

## 論文の内容の要旨

論文題目 非線形 3 次元挙動を伴う液中構造物の耐震評価技術に関する研究

氏 名 岩崎 晃久

### 1. 序論

昨今、大きな地震が頻繁に発生しているわが国では、産業施設の耐震問題は避けて通れない課題であり、地震に対する構造物の健全性の確認は非常に重要である。一般的には線形で取り扱うことができる構造物が多く、比較的容易に解析による耐震評価が可能であるが、実際の構造物の中にはガタ、衝突、滑り、ロッキングなどの接触や幾何学的な非線形が生じるものがあり、それらによって地震時における挙動が複雑となる。非線形構造物の振動に対して解析評価するためには、非線形事象を再現できる適切な解析手法が必要であり、実験による検証の裏付けが必要とされる。

本研究では、非線形構造物として原子力プラント機器であるフリースタンディングラックおよび高速炉炉心を対象とした。フリースタンディングラックは水中にあり、地震時には滑りやロッキングが生じ、ロッキング時には脚部に衝突荷重が生じる。高速炉炉心は液体ナトリウム中において多数の炉心構成要素が炉心支持板に挿入されて自立し、地震時には隣接する炉心構成要素間で衝突しながら上下に跳び上がりが生じる。これらは液中にあり、液体から作用する荷重によって地震時の応答が低減されるため、その影響は無視できない。本研究ではフリースタンディングラックと高速炉炉心を対象とし、液中における複雑な非線形挙動を把握するとともに構造健全性を確認するための変位や荷重を解析評価することを目的とする実験的および解析的研究について示す。

### 2. フリースタンディングラック耐震解析手法と試験

フリースタンディングラックは水で満たされた使用済燃料ピットの床面に置かれ、地震時にロッキングや滑りが生じ、ロッキングによって脚部に浮き上がりが生じた際は床面に着地したときに衝突荷重が発生する。また、ラックセルの中には燃料集合体が装荷され、地震時にはラックセルの中で燃料集合体が動き、ラックセルと衝突する。フリースタンディングラックの解析モデルには滑りやロッキングといった大変位を伴う 3 次元挙動とラックーピット間、燃料ーラック間の流体構造連成および燃料ーラック間、脚ーピット床間の衝突・摩擦などの非線形事象を考慮した。燃料の重量によってフリースタンディングラックのベースプレートに弾性変形が生じるため、それによる脚部の剛性・荷重分布がラック挙動に与える影響を模擬できるように脚部のモデル化

を行った。

実寸大フリースタンディングラックの耐震試験を実施し、燃料装荷状態や加振波（加振方向・加振周波数）などがラック挙動に与える影響について確認した。フリースタンディングラックの実寸大試験体は7×10のラックセルから構成され、高さ4.5m、幅2m、長さ3mの大きさであり、5脚の支持脚を持つ。短周期・中周期地震波では、滑り・ロッキングがほとんど発生せず、長周期を含む加振波で滑り・ロッキングが生じた。また、長軸方向の加振と比べて短軸方向の加振は滑り変位が小さく、ロッキング変位は大きくなった。その他、3方向加振など解析の検証に必要なラック試験体の挙動を取得した。部分装荷ラックでは、燃料装荷側に振動する際にはロッキングが生じて滑りが小さく、燃料未装荷側に振動する際にはロッキングが小さく滑りが大きくなり、これらが繰り返されることで燃料未装荷側へドリフトすることが確認できた。

### 3. フリースタンディングラック耐震評価手法

フリースタンディングラックの耐震健全性を確認するためには、滑りやロッキングによる3次元的な挙動および脚部における衝突荷重等が精度よく計算され、それらが設計許容値を満足する必要がある。しかしながら、フリースタンディングラックの振動挙動は非線形性が強い事象であるため、滑り変位や脚部荷重のように解析と試験に差が生じることもあるが、それらを安全側に評価をするための解析パラメータを定めることは難しい。そのため、フリースタンディングラックの滑りやロッキングへの影響が大きい摩擦係数による安全側評価を確認するための解析を実施した。フリースタンディングラック脚部における摩擦係数の下限値0.2を使用して滑りの評価を、上限値0.8を使用してロッキングの評価を行い、安全側に解析評価できることを確認した。

