

貯蔵建屋の耐震重要度分類の整理について

1. 耐震重要度分類の整理

貯蔵建屋は設置許可基準規則の別記 2 を踏まえ、以下に示す理由により耐震重要度分類を C クラスに分類しており、妥当である。

- ・ 設置許可基準規則の別記 2 において、B クラスの項目には除外規定も含め「放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で、その破損により、公衆及び従事者に過大な放射線被ばくを与える可能性のある施設」、「放射性物質の放出を伴うような場合に、その外部放散を抑制するための施設で、S クラスに属さない施設」と記載されている。また、C クラスは「S クラスに属する施設及び B クラスに属する施設以外の一般産業施設又は公共施設と同等の安全性が要求される施設をいう。」とされている。
- ・ 貯蔵建屋は、設置許可基準規則の別記 4 に記載のとおり乾式キャスクは閉じ込め機能を担保する部位は外力に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えることとなっており、放射性物質の外部放散を抑制するための機能（閉じ込め機能）を貯蔵建屋に求めておらず、その機能を有しない。よって、「放射性物質の放出を伴うような場合に、その外部放散を抑制するための施設で、S クラスに属さない施設」には該当しない。
- ・ 耐震重要度分類の設定においては、「耐震設計に係る工認審査ガイド」に「JEAG4601[※]の規定を参考に耐震設計上の重要度分類を適用していること」とされており、設置許可基準規則の別記 2 と JEAG4601 の耐震重要度分類は同等の内容が記載されているため、JEAG4601 が適用可能となっている。JEAG4601 には C クラスの対象設備として「放射性物質を内蔵しているか、又はこれに関連した施設で S クラス、B クラスに属さない施設」が示されている。

※ JEAG4601 : 「原子力発電所 耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG4601・補 - 1984」

なお、破損による影響を定量的に示す観点から、参考として次項にその確認結果を示す。

2. 影響確認について

2.1 確認方法

貯蔵建屋の破損による公衆に与える放射線の影響確認のため、年間を通して貯蔵建屋がない状態を想定した場合であっても、敷地等境界評価点での線量が周辺監視区域外における線量限度である 1 mSv/y を下回ることを確認する。

確認方法としては、設置許可基準規則第 29 条で示す平常時における敷地等境界における線量評価結果より、貯蔵建屋がない場合の結果を算出する。

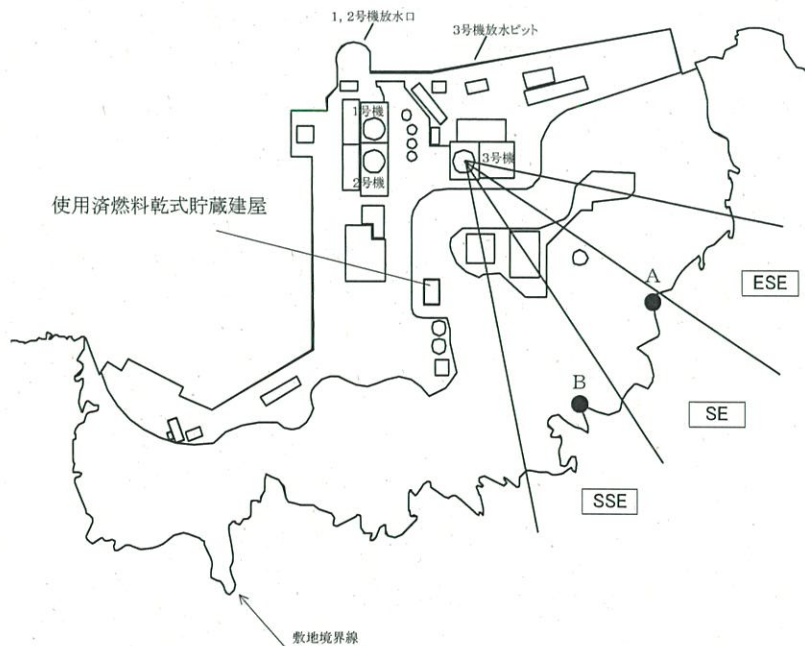
2.2 確認結果

表 1 に確認結果を示す。表 1 に示すとおり年間を通して貯蔵建屋がない状態を想定した場合であっても、線量限度である 1 mSv/y を下回っており、Cクラスに分類することは妥当である。

表 1 貯蔵建屋がない場合の敷地等境界の線量まとめ

保管物名	貯蔵建屋がない場合の線量 ($\mu \text{ Sv/y}$)
乾式キャスク (45 基)	約 190 [※]

※伊方発電所敷地境界での評価地点のうち、乾式貯蔵施設からの最短地点（下図 B 点）における既設建屋の線量 ($3.9 \mu \text{ Sv/y}$) との合算。



定置方法変更時点までにお示しした
旧定置方法の使用済燃料乾式貯蔵容器及び
貯蔵架台の耐震評価について
(説明途上の内容を含む)

目次

1. 概要
 2. 基本方針
 - 2.1 構造の説明
 - 2.2 評価方針
 3. 耐震評価箇所
 - 3.1 乾式キャスクの耐震評価箇所
 - 3.2 貯蔵架台の耐震評価箇所
 4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析
 - 4.1 評価条件
 - 4.2 設計用地震力
 - 4.3 評価手法及び諸元
 - 4.4 地震応答解析結果
 5. 乾式キャスクの応力評価
 - 5.1 評価方法
 - 5.2 荷重の組合せ及び許容応力
 - 5.3 使用材料の許容応力
 6. 貯蔵架台の応力評価
 - 6.1 評価方法
 - 6.2 荷重の組合せ及び許容応力
 - 6.3 使用材料の許容応力
 7. 乾式キャスクの転倒評価
 - 7.1 評価方法
 - 7.2 許容限界
 8. 評価結果
 - 8.1 乾式キャスクの評価結果
 - 8.2 貯蔵架台の評価結果
 - 8.3 乾式キャスクの転倒評価結果
- 別紙 1 乾式キャスク底部と貯蔵架台の嵌め合い部の隙間設定及び深さ設定の考え方について
- 別紙 2 加振試験による耐震評価式の構築・検証について
- 別紙 3 乾式キャスク及び貯蔵架台の耐震安全性評価に関する妥当性

1. 概要

使用済燃料乾式貯蔵容器（以下「乾式キャスク」という。）の定置方法として、乾式キャスクを基礎に固定する方法、基礎に固定しない方法及び非剛結方法がある。

本資料では、このうち非剛結方法で貯蔵する場合の耐震評価の考え方を説明する。

耐震評価は、以下に示す規格及びガイドに従い応力評価にて行い、乾式キャスク及び貯蔵架台に発生する応力が許容値以下となることを確認する。また、地震時に貯蔵架台の乾式キャスクに対する支持機能が失われることなく、乾式キャスクが傾く時の角度（以下「傾き角」という。）が転倒する角度（以下「転倒角」という。）に至らないことを確認する。

- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG 4601-1987) (日本電気協会 1987年8月)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG 4601-1991 追補版) (日本電気協会 1991年12月)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針重要度分類・許容応力編(JEAG 4601・補-1984) (日本電気協会 1984年9月)
- ・ 発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2012年版) (JSME S NC1-2012) (日本機械学会 2012年12月)
- ・ 発電用原子力設備規格 材料規格(2012年版) (JSME S NJ1-2012) (日本機械学会 2012年12月)
- ・ 使用済燃料貯蔵施設規格・金属キャスク構造規格(2007年版) (JSME S FA1-2007) (日本機械学会 2007年12月)
- ・ 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド (原子力規制委員会 2019年3月)

