フリースタンディングラックの実用化研究
(耐震設計評価手法の高度化)岩崎 晃久^{*1}, 猫本 善統^{*1}, 森田 英之^{*1}, 谷口 勝彦^{*2}
奥野 大作^{*2}, 松岡 寿浩^{*3}, 千種 直樹^{*4}Practical research of free standing rack
(Development of seismic evaluation method)Akihisa IWASAKI^{*1}, Yoshitsugu NEKOMOTO^{*1}, Hideyuki MORITA^{*1}, Katsuhiko TANIGUCHI^{*2},
Daisaku OKUNO^{*2}, Toshihiro MATSUOKA^{*3} and Naoki CHIGUSA^{*4}^{*1} Takasago R&D Center Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

2-1-1 Shinhamma, Arai-cho, Takasago-shi, Hyogo 676-8686, Japan

^{*2,*3} Nuclear Energy Systems Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

1-1-1 Wadasaki-cho, Hyogo-ku, Kobe-shi, Hyogo 652-8585, Japan

^{*4} The Kansai Electric Power Co., Inc.

3-6-16 Nakanoshima, Kita-ku, Osaka 530-8270, Japan

Received 14 April 2015

Abstract

Under earthquake condition, the response of the free standing rack is nonlinear and involves complex combination of motion, such as sliding, rocking, twisting, and impacts between the fuel assemblies and the rack cells and between the pool floor and the rack pedestals. To obtain an accurate simulation of the free standing rack, the seismic analysis requires careful considerations of these complex phenomena, and fluid coupling effects. This seismic evaluation method was validated by comparison to full-scale test results. However, the conservative evaluation method is required, since analysis results are not entirely consistent with the test results. In this study, authors obtained the margin of safety for free standing rack, and developed the seismic design method.

Key words : Spent fuel rack, Seismic evaluation, Full-scale, Free standing, Sliding, Rocking, Impact, Margin of safety

1. 結 言

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。それゆえ、使用済燃料ラックには高い耐震性が要求されるため、海外で多くの実績を持つフリースタンディングラックの採用が検討されている。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、滑ることで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、高震度化へ期待ができる。しかしながら、日本国内では適用事例がなく、設計するには耐震評価手法を構築する必要がある。また、フリースタンディングラックの滑りやロッキングをとまなう 3 次元の非線形挙動を考慮できる解析モデルとしなければならない。そのために、実寸大のフリースタンディングラックの耐震試験を実施し、解析モデルを作成するための検証データを取得した (Iwasaki et al., 2012a, 2012b), (岩崎他, 2015)。

フリースタンディングラックの解析に関する文献はこれまで数多く発表されている。Soler らや Zhao らは、フリースタンディングラックの解析に FEM を使用しているが (Soler and Singh, 1984), (Zhao et al., 1996), 加振

No.15-00212 [DOI:10.1299/transjsme.15-00212], J-STAGE Advance Publication date : 15 October, 2015

^{*1} 正員, 三菱重工業(株) 総合研究所 (〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜 2-1-1)

^{*2} 三菱重工業(株) 原子力事業部 (〒652-8585 兵庫県神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1)

^{*3} 正員, 三菱重工業(株) 原子力事業部

^{*4} 正員, 関西電力(株) (〒530-8270 大阪府大阪市北区中之島 3-6-16)

E-mail of corresponding author: akihisa_iwasaki@mhi.co.jp

条件としてロッキングによる浮き上がりは小さく、滑り挙動が主体となるものを扱っている。大加振時における滑りをともないながらロッキングが大きく生じるような事象に関して検証している事例はない。ラック以外の滑りとロッキングの挙動を考慮した解析例としては、Lee らが ABAQUS を使用したキャスクの地震応答解析を行い (Lee et al., 2005) , Taniguchi が数値解析によるタンクの地震応答解析を行っている (Taniguchi, 2002) 。本論文では、大加振時における滑りやロッキングをとまなう 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解析手法についてまとめ、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。また、フリースタンディングラックには地震時に滑りやロッキング、衝突といった非線形性の強い事象が発生するため、解析結果と試験結果の滑り変位や脚部荷重の最大値に差が生じる場合もあり、それを考慮した解析評価するための方法が必要である。評価対象としては、ラックがピット壁面に衝突しないことを確認するための最大滑り変位、ラックが転倒しないことを確認するための最大ロッキング変位、ラックやピット床面が健全であることを確認するための最大脚部荷重がある。ラック脚部とピット床面の間の摩擦係数の上限値を使用してロッキング挙動を、下限値を使用して滑り挙動を評価することが多い (Soler and Singh, 1984, 1993) , (Pop et al., 1990), (Shah et al., 1995), (Zhao et al., 1996), (Blumer et al., 2001)。本論文においても、摩擦係数を保守側に設定した解析結果の滑り変位や脚部荷重などが実寸大加振試験の結果 (岩崎他, 2015) より大きくなることを確認した上で、試験結果に対する解析結果の裕度が小さい滑り変位に関しては解析パラメータのばらつきによる影響を考慮した安全係数を導出した。最後に、フリースタンディングラックの耐震設計評価上重要となる滑り変位、ロッキング変位、脚部荷重に対して、健全性を確認するための耐震設計評価手順をまとめた。

