Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00053

Received date : 5 February, 2021

Accepted date : 9 June, 2021

J-STAGE Advance Publication date : 17 June, 2021

使用済燃料キャスク保持プレートの開発

松原 亨^{*1}, 岩崎 晃久^{*2}, 會田 浩平^{*1}, 阪本 浩之^{*1}

Development of retention plate which holds spent fuel cask

Toru MATSUBARA^{*1}, Akihisa IWASAKI^{*2}, Kohei AIDA^{*1} and Hiroyuki SAKAMOTO^{*1}

^{*1} Nuclear Energy Systems, Mitsubishi Heavy Industries, LTD

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

^{*2} Research & Innovation Center, Mitsubishi Heavy Industries, LTD

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

Abstract

A method to retain a cask by a retention plate has been developed. In this method, a small fitting gap between the bottom of the cask and the circular hollow of the retention plate controls movement of the cask in the range of the circular hollow area at an earthquake. The fitting of the cask and the retention plate absorbs the seismic energy by the motion of the cask and the collision between them. Characteristics of the vibration behavior of the cask with the retention plate were analyzed by dynamic analysis. As a result of the analysis, the cask does not get out of the retention plate or fall down during an earthquake. The movement of the cask mainly consists of three basic motions, slipping motion, rocking motion, and rotating motion, and reaction force between the cask and the retention plate becomes the maximum in rocking motion. The strength integrity of the retention plate was also confirmed under condition of the maximum reaction force, and the function of the retention plate, which is to keep the cask as standing at an earthquake, was maintained. In addition, characteristics of the vibration behavior of the cask and the design of the retention plate were validated by 1/4 scale mock-up seismic test.

Keywords : Cask, Retention plate, Seismic evaluation, Non-linear vibration, Rocking, Vibration test

1. 緒 言

原子力発電所で使用した使用済燃料を輸送・貯蔵兼用のキャスクに収納し、中間貯蔵施設に一時保管する計画が推進されている。そのキャスクは、使用済燃料を収納した状態で、地震などの自然災害への耐性、発生する放射線の遮蔽、崩壊熱の除熱、放射性物質の密封、使用済燃料の臨界防止等の安全機能を満足する様に設計される。キャスクは図 1(a)に示す使用済燃料を収納する目的で特別に設計された鋼製円筒容器で、直径約 2.6 m、高さ約 5.2 m、使用済燃料を収納した際の全質量は約 120 ton で、施設内で保管される。

施設内にキャスクを貯蔵する際、横置き状態、縦置き状態のいずれでも設置することが可能であるが、貯蔵場所の限られた面積を有効に活用する観点では、縦置き状態で貯蔵することが効率的である。縦置き状態で貯蔵するキャスクは、横置き状態で貯蔵する場合と比較してキャスクの重心が高くなる。転倒防止対策としてキャスクのトラニオンを介して建屋に固定して保持する方式もあるが、取扱性を改良した保持方法として、輸送時にキャスクに設置する緩衝体を中間貯蔵施設でキャスクから取り外した後、当該箇所に専用に設計した保持プレートを取り付け、建屋に固定して保持する方法を考案した。本方式は、図 1(b)に示す通り、円形状の掘り込み部を設けた保持プレートを縦置き状態にしたキャスクの底部に嵌合させて、キャスクを保持（所謂、カップホルダ保持）するものである。本方式では、保持プレートは建屋のコンクリートに設置された埋め込み金物に基礎ボルトで固定される。

No.21-00053 [DOI: 10.1299/transjsme.21-00053]

^{*1} 三菱重工業(株) 原子力セグメント 機器設計部 (〒652-8585 兵庫県神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1)

^{*2} 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)