2. 基本方針

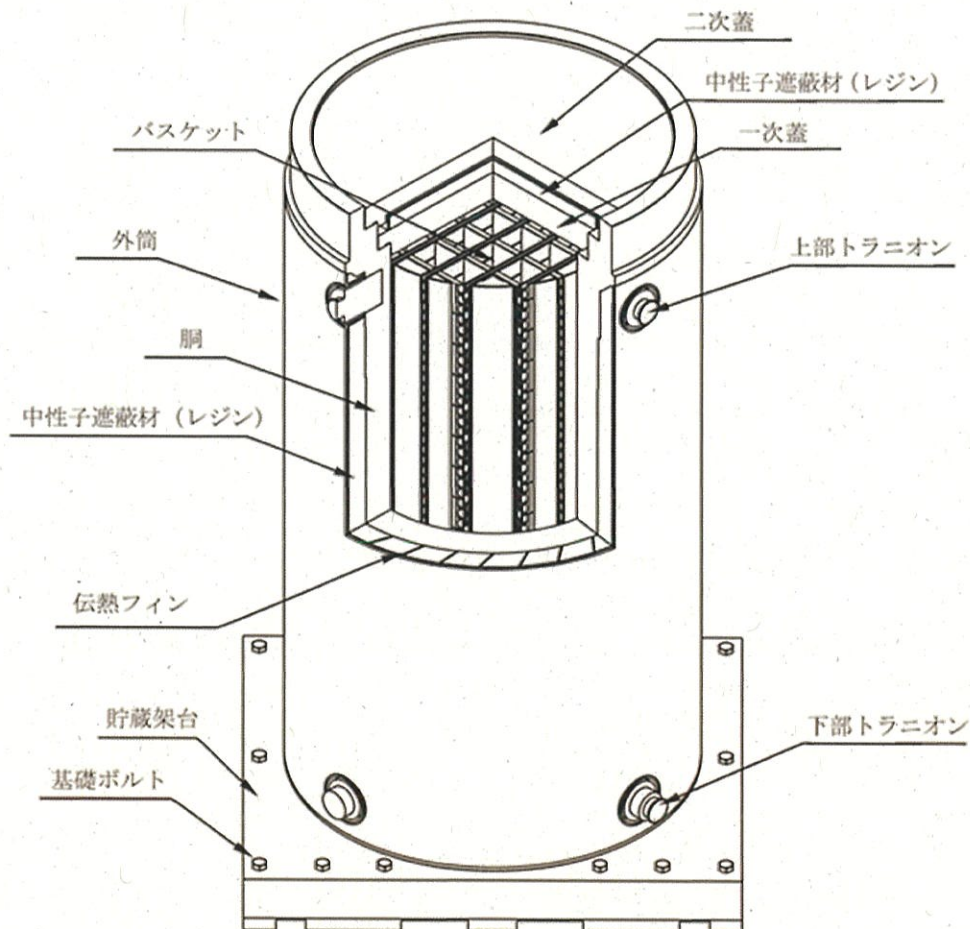
2.1 構造の説明

非剛結方法の乾式キャスクは、基礎に固定した貯蔵架台に設置することで、横滑りを制限する方法としている。これは第2-1表に示すとおり、乾式キャスクを基礎等に固定する場合としない場合の有利な点を兼ね備えた定置方法であるためである。

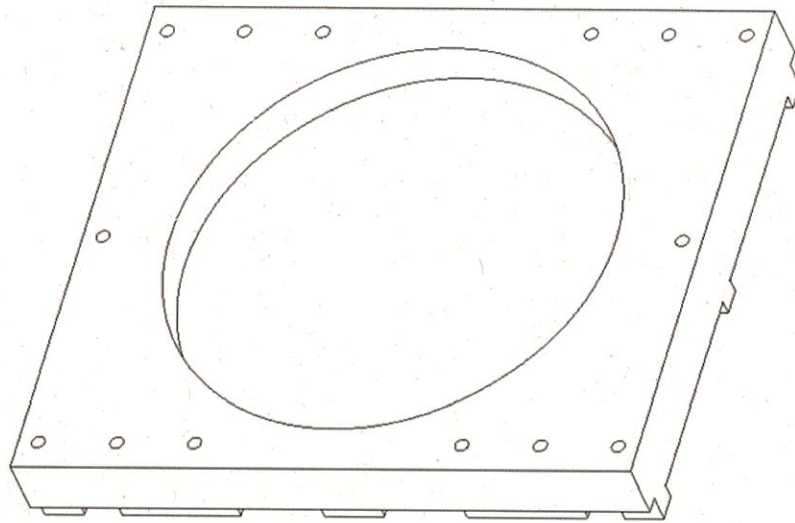
非剛結方法の乾式キャスクの構造を第2-1図に、貯蔵架台の構造を第2-2図に、貯蔵時の寸法を第2-3図に示す。また、乾式キャスクと貯蔵架台の隙間の寸法は製造公差等を考慮しても \square (ノミナル値) 以下となるよう設定している。隙間設定の考え方について「別紙1 乾式キャスク底部と貯蔵架台の嵌め合い部の隙間設定及び深さ設定の考え方について」に示す。

乾式キャスク及び貯蔵架台は、基準地震動 S_s による地震力に対してその安全機能が損なわれるおそれがないように、以下の構造としている。

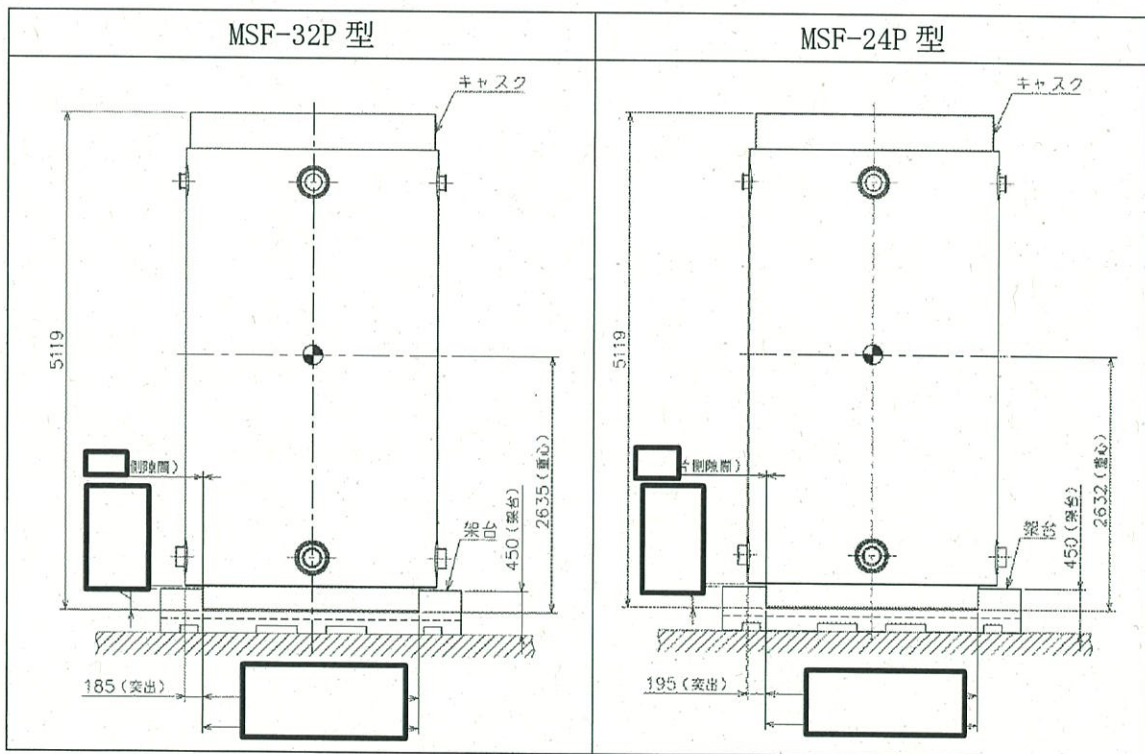
- ・貯蔵架台に乾式キャスク底部と嵌め合う凹部を設けることで、固定せず乾式キャスクが転倒しない構造とする。
- ・貯蔵架台は、使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下「貯蔵建屋」という。）床面に埋め込まれた支持金物に対して、基礎ボルトで固定される構造とする。