2. 解析モデル

フリースタンディングラックは、図 1 に示すように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、角鋼管の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、燃料棒を束ねているグリッド部でラックセルと衝突する。このフリースタンディングラックは水で満たされた燃料ピットの床面に置かれ、完全に浸水されている。したがって、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をとまなう 3 次元挙動を考慮する必要がある。また、ラックーピット間、燃料ーラックセル間の流体構造連成、および燃料ーラックセル間の衝突、脚ーピット床間の衝突・摩擦などの非線形事象も考慮する必要がある。図 2 に解析モデルの概要を示す。ラックと燃料を 1 本の梁でモデル化し、ベースプレートにおける各々の重心位置に配置する。ラックとピット間および燃料とラック間の流体構造連成を考慮する。また、ラック脚部とピット床面間および燃料とラックベースプレート間は衝突 (ばね・減衰・ガタ) と摩擦を、燃料とラック間には衝突 (ばね・減衰・ガタ) を考慮する。ただし、ラック脚部とピット床面間および燃料とラックベースプレート間は解析開始時には接触した状態である。フリースタンディング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。

解析モデルに適用した考え方を以下に示す。

- (1) ラックは角鋼管を束ねた構造であるため、燃料装荷のない空のラックを、高さ方向に一樣な質量と剛性を持つ 1 本の梁でモデル化した (猫本他, 2002) , (日本電気協会, 2008) 。
- (2) ベースプレートを剛板とし、脚部の位置の影響を考慮できるように脚部と脚部まわりのベースプレートの局所剛性を脚部の衝突ばねとして脚部の位置に配置した。
- (3) ラック脚部とピット床面間および燃料とベースプレートの間の摩擦 (水平方向) において、静摩擦係数は動摩擦係数に等しいとした。
- (4) ラックの流体付加質量は、図 3 に示すようにラックとピットの等価断面積となる正方形の二重角柱における流体付加質量 $m_{add-rack}$ (佐々木, 富田, 1981) , (猫本他, 2002) を使用し、ラックとピット間の上下における端漏れによって流体付加質量が小さくなる影響も考慮した。

$$m_{add-rack} = \frac{4}{3} \cdot \frac{r_p^2 + r_r^2}{r_p^2 - r_r^2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot r_r^2 \cdot h_r \cdot \alpha \quad (1)$$

ここで, r_p はピットの等価断面積となる正方形の一辺長さの半分, r_r はラックの等価断面積となる正方形の一辺長さの半分, ρ は水密度, h_r はラック高さ, α は端漏れによる流体付加質量の低減を考慮するための係数 (Mulcahy, 1980) とした.

(5) 流体構造連成による流体力にはラックとピット間に生じる流体付加質量 (モデル化(4)) および慣性連成項 (質量マトリクスの非対角項) を考慮した (Fritz, 1972), (猫本他, 2002). 流体付加減衰は無視した. 流体構造連成による流体力を次式に示す.

$$\begin{Bmatrix} F_{rack} \\ F_{pit} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{add-rack} & -(m_{add-rack} + m_{d-rack}) \\ -(m_{add-rack} + m_{d-rack}) & m_{add-rack} + m_{d-rack} + m_{h-pit} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_{rack} \\ \ddot{x}_{pit} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで, F_{rack} はラックに作用する流体力, F_{pit} はピットに作用する流体力, m_{h-pit} はピット内包体積の水質量, $\ddot{x}_{rack}$ はラック加速度, $\ddot{x}_{pit}$ はピット加速度とした. m_{d-rack} には次式を使用した (佐々木, 富田, 1981).

$$m_{d-rack} = \frac{4}{3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot r_r^2 \cdot h_r \quad (3)$$

(6) 燃料とラックセル間に生じる流体構造連成もモデル化(4)(5)と同様に考えた. ただし, 燃料とラックセルは幅に対して高さが大きいため, 端漏れの影響は考慮しない.

(7) 燃料を装荷することで生じるベースプレートのたわみによる脚部荷重配分への影響を考慮できるように, 脚部に初期突出量を与えた (モデル化(2)にあるように, ベースプレートは剛板でモデル化するため, 脚部の突出量で初期脚部荷重を調整した).

(8) ラックに装荷された複数の燃料は同相に動くと考え, 一様断面1本梁に集約して燃料の重心位置に配置した. なお, 複数の燃料が加振中に同位相で振動することは試験でも確認されている (岩崎他, 2015).

