

フリースタンディングラックの耐震設計手法に関する検討

Seismic Design Method of Free Standing Rack

三菱重工業(株)	谷口 勝彦	Katsuhiko TANIGUCHI
三菱重工業(株)	奥野 大作	Daisaku OKUNO
三菱重工業(株)	岩崎 晃久	Akihisa IWASAKI
三菱重工業(株)	猫本 善続	Yoshitsugu NEKOMOTO
三菱重工業(株)	松岡 寿浩	Toshihiro MATSUOKA

For high earthquake resistance and ease of installation, free standing racks which are not anchored to the pool floor or walls has been adopted in many countries. Under the earthquake, the response of the free standing rack is highly nonlinear and involves a complex combination of motions (sliding, rocking, twisting, and turning) and impacts between the fuel assemblies and the fuel cell walls, rack-to-rack, and the pit floor and rack pedestals.

We carried out seismic experiments on the full-scale rack model in water and dry conditions to obtain the fundamental data about free standing rack (sliding, rocking and turning motions). We have developed the nonlinear dynamic analysis method to predict seismic response for the free standing rack utilizing the full-scale test result and verified the analysis evaluation method of the rack by comparison of test result.

Keywords: Spent Fuel Storage Rack, Free Standing Rack, Seismic behavior

1. はじめに

原子力発電所の使用済燃料ピット水中に設置される使用済燃料ラックは、原子力発電所のさらなる信頼性向上の観点から、今後、より一層高い耐震信頼性を有することが求められている。

海外プラントにおいて十分な使用実績があるフリースタンディング方式使用済燃料ラック（以下、フリースタンディングラック）は、ラックを固定する基礎ボルト又は壁サポートを使わず、高い耐震性を確保する方式である。具体的には、地震時にラックが滑ることによる摩擦により地震エネルギーが消散され、さらには、ラック周囲の流体抵抗によりラックの地震応答を低減することが可能となる。しかしながら、フリースタンディングラックは地震時にラックの滑り、ロッキング及び衝突等の複雑な非線形挙動を示すことから、その振動挙動を正確に把握し、設計を実施するためには、これらの様々な非線形性を考慮した解析手法の構築が必要である。

そこで本研究では、大型振動施設を用いてフリースタンディングラックの寸大試験[1][2]を実施し、水中での振動挙動データを取得するとともに、解析手法の妥当性を検証し、フリースタンディングラックの耐震設計手法に関する検討を行った[3][4]。

2. 振動試験

2.1 フリースタンディングラック試験体の概要

フリースタンディングラックの寸大試験体（以下、ラック試験体）は、7×10のラックセルから構成され、その大きさは、高さ約4.5m、幅約2m、長さ約3mである。ラック試験体を支持する支持脚は5脚とし、ラック周囲の流体による抵抗を増加させるため、ラック外周全面に外周板を設置する構造とした。

ラックセル内には試験用に製作した模擬燃料集合体（以下、模擬燃料）を装荷することとし、模擬燃料の装荷条件の影響を考慮した試験を実施した。ラック試験体の重量は、ラック単体で約20ton、模擬燃料が全装荷（70体）の状態では約70tonである。

本試験で使用したラック試験体及び試験装置を図1に示す。本振動試験は、(独)防災科学技術研究所の大型三次元振動台E-Defenseを用いて実施し、15m×20mの振動台上に約8m四方の水槽を設置した。さらに、水槽の内面上端部にはスロッシング防止板を設置することで、実機にて想定される環境を模擬した。ラック試験体、模擬燃料、水槽、水の全て重量の合計は、約500tonとなる。