第2-1図 乾式キャスクの構造

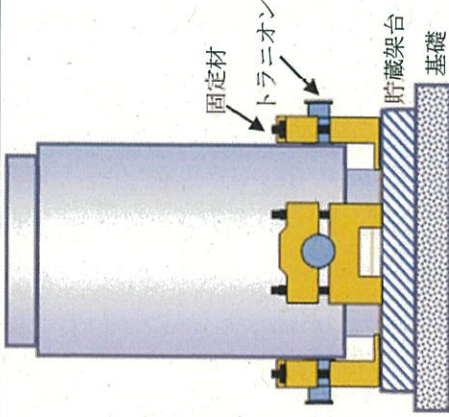
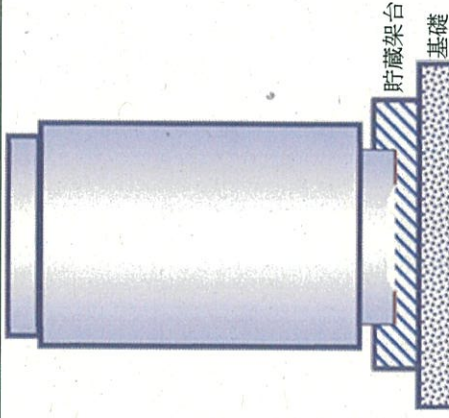
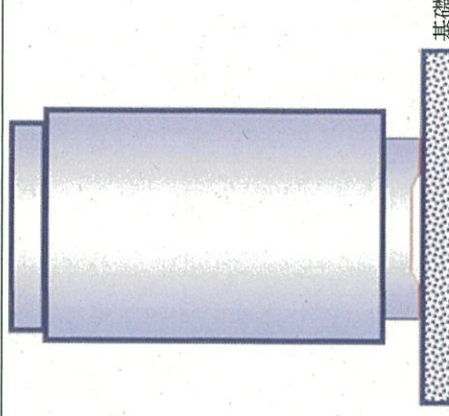


第2-2図 貯蔵架台の構造



第2-3図 乾式キャスク貯蔵時の寸法

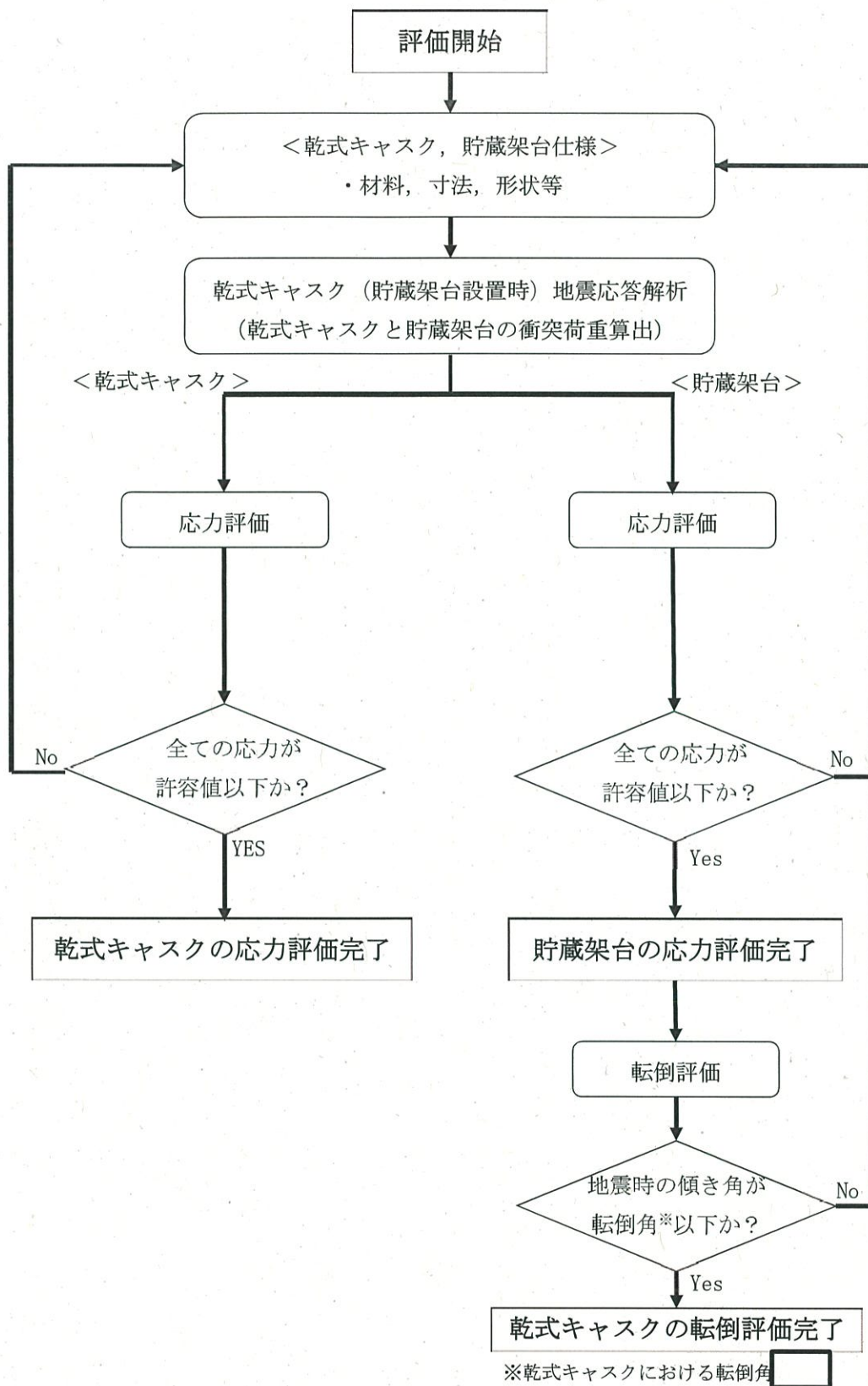
第2-1表 乾式キヤスクの定置方法の比較

	固定する場合	非剛結方法	固定しない場合
評価項目			
管理	固定材の固縛力の管理を考慮する必要がある。	固定材がないため、固縛力の管理を必要としない。	固定作業がないため、固定式に比べ被ばく量は少ない。
被ばく量	乾式キヤスクと貯蔵架台との連結や解除作業時の固定材取付・取外及び基礎への固定を行うため、他の方法に比べ被ばくへの配慮が必要。	貯蔵架台と基礎の固定作業が必要だが、固定材の脱着が必要ないため、固定式に比べ被ばく量は少ない。	固定作業がないため、固定式に比べ被ばく量は少ない。
支持構造物	地震荷重が固定材に集中する。	乾式キヤスクと貯蔵架台との摩擦等により、地震力が減衰し、貯蔵架台に大きな荷重は発生しない。	-
乾式キヤスク地震荷重作用部	乾式キヤスクに作用する地震荷重がトラニオン等の作用部に集中する。	乾式キヤスクに作用する地震荷重が貯蔵架台との摩擦等により減衰した上で、作用部に作用する。	乾式キヤスクに作用する地震荷重が、摩擦等により減衰した上で、作用部に作用する
乾式キヤスク鉛直	浮き上がらないため荷重はほとんど発生しない。	貯蔵架台により浮き上がりが制限されており、大きな荷重は発生しない。	浮き上がりが制限されていないため、大きな荷重が発生するおそれがある。
乾式キヤスク水平	移動しないため荷重はほとんど発生しない。	貯蔵架台により移動量が制限されており、大きな荷重は発生しない。	周辺施設との相互影響により、大きな荷重が発生するおそれがある。
相互影響	貯蔵架台により位置固定されており、隣接する乾式キヤスク周辺施設等との相互影響はない。	貯蔵架台により位置固定されており、隣接する乾式キヤスクや周辺施設等との相互影響はない。	貯蔵架台による位置固定（移動制限）がないため、隣接する乾式キヤスクや周辺施設等との相互影響が発生するおそれがある。