(9) 複数燃料を1本梁に集約することで模擬できない複数の燃料の配置による回転慣性 I_f をベースプレートに付加した (図4). ラック重心位置における燃料による回転慣性 I_G は次式で表わせ, モデル化(8)にしたがって燃料を1本梁にモデル化することで右边第1項は考慮される.

$$I_G = M_f \cdot l^2 + I_f \quad (4)$$

ここで, M_f は装荷燃料の総質量, I_f は装荷燃料の重心位置における燃料の回転慣性, l はラックと燃料の重心間距離とした.

モデル化(4)~(6)の流体構造連成の計算はラック高さ方向に分割して行うことで, ロッキングによる影響も考慮される. また, (1)~(3)式は CFD など妥当と考えられる手法で算出した値を使用してもよい. 水中条件を対象とした試験解析では試験で取得した摩擦係数 0.3 を使用した (Iwasaki et al., 2012a), (岩崎他, 2015). また, 脚部の減衰に関しては反発係数が 0.7 相当になるように設定した.

Fig.1 Structure of rack and fuel assembly

Fig.2 Overview of the free standing rack analysis model

Fig.3 Fluid added mass

Fig.4 Inertia moment of the partial fuel loading rack

3. 試験解析

3・1 試験解析ケース

解析の対象であるフリースタンディングラック試験体の概要を図5に示す。震動台の上に水槽を設置し、その中にラック試験体を置いた。フリースタンディングラックの耐震試験で確認すべき挙動としては、図6に示すように、滑り・回転・ロッキング・衝突が挙げられ、滑り変位・回転角度・ロッキングによる脚部の上下変位・脚部の衝突荷重について試験と解析で比較する。また、燃料装荷は図7に示すように全数のラックセルに燃料を配置した Full 装荷、短軸側半数のラックセルに燃料を配置した Part1 装荷、長軸側半数のラックセルに燃料を配置した Part2 装荷の3体系とした。Full 装荷では、燃料が最も多く装荷されて重量が大きくなるため、地震時にラックに作用する荷重が最も大きくなる。Part1 装荷、Part2 装荷は装荷燃料の重心がラック中央より偏心するため、回転やロッキングが生じやすい装荷条件であり、それぞれ短辺方向と長辺方向に偏心させた。

表1に示す6ケースの試験解析を実施した。試験に使用した加振波には1波包絡地震波と3波分割地震波（長周期波）の2種類の人工地震波がある。1波包絡地震波は日本国内PWRプラントの使用済燃料ピット床位置における地震特性を考慮した目標床応答スペクトルを全周波数範囲にわたって1波で包絡した水平2方向（X方向・Y方向）からなる60秒の地震波であり、図8に示す。3波分割地震波は震動台の入力制限を考慮して3波分割で地震波を生成したものであり、PWRの使用済燃料ラックの設計用減衰定数の算定においても同様の手法を用いている（猫本他，2002）。水平2方向（X方向・Y方向）に関しては目標床応答スペクトルの周波数特性を3つに分けて、短周期（10.6～30Hz）・中周期（8～10.6Hz）・長周期（1～8Hz）の周波数範囲ごとに目標床応答スペクトルを包絡する各30秒の地震波、鉛直方向（Z方向）に関しては全周期成分を包絡する30秒を3回繰り返した地震波であり、図9に示す。なお、加振レベル110%は震動台加振限界近くまで加振したものである。

加振周波数がラック挙動に与える影響を確認することができ、1G以上の地震波に対しても5Hz以上の成分は滑りに有意に効かないことが確認されている (Iwasaki et al., 2011)。実際の加振試験でもフリースタンディングラックの振動応答には長周期成分が支配的であり、3波分割地震波 (短周期波・中周期波) ではラックの滑り変位・ロッキング変位がほとんど発生しなかったため (岩崎他, 2015)、ここでは取り上げないこととする。

Fig.6 Behavior of free standing rack

Fig.7 Fuel loading condition

Table 1 Analysis case

Case No.	In air / In water	Fuel loading condition	Seismic wave	Excitation direction	Excitation level
Case1	In water	Full	One envelope wave	Y	100%
Case2	In water	Full	Three divided wave (Long period wave)	Y	110%
Case3	In water	Full	Three divided wave (Long period wave)	X	110%
Case4	In water	Full	Three divided wave (Long period wave)	X+Y+Z	100%
Case5	In water	Part1	Three divided wave (Long period wave)	X+Y	110%
Case6	In water	Part2	Three divided wave (Long period wave)	X+Y	110%

Fig.8 Seismic waves that is enveloping the target FRS in one wave (One envelope wave)

Fig.9 Seismic waves that is enveloping the target FRS in three waves (Three divided wave (Long period wave))

