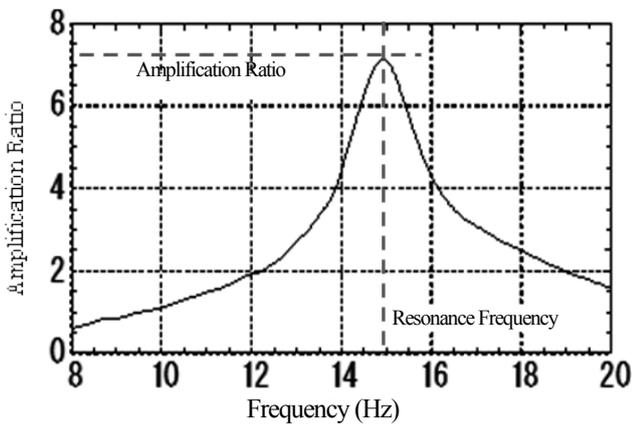
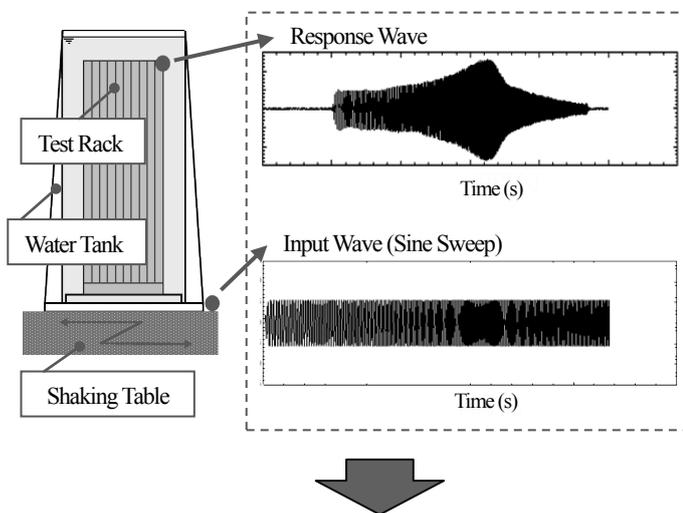


Fig.6 Summary of the Shake Test Method

Table.2 Shake Test Input Conditions

Rack Type	Input Wave	Frequency Range (Hz)	Input Acceleration (m/s ²)
Square Tube Type	Sine Sweep Wave	8-20	0.42 - 7.09
Lattice Type	Sine Sweep Wave	9-21	0.51 - 4.94

4.2 試験結果

正弦波掃引加振試験における各加振入力に対する、試験用燃料ラック頂部と振動台の伝達関数から得られた試験用燃料ラックの共振曲線として、格子型ラックの例を Fig.7 に示す。

この結果から、入力が小さい領域では応答倍率は7~8程度と大きいですが、加振入力レベルが大きくなるに従い応答倍率が3程度となっており、顕著な低下傾向が見られる。

これらの加振入力に対する応答特性は、燃料ラックの減衰特性の振幅依存性を示すものであり、入力加速度レベルの小さな低振幅域では減衰が比較的小さく、振幅の増加に伴って減衰が増加することによって、応答倍率が低下していると考えられる。なお、角管型ラックの減衰水特性も同様の傾向であることを確認している。

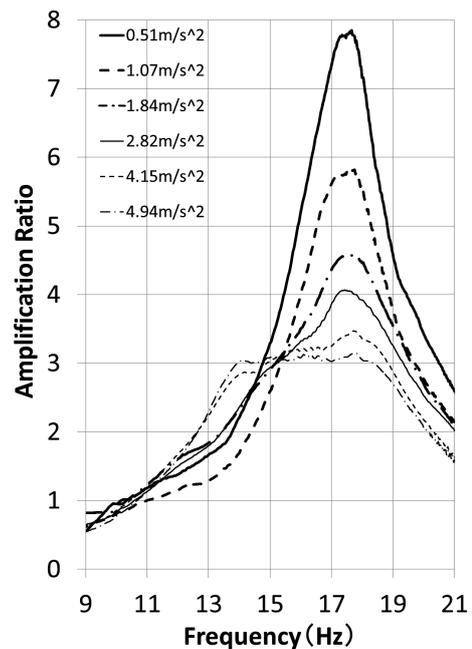


Fig.7 Shake Test Result (Lattice Type)