□：他の定置方法に比べ有利な項目

2.2 評価方針

乾式キャスク及び貯蔵架台の応力評価は、「2.1 構造の説明」にて示す乾式キャスク及び貯蔵架台の構造を踏まえ「3. 耐震評価箇所」にて設定する箇所において、「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」で算定した荷重による応力等が許容限界内に収まることを、「5. 乾式キャスクの応力評価」、「6. 貯蔵架台の応力評価」及び「7. 乾式キャスクの転倒評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「8. 評価結果」に示す。乾式キャスク及び貯蔵架台の耐震評価フローを第2-4図に示す。



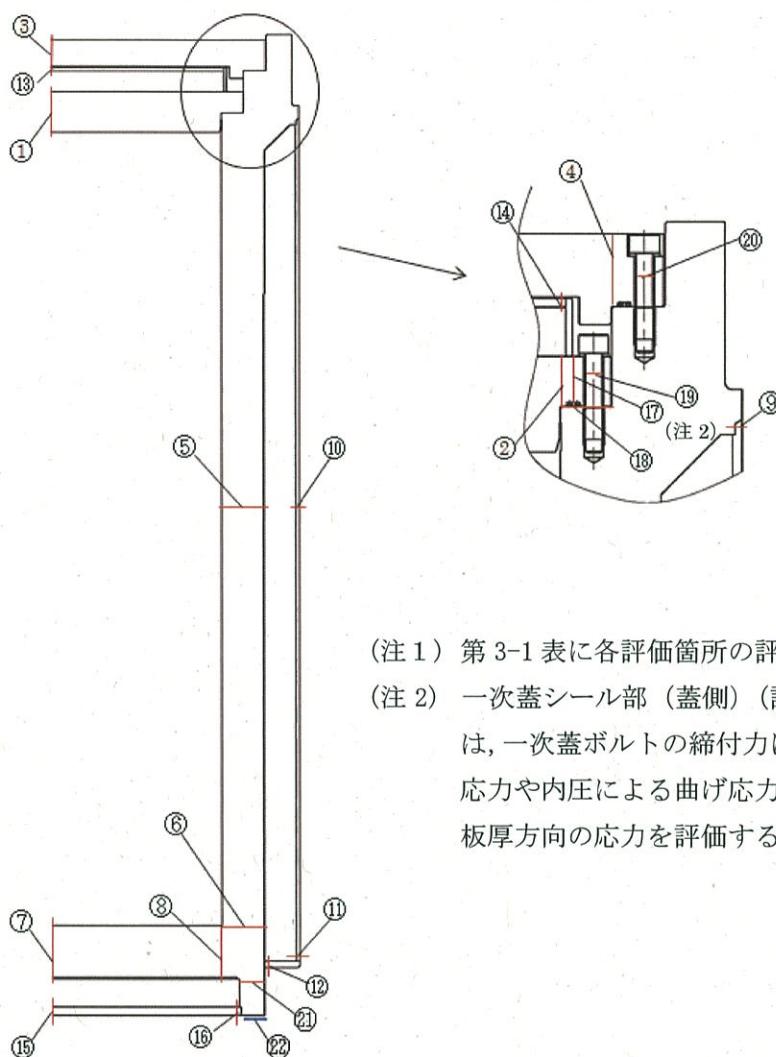
第2-4図 乾式キャスク及び貯蔵架台の耐震評価フロー

3. 耐震評価箇所

3.1 乾式キャスクの耐震評価箇所

乾式キャスクの耐震評価箇所を第3-1図に示す。

評価箇所については、貯蔵時の乾式キャスクの安全機能を維持する観点で、貯蔵時の応力発生箇所を考慮して、選定している。



(注1) 第3-1表に各評価箇所の評価内容等を示す。

(注2) 一次蓋シール部（蓋側）（評価位置⑰）⑰の評価は、一次蓋ボルトの締付力による板厚方向の圧縮応力や内圧による曲げ応力が支配的となるため、板厚方向の応力を評価する。

第3-1図 乾式キャスクの耐震評価箇所

第3-1表 乾式キヤスクの耐震評価箇所及び評価内容 (1/2)

耐震評価箇所		評価内容
①	一次蓋	地震時に構造健全性を維持し，除熱，遮蔽，閉じ込め機能を維持できることを評価
②		
③	二次蓋	地震時に構造健全性を維持し，除熱，遮蔽機能を維持できることを評価
④		
⑤	胴	地震時に構造健全性を維持し，除熱，遮蔽，閉じ込め機能を維持できることを評価
⑥		
⑦		
⑧		
⑨	外筒	地震時に構造健全性を維持し，除熱，遮蔽機能を維持できることを評価
⑩		
⑪		
⑫	下部端板	地震時に構造健全性を維持し，遮蔽機能を維持できることを評価

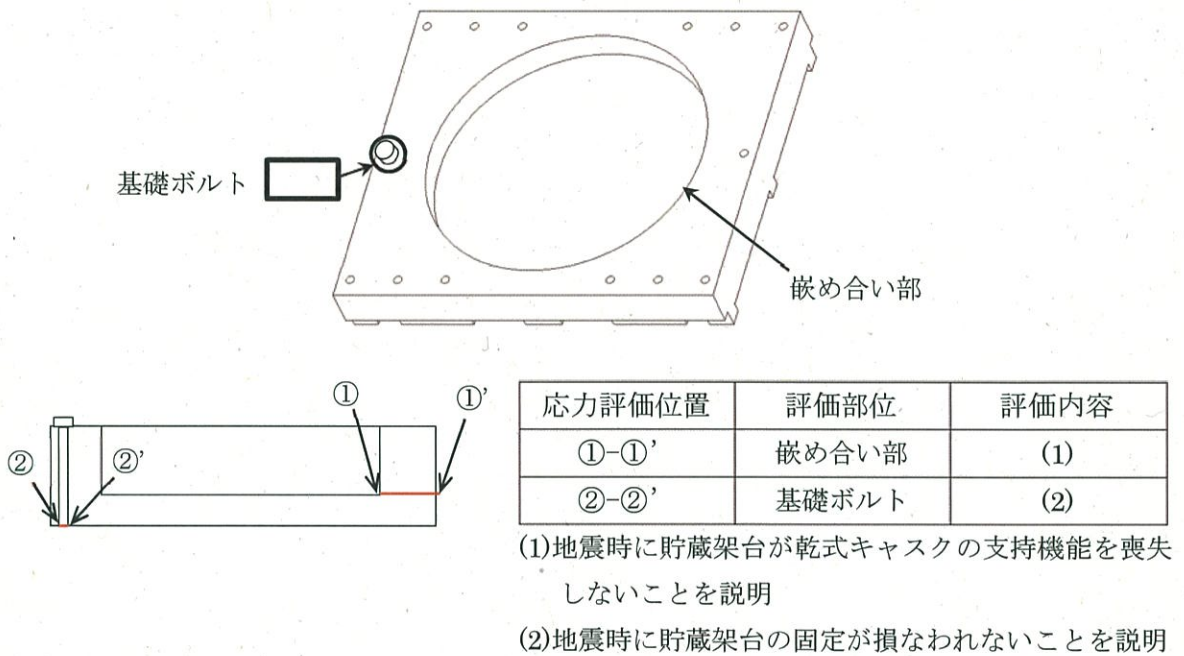
第3-1表 乾式キヤスクの応力評価位置, 評価部位及び評価内容 (2/2)