3・2 全装荷試験の解析

Case4 (3波分割地震波長周期波・X+Y+Z方向・Full装荷)における試験と解析の結果を図10, 図11に示す。滑り変位に関しては, 試験結果と解析結果の滑りが生じるタイミングは良く一致しており, 解析でラックの滑り挙動を再現していることが確認できた。ただし, 滑り変位は, 加振中, 時間の経過で累積していくため, 試験ケースによっては試験結果と解析結果の滑り変位に差が生じる場合もある。脚部(1)のロッキング変位と脚部荷重を10-20秒に拡大し, 試験結果と解析結果を重ね合せたものを図12に示す。ロッキング変位に関しては, 試験結果と解析結果のロッキング変位が生じるタイミングは良く一致した。また, ロッキング変位は滑りのように累積していく挙動ではないため, 時間の経過に関係なく, 非常に近い変位波形となった。脚部荷重に関しては, 試験結果と比べて解析結果の方が小さくなったが, 脚部荷重が生じるタイミングや荷重が変動する傾向は良く一致しており, 解析でラックのロッキング挙動を再現できていることが確認できた。

(a) Sliding displacement (X direction)

(b) Sliding displacement (Y direction)

(c) Angle of rotation

(d) Rocking displacement of leg(1)

(e) Leg load of leg(1)

Fig.10 Test result of Case4 (Full loading condition)

(a) Sliding displacement (X direction)

(b) Sliding displacement (Y direction)

(c) Angle of rotation

(d) Rocking displacement of leg(1)

(e) Leg load of leg(1)

Fig.11 Analysis result of Case4 (Full loading condition)

Fig.12 Rocking displacement and leg load of leg(1) (Case4)

3・3 部分装荷試験の解析

部分装荷ラックの特徴として、図 13 に示すように、燃料装荷側に移動するときは燃料装荷側の脚を支点とする回転慣性が小さく、滑りよりもロッキングが生じる。反対に燃料未装荷側に移動するときは燃料未装荷側の脚を支点とする回転慣性が大きく、ロッキングよりも滑りが生じる。これらが繰り返されることでラック試験体は燃料未装荷側へドリフトしていく滑り挙動となる。

Case5 (3 波分割地震波長周期波・X+Y 方向・Part1 装荷) における試験と解析の結果を図 14, 図 15 に示す。部分装荷ラックの滑り変位の特徴である燃料未装荷側へのドリフトについて解析で確認することができた。また、図 16 に示すようにロッキング変位や脚部荷重が生じるタイミングは良く一致し、解析で部分装荷ラックのロッキング挙動の傾向も再現していることが確認できた。

Fig.13 Rocking behavior with partial fuel loading

3・4 流体力

試験ではラック全側面の圧力変動を計測しているため、圧力計近傍の面積と圧力計測値からラック側面における流体力が概算でき、ラック対面の流体力の差分からラックに作用する流体力を直接算出することができる。また、解析で使用しているモデル化(4) (5)にしたがってラックとピットの加速度計測値からラックに作用する流体力 F_{rack} (質量マトリクスの対角項である流体付加質量と非対角項である慣性連成項から導出される流体力) を計算することができる。Case3 (3 波分割地震波長周期波・X 方向) における圧力計測値から概算した流体力と加速度計測値から計算した流体力の時刻歴波形を図 17 に示す。これらの時刻歴波形は良く一致しており、解析で使用するモデル化(4) (5)の流体力が妥当であることを確認することができた。

(a) Sliding displacement (X direction)

(b) Sliding displacement (Y direction)

(c) Angle of rotation

(d) Rocking displacement of leg(1)

(e) Leg load of leg(1)

Fig.14 Test result of Case5 (Partial loading condition)

(a) Sliding displacement (X direction)

(b) Sliding displacement (Y direction)

(c) Angle of rotation

(d) Rocking displacement of leg(1)

(e) Leg load of leg(1)

Fig.15 Analysis result of Case5 (Partial loading condition)

(a) Rocking displacement leg(1)

(b) Leg load of leg(1)

Fig.16 Rocking displacement and leg load of leg(1) (Case5)

Fig.17 Fluid force of test and calculation (Case3)

3・5 最大滑り変位

X 方向と Y 方向の最大滑り変位を図 18 に示す。前章で解析結果が試験結果の傾向を再現することを確認したが、最大滑り変位は試験ケースによっては差がある。特に、部分装荷である Case6 (3 波分割地震波長周期波・X+Y 方向・Part2 装荷) では、試験結果が解析結果を大きく上回った。これは図 13 に示したように部分装荷ラックの滑り変位が一方向にドリフトするため、滑り変位の誤差も積算されたことが要因だと考えられる。したがって、滑り変位は試験結果と解析結果の差が時間の経過で累積し、最大値にも大きな差が生じる場合があるため、4 章、5 章で滑り変位の保守性について検討した。