E-mail of corresponding author: toru.matsubara.4a@nu.mhi.com

本方式では、キャスクは保持プレートに溶接ではなく、嵌合で保持されるため、その嵌合部の隙間の範囲内で、キャスクは運動できる。そのため、地震時には、キャスクは保持プレートに嵌合した状態で揺動し、キャスクと保持プレート相互の摩擦や衝突によって地震のエネルギーを吸収しながら、キャスクを安定に保持する。その地震時のキャスク縦置き機能の健全性に関しては、揺動挙動を含めた検証が必要となる。揺動挙動の一つであるロッキングを扱った評価としては、正弦波加振でロッキングする矩形の2次元モデルを対象に、構造物のアスペクト比と地震波によってロッキング及び転倒の発生有無を整理したものが報告されている (Ishiyama, 1982)。また、変位、速度、加速度の地震時の過渡的な応答を考慮し、2次元挙動に着目した評価として、エネルギー累積評価手法の事例もある (秋山他, 1996, 中川他, 2008, 奥村他, 2010, 川口他, 2012)。

一方、本方式では、保持プレートとの隙間でキャスクのロッキング傾斜が制限され、ロッキング中に回転運動が生じるため、2次元モデルとは異なる3次元での応答挙動の検証が必要である。ここでは、縦置き状態のキャスクと保持プレートの地震時の3次元挙動を評価し、その保持機能の健全性を確認したので、報告する。

Fig. 1 Retention method of a cask by a retention plate. After removing shock absorbers from the cask in transport condition, the cask is installed vertically into the circular hollow of the retention plate.

2. 検討方針

保持プレートの機能要求、それを満足する保持プレートの設計方針、構造、仕様等を示した上で、時刻歴応答解析及び試験により、保持プレートに嵌合したキャスクの保持機能の健全性を確認する。

機器を保持部品で建屋に保持する方式としては、ボルトで固定する方式、ピン、キーで保持する方式、嵌合で保持する方式があり、それぞれの耐震健全性に係る評価項目を表1に示す。共に保持部品の強度と、保持部品と機器の離脱性が、機器の耐震性としての評価項目である。機器の保持部品に保持プレートを用いる本方式は、この内、機器を嵌合で保持する方式であり、ボルト、ピン、キー等の保持部品の評価と同様に、機器の耐震性としての評価項目は、保持部品である保持プレートの構造強度、及び保持プレートと機器が離脱しないことで構成される。

ここでは、保持プレートと機器が離脱しないことを、保持プレートに嵌合した状態のキャスクの時刻歴応答解析で確認する。また、保持プレート自体の構造強度は、キャスクから保持プレートに作用する最大荷重を解析することで確認する。その上で、本方式で製作した1/4スケールモデルの供試体を使った加振試験 (Aida et al., 2019) の試験結果により、キャスクと保持プレートに係る挙動と、耐震健全性に係る解析評価の妥当性を確認する。

Table 1 Retention methods of equipment to basement.

Retention method	Mechanical Evaluation	Architect Evaluation
1) Retention of an equipment by bolting to base plate of basement	<ul style="list-style-type: none"> Structural strength of bolts to keep contact of equipment with base plate 	<ul style="list-style-type: none"> Structural strength of base plate to keep contact of base plate with basement
2) Retention of an equipment by guide pins or keys on lug plate	<ul style="list-style-type: none"> Structural strength of pins or keys, and lug plate Keep contact equipment with lug plate 	<ul style="list-style-type: none"> Structural strength of base plate to keep contact of base plate with basement
3) Retention of an equipment by retention plate bolted to base plate of basement	<ul style="list-style-type: none"> Structural strength of retention plate and bolts to base plate Keep contact equipment with retention plate 	<ul style="list-style-type: none"> Structural strength of base plate to keep contact of base plate with basement

3. 保持プレートの設計

3・1 機能要求

地震時において、縦置き状態のキャスクの保持部品としての保持プレートに求められる機能要求は以下の通りである。

転倒防止： キャスクを所定の設置位置で保持する

衝撃緩衝： 地震時に床面から流入するエネルギーを散逸させる

3・2 構造, 仕様

機能要求を満足するように設計した保持プレートの形状, 仕様を図2に示す。保持プレートは、板状のベースにキャスクの底部を嵌めるための円形の掘り込み部を設けた形状で、そこにキャスクの底部を嵌めて、キャスクを保持する構造である。