2.2 振動試験条件

本試験では、以下のような条件をパラメータとし、30

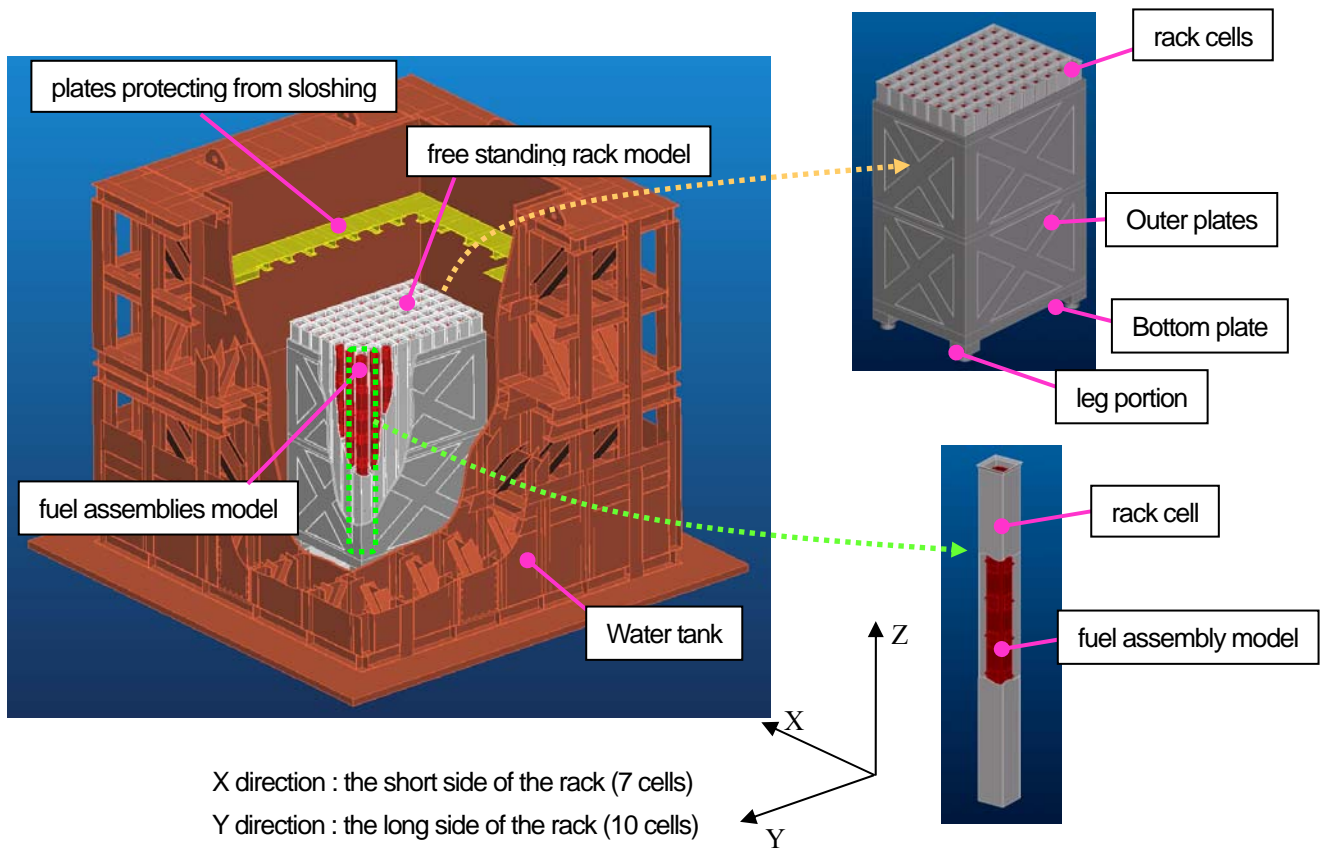


Fig.1 Overview of free standing rack and water tank

Table.1 Vibration test case

test case	air/water	fuel loading condition	seismic wave	excitation direction	excitation level
case-1	water	Full	one envelope seismic wave	Y	100%
case-2	water	Full	three divided seismic wave	Y	110%
case-3	water	Full	one envelope seismic wave	X	100%
case-4	water	Full	three divided seismic wave	X	110%
case-5	air	Full	one envelope seismic wave	Y	100%

ケース以上の振動試験を実施した。

- 気中/水中条件
- 入力地震波の種類 (2タイプ)
- 入力地震波の方向
- 加振レベル
- 燃料装荷状態 (全装荷/部分装荷/空)

本論文ではその内、全装荷状態における基本的な試験ケースに対する結果を示す。具体的な試験ケースを表 1 に示す。

試験で使用する人工地震波は、国内 PWR プラントの使用済燃料ピット床における地震特性を考慮し作成した床応答スペクトルを基本とし、1 波 60 秒の地震波 (1 波包絡地震波) とその周波数特性を短周期 (約 10Hz~30Hz)、中周期 (約 8Hz~10Hz)、長周期 (約 1Hz~8Hz) の各 30 秒 3 つに分けた 3 波分割地震波の 2 種類とした。本試験

にて使用した、1 波包絡地震波及び 3 波分割地震波の時刻歴波形を図 2、図 3 に示す。

フリースタANDINGラックの地震挙動を正確に把握するため、本試験では、ラック試験体の加速度、変位、及び外周面での圧力を計測した。また、ラックのロッキング挙動を検証するため、ロッキング時における支持脚の浮上り変位、支持脚と床の荷重を計測した。

2.3 振動試験結果

フリースタANDINGラックの基本的な挙動を把握するため、1 方向加振における振動試験を実施した。

case-1、case-2 ではフリースタANDINGラックの周波数特性における振動挙動に着目するため、2 種類の地震波を用いてラックの長手方向 (Y 方向) 加振試験を実施した。その結果を図 4、図 5 にそれぞれ示す。