耐震評価箇所		評価内容
⑬	蓋部中性子遮蔽材カバー	地震時に構造健全性を維持し, 遮蔽機能を維持できることを評価
⑭		
⑮	底部中性子遮蔽材カバー	地震時に構造健全性を維持し, 遮蔽機能を維持できることを評価
⑯		
⑰	一次蓋シール部 (蓋側)	地震時に構造健全性を維持し, 閉じ込め機能を維持できることを評価
⑱	一次蓋シール部 (胴側)	
⑲	一次蓋ボルト	地震時に構造健全性を維持し, 閉じ込め機能を維持できることを評価
⑳	二次蓋ボルト	地震時に構造健全性を維持できることを評価
㉑	胴 (脚部)	地震時に構造健全性を維持できることを評価
㉒		
—	バスケット	地震時に構造健全性を維持し, 除熱, 未臨界機能を維持できることを評価
—	伝熱フィン	地震時に構造健全性を維持し, 除熱機能を維持できることを評価

3.2 貯蔵架台の耐震評価箇所

貯蔵架台の耐震評価箇所を第3-2図に示す。

貯蔵架台は、乾式キャスクが地震力に対して転倒するおそれがないように嵌め合い部の支持機能が維持される必要がある。そのため、貯蔵架台の嵌め合い部のうち、地震時に比較的大きな応力が発生すると想定される嵌め合い部根元部を評価断面として選定した。



第 3-2 図 貯蔵架台の耐震評価箇所

4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析

4.1 評価条件

- (1) 地震時に貯蔵架台に設置した乾式キャスクに発生する挙動を第 4-1 図に示す。これらの挙動のうち、浮き上がり挙動は地震による鉛直方向の加速度が 1G を超える場合に発生するが、今回乾式キャスクを設置する地点の鉛直方向加速度は 1G を超えないため、滑り、回転、傾き、及びそれぞれの挙動を組合せた挙動が発生する。

これらの挙動のうち、傾き挙動は、ある一方向（径方向）へ乾式キャスクが傾く挙動であり、乾式キャスクの運動エネルギーが、ある一方向へ集中し貯蔵架台と衝突する。そのため、乾式キャスクの運動エネルギーの全てが荷重として、乾式キャスクおよび貯蔵架台に生じる。

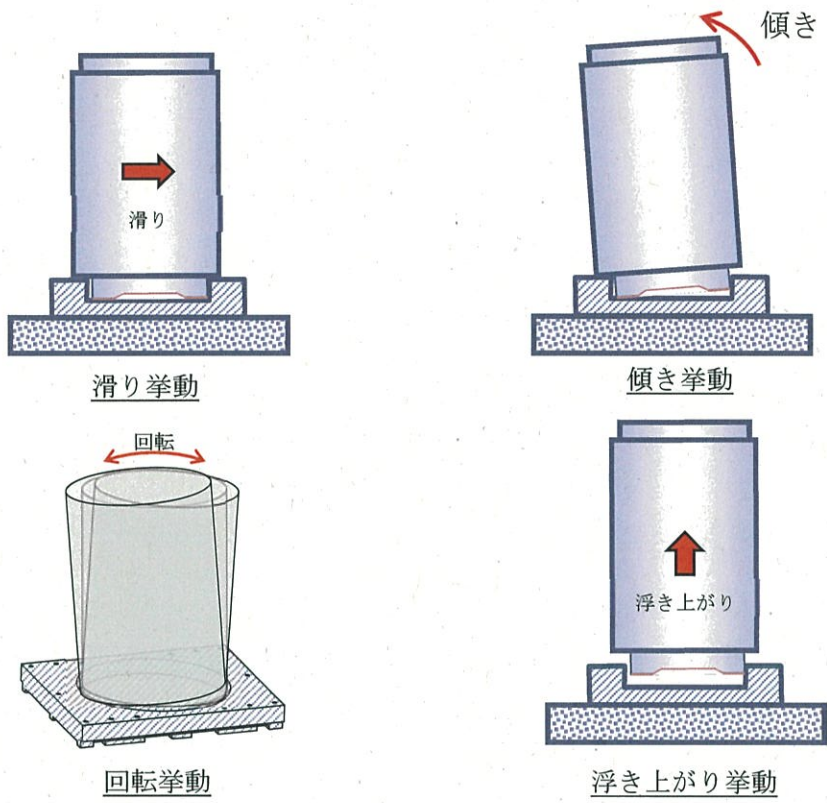
滑り挙動は、貯蔵架台と乾式キャスク底面との摩擦力を介して地震力が乾式キャスクに伝播して発生するものであり、乾式キャスクの運動エネルギーは減衰するため、傾き挙動に比べて荷重は小さくなる。

回転挙動は、貯蔵架台に沿って乾式キャスクが回転する運動であり、乾式キャスクの運動エネルギーは回転エネルギーとして消散されるため、乾式キャスクおよび貯蔵架台に発生する荷重は傾き挙動に比べて小さくなる。

以上より、乾式キャスクの挙動のうち、乾式キャスクおよび貯蔵架台へ最も厳しい荷重が生じる傾き挙動時の応答を手計算及び 3 次元 FEM 解析を用いて解く。

なお、地震応答解析に用いる手計算の耐震評価式は、乾式キャスクの加振試験の結果を考慮し、実機に比べて保守的な荷重が算出されるよう構築している。「別紙 2 加振試験による耐震評価式の構築・検証について」に加振試験による検討内容を示す。

- (2) 手計算では、傾き挙動におけるエネルギーのつり合い及びモーメントのつり合いから、乾式キャスクと貯蔵架台が衝突した時の荷重をエネルギー保存則により算出する。なお、評価に用いるエネルギー保存則は既往の工事計画にて、キャスク落下時の衝突荷重の算出に適用している実績のある手法である。
- (3) 解析コードは ABAQUS (Ver. 6.12-3) を使用する。なお、評価に用いる解析コード ABAQUS (Ver. 6.12-3) は平成 28 年 3 月 23 日付け原規規発第 1603231 号にて認可された工事計画で実績のある解析コードである。
- (4) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。



第 4-1 図 地震時における乾式キャスクの挙動

4.2 設計用地震力

乾式キャスク及び貯蔵架台の耐震計算に用いる入力地震力は、乾式キャスクの設置場所における最大床応答加速度を2割増しした値(1.2ZPA)[※]を用いる。

本資料に示す耐震評価では、暫定的にEL. 21mにおける地震波による床応答加速度を用いる。耐震評価に用いる設計用地震力を第4-1表に示す。

乾式キャスクは今回評価に用いている地盤上の基礎に設置されるものであり、建屋構造による増幅は小さい見込みである。

第4-1表 設計用地震力

地震動	設置場所 (m)	備考
基準地震動Ss-1	乾式貯蔵建屋設置地盤 EL. 21.0	水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せを考慮した評価を行う。

※1.2ZPAの適用については、JEAG4601の考え方に準拠したものである。

具体的にはJEAG4601-1987「6.5.1 床応答スペクトル」において、運動方程式((6.5.1-1)式)により床応答スペクトルを算出すると記載されているが、この運動方程式には、床応答加速度の時刻歴を入力することとなっている。