本方式では、キャスク底部と保持プレートの掘り込み部の間には水平方向に隙間を設ける。隙間量が小さすぎると施工性が悪化し、またエネルギー減衰は期待できなくなる。逆に大きすぎると、キャスクの水平方向移動量が増え、保持プレートとの衝突荷重やキャスクの傾斜角が大きくなり、キャスクが損傷したり、転倒したりする問題が発生する。そのため、キャスク底部と保持プレートとの隙間量は、直径2210mmの保持プレート掘り込み部に対して、半径方向に2mmとし、また、嵌合の有効深さは220mmとした。このような保持プレートを用いると、キャスクが傾いた際に、キャスクの傾く方向と反対側でキャスクが掘り込み部に引っ掛かる。両者を剛体とした場合の理論上のキャスクの最大傾斜角は1.2°となる。

図3に示す通り、保持プレートに生じる荷重は、基礎ボルトを介して建屋躯体に伝わる。埋め込み金物より建物側は建築設計であり、キャスク、保持プレート及び基礎ボルトを機械設計として健全性を評価する。

Fig. 2 Retention plate. The plate has a circular hollow for the installation of the cask.

Fig. 3 Extent for the cask design. Parts above floor level are evaluated as a mechanical design.

4. キャスクの振動挙動分析

4・1 解析モデル

保持プレート上にあるキャスクの振動特性を確認するため、実機キャスクを模擬したモデルで時刻歴応答解析を実施した。キャスクの振動挙動は、キャスクと保持プレートの衝突という非線形性の強い現象が生じることから、これに対応する計算コードとしてLS-DYNAを用いた。数値積分法は動的陽解法を用い、時間増分 dt については、Courant 条件を満足するように設定した。解析モデルを図4に示す。キャスク及び保持プレートをソリッド要素でモデル化し、保持プレートは床面に保持された状態を、キャスクと保持プレート間は、ソリッド要素の表面に接触定義を設定することで、キャスクが保持プレートの上に置かれた状態を模擬している。要素数は約24000、節点数は約32000である。また、主な解析条件を表2に示す。

Fig. 4 Analysis model. Component parts were modelled with solid elements. Contact condition was defined between the cask and the retention plate.

Table 2 Analysis condition.

Parameter	Value
Friction coefficient	0.3
longitudinal elastic modulus	2.0×10^5 MPa
Poison ratio	0.3
Density (Retention plate, SF490A)	7.8 g/cm ³

4・2 入力地震波

フリースタANDING方法の使用済燃料ラックの実用化研究（岩崎他，2015）で加振試験に使用した地震波を使用した。これは、国内PWRプラントの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波で包絡する60秒の地震波であり、最大加速度は水平方向約11 m/s²、鉛直方向約7 m/s²である。入力地震波の床応答加速度スペクトルを図5に、時刻歴波形を図6(a)に示す。

Fig. 5 Floor response spectrum of seismic wave used in time history response analysis.

4・3 キャスク振動挙動

解析により得られたキャスク重心位置（図4参照）における時刻歴応答変位を図6(b)に示す。地震波の入りが含まれるほぼ全域の60秒間でキャスクが運動し続けるものの、キャスクが抜け出したり、転倒したりすることはなかった。キャスク重心位置における最大変位は、水平方向で約86 mm、鉛直方向で約38 mmであった。キャスクと保持プレートの寸法の関係から両者が剛体と仮定して、傾き得るキャスクの最大傾斜角1.2°となる重心位置変位の理論値は、それぞれ水平方向49 mm、鉛直方向22 mmであることから、キャスクが傾斜し保持プレート等の弾性変形が加わっただけ最大傾斜角より、さらに傾斜することが分かる。

この間のキャスクの運動は、主に図 7 に示す様な滑り挙動、ロックンク挙動、回転挙動の 3 つの振動挙動で構成される。図 7 には、それぞれの 3 つの振動挙動が主に発生している代表的な時刻を抽出し、キャスク重心位置の時刻歴応答変位、水平方向の軌跡を示している。それぞれの振動挙動の発生メカニズムは以下のとおり考察できる。