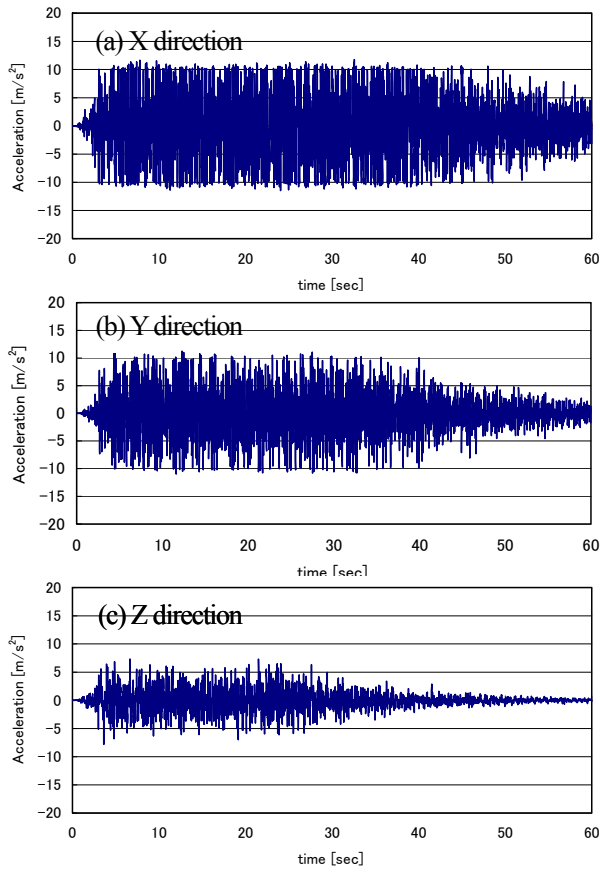


Fig.2 Artificial earthquake wave
(One envelope seismic wave)

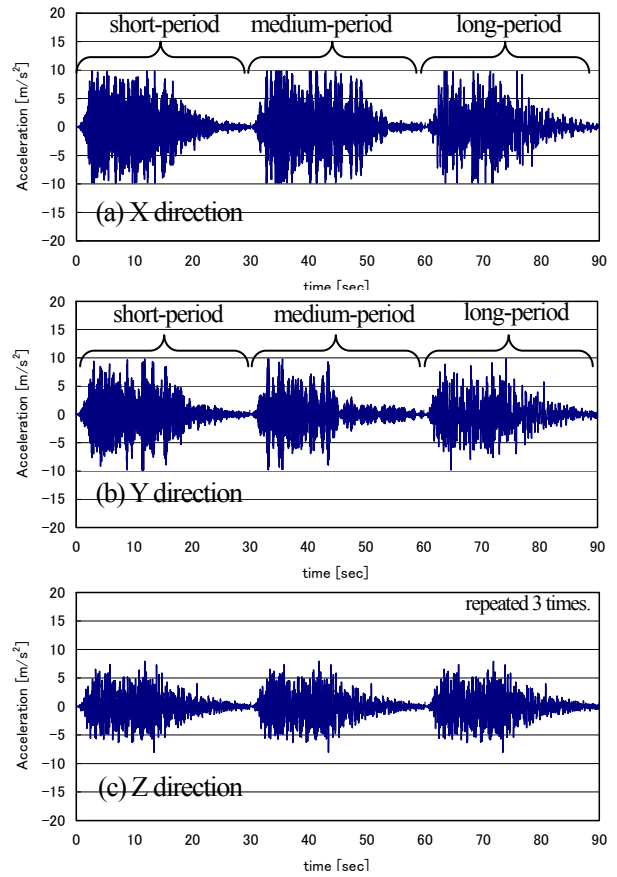
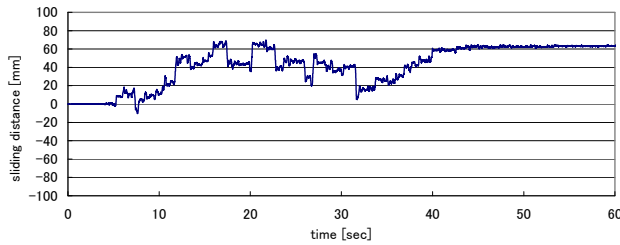
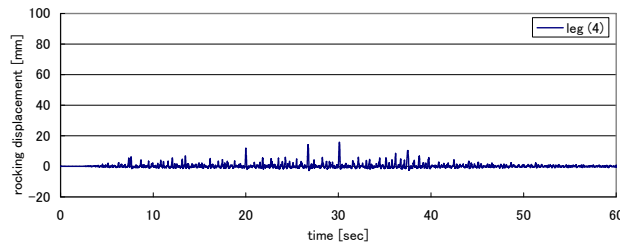


Fig.3 Artificial earthquake wave
(Three divided seismic wave)

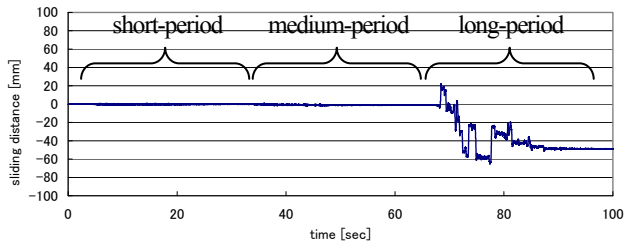


(a) sliding distance

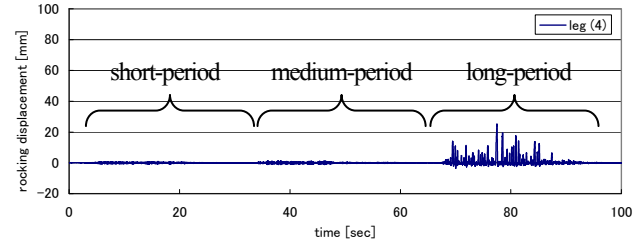


(b) rocking displacement

Fig.4 Test result (case-1)

