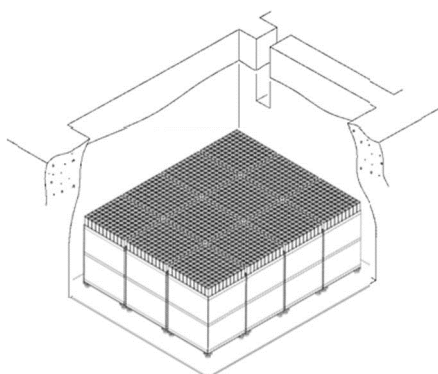


フリースタンディングラックの耐震評価技術の開発

Development of Seismic Evaluation Method of the Free Standing Rack



岩崎 晃久*¹
Akihisa Iwasaki

猫本 善統*²
Yoshitsugu Nekomoto

森田 英之*³
Hideyuki Morita

岸本 純一*⁴
Junichi Kishimoto

谷口 勝彦*⁵
Katsuhiko Taniguchi

高木 友*⁵
Yu Takaki

原子力発電所の原子炉から取り出された使用済燃料は、中間貯蔵施設あるいは再処理施設へ搬出するまでの間、使用済燃料ラックに一時的に貯蔵される。使用済燃料ラックは高い耐震性が要求される。フリースタンディングラックは周囲からの支持部材を持たず、滑ることによって地震エネルギーが消散され、周囲の水によって応答が低減されるため、高耐震化へ期待ができる。大加振時における滑りやロッキングを伴う3次元挙動・衝突・流体構造連成を考慮したフリースタンディングラックの耐震評価技術を構築し、E-ディフェンス*にて実施した実寸大加振試験結果と比較することで、解析手法の妥当性を確認した。本報では、フリースタンディングラックの耐震評価技術について述べる。

※国立研究開発法人 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター
実寸大三次元震動破壊実験設備の世界最大クラスの振動台

1. はじめに

最近の大地震によって、原子力プラントの主要機器には高い耐震性を有することが重要となっており、大地震に耐えられる使用済燃料ラックが必要とされる。この要求を満足させるために、フリースタンディング方式の使用済燃料ラック(フリースタンディングラック)の開発が行われている。フリースタンディングラック(図1)は周囲からの支持部材を持たず、使用済燃料ピットの床に直置きするため、支持部材の耐力は関係なく、地震時にはフリースタンディングラックの滑りにより、フリースタンディングラック自身への地震入力も壁支持方式・床支持方式と比べて低減される。また、フリースタンディングラックは滑ることによって摩擦によって地震エネルギーが消散され、周囲の水によって応答が低減されるため、高耐震化への対応に際して期待ができる。フリースタンディングラックのラックセルには使用済燃料が装荷されており、地震時にはラックセル内で燃料が振動して燃料とラックセルが衝突する上、フリースタンディングラックに滑りだけではなくロッキング(ラックの脚部が浮き上がる事象)も発生する。したがって、フリースタンディングラックを設計するためには、3次元での滑り、ロッキング、衝突といった非線形事象を評価できる解析手法を構築する必要がある。

本研究は、フリースタンディングラックの耐震評価技術を構築するとともに、実物大のフリースタンディングラックの加振試験で耐震評価技術の妥当性を確認し、実用化に向けての目途を得ることを目的としたものである。

*1 総合研究所振動研究部 技術士(機械部門)

*2 総合研究所振動研究部 主席研究員 工博

*3 総合研究所振動研究部 主席研究員 技術士(機械部門) 工博

*4 エネルギー・環境ドメイン原子力事業部機器設計部 課長 技術士(機械部門)

*5 エネルギー・環境ドメイン原子力事業部機器設計部

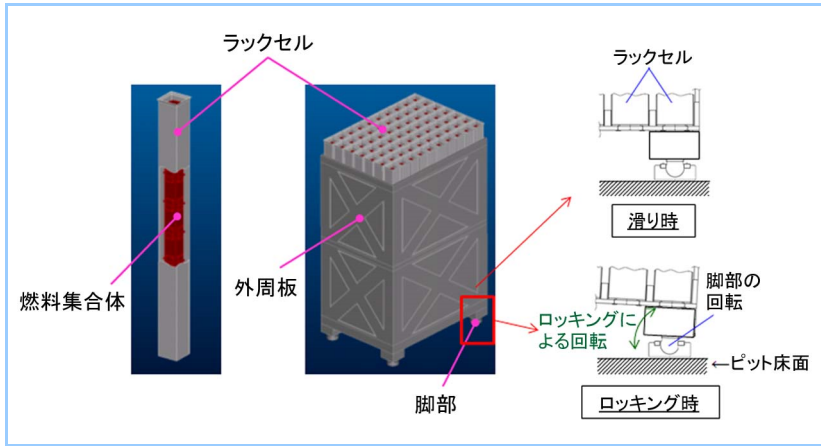


図1 フリースタANDINGラック
 フリースタANDINGラックは外周板で囲われ、脚部はロックングによる回転で応力が集中しないように回転機構を有する。

2. 耐震解析手法

滑りや衝突を含む3次元の非線形挙動を対象とした耐震解析手法を構築し、世界初の水中における実物大のフリースタANDINGラックを対象とした振動台加振試験を実施した。実物大の試験における滑りやロックングの挙動、衝突荷重などを解析でシミュレートできることを確認し、大地震に対するフリースタANDINGラックの構造健全性を評価可能となった。