Fig.18 Maximum sliding displacement

3・6 最大ロッキング変位・最大脚部荷重

5 つあるラック脚部のうち、最大ロッキング変位を図 19 に、最大脚部荷重を図 20 に示す。ロッキング変位は図 11、図 15 に示したように装荷状態に関わらず試験結果と解析結果は良く一致しているが、最大脚部荷重はすべて解析の方が小さくなった。ラックの全体挙動を評価する上では本解析手法は妥当であると考えられるが、解析では局所的な応答である脚部の衝突荷重が小さくなる傾向があるため、4 章で脚部荷重の保守性について検討した。

Fig.19 Maximum rocking displacement

Fig.20 Maximum leg load

4. 摩擦係数による保守性確認

4.1 解析条件

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良く計算され、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、3.5節や3.6節で示した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、それらを保守側に解析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、ラックの滑りやロッキングへの影響が最も大きい摩擦係数に着目する。フリースタンディングラックおよび使用済燃料ピットはすべてステンレス製であり、フリースタンディングラック脚部底面とピット床面の摩擦はステンレス同士のものとなる。数多くのフリースタンディングラックに関する文献でも Rabinowicz によるステンレス同士の摩擦試験 (Rabinowicz, 1976) を参照し、摩擦係数の下限値である 0.2 を使用して滑りの評価を、上限値である 0.8 を使用してロッキングの評価を行っている。本研究においても、表 1 に示す試験ケースに対して摩擦係数 0.2 および 0.8 を使用した時刻歴応答解析を実施し、保守側に評価できることを確認した。

4.2 滑り変位の保守性

摩擦係数を下限値 0.2 としたときの Case1~Case6 の解析結果と試験結果のうち、ラック重心位置の最大滑り変位を図 21 に、角の最大滑り変位を図 22 に示す。解析結果と試験結果ともに重心位置と角の最大滑り変位に大きな差はなく、回転による影響はわずかであった。図 21(a)、図 22(a)には燃料全装荷を対象とした結果を、図 21(b)、図 22(b)には燃料部分装荷を対象とした結果を示す。燃料全装荷のすべてのケースにおいて解析の最大滑り変位は試験結果より大きくなったが、ケースによっては試験結果に対する解析結果の裕度は小さい。また、燃料部分装荷では解析結果より試験結果の方が滑り変位が大きくなった。燃料部分装荷の試験では、図 13 に示すようにラックが燃料装荷側に移動する際、ロッキングが生じやすく滑りにくくなり、燃料未装荷側に移動する際、ロッキングが生じにくく滑りやすいため、ラックには燃料未装荷側にドリフトしていく滑りが生じた。解析結果と試験結果の最大滑り変位の差が大きくなった主な要因は、解析では滑りが生じやすい摩擦係数の下限値 0.2 を使用したため、部分装荷ラックは試験 (摩擦係数 0.3) ほどロッキングせず、一方向へのドリフトも生じにくくなったためであると考えられる。そこで、部分装荷ラックに関しては、保守性を担保するために摩擦係数の上限値と下限値を使用して滑りが一方向へ生じやすい摩擦係数の組み合わせとする (図 23 に示すように燃料装荷側の脚の摩擦係数 0.8、燃料未装荷側の脚の摩擦係数 0.2 とする)。摩擦係数 0.2 と 0.8 を組み合わせたときの解析結果を図 24、図 25 に示す。ドリフトしやすいように摩擦係数を組み合わせることで、試験結果より解析結果の方が概ね 2 倍以上大きくなることを確認することができた。

Fig.21 Maximum sliding displacement of the centroid of the full fuel loading rack (Friction coefficient of analysis is 0.2)

Fig.22 Maximum sliding displacement of the corner of the full fuel loading rack (Friction coefficient of analysis is 0.2)

Fig.23 Friction coefficient of partial loaded rack used in the analysis

Fig.24 Maximum sliding displacement of the centroid of the partial fuel loading rack (Friction coefficient on fuel loading side is 0.2, and friction coefficient on fuel loading side is 0.8.)

Fig.25 Maximum sliding displacement of the corner of the partial fuel loading rack (Friction coefficient on fuel loading side is 0.2, and friction coefficient on fuel loading side is 0.8.)