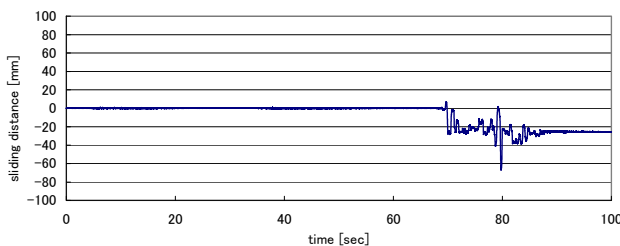


(a) sliding distance

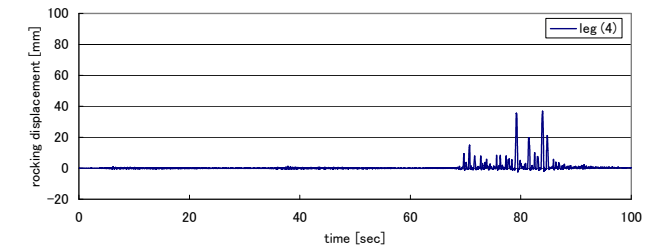


(b) rocking displacement

Fig.5 Test result (case-2)



(a) Sliding distance



(b) Rocking displacement

Fig.6 Test result (case-4)

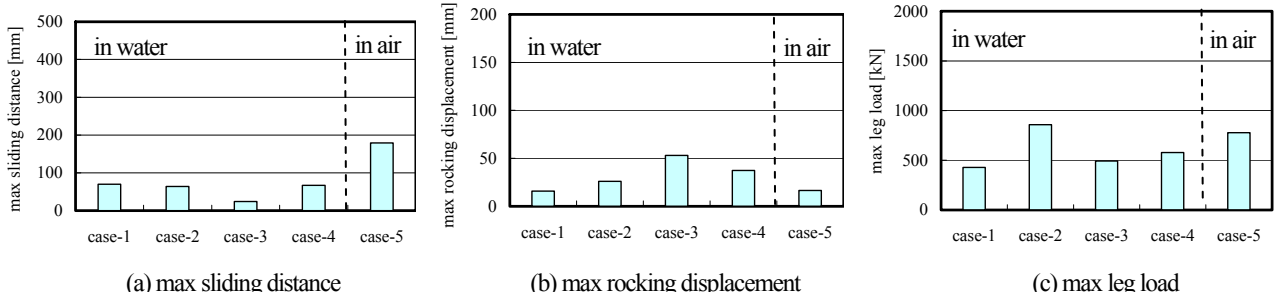


Fig.7 Maximum value of test result

図4、図5より、1波包絡地震波では、加振加速度が大きい全時間帯において、滑りやロッキングが発生していることに対し、3波分割地震波の短周期、中周期帯における加振では、滑り変位、ロッキング変位ともに微小であり、長周期の地震波における加振に対してのみ大きな挙動を示すことを確認した。また、その傾向は、ロッキング挙動が発生しやすいX方向加振においても同様であることを確認した(図6)。

表1に示したcase-1からcase-5までの試験ケースにおいて、滑り変位、ロッキング変位、脚荷重の最大値の比較を図7に示す。case-1及びcase-2のY方向加振と比較し、case-3、4のX方向加振ではロッキング変位が大きくなる一方で滑り変位は小さくなることを確認した。これは地震により発生する運動エネルギーがロッキング挙動により消費されることに起因するものと考えられる。また、case-1とcase-5を比較することにより、気中条件においては、滑り変位及び脚荷重が水中条件よりも大きくなることを確認した。

3. 解析手法

3.1 解析モデル

フリースタンディングラックの挙動を正確に予測するためには、ラックの滑り、ロッキング及び衝突等の複雑な非線形挙動を考慮した3次元非線形解析を実施する必要がある。また、その解析においては、ラックセルと燃料及びラックブロックとピット壁との流体構造連成効果を考慮しなければならない。

これらの挙動を考慮するため、解析モデルには機構解析ソフトADAMS (MSC Software)を使用した。本研究では、実寸大試験より得られた試験結果と解析結果を比較することで、解析モデルの妥当性を検証した。解析モデルの概要を図8に示す。なお、解析に適用した仮定を以下に示す。

- ・ラックブロックを質量及び固有振動数が等しい一様断面を持つ1本の梁に設定する。
- ・ラックブロックのベースプレートは剛体とする。
- ・静摩擦係数と動摩擦係数は等しいものとし、その値は試験により得られたものを使用する。
- ・FEM解析にて算出したラック脚部の局部剛性を脚部の衝突剛性とする。
- ・複数の燃料を一樣な断面の1本梁に集約する。
- ・水中条件においては、流体付加質量を考慮する(流体付加減衰は無視する)。なお、ラックとピット壁間の流体構造連成による流体力は次式にて表される。