2.1 解析モデル

フリースタANDINGラックの振動応答としては、**図2**に示すような滑り・回転・ロックング・衝突が生じ、3次元の非線形挙動となる。解析モデルの概要を**図2**に示す。フリースタANDINGラックと燃料を1本の梁でモデル化し、フリースタANDINGラックとピット間及び燃料とラックセル間の流体構造連成を考慮する。また、フリースタANDINGラック脚部とピット床面間及び燃料とベースプレート間には衝突(ばね・減衰・ガタ)と摩擦を、燃料とラックセル間には衝突(ばね・減衰・ガタ)を考慮する。フリースタANDINGラックの耐震解析には機構解析ソフト ADAMS (MSC Software)を使用した。

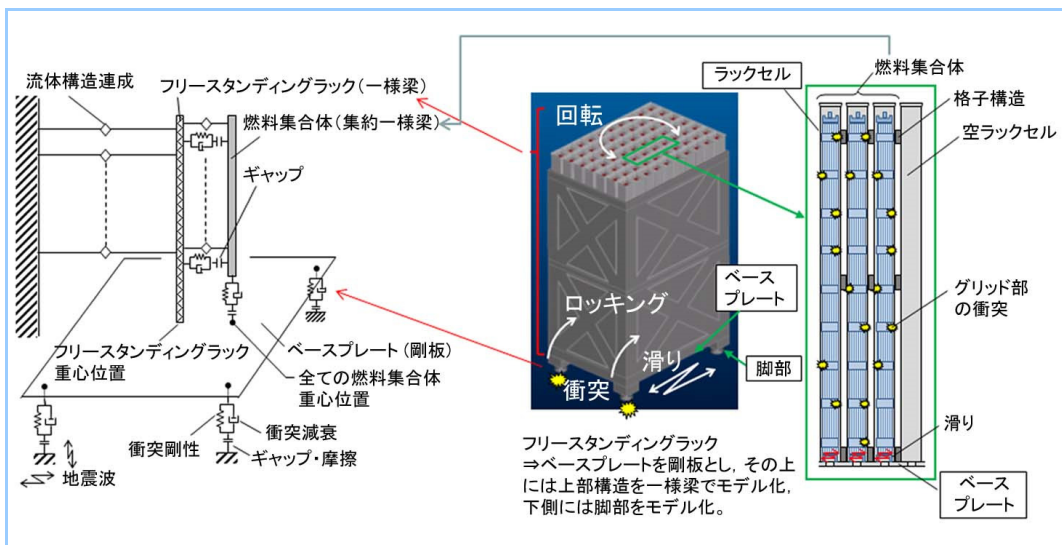


図2 フリースタANDINGラックの解析モデル概要
 フリースタANDINGラック及び燃料集合体を1本の一様梁でモデル化し、ばねとダンパーで衝突部を模擬した。

2.2 滑りとロッキングの条件

フリースタンディングラックにおける滑りとロッキングの挙動について、水平・上下の2次元の物理モデルを用いて説明する。実際の解析手法では考慮しているが、ここでは簡単にするため、幾何学的非線形やベースプレートの変形、燃料によるガタを無視し、上下加振や振動することによる遠心力を考慮しない。また、流体による影響も考慮しない。地震動の加振レベルが小さいときは滑りやロッキングは生じないが、加振レベルが大きくなると滑り、あるいはロッキングの条件のうち、早く満たした方の挙動が生じる。