エネルギー保存則を用いた今回の乾式キャスク及び貯蔵架台の評価では、床応答スペクトルの算出と同様に、運動方程式に床応答加速度の時刻歴波を入力すれば良いところ、その最大値であるZPAを、剛構造物の強度評価に対する考え方を踏まえ2割増しした1.2ZPAを入力し、評価に必要なエネルギー量を算出している。

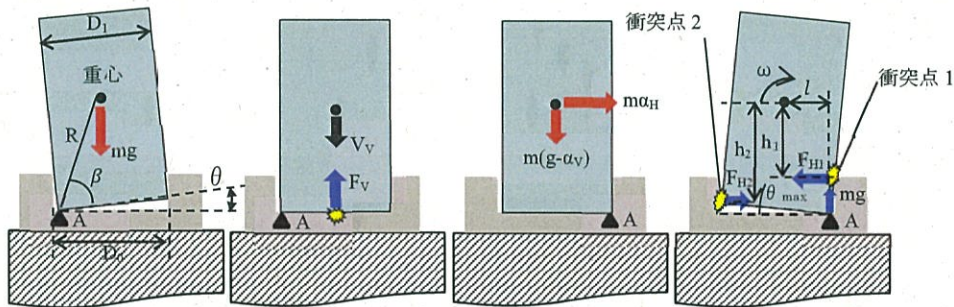
4.3 評価手法及び諸元

乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析では、第4-2図に示す傾き挙動における衝突荷重を算出する。傾き支点であるA点は、傾き挙動の進展により時々刻々移動する。このA点及び乾式キャスクと貯蔵架台の接触箇所には、動摩擦力が発生し、運動エネルギーが消費されるが、本評価では、保守的にこの運動エネルギーの消費を無視する。

評価手法及び諸元を以下に示す。

- (1) 鉛直方向の応答荷重は、乾式キャスクが貯蔵架台嵌め合い部底面に衝突した時の貯蔵架台の変位をエネルギーのつり合い((1)式)から算出し、その変位を(2)式に代入することで算出される。なお、衝突後も傾き挙動が継続することから、運動エネルギーの鉛直成分が貯蔵架台との衝突で消費され、水平成分が傾き挙動の継続に使われると仮定する。
- (2) 水平方向の応答荷重は、乾式キャスクが貯蔵架台嵌め合い部の二側面と接触した時の変位をエネルギーのつり合い((3)式)及びモーメントのつり合い((4)式)の連立方程式から算出し、その変位を(5)式に代入することで算出される。

なお、衝突時の角速度 ω は地震による水平加速度 α_H 及び鉛直加速度 α_V を考慮して設定する。



第4-2図 傾き挙動の1サイクル

$$\frac{1}{2}mV_V^2 = \frac{1}{2}k_V x_V^2 \quad (1)$$

$$F_V = k_V x_V \quad (2)$$

$$\frac{1}{2}I_A \omega^2 = \frac{1}{2}k_1 x_1^2 + \frac{1}{2}k_2 x_2^2 + mgR(\sin(\theta_{max} + \beta) - \sin(\theta_0 + \beta)) \quad (3)$$

$$h_1 k_1 x_1 = h_2 k_2 x_2 + mgl \quad (4)$$

$$F_{H1} = k_1 x_1, F_{H2} = k_2 x_2 \quad (5)$$

ここで、

m : 乾式キャスク質量 (kg)

V_V : 貯蔵架台嵌め合い部底面との衝突直前の乾式キャスクの鉛直方向速度 (m/s)

k_V : 3次元FEM解析モデルより求めた貯蔵架台の鉛直剛性 (6.7×10^{10} N/m)

x_V : 貯蔵架台の鉛直変位 (m)

F_V : 鉛直方向の応答荷重 (N)

F_{H1} : 衝突点1の水平方向の応答荷重 (N)

F_{H2} : 衝突点2の水平方向の応答荷重 (N)

I_A : A点まわりの慣性モーメント ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

ω : 貯蔵架台嵌め合い部二側面との衝突直前の乾式キャスクの角速度 (rad/s)

k_1, k_2 : 3次元FEM解析モデルより求めた衝突点1及び2の水平剛性 ($k_1 = 9.6 \times 10^9$ N/m, $k_2 = 1.7 \times 10^{10}$ N/m)

x_1, x_2 : 衝突点1及び2の水平変位 (m)

h_1, h_2 : 衝突点1及び2と重心との鉛直距離 (m)

R : A点と重心位置との距離 (m)

l : A点と重心位置との水平距離 (m)

g : 重力加速度 (9.80665m/s^2)

このうち、乾式貯蔵キャスクの貯蔵架台嵌め合い部底面との衝突直前の乾式キャスクの鉛直方向速度 V_V と貯蔵架台嵌め合い部二側面との衝突直前の乾式キャスクの角速度 ω の算出過程を以下に示す。

a. 貯蔵架台嵌め合い部底面との衝突直前の乾式キャスクの鉛直方向速度 V_V

乾式キャスク重心に重力が作用することで、乾式キャスク底面が貯蔵架台嵌め合い部底面に衝突する直前の乾式キャスクの鉛直方向速度 V_V を算出する。

(以下で、 $t, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ の添え字0は初期状態である幾何学的な3点支持を、添え字1は底面衝突直前を意味する)

この時のA点回りの回転の運動方程式は、以下の通りである。

$$I_A \cdot \ddot{\theta} = -mgR \cdot \cos(\beta + \theta) \quad (6)$$

I_A は乾式キャスクの質量及び幾何形状から一義的に定まる。
これより、角加速度

$$\ddot{\theta}_0 = -\frac{m \cdot R}{I_A} g \cdot \cos(\beta + \theta_0) \quad (7)$$

を、角速度の初期値がゼロ、角度の初期値が θ_0 であることを考慮し時間積分し、底面衝突時の関係

$$\frac{1}{2} \ddot{\theta}_0 t_1^2 + \theta_0 = 0 \quad (8)$$

から、底面衝突までの時間 t_1 が得られる。

$$t_1 = \sqrt{\frac{2\theta_0}{(-\ddot{\theta}_0)}} \quad (9)$$

したがって、底面衝突時の角速度 $\dot{\theta}_1$ は、

$$\dot{\theta}_1 = \ddot{\theta}_0 \cdot t_1 = -\sqrt{2(-\ddot{\theta}_0) \cdot \theta_0} \quad (10)$$

であり、以下の通り、乾式キャスクの鉛直方向速度を得る。

$$V_V = R \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \cos\beta \quad (11)$$

なお、角度 θ_0 は傾き挙動による回転角であり、乾式キャスクと貯蔵架台嵌め合い部の幾何学的な関係を示す次式から定まる。

$$D_0 = d \cdot \tan\theta_0 + D_1 \cdot \cos\theta_0 \quad (12)$$

ここで、

D_0 : 貯蔵架台嵌め合い部の内径 (m)

D_1 : 乾式キャスク底部の外径 (m)

d : 貯蔵架台嵌め合い部の高さ (m)

b. 貯蔵架台嵌め合い部二側面との衝突直前の乾式キャスクの角速度 ω

乾式キャスク底面が貯蔵架台嵌め合い部底面に衝突後、A点を回転中心として重心が持ち上がる方向に回転する。この時、地震による水平方向加速度、鉛直方向加速度を回転が促進される方向に常に作用すると仮定し、貯蔵架台嵌め合い部二側面との衝突直前の乾式キャスクの角速度 ω を算出する。

(以下で、 t , θ , $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$ の添え字0は初期状態である幾何学的な3点支持を、添え字1は底面衝突直前を、添え字2は底面衝突直後を、添え字3は二側面との衝突直前を意味する。)