- ・ 滑り挙動（図 7(a)参照）については、キャスクが浮き上がらずに、保持プレートとキャスクの隙間内で水平方向にのみ変位が発生する現象であり、加振の最初等、加速度が小さくキャスクが運動し始めた段階に生じている。
- ・ ロックンク挙動（図 7(b)参照）については、キャスクの下部の変位が保持プレートの掘り込み部で制約を受けた状態で、キャスクの重心位置に水平方向の慣性力が作用することにより、キャスクが傾くように振動し、その結果キャスクの底部の片側が保持プレートから交互に浮き上がる現象が連続的に発生する。ロックンクの繰り返しによって、鉛直上方から見た運動方向が変化していくこともあるが、1 振幅毎に着目すれば二次元の運動と考えることができる。
- ・ 回転挙動（図 7(c)参照）については、ロックンク挙動でキャスクが保持プレートに接触した際に振動方向と直交する方向にも荷重が作用することにより、振動方向と垂直な方向にも運動し、その結果、保持プレートの掘り込み部に沿って、キャスクが回転する挙動である。ロックンク挙動と直交する方向に荷重が作用する要因としては、ロックンク挙動中に振動方向と垂直な方向に加振される、または、保持プレート掘り込み部の側面とキャスクの外表面が曲面であることから接触時に運動と垂直成分の反作用を受ける、等が考えられる。回転挙動については、回転時の運動エネルギーは摩擦以外に消失する要因がないため、回転が継続する傾向がある。なお、回転挙動中においても、キャスクの一部は常に保持プレートに接地しており、キャスクが完全に浮き上がることはなかった。

これらの 3 つの振動挙動は重畳して発生するが、保持プレートとの嵌合によってキャスクの傾斜角は制約されることから、その制約の範囲内でキャスクが運動する結果となった。本方式におけるキャスクの振動挙動は、保持プレートの隙間量で、最大傾き角を制限することができ、キャスクを保持できることを確認した。

4・4 保持プレート荷重

保持プレートに作用する荷重として、図 8 に示す通り保持プレートの掘り込み部側面の上半分の全節点における水平方向の作用荷重の絶対値を足し合わせた結果を図 6(c)に示す。ここで、キャスクが傾斜し保持プレートに接触した際に、保持プレートの上側面に荷重が作用すると考え、側面の上半分の全節点で評価した。保持プレートに発生する荷重は、図 6(c)から、 $2.0 \times 10^6 \text{ N}$ 程度の荷重がほぼ全時刻帯で断続的に発生し、瞬間的に $5.0 \times 10^6 \text{ N}$ 程度の大きな荷重が発生した。特に、9～10 秒付近で約 $9.0 \times 10^6 \text{ N}$ の最大荷重が発生した。この荷重は、図 6(b)から、ロックンク挙動によって生じたことが分かる。

また、キャスクと保持プレートの水平方向の相対速度（キャスク重心位置と保持プレートの相対速度の水平成分の絶対値）を図 6(d)に示す。ここでの相対速度は接触面の法線方向の速度のみではないため、水平方向の相対速度が大きくても、作用荷重が小さい場合もあるが、図 6(c)で作用荷重が最大となる時刻では、図 6(d)の相対速度も約 0.7 m/s 以上と高いことが確認でき、ロックンク挙動における作用荷重と衝突速度の間に相関があると推測できる。

更に、図 7(b)の軌跡図から、ロックンク挙動でキャスクが保持プレートに衝突した後、キャスクの運動方向が 180° 反転しており、衝突前の運動エネルギーが保持プレートのひずみエネルギーに変換されたと推定できる。一方で、図 7(c)の回転挙動では、運動エネルギーを持ってキャスクが側面に沿って回転し、接触面の法線方向に作用する荷重は遠心力のみであり、エネルギー減衰が少ないため、ロックンクに伴う荷重が保持プレートに直接作用していないと考えられる。

保持プレートに作用する荷重は、ロックンク挙動の様にキャスクが保持プレート掘り込み部の側面に直交する様に法線方向に衝突し、かつその際の衝突速度（キャスクと保持プレートの相対速度）が高いときに最大となることを確認した。

Fig. 6 Response of the cask in time history response analysis. The cask does not get out of the retention plate or fall down during an earthquake. Movement of the cask consists of three basic motions (refer to Fig.7), and the maximum horizontal force is observed in rocking motion.