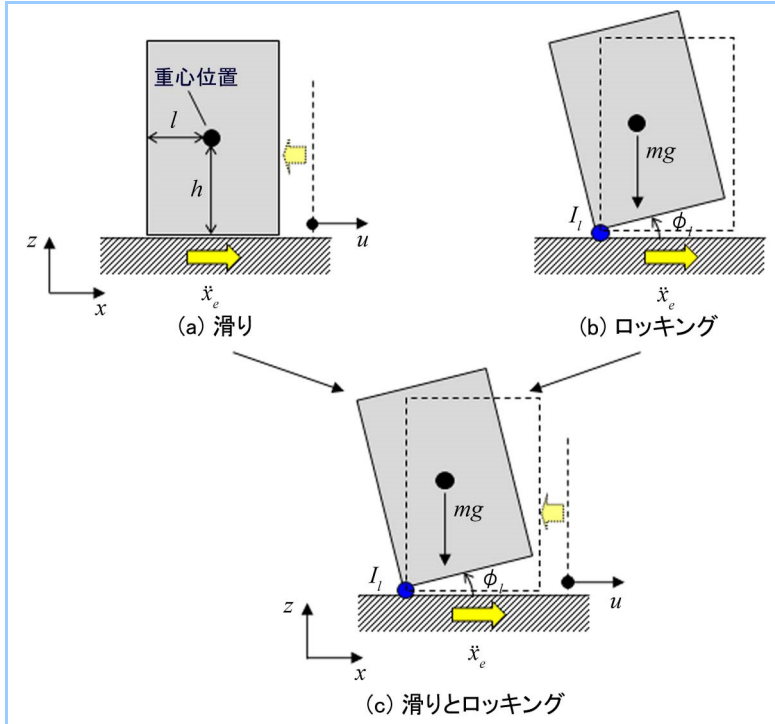


図3 滑りとロッキングの挙動

フリースタンディングラックの地震応答には、滑り・ロッキング・滑りとロッキングが同時に生じるといった3通りの挙動がある。

図3に示すように、ピット床面加速度 \ddot{x}_e 、ピット床面に対するフリースタンディングラックの相対速度(滑り速度) \dot{u} が負のときを対象とすると、滑りの条件は次式で表せる。

$$m\ddot{x}_e > mg\mu_s \tag{1}$$

ここで、 m はフリースタンディングラック質量、 g は重力加速度、 μ_s は静摩擦係数とする。また、ロッキング条件について次式に示す。

$$m\ddot{x}_e h > mgl \tag{2}$$

ここで、 h はフリースタンディングラックの重心高さ、 l はロッキングの支点となる脚部から重心までの水平距離とする。さらに加振レベルが大きくなると、滑りとロッキングが同時に生じる。滑りながらロッキングが生じ始める条件は次式となる。

$$m(\ddot{x}_e + \ddot{u})h > mgl \tag{3}$$

また、ロッキングしながら滑りが生じ始める条件は次式となる。

$$m(\ddot{x}_e - h\ddot{\phi}_1) > \mu_s m(g + l\ddot{\phi}_1) \tag{4}$$

ここで、 $\ddot{\phi}_1$ はロッキングの支点となる脚部回りの回転角加速度とする。滑りとロッキングが同時に生じているときの水平方向(滑り)及び回転方向(ロッキング)の運動方程式を次式に示す。

$$m(\ddot{x}_e + \ddot{u}) = \mu m(g + l\ddot{\phi}_l) + mh\ddot{\phi}_l \tag{5}$$

$$I_l\ddot{\phi}_l = -mgl + m(\ddot{x}_e + \ddot{u})h \tag{6}$$

ここで、 μ は動摩擦係数、 I_l は回転慣性モーメントとする。大加振時は滑りとロッキングが混在した挙動となり、(5)(6)式に基づいてフリースタANDINGラックの挙動を計算することになる。実際には3次元で考える必要があり、幾何学的非線形や弾性応答の影響などもあり、複雑な計算となる。

2.3 実物大加振試験

(国研)防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター 実寸大三次元震動破壊実験設備 (E-ディフェンス)を使用し、大水槽に満たされた水の中にある実物大のフリースタANDINGラックの耐震試験を実施した。耐震試験の概要を図4に示す。フリースタANDINGラック試験体は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、模擬燃料を搭載した状態で約70tonとなった。なお、脚部はロッキングの際に応力が集中しないように回転する機構としている。加振地震波として、図5に示す短周期・中周期・長周期に分割したものを使用した。フリースタANDINGラックは地震動に対し周波数特性を有するものではないものの、図6に示すように短周期・中周期では応答が小さくなり、滑る時間(加速度が大きい時間)が長く、滑り中の加振変位も大きくなる長周期において顕著に応答する結果となった。