この時の、A点回りの回転の運動方程式は、以下の通りである。

$$I_A \cdot \ddot{\theta} = -m(g - \alpha_V)R \cdot \cos(\beta + \theta) + m\alpha_H R \sin(\beta + \theta) \quad (13)$$

ここで,

α_H : 地震の水平加速度 (m/s²)

α_V : 地震の鉛直加速度 (m/s²)

これより, 角加速度 $\ddot{\theta}_3$ は

$$\ddot{\theta}_3 = \frac{m \cdot R}{I_A} (-(g - \alpha_V) \cdot \cos(\beta + \theta_0) + \alpha_H \cdot \sin(\beta + \theta_0)) \quad (14)$$

となる。

角加速度 $\ddot{\theta}_3$ について, 角速度の初期値が $\dot{\theta}_2$, 角度の初期値がゼロであることを考慮し時間積分した以下の二側面との衝突直前の関係

$$\frac{1}{2} \ddot{\theta}_3 t_3^2 + \dot{\theta}_2 t_3 = \theta_0 \quad (15)$$

から, 底面衝突から二側面との衝突までの時間 t_3 が得られる。二側面との衝突の角速度 $\omega (= \dot{\theta}_3)$ は, t_3 を $\omega = \ddot{\theta}_3 t_3 + \dot{\theta}_2$ に代入することで,

$$\omega = \sqrt{\dot{\theta}_2^2 + 2\ddot{\theta}_3 \cdot \theta_0} \quad (16)$$

なお, 底面衝突直後の角速度 $\dot{\theta}_2$ については, エネルギー保存則より, 底面衝突前の乾式キャスク重心の水平方向速度

$$V_H = R \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \sin\beta \quad (17)$$

による乾式キャスクの運動エネルギーが, 底面衝突直後の A 点回りの回転エネルギーに移行していると仮定し, 以下の関係より得ることができる

$$\frac{1}{2} I_A \cdot \dot{\theta}_2^2 = \frac{1}{2} m \cdot V_H^2 \quad (18)$$

4.4 地震応答解析結果

「4.3 評価手法及び諸元」に基づき算出した乾式キャスク及び貯蔵架台に作用する地震応答荷重を第4-2表に示す。

第4-2表 乾式キャスク及び貯蔵架台に作用する荷重

荷重の種類		荷重 (N)
鉛直方向荷重 (F_v)		2.0×10^7
水平方向荷重	乾式キャスクの傾き方向側 (F_{H1})	2.6×10^7
	乾式キャスクの傾き方向と逆側 (F_{H2})	2.4×10^7