Fig. 7 Basic motions of the cask are categorized into (a) slipping motion, (b) rocking motion, and (c) rotating motion. Horizontal trajectory in (b) shows that the cask rebounds at the side surface of the circular hollow in the retention plate and changes the direction of motion by the collision. Reaction force between the cask and the retention plate becomes the maximum at the time of the collision in rocking motion.

Fig. 8 Evaluation points for calculating reaction force to the retention plate. Applied force for all nodes which are in upper half of the side surface of the circular hollow are summed.

5. 保持プレートの強度

5・1 評価方針

保持プレートの強度評価として、保持プレートへの荷重が最も厳しくなる条件を確認した。

保持プレートは、その掘り込み部でキャスクを案内するため、図 9 に示す通り、キャスクがクリアランス内で移動している間は摩擦荷重が作用し、キャスクが保持プレートに接触（衝突）した際に最大荷重が発生する。4 章からも、キャスクが保持プレートに衝突する際に発生する荷重は、ロッキング挙動の様に、キャスクが保持プレート掘り込み部の側面に直交する様に法線方向に衝突する場合が最も大きい。

以上により、保持プレートの掘り込み部の側面にキャスクを衝突させる強度評価モデルにより、保持プレートに加わる最大荷重を評価した。

Fig. 9 Force is not applied to the cask while slipping in free standing condition. In the case of storage method with the retention plate, reaction force between the cask and the retention plate is applied at the collision.

5・2 評価モデル

(1) 解析モデル

衝突現象により生じる応力を評価するため、LS-DYNA を用いた。解析モデルは図 4 に示したものと同じく、キャスク、保持プレートで構成し、キャスク、保持プレート間は接触定義を設定し、弾性モデルとした。衝突時の局所的な応力を評価するため、キャスクと保持プレートが接触すると想定される部分は、4.1 節のモデルよりメッシュを細分化し、要素数は約 360000、節点数は約 400000 である。

(2) 解析条件

図 10 に示す通り、キャスクに初速を持たせて保持プレートの側面に衝突させた。4 章の時刻歴応答解析の結果ではキャスクの重心と保持プレートの水平方向の最大相対速度は 0.92 m/s であったことから（図 6(d)参照），ここでは、初速を 0.92 m/s とした。また、衝突初期のキャスクの傾斜角は、理論上の最大傾斜角として 1.2° を設定した。

Fig. 10 Analysis condition for strength evaluation of the retention plate. Initial velocity for the collisions is set based on the maximum relative velocity of the cask in time history response analysis, and initial tilt angle is set from the theoretical maximum tilt angle of the cask.

5・3 解析結果

本解析で得られた、衝突開始からの時刻に対するキャスクの傾斜角、及び保持プレートに作用する荷重の関係を図 11(a)に、各時刻における保持プレートの応力分布図を図 11(b)に示す。ここで、図 11(a)の作用荷重について

は、図 8 に示す通り、保持プレートの掘り込み部側面における上半分の全節点に作用するキャスクからの反力を合計したものである。

解析結果では、キャスクが傾いた状態で保持プレートに接触しているため、接触した時点（0.003 秒付近）で瞬間的に大きな作用荷重が発生し、その後は一度作用荷重が下がるものの、傾斜角の増加に伴って作用荷重が徐々に大きくなり、最大傾斜角となる約 2.0° で（0.12 秒付近）作用荷重が最も大きくなった。

接触開始時（0.003 秒付近）、及び最大傾斜時（0.12 秒付近）の応力分布図を図 12 に示す。図 11(a)からは、作用荷重は接触開始時の方が大きいものの、図 12(a)の応力分布図からは、接触開始時は保持プレートの中のキャスクが衝突する方向のみしか応力が発生しておらず、またその領域の面積が大きいことから支圧荷重が分散するため、保持プレートに発生する最大応力は最大傾斜時の方が大きい。