図4 耐震試験概要

E-ディフェンスを使用して実物大のフリースタANDINGラックの耐震試験を実施した。

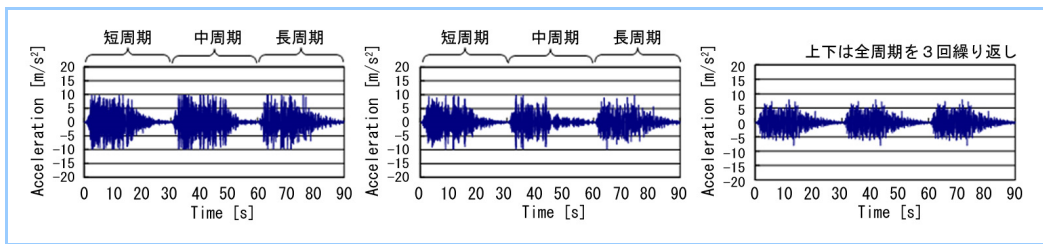


図5 加振地震波

短周期・中周期・長周期に分割した地震波を耐震試験に使用した。

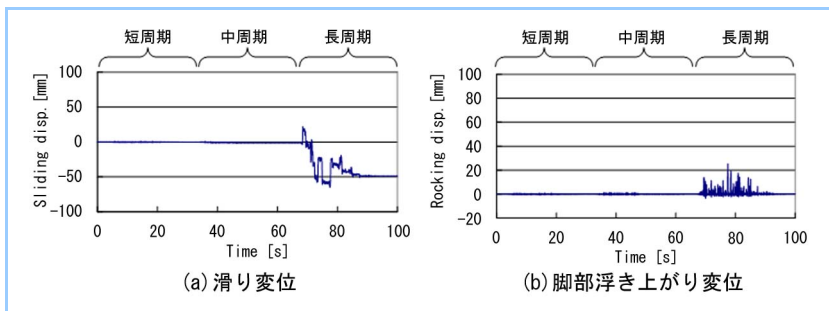


図6 試験結果(水平1方向加振)

耐震試験におけるフリースタANDINGラックの滑り変位と脚部浮き上がり変位を示す。

2.4 試験と解析の比較

応答が顕著であった長周期地震波加振の試験と解析の結果を図7に示す。滑り変位、脚部の浮き上がり変位及び荷重は試験結果と解析結果で一致しており、解析の妥当性を確認することができた。

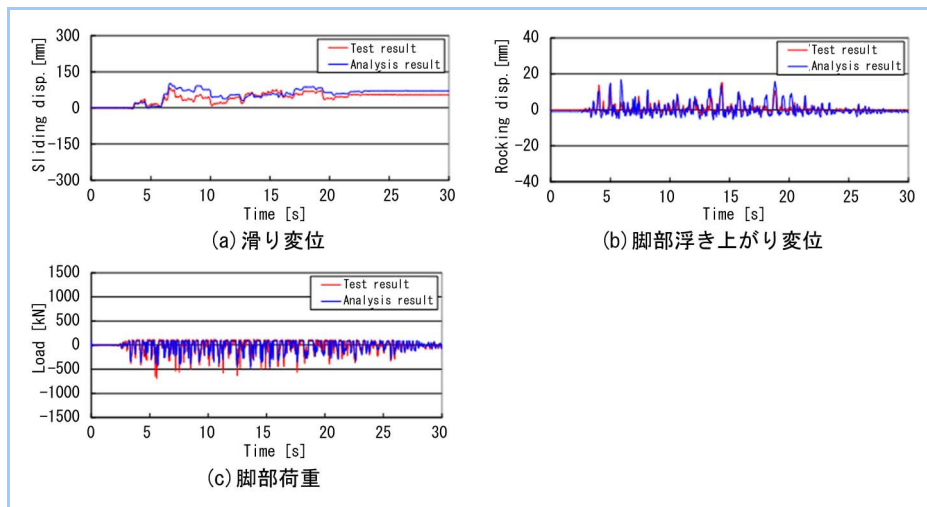


図7 試験と解析の比較(3方向同時加振)

地震波加振試験と解析の滑り変位、脚部浮き上がり変位、脚部荷重を示す。

3. まとめ

本報は、加圧水型原子炉(PWR)採用の5電力会社の共同研究として実施した研究の成果をまとめたものであり、関係者の貴重な助言に対し、ここに謝意を表します。

本報による結果を以下にまとめる。

- (1) 機構解析を用いたフリースタANDINGラックの耐震解析により、滑りやロッキングを伴うフリースタANDINGラックの滑り変位、脚部の浮き上がり変位や荷重を評価することが可能となった。
- (2) 実寸大加振試験で取得した滑り変位、脚部の浮き上がり変位や荷重などを比較することで解析評価手法の妥当性が検証された。
- (3) フリースタANDINGラックの耐震解析評価が可能となったことで実機成立性も確認することができ、フリースタANDINGラックの実用化に向けて一定の目途を得た。

参考文献

- (1) 岩崎晃久ほか、フリースタANDINGラックの実用化研究(実寸大試験体を用いた耐震試験)、日本機械学会論文集, Vol.81 No.831 (2015) p.15-00153
- (2) 岩崎晃久ほか、フリースタANDINGラックの実用化研究(耐震設計評価手法の高度化)、日本機械学会論文集, Vol.81 No.831 (2015) p.15-00212
- (3) 軽水炉一課ほか、フリースタANDING使用済燃料ラックの開発、三菱重工技報, Vol.43 No.4 (2006) p.55