4.3 減衰特性評価

(1) 減衰定数の評価方法

今回の試験における減衰定数の評価においては、試験用燃料ラックの応答特性を精度よく評価することが出来るよう、応答倍率による手法を用いて減衰を評価した。

応答倍率による減衰評価の概要を Fig.8 に示す。

1 質点系の応答倍率が $1/2\zeta$ (ζ : 減衰比) と等しいことから、これを試験用燃料ラックの多質点系に展開して、減衰比を求めた。

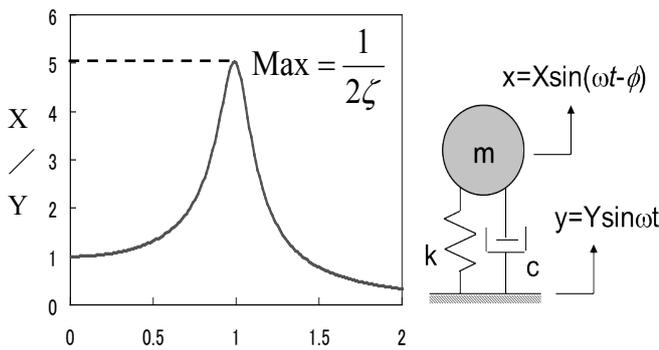


Fig.8 Summary of Damping Constant Evaluation

(2) 減衰特性評価結果

前述の応答倍率による手法により求めた減衰定数とラック頂部の最大応答加速度の関係を Fig.9 に示す。

角管型ラックと格子型ラック共に、ラック頂部の応答加速度と減衰の関係は、応答加速度の増加に伴い減衰定数が増加する傾向であり、減衰の大きさについても角管型ラックと格子型ラックは同等であることがわかる。

したがって、燃料ラックの減衰定数は、加速度が大きな領域では、既往の加振試験結果により得られた 7% よりも十分に大きいことを確認した。

この減衰の傾向は、燃料ラックの応答の増加に従い、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消散が大きくなり、減衰も増加したことによるものと推定される。

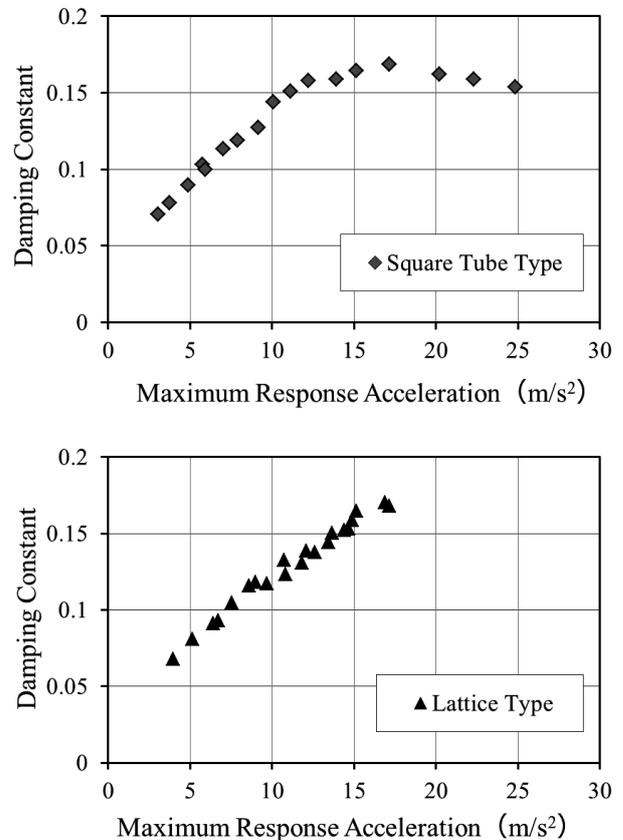


Fig.9 Damping Constant of the Fuel Racks

5. 結論

実機を模擬した 2 種類の燃料ラックにより、既往試験よりも大きな加振条件での水中加振試験を実施した。その結果、角管型および格子型共に、応答加速度の増加に伴い減衰定数が大きくなる傾向を確認した。

本試験結果から、設計用地震動増大を想定した応答加速度レベルにおけるラックの減衰定数は、既往の加振試験に基づく 7% よりも大きくなることを確認した。

したがって、今後の燃料ラックの耐震性評価においては、評価用地震動に対する燃料ラック頂部の応答加速度に応じた適切な減衰定数が適用できるものと考えられる。