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

F_{rack} : fluid force acting on the rack

F_{pit} : fluid force acting on the pit

m_{v-rack} : added mass of the rack (added mass due to water flow produced by relative motion between the rack and the pit)

m_{d-rack} : excluded fluid mass due to rack

m_{h-pit} : mass of water contained in the pit

\ddot{x}_{rack} : acceleration of the rack

\ddot{x}_{pit} : acceleration of the pit

3.2 解析結果

振動試験にて計測した振動台の加振加速度を用いて、3次元時刻歴応答解析を実施した。全装荷条件、3波分割地震波による3方向同時加振試験結果及びその再現解析結果の比較を図9及び図10に示す。なお、図9、図10は、3波分割地震波のうち、長周期波の応答のみを示す。

図9、図10において、滑り変位は各時間ステップにお

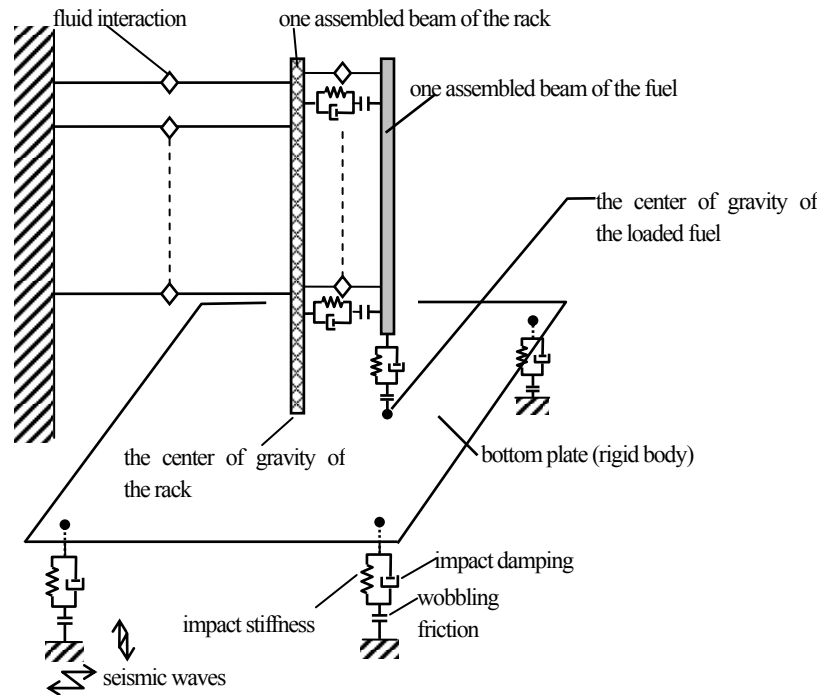


Fig.8 Overview of the free standing rack analysis

Table.2 Evaluation Items and Acceptance Criteria

ける誤差が累積していくため、試験と解析における最大滑り量及び残留変位の差が生じやすく、それらを完全に一致させることは難しいが、ラックの回転角、ロッキング変位、脚荷重においては、それらの時刻歴波形は試験と解析ではほぼ一致しており、本解析モデルはラック試験体の全体挙動を再現可能であることを確認した。

図9、図10に示したロッキング変位及び脚荷重のうち、10秒から20秒までを取り出し、試験結果及び解析結果を一つのグラフに記載したものを図11に示す。ロッキング変位及び脚荷重の解析結果は、試験結果におけるラック挙動のタイミングとその大きさを精度よく再現しており、本解析手法の妥当性を確認した。

4. 耐震設計手法

4.1 評価項目

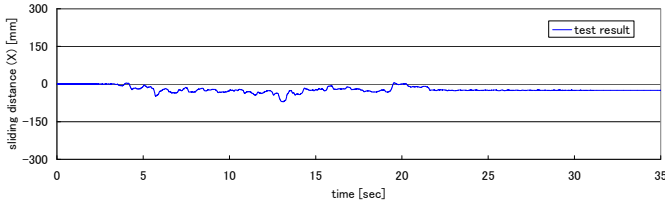
フリースタンディングラックは地震時にラックの滑り、ロッキング、衝突（燃料とラックセル間、脚部とピット床間、ラックブロック間）等の複雑な非線形挙動を示すため、フリースタンディングラックの設計を実施するためには、その振動挙動を正確に把握した上で、各評価項目及び判定基準を適切に決定する必要がある。本研究では、振動試験結果及び再現解析結果を踏まえ、表2に示す評価項目及び判定基準を決定した。

	Evaluation Item	Acceptance Criteria
1	Sliding	Confirm no rack-to-wall impact occurs
2	Overtuming	Confirm no overtuming occurs
3	Evaluation for Impact Load	a) Pedestal-to-Pit floor impact Confirm the stress due to pedestal-to-pit floor impact is less than the allowable stress b) Rack-to-Rack impact Confirm the stress due to rack-to-rack impact is less than the allowable stress
4	Stress evaluation of rack modules including connecting structure	Confirm the stress on rack modules are less than the allowable stress