4-3 ロッキング変位・脚部荷重の保守性

摩擦係数を上限値 0.8 としたときの Case1～Case6 の解析結果と試験結果のうち、最大ロッキング変位・最大脚部荷重を図 26、図 27 に示す。ロッキング変位・脚部荷重は滑り変位のように累積していくような挙動ではなく、誤差が積算されることもないため、全装荷・部分装荷ともにロッキング変位・脚部荷重は試験結果より摩擦係数 0.8 の解析結果の方が大きく、保守性を確認することができた。

Fig.26 Maximum rocking displacement (Friction coefficient of analysis is 0.8)

Fig.27 Maximum leg load (Friction coefficient of analysis is 0.8)

5. 滑り変位に関する安全係数

前章では、燃料全装荷のラックの滑り変位は、図 21(a)、図 22(a)に示すように摩擦係数 0.2 を使用することで保守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の誤差も積算されるため、解析条件によっては試験結果に対する解析結果の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図 24、図 25 に示すように摩擦係数 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見積もれることを確認することができた。フリースタンディングラックの振動挙動は非線形であり、解析パラメータのばらつきの影響を受けることも考えられるため、試験結果に対して解析結果の余裕が特に小さい燃料全装荷条件における滑り変位に関して、主要な 5 つの解析パラメータ（脚部剛性・脚部減衰・中央脚の自重配分・角 4 脚の自重配分・ラックの流体付加質量に関する端漏れ係数）にばらつきを与えたモンテカルロ法による評価を実施した。これらのパラメータのばらつきは実機で取りうる範囲を考慮し、変動係数 0.2~0.4 の正規乱数によって与えた。Case4 と同じ 3 波分割地震波（長周期・X+Y+Z 方向）を入力加振とし、脚部とピット床間の摩擦係数には下限値である 0.2 を使用して計 60 ケースの解析を実施した。全解析ケースにおける X 方向と Y 方向のラック角における最大滑り変位の頻度分布および累積頻度を図 28 に示す。また、表 2 に示すように X 方向における 60 ケースの最大滑り変位の最大値は 193 mm、平均値+3×標準偏差 (σ) は 193 mm となり、Y 方向では最大値 183 mm、平均値+3 σ は 193 mm となった。X 方向・Y 方向いずれにおいても平均値+3 σ が最大値に近く、ばらつきを考慮しないノミナル解析の 2 倍が最大値および平均値+3 σ より大きくなることを確認した。以上のことから、燃料全装荷ラックの滑り評価では安全係数“2”を用いることとする。試験結果に対する解析結果の裕度の小さい全装荷ラックの滑り変位は、解析パラメータのばらつきまで考慮し、摩擦係数の下限値 0.2 を使用した解析結果を 2 倍とすることで試験結果より大きく見積もることができる。

Fig.28 Frequency and cumulative frequency of sliding displacement

Table 2 Statistics of analysis results (Sliding displacement)

	X direction	Y direction
Nominal analysis [mm]	103	114
Analysis considering dispersion (Average + 3 σ) [mm]	193	193
Analysis considering dispersion (Maximum) [mm]	193	183
Nominal analysis $\times 2$ [mm]	206	228

6. 耐震評価手法

6.1 評価手順

4章で摩擦係数の設定によって解析結果の保守性を確認するとともに、5章で比較的、試験結果に対する解析結果の裕度の小さい燃料全装荷の滑り変位に対しては安全係数“2”を使用することで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が可能であることを示した。本章ではそれらを踏まえてフリースタンディングラックの滑り、およびロッキングに関する評価の手順を整理した。それらの評価手順を図29に示す。

6.2 滑り変位評価

滑り変位評価では、燃料全装荷条件においては全脚の摩擦係数を0.2（最も滑りやすい条件）で解析を実施し、5章で得た安全係数“2”を乗じた滑り変位で最大滑り変位の評価を行う。また、燃料部分装荷条件においては燃料未装荷側にドリフトしながら滑るため、燃料装荷側の摩擦係数を0.8（最も滑りにくい条件）、燃料未装荷側の摩擦係数を0.2（最も滑りやすい条件）として解析を実施し、最大滑り変位の評価を行う。この条件では解析結果が十分保守側となるため、安全係数を使用する必要はない。また、ラック形状のアスペクト比が小さいなど、ロッキングによって片側の脚部だけで支持するような挙動をしない場合は、振動方向の挙動に差異が小さくなり、一方向にドリフトが生じないため、燃料部分装荷における評価は不要であると考えられる。

6.3 ロッキング評価

ロッキングの評価では、燃料全装荷条件において全脚の摩擦係数を0.8（最もロッキングしやすい条件）で解析を実施し、最大ロッキング変位および最大脚部荷重の評価を行う。ロッキングは滑りのように誤差が積算されていくことがないため、安全係数を使用しない。また、ラック形状などによって、燃料全装荷条件より燃料部分装荷条件の方がロッキング変位に対して厳しくなる場合は燃料部分装荷条件における解析も必要としなければならない。

以上の手順で算出された解析結果からラックの構造健全性を確認する．最大滑り変位ではラックがピット壁面に衝突しないこと，最大ロッキング変位ではラックが転倒しないこと，最大脚部荷重に関しては，別途 FEM の詳細解析モデルで静解析を実施し，ラックの構造が健全であることを示す．

※1 There is no need to perform analysis on the partial loading condition if the rack is not rocking.
(Check whether the rack will be in the state or supporting only by one side.)