一方で、図 12(b)の最大傾斜時は、保持プレートのキャスクが倒れる側の掘り込み部側面の上方、及びその反対側の掘り込み部側面の中央高さ付近でキャスクと接触し、キャスクが傾き得る最大の傾斜状態で、保持プレートの両側で接触して支持されている状態であることが確認できた。このとき、保持プレートの掘り込み部側面はキャスクの底部 2 箇所によって相反する方向に荷重を受け、保持プレートの上面が開く方向に保持プレート全体が曲げ変形する。以上の結果より、保持プレートの強度評価は、最大傾き時の状態で評価することが適切である。

また、図 12(b)からは、最大荷重発生時に、キャスクと接触する部分で局所的に降伏応力を超えている部分（応力分布図中で白色で表示している部分）があるものの、主要強度部材では降伏応力以下であり、保持プレートが破断に対する構造健全性を維持できることを確認した。

(a) Tilt angle of the cask and reaction force to the retention plate

(b) Stress distribution of the retention plate

Fig. 11 (a) Reaction force from the cask to the retention plate increases with the raise of the tilt angle of the cask, and it reaches the maximum when the tilt angle become the maximum. (b) Stress distribution of the retention plate varies by the tilt angle of the cask. The cask contacts to the retention plate at both anterior and posterior portions of the cask, and stress distributes in both sides of the retention plate when the tilt angle of the cask become larger.

Fig. 12 Stress distribution of the retention plate (a) at the time of cask contact and (b) at the time of maximum cask tilt. Although contact point of the retention plate with the cask is one part which the cask incline toward in (a), contact points are at both sides of the cask in (b). Since the retention plate deforms as bending mode due to applied force at two contact points, the strength of the retention plate becomes severest in (b). In this condition applied stress to the most part of the retention plate is under yield stress, and the strength integrity of the retention plate is maintained.

6. 加振試験による妥当性確認

6・1 モデル試験

1/4 スケールモデルでの加振試験（Aida et al., 2019）を用い，4 章の時刻歴応答解析により評価した保持プレート上のキャスクの震動挙動を確認した．

(1) 試験装置

試験装置の外観を図 13(a)に示す．供試体は，1/4 スケールでモデル化したキャスク（ $\phi 540 \text{ mm} \times 1280 \text{ mm}$ ）と保持プレート（ $775 \text{ mm} \times 675 \text{ mm} \times 115 \text{ mm}$ ）で構成されており，キャスクと保持プレートの隙間量も 1/4 スケールの半径方向 0.5 mm で再現した．実機設計と同様に，保持プレートは床面である加振台に固定されており，保持プレート上の掘り込み部に嵌合させて，キャスクを設置した．

また，試験装置に設置した計測器の種類及び設置位置を図 13(b)に示す．保持プレートに対するキャスクの相対変位を確認するため，キャスクの周方向に 90° ピッチで 4 箇所，高さ方向 2 段の計 8 か所の水平方向のレーザー変位計，またキャスクの外周 4 箇所に鉛直方向のレーザー変位計を取り付けてキャスクの振動挙動を計測した．なお，水平方向のレーザー変位計のうち，上方に設置された取り付け位置は床面から 770 mm の高さである．また，キャスクと保持プレート間の接触時の作用荷重を計測するため，保持プレート掘り込み部の円周端部の上側の 44 箇所にひずみゲージを取り付けた．

各物理量のスケール比率を表 3 に示す．キャスクの振動挙動は，外力となる地震加速度の他に重力加速度にも依存すると考えられことから，加速度のスケール比が 1 となる様に，時間のスケール比を $1/2$ とした．

Table 3 Ratio of test model^{*1)} .

Quantity	Unit	Dimension	General ratio for scale model	
Length	[m]	L	1/n	1/4
Acceleration	[m/s ²]	LT ⁻²	1	1
Mass	[kg]	M	1/n ³	1/64
Time	[s]	T	1/n ^{0.5}	1/2
Inertia moment	[kg・m ²]	ML ²	1/n ⁵	1/1024 ^{*2)}
Load	[N]	MLT ⁻²	1/n ³	1/64

^{*1)} Quoted from “Development of transportable storage cask holder with high seismic resistance”

^{*2)} Actual ratio in Test Model is 1/1100.