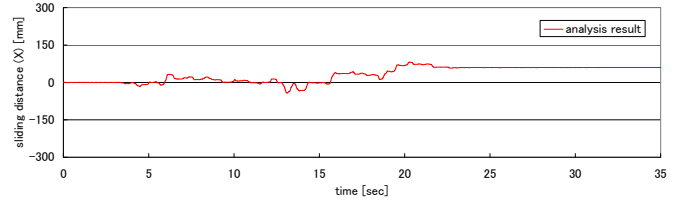
4.2 耐震設計手法のコンセプト

フリースタンディングラックの耐震設計において、基本的な条件設定の考え方を以下に示す。

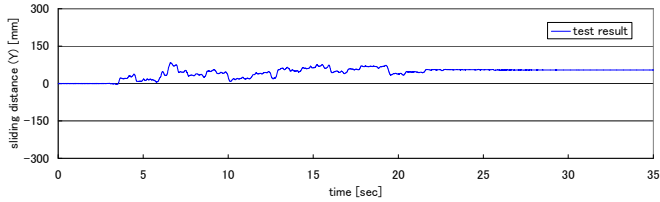
- ・ラック挙動への影響度が大きいパラメータである摩擦係数を変化させ、事象ごとに評価が厳しくなる数値を採用する。
- ・具体的には、ラックブロックの滑りを評価する場合



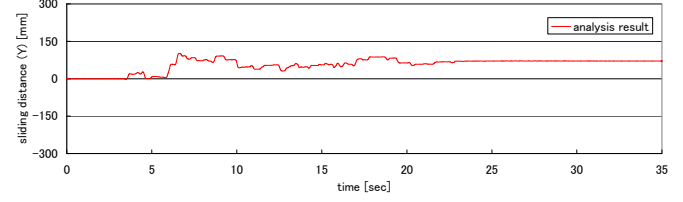
(a) sliding distance (X direction)



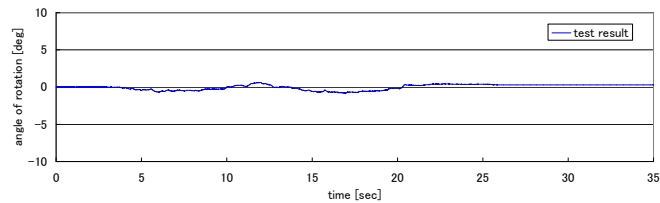
(a) sliding distance (X direction)



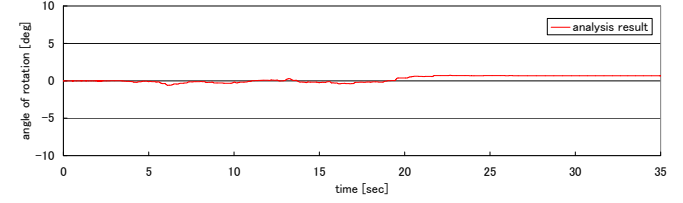
(b) sliding distance (Y direction)



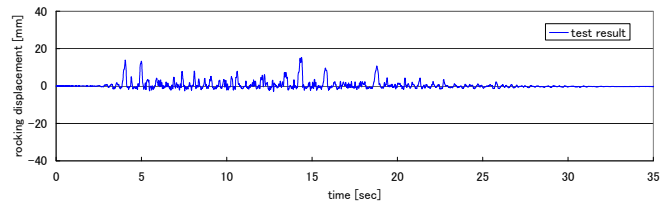
(b) sliding distance (Y direction)