燃料全装荷のラックの滑り変位は、摩擦係数0.2を使用することで安全側となることを確認したが、地震中に滑り変位が累積していくことを考えると解析との誤差も積算されるため、解析条件によってはさらに裕度が小さくなることも考えられる。一方で燃料部分装荷のラックの滑り変位においては、摩擦係数0.2と0.8を組み合わせることで、滑り変位を十分大きく評価できることを確認した。解析の裕度が小さい燃料全装荷ラックではラック挙動に影響があると考えられる解析パラメータのばらつきまで考慮した滑り変位の評価を実施し、設計値の解析に対して裕度を持った評価が可能である安全係数2を導出した。フリースタンディングラックの滑り挙動・ロッキング挙動に対して安全側に評価できる耐震評価フローを示した。

### 4. 高速炉炉心の群振動解析

高速炉の炉心構成要素は、運転時における高温状態やスウェリングによる伸びが生じるため、軸方向は拘束せず、炉心支持構造物上に自立させている。そのため、上下方向の地震動によって炉心構成要素が跳び上がる可能性がある。一方、炉心構成要素は同時に作用する水平方向の地震荷重によって水平方向に変位して隣接する炉心構成要素と衝突し、下部のエントランスノズルが炉心支持板の連結管に干渉することで摩擦力や衝突荷重が生じて跳び上がり挙動が複雑になる。また、炉心は炉心構成要素数百体以上の多数体群であり、液体ナトリウム中に配置されるため、

流体を介して炉心構成要素が相互に連成した群振動を呈す。高速炉の炉心、炉心構成要素、炉心支持構造物設計において地震時の炉心群振動挙動を把握する必要があるため、群体系における衝突・摩擦および流体構造連成を考慮した耐震解析手法を構築した。高速炉炉心の地震応答に影響する事象を整理するとともに、多数の炉心構成要素における解析モデルの考え方を示した。

## 5. 高速炉炉心の群振動試験と解析の検証

実寸大単体試験では、単体で確認できる事象に着目した試験を実施した。加振レベル・加振周波数等をパラメータとし、跳び上がり変位、パッド部荷重やガタを含む炉心構成要素の振動特性など、解析で精度よく評価できることを確認した。1/1.5 縮尺 37 体群体系試験では、複数体の炉心構成要素における群振動挙動について解析の妥当性を示した。流体力によるパッド部衝突荷重の低減や炉心支持板の応答による跳び上がり変位の増加などが解析で再現された。1/2.5 縮尺多数体系試験（313 体）では、炉心槽側にあるコアフォーマによって変位が制限されるため、端にある炉心構成要素の水平変位ほど小さく、中央ほど水平変位が大きくなる列効果が解析で再現されることを確認した。炉心群振動挙動に影響がある因子を抽出し、それらを考慮できる耐震試験結果と比較することで解析の検証を行い、高速炉炉心の耐震解析手法の妥当性を示した。

## 6. 結論

フリースタANDINGラックと高速炉の炉心を対象とし、実寸大試験や縮尺試験を実施して地震時に生じる非線形挙動を把握した後に、試験で確認された変位や衝突などを再現するための解析手法を開発した。ともに流体連成下における非線形 3 次元挙動を伴う構造物であり、フリースタANDINGラックでは滑りやロッキングの大変位による幾何学的非線形が生じ、高速炉炉心では多数のガタ支持における接触や跳び上がりなどの非線形が生じる。試験結果と比較することで解析手法の妥当性を確認するとともに、非線形挙動に対する設計評価手法についてまとめた。

フリースタANDINGラックでは、適切に剛性や荷重分布を考慮した脚部の衝突モデルとすることでロッキング挙動を再現することができた。また、滑り変位は時刻歴で累積し、解析との誤差が大きくなりうるため、設計値のばらつきを考慮したモンテカルロ法を実施し、安全側に最大滑り変位を評価することができる安全係数を導出した。

高速炉炉心の耐震解析手法では、エントランスノズルや球面座におけるガタ部を考慮することで、炉心構成要素の自由倒れや回転、跳び上がりといった剛体運動を模擬でき、炉心構成要素全数において隣接する炉心構成要素との衝突および摩擦、流路網による流体力などの非線形事象を考慮した数値解析モデルを構築した。炉心構成要素の実寸大試験体単体や縮尺試験体複数体の耐震試験の結果と比較することで、実規模における 3 次元挙動や流体の影響・周囲との干渉（衝突・摩擦）などが生じる群振動挙動について本解析手法の妥当性を確認し、高速炉炉心の耐震評価が可能であることを示した。