Fig. 13 (a) Overview of 1/4 scaled seismic test model and (b) its measurement instruments. Motion of the cask and applied force to the retention plate can be observed by 12 displacement sensors around the cask and 44 strain gauges in the circular edge of the retention plate.

(2) 入力地震波

1/4 モデル試験では実際の地震波レベルの地震波を用いて試験を実施し、国内の加圧水型軽水炉の床応答加速度スペクトルを考慮して作成した人工地震波を使用した。最大加速度は水平方向で約 5 m/s^2 、鉛直方向約 3 m/s^2 であり、水平方向の X 軸、Y 軸には同一の波形を同位相で入力している。床応答加速度スペクトルを図 14 に、時刻歴波形を図 15(a)に示す。表 3 のスケール比率に則り、入力地震波は、実機設計を対象に作成した人工地震波を基に時刻歴地震波の加速度を等倍、時刻を 1/2 倍している。

Fig. 14 Floor response spectrum of seismic wave used in seismic test.

6・2 試験結果

(1) 振動挙動

試験により得られたキャスクの変位を図 15(b)に示す。ここで、水平方向変位は、上側 4 箇所のレーザー変位計の計測値を基に算出して同高さ（床面から 770 mm）におけるキャスク中心位置の水平方向変位に換算したもの、鉛直方向変位は、4 箇所のレーザー変位計の計測値を平均したものである。

図 15(b)からは、加振の初期の段階で滑り挙動が発生し、その後は、ロッキング挙動と回転挙動を繰り返し、保持プレートに対して相対的に運動するものの、保持プレートから抜け出したり、転倒したりすることなく、加振終了後も保持プレート上に留まった。ここで、回転挙動時の例として 20.4～21.8 秒における軌跡、及びロッキング挙動の例として 22.0～23.2 秒の軌跡をそれぞれ図 16(a)、図 16(b)に示す。回転挙動は保持プレートの掘り込み部に沿って円形に運動するのに対して、ロッキング挙動は直線的な運動で保持プレートの掘り込み部に跳ね返って方向を反転させていることが確認できる。

(2) 作用荷重

保持プレート掘り込み部の円周端部上側のひずみを図 15(c)に示す。ここでは、全周方向 44 箇所の計測値の絶対値の中で各時刻において最大値となるもの（キャスクが衝突する際は圧縮ひずみとなるため計測されたひずみ値を絶対値で示している）を示している。図 15(c)からは、保持プレートのひずみが、ほぼ全時刻帯において 200μ 以下程度である中に瞬間的に 800μ 以上の大きな値を示すことが確認できる。最大ひずみが発生している 22.6 秒付近においては、ロッキング挙動で振動するキャスクが保持プレートに衝突したタイミングと一致しており、図 16(b)から、そのタイミングではキャスクが保持プレートの側面に直交する様に法線方向に衝突したと考えられる。

さらに、キャスクと保持プレートの水平方向相対速度の絶対値を図 15(d)に示す。図 15(c)で 800μ 以上の高いひずみ値が発生している付近では、キャスクと保持プレートの相対速度も 0.4 m/s 以上の比較的高い速度であった。

6・3 保持プレートの設計の妥当性

加振試験によって、4 章で得られた保持プレートで保持したキャスクの振動挙動を確認し、キャスクが保持プレートで保持できることを確認した。

- ・ 地震時に本方式で保持したキャスクは、滑り挙動、ロッキング挙動、回転挙動の 3 つの振動挙動を示す。
- ・ キャスクと保持プレートの隙間で、キャスクの揺動は制約され、キャスクが保持プレートで保持される。
- ・ キャスクの振動変位は加振入力波や直前のキャスクの運動によって左右され、不確定性が大きいと推測されるものの、保持プレートに作用する荷重については、ロッキングしたキャスクが保持プレート掘り込み部の側面に直交する様に法線方向に衝突する荷重が最大になる。

(a) Seismic wave

(b) Displacement of the cask

(c) Strain of the retention plate

(d) Relative velocity of the cask

Fig. 15 Response of the cask in the seismic test. The cask does not get out of the retention plate or fall down during an earthquake. The cask motion and strain showed a similar trend with the results of time history response analysis. (refer to Fig.6).