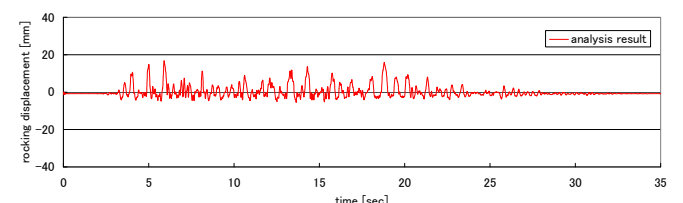
(c) angle of rotation



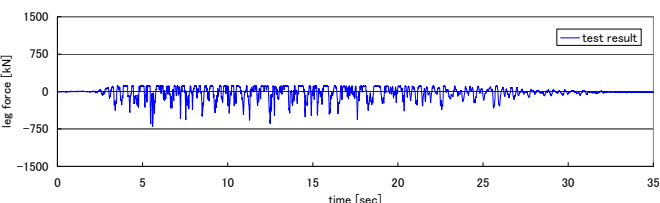
(c) angle of rotation



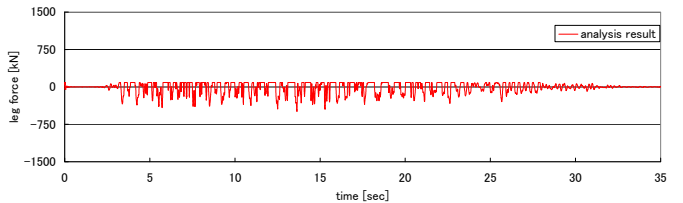
(d) rocking displacement



(d) rocking displacement



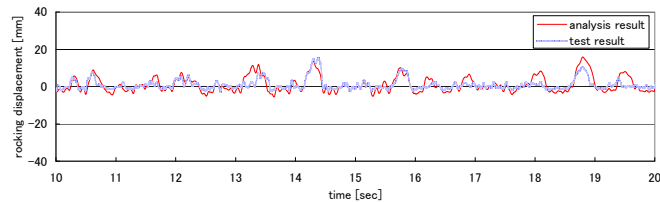
(e) leg load



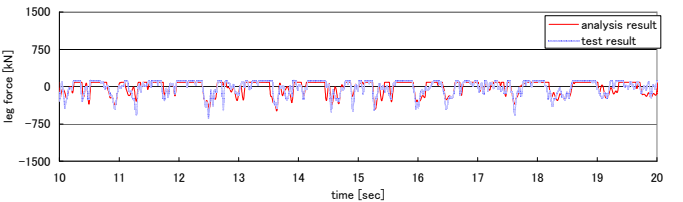
(e) leg load

Fig.9 Test result (full fuel loading condition)

Fig.10 Analysis result (full fuel loading condition)

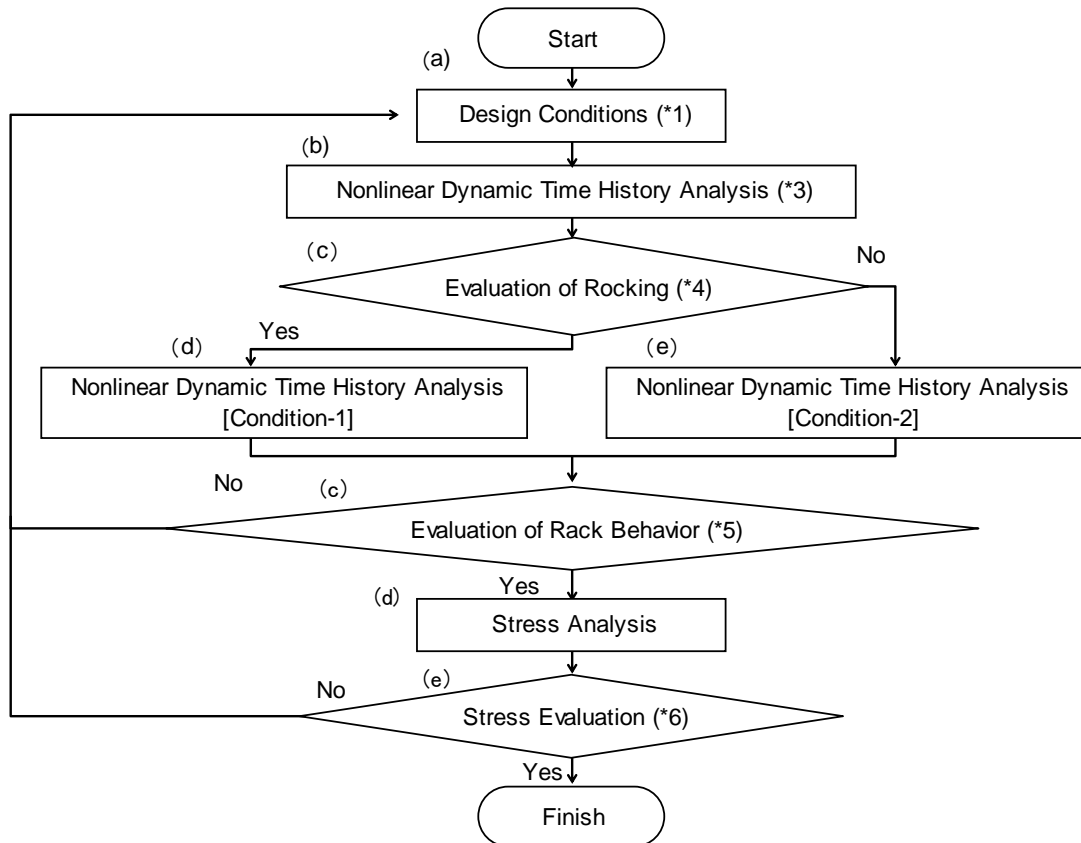


(a) rocking displacement



(b) leg load

Fig.11 Analysis and test result (full fuel loading condition)



(*1) Design Conditions

- Rack configuration, Materials, Rack arrangement, etc
- Connecting Structure
- Restriction of Fuel loading condition (*2)

(*2) Fuel assemblies are loaded so that the center of gravity of loaded fuels is located near the center of rack.

(*3) The friction coefficient 0.8 on severe fuel loading condition (partial fuel loading)

(*4) Check whether rack will be in the state of supporting only by one side.