Fig.29 Seismic evaluation flow of sliding and rocking behavior

7. 結 言

滑り, ロッキング, 燃料ラックセル間の衝突, 脚-ピット床間の衝突・摩擦, 周囲の水との流体構造連成の影響などの非線形の3次元挙動や燃料の装荷状態を考慮したフリースタンディングラックの耐震解析を実施し, 実寸大試験結果と比較することでその妥当性を示した. また, フリースタンディングラックの耐震評価上重要となる滑り変位, ロッキング変位, 脚部荷重に対してラックの健全性を確認するための評価手法をまとめた. フリースタンディングラックの滑り変位は累積するため, 地震中の解析結果と試験結果の差も時間の経過とともに積算されていく. そのため, 摩擦係数の下限値0.2を使用することで燃料全装荷ラックの滑り変位が保守側になることを確認したが, 試験結果に対する解析結果の裕度は小さかった. そのため, 解析パラメータのばらつきを考慮したモンテカルロ法による滑り変位の頻度分布から, 安全係数“2”を導出した. また, 燃料部分装荷ラックの滑り変位は, 摩擦係数0.2と0.8を一方向(燃料未装荷側)にドリフトしやすいように組み合わせることで, 十分な保守性を確認することができた. 一方で, ロッキングに関しては, 滑り変位と異なり, 累積していく事象ではないため, 摩擦係数の上限値0.8を使用してロッキング変位と脚部荷重の保守性を確認することができた. 以上の結果を踏まえて, 本論文では滑り変位, ロッキング変位, 脚部荷重の耐震設計評価手順を整理した.

謝 辞

本報はPWR5電力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感謝を表する.

文 献

- Blumer,U., Luethi,P.and Klaui,E., Structural qualification of high density fuel storage racks, Transactions of the 16th International Conference of Structural Mechanics in Reactor and Technology (2001), Paper No.1942.
- Fritz, R.J., The effect of liquids on the dynamic motions of immersed solids, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry (1972), pp.167-173.
- 岩崎 晃久, 猫本 善続, 森田 英之, 谷口 勝彦, 奥野 大作, 松岡 寿浩, 千種 直樹, フリースタンディングラックの実用化研究(実寸大試験を用いた耐震試験), 日本機械学会論文集, Vol.81, No.831 (2015), DOI: 10.1299/transjsme.15-00153.
- Iwasaki,A.,Nekomoto,Y., Morita,H., Nishida,S., Nagaya,M.,Okuno,D. and Chigusa,N., Evaluation of the sliding behavior of the rack using CAV concept, Proceedings of the ASME 2011 Pressure Vessels &Piping Division Conference (2011), PVP2011-57933.
- Iwasaki,A.,Nekomoto,Y., Morita,H., Taniguchi,K., Okuno,D., Matsuoka,T. and Chigusa,N., Experimental study on free standing rack loading full fuel assembly, Proceeding of the 2012 ASME Pressure Vessels and Piping Conference (2012a), PVP2012-78451.
- Iwasaki,A.,Nekomoto,Y., Morita,H., Taniguchi,K., Okuno,D., Matsuoka,T. and Chigusa,N., Experimental parameter study on free standing rack, Proceeding of the 2012 ASME Pressure Vessels and Piping Conference (2012b), PVP2012-78458.
- Lee,J.H., Seo,K.S. and Cho,C.H., Seismic response analysis of a freestanding model of spent fuel storage cask, Transactions of the 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor and Technology (2005), pp.3317-3323.
- Mulcahy,T.M., Fluid force on rods vibrating in finite length annular regions, Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics, Vol.47 (1980).
- 猫本 善続, 中村 友道, 佐藤 郁夫, 奥野 大作, 鶴 一隆, 原文雄, PWR使用済燃料ラックの合理的な耐震設計手法の開発, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2002, No. 632(2002).
- 原子力規格委員会, 原子力発電所耐震設計技術規程(JEAC4601-2008) (2008), 日本電気協会.