Fig. 16 Examples of horizontal trajectory of the cask in (a) rotating motion and (b) rocking motion. The cask moves on a circular orbit along the side wall of the circular hollow in the retention plate in rotating motion. In contrast, the cask moves straight and rebounds at the side wall of the circular hollow in the retention plate in rocking motion. Maximum strain is observed at the collision in rocking motion.

7. 結 言

本論文では、縦置き状態のキャスクを保持プレートで保持する方法の妥当性を評価し、以下の結論を得た。

- (1) 保持プレートと嵌合したキャスクは、地震時に、滑り、ロックング、回転が複合した挙動で運動する。
- (2) 保持プレートの荷重は、ロックングしたキャスクが掘り込み部に法線方向で衝突する際に最大となる。
- (3) 保持プレートと嵌合したキャスクは、大地震レベルでの時刻歴応答解析において、嵌合を維持する。
- (4) 保持プレートと嵌合したキャスクは、1/4 スケールの加振試験においても、嵌合を維持した。
- (5) 保持プレートは、大地震レベルにおいて、キャスクの保持機能を維持する。

文 献

- Aida, K., Iwasaki, A., Saito, Y., Ogasa, M., Matsubara, T. and Tamaki, H., Development of transportable storage cask holder with high seismic resistance, Proceedings of the 19th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (2019).
- 秋山宏, 伊山潤, 原田幸博, エネルギースペクトルを用いた剛体の転倒予測, 日本建築学会構造系論文集, No. 488 (1996), pp. 49-55
- Ishiyama, Y., Criteria for overturning of bodies by earthquake excitations, 日本建築学会論文報告集, No.317 (1982).
- 岩崎晃久, 猫本善統, 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), DOI: 10.1299/transjsme.15-00153.
- 川口昇平, 白井孝治, 金澤健司, 搬送中の貯蔵架台付き金属キャスクの長周期地震動に対する地震時安定性評価, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 68, No. 2 (2012), pp. 271-286.
- 中川正紀, 上野学, 清水仁, 飯島唯司, エネルギー累積評価に基づく地震時ロックング転倒応答の評価, 日本原子力学会 2008 年春の年会 (2008), L58.
- 奥村和恵, 鈴木智, 清水仁, 福山満由美, 丸山直伴, 貯蔵架台付き金属キャスクの地震による転倒評価手法の設計適用性, 日本原子力学会 2010 年秋の大会 (2010), K39.

References

- Aida, K., Iwasaki, A., Saito, Y., Ogasa, M., Matsubara, T. and Tamaki, H., Development of transportable storage cask holder with high seismic resistance, Proceedings of the 19th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (2019).
- Akiyama, H., Iyama, J. and Harada, Y., Estimation of overturning of rigid bodies with Energy spectrum, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), No. 488 (1966), pp. 49-55 (in Japanese).
- Ishiyama, Y., Criteria for overturning of bodies by earthquake excitations, Transactions of the Architectural Institute of Japan, No. 317 (1982) (in Japanese).
- Iwasaki, A., Nekomoto, Y., Morita, H., Taniguchi, K., Okuno, D., Matsuoka, T. and Chigusa, N., Practical research of free standing rack (Seismic experiment study on full scale free standing rack), Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 81, No. 831 (2015), DOI: 10.1299/transjsme.15-00153.
- Kawaguchi, S., Shirai, T. and Kanazawa, K., Stability evaluation of metal cask attached to a transfer pallet during long-period seismic motions, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), Vol. 68, No. 2 (2012), pp. 271-286 (in Japanese).
- Nakagawa, M., Ueno, M., Shimizu, M. and Iijima, T., Evaluation of overturning of rigid body with input energy under seismic excitation, Atomic Energy Society of Japan, 2008 Annual Meeting (2008), L58 (in Japanese).
- Okumura, K., Suzuki, S., Shimizu, M., Fukuyama, M. and Maruyama, N., Applicability of tipping-over evaluation for a seismic design of metal cask with storage pallet, Atomic Energy Society of Japan, 2010 Fall Meeting (2010), K39 (in Japanese).