(*5) Evaluation of sliding and overturning [Acceptance Criteria** : 1), 2)]

(*6) Stress evaluation of Impact area [Acceptance Criteria** : 3); Stress evaluation of rack modules including connecting structure [Acceptance Criteria** : 4)]

** : Acceptance Criteria are shown in page 71

Condition-1

Item	Friction Coefficient	Fuel Loading Conditions	Remark
1) Sliding	0.2	Full	(*7)
	Combination of 0.2 and 0.8 (*8)	1/2 Partial Loading	(*9)
2) Overturning - Displacement of Rocking	0.8	*3	—
3) Impact Load	- Pedestal-to-Pit floor	Full	—
	- Rack-to-Rack	Full	(*10)
4) Stress Evaluation (Connecting Structure)	Combination of 0.2 and 0.8	Full	—

Condition-2

Item	Friction Coefficient	Fuel Loading Conditions	Remark
1) Sliding	0.2	Full	(*7)
2) Overturning - Displacement of Rocking	0.8	*3	—
3) Impact Load	- Pedestal-to-Pit floor	Full	—
	- Rack-to-Rack	Full	(*10)
4) Stress Evaluation (Connecting Structure)	Combination of 0.2 and 0.8	Full	—

(*7): Sliding displacement are calculated using safety factor 2.0.

(*8): Friction coefficient are assigned to each pedestal. [Supporting pedestals: 0.8, lifting pedestals: 0.2]

(*9): This item may be excluded in case the fuel loading pattern is restricted.

(*10): Rack-to-Rack impact are evaluated by the impact load due to the rack-to-wall collision on maximum velocity.

Fig.12 Flow chart for seismic design method of free standing rack

には、基本的に摩擦係数を下限値の $\mu=0.2$ （最も滑り易い条件）、ロッキングによる転倒及び脚部とピット床間の衝撃荷重を評価する場合には、摩擦係数を上限の $\mu=0.8$ （最も転倒し易い条件）に設定する[5]。

上記の通り摩擦係数を適切に選択することで各評価項目に対して安全側の評価が可能となる。その際、摩擦係数に加え、燃料の装荷条件を適切に考慮することが必要である。

4.3 耐震設計手法

4.2 節に述べた基本的な考え方をベースに、フリースタANDINGラックの耐震設計手法フローを図 12 に示す。

燃料全装荷条件における滑り評価においては、常に安全側の解が得られるよう割増係数「2」を採用することとした。具体的には、摩擦係数を 0.2 に設定した解析を実施し、得られた最大変位に「2」を乗じたものを設計値として用いることとする。ここで、割増係数については、摩擦係数を $\mu=0.2$ （下限値）に固定し、それ以外の解析パラメータ（脚部の剛性、流体付加質量等）をランダムに変化させた統計的手法を実施することにより、割増係数「2」を決定している。

地震時におけるフリースタANDINGラックの滑り、ロッキング及び衝突の各挙動に対し、図 12 に示した評価条件にて解析を実施することにより、本振動試験にて得られた試験結果を全て安全側に評価することが可能であることを確認した。

5. まとめ

本研究では、実寸大フリースタANDINGラックの振動試験を実施し、地震時の基本挙動データを取得するとともに、試験結果と解析結果との比較検証を行った。さらには、解析パラメータを適切に設定することで、フリースタANDINGラックの耐震設計手法についての検証を実施した。得られた結論を以下に示す。

- 1) フリースタANDINGラックは、比較的長い周期の地震動に対して滑り、ロッキング等の地震応答を示すが、短周期の地震動に対する応答は非常に小さいことを確認した。
- 2) フリースタANDINGラックの滑り、ロッキング及び衝突挙動を再現可能な解析モデルを構築した。

- 3) フリースタANDINGラックの滑り、ロッキング及び衝突の各挙動に対し、試験結果を保守的に評価できる耐震設計手法を構築した。

参考文献

- [1] A.Iwasaki, Y.Nekomoto, “Experimental Study on Free Standing Rack Loading Full Fuel Assembly”, Pressure Vessels & Piping Division Conference, ASME, PVP2012-78451, 2012.
- [2] A.Iwasaki, Y.Nekomoto, “Experimental Parameter Study on Free Standing Rack”, Pressure Vessels & Piping Division Conference, ASME, PVP2012-78458, 2012.
- [3] A.Iwasaki, “Analysis Study on Free Standing Rack under the Earthquake Excitation”, Pressure Vessels & Piping Division Conference, ASME, PVP2012-78462, 2012.
- [4] Katsuhiko Taniguchi, Experimental and Analysis Study of Free Standing Rack under Seismic Excitation, ICONE20, ASME, ICONE20POWER2012-55240, 2012.
- [5] USNRC NUREG/CR-5912, “Review of Technical Basis and Verification of Current Analysis Methods Uses to Predict Seismic Response of Spent Fuel Storage Racks”, October, 1992.

（平成 25 年 6 月 21 日）