- Pop, J., Putman, S.F. and Singh, S., Nonlinear dynamic analysis of spent fuel storage racks, American Society of Mechanical Engineers, New York, Pressure vessels and piping conference, PVP Vol.191 (1990), pp.113-118.
- Rabinowicz, E., Friction coefficients of water-lubricated stainless steel for a spent fuel rack facility, Massachusetts Institute of Technology (1976).
- 佐々木 陽一, 富田 久雄, 原子炉炉心の耐震解析, 東芝レビュー, Vol.36, No.7 (1981), pp.657-664, 東芝技術企画室.
- Shah, S.J., Biddle, J.R., Bennett, S.M., Schechter, C.B., Harstead, G.A. and Kopecky, B., Seismic and structural analysis of high density/consolidated spent fuel storage racks, Institute of Nuclear Materials Management, Paper 24 (1995), pp.173-180.
- Soler, A.I. and Singh, K.P., Seismic response of a free standing fuel rack construction to 3-D floor motion (1984), Nuclear Engineering and Design 80 (1984), pp.315-329.
- Soler, A.I. and Singh, K.P., Some results from simultaneous seismic simulations of all racks in a fuel pool, InnnSpent Fuel Management Seminar X (1993).
- Taniguchi, T., Non-linear response analysis of rectangular rigid bodies subjected to horizontal and vertical ground motion, Earthquake Engineering and Structural Dynamics Vol.31 (2002), pp.1481-1500.
- Zhao, Y., Wilson, P.R. and Steevenson, J.D., Nonlinear 3-D dynamic time history analysis in the reracking modifications for a nuclear power plant, Nuclear Engineering and Design, Vol.165 (1996), pp.199-211.

References

- Blumer, U., Luethi, P. and Klau, E., Structural qualification of high density fuel storage racks, Transactions of the 16th International Conference of Structural Mechanics in Reactor and Technology (2001), Paper No.1942.
- Fritz, R.J., The effect of liquids on the dynamic motions of immersed solids, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry (1972), pp.167-173.
- Iwasaki, A., Nekomoto, Y., Morita, H., Taniguchi, K., Okuno, D., Matsuoka, T. and Chigusa, N., Practical research of free standing rack (Development of seismic evaluation method), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (in Japanese), Vol.81, No.831 (2015), DOI : 10.1299/transjsme.15-00153.
- Iwasaki, A., Nekomoto, Y., Morita, H., Nishida, S., Nagaya, M., Okuno, D. and Chigusa, N., Evaluation of the sliding behavior of the rack using CAV concept, Proceedings of the ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Division Conference (2011), PVP2011-57933.
- Iwasaki, A., Nekomoto, Y., Morita, H., Taniguchi, K., Okuno, D., Matsuoka, T. and Chigusa, N., Experimental study on free standing rack loading full fuel assembly, Proceeding of the 2012 ASME Pressure Vessels and Piping Conference (2012a), PVP2012-78451.
- Iwasaki, A., Nekomoto, Y., Morita, H., Taniguchi, K., Okuno, D., Matsuoka, T. and Chigusa, N., Experimental parameter study on free standing rack, Proceeding of the 2012 ASME Pressure Vessels and Piping Conference (2012b), PVP2012-78458.
- Lee, J.H., Seo, K.S. and Cho, C.H., Seismic response analysis of a freestanding model of spent fuel storage cask, Transactions of the 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor and Technology (2005), pp.3317-3323.
- Mulcahy, T.M., Fluid force on rods vibrating in finite length annular regions, Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics, Vol.47 (1980).
- Nekomoto, Y., Nakamura, T., Sato, I., Okuno, D., Tsuru, K. and Hara, F., Development of the rational seismic design method of the PWR spent fuel storage rack, Dynamics and Design Conference 2002, Paper No.632 (2002) (in Japanese).
- Nuclear standards committee of JEA, Technical code for seismic design of nuclear power plants (JEAC4601-2008) (2008), The Japan Electric Association (in Japanese).
- Pop, J., Putman, S.F. and Singh, S., Nonlinear dynamic analysis of spent fuel storage racks, American Society of Mechanical Engineers, New York, Pressure vessels and piping conference, PVP Vol.191 (1990), pp.113-118.

- Rabinowicz, E., Friction coefficients of water-lubricated stainless steel for a spent fuel rack facility, Massachusetts Institute of Technology (1976) .
- Sasaki, Y. and Tomita, H., Analysis for antiseismic structure of nuclear reactor core components, Toshiba review, Vol.36, No.7 (1981), pp.657-664 (in Japanese).
- Shah, S.J., Biddle, J.R., Bennett, S.M., Schechter, C.B., Harstead, G.A. and Kopecky, B., Seismic and structural analysis of high density/consolidated spent fuel storage racks, Institute of Nuclear Materials Management, Paper 24 (1995), pp.173-180.
- Soler, A.I. and Singh, K.P., Seismic response of a free standing fuel rack construction to 3-D floor motion (1984), Nuclear Engineering and Design 80 (1984), pp.315-329.
- Soler, A.I. and Singh, K.P., Some results from simultaneous seismic simulations of all racks in a fuel pool, In: Spent Fuel Management Seminar X (1993) .
- Taniguchi, T., Non-linear response analysis of rectangular rigid bodies subjected to horizontal and vertical ground motion, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.31 (2002), pp.1481-1500.
- Zhao, Y., Wilson, P.R. and Steevenson, J.D., Nonlinear 3-D dynamic time history analysis in the reracking modifications for a nuclear power plant, Nuclear Engineering and Design, Vol.165 (1996), pp.199-211.