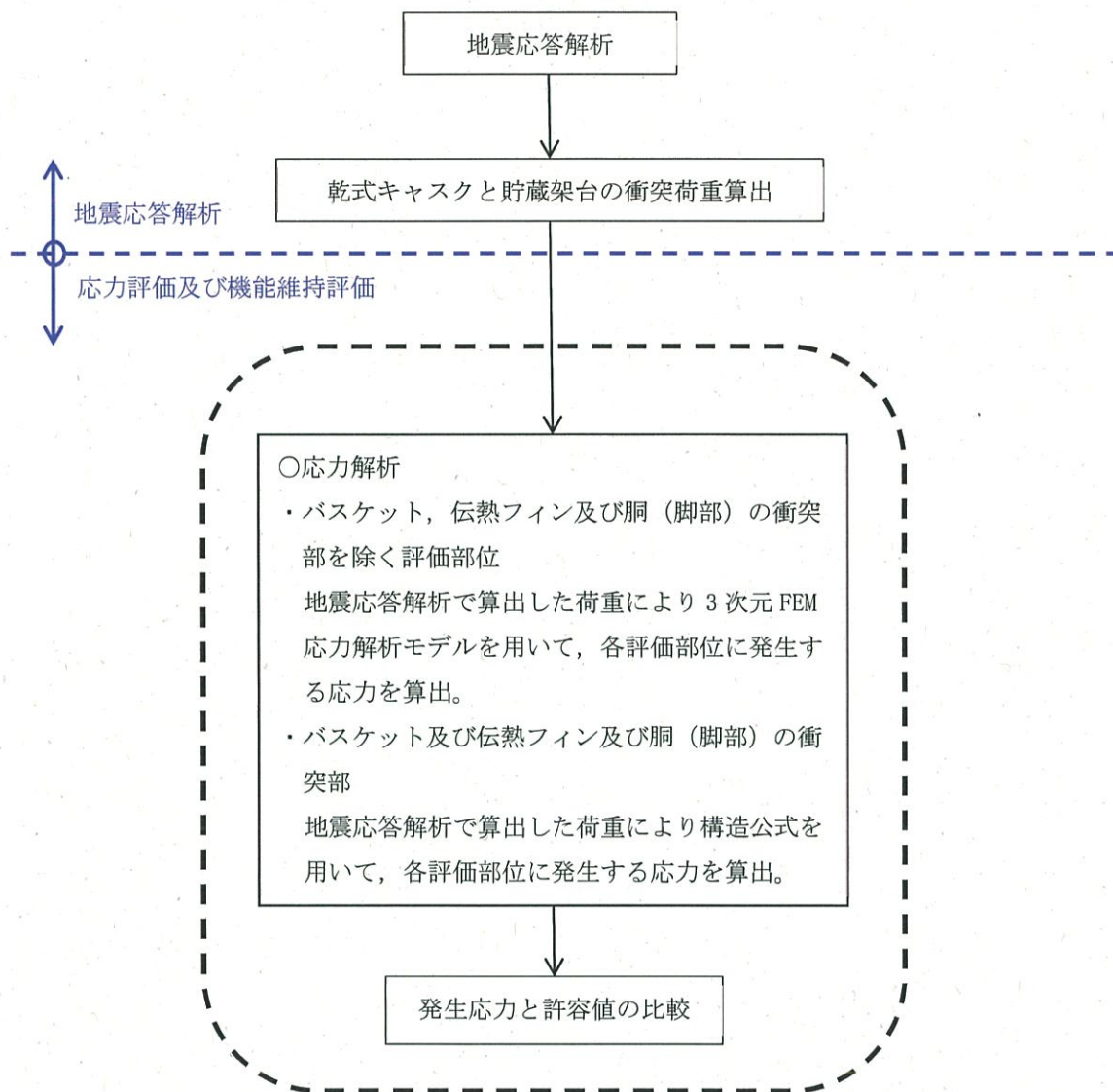
5. 乾式キャスクの応力評価

5.1 評価方法

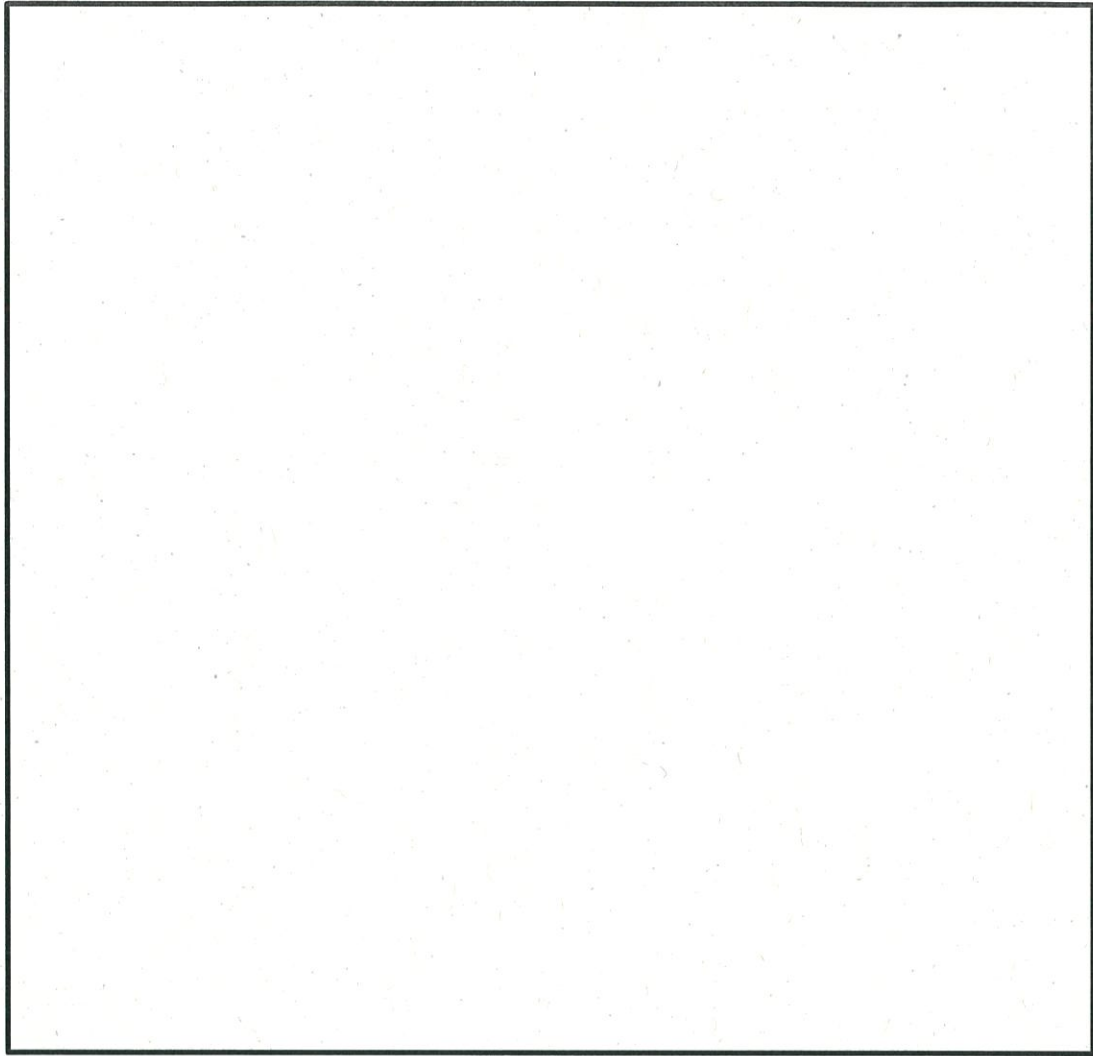
乾式キャスクは、「3.1 乾式キャスクの耐震評価箇所」に示す安全機能を維持するための部位について、第 5-1 図の乾式キャスクの応力評価フローに基づいて傾き衝突時及び底面衝突時の応力評価を行う。

バスケット、伝熱フィン及び胴（脚部）の衝突部を除く箇所に発生する応力は、第 5-2 図に示す 3 次元 FEM 応力解析モデルに「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」で算出した荷重を入力し求める。また、乾式キャスクと貯蔵架台の嵌め合い部を境界条件として考慮する。また、胴、一次蓋、二次蓋、一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトについては発生する応力を基に疲労評価を行う。

バスケット、伝熱フィン及び胴（脚部）の衝突部の発生応力は、「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」で算出した荷重より、構造公式を用いて求める。応力算出式を a. ～e. に示す。なお、評価にあたっては、嵌め合い部の発生応力が大きい MSF-32P 型を代表として示す。



第5-1図 乾式キャスクの応力評価フロー



第 5-2 図 乾式キャスク応力評価用 3 次元 FEM モデル

a. バスケットプレートの圧縮応力の算出式

底面衝突時において、最下段のバスケットプレート（第 5-3 図参照）には、それより上部にあるバスケットプレート等の自重及び鉛直方向の慣性力が作用し、圧縮による膜応力

σ_c (MPa)が生じる。

$$\sigma_c = \frac{W_b \times G_v}{A_1} \quad (1)$$

ここで、

W_b : バスケットプレート、バスケットサポート、中性子吸収材の合計質量 (kg)

G_v : 自重及び鉛直方向の加速度 (m/s^2)

(第 4-2 表に示す鉛直方向荷重(F_v)を乾式キャスク質量で除して算出)

A_1 : バスケットプレートと胴の接触面積 (mm^2)

バスケットプレートと胴の接触面積 A_1 は、以下の式で与えられる。計算に用いた寸法を第 5-3 図に示す。

$$A_1 = (b_1 - b_2) \times L_1 \times n \quad (2)$$

ここで、

b_1 : バスケットプレート幅 1 (mm)

b_2 : バスケットプレート幅 2 (mm)

L_1 : バスケットプレート長さ (mm)

n : 胴に接触するバスケットプレート L_1 部の個数 (-)

b. バスケットプレート縦板の圧縮応力の算出式

傾き衝突時において、バスケットプレート縦板切欠部には、第 5-4 図に示すように、領域 I の範囲にあるバスケットプレート、バスケットサポート及び燃料集合体に生じる水平方向の慣性力並びに、領域 II のバスケットプレートに生じる水平方向の慣性力により、圧縮による膜応力 σ_c (MPa)が生じる。

$$\sigma_c = \frac{W_I + W_{II}}{A \times N} G_H \quad (3)$$

ここで、

W_I : 領域 I のバスケットプレート、中性子吸収材、バスケットサポート及び燃料集合体の質量 (kg)

W_{II} : 領域 II のバスケットプレート及び中性子吸収材の質量 (kg)

G_H : 水平方向の加速度 (m/s^2)

(第 4-2 表に示す水平方向荷重(F_{H1} と F_{H2} の差分)を乾式キャスク質量で除して算出)

N : バスケットプレート縦板の数 (枚)

A : バスケットプレート縦板の断面積 (mm^2)

バスケットプレート縦板の断面積Aは、以下の式で与えられる。計算に用いた寸法を第5-5図に示す。

$$A = (b_1 + b_2 \times 2) \times h_1 - (b_3 + b_4 \times 2) \times h_2 \quad (4)$$

ここで、

- b_1 : バスケットプレート縦板の幅 1 (mm)
- b_2 : バスケットプレート縦板の幅 2 (mm)
- h_1 : バスケットプレート縦板の高さ 1 (mm)
- b_3 : バスケットプレート縦板の幅 3 (mm)
- b_4 : バスケットプレート縦板の幅 4 (mm)
- h_2 : バスケットプレート縦板の高さ 2 (mm)

c. バスケットプレート横板の曲げ応力及びせん断応力の算出式

傾き衝突時において、バスケットプレート横板切欠部には、第5-6図に示すようにバスケットプレート、中性子吸収材及び燃料集合体に生じる慣性力により曲げ応力 σ_b 及びせん断応力 τ が生じる。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (6)$$

ここで、

- M : 曲げモーメント (N・mm)
- Z : バスケットプレート横板の断面係数 (mm³)
- F : せん断荷重 (N)
- A : バスケットプレート横板の断面積 (mm²)

曲げモーメントMは、以下の式で与えられる。

$$M = \frac{w \times \ell^2}{12} G_H \quad (7)$$

ここで、

- w : 分布荷重 (kg/mm)
- ℓ : バスケットセルの内幅 (mm)
- G_H : 水平方向の加速度 (m/s²)

分布荷重wは、以下の式で与えられる。

$$w = \frac{W_f + W_b \times N}{\ell \times N} \quad (8)$$

ここで、

- W_f : 燃料集合体の質量 (kg)
- W_b : バスケットプレート及び中性子吸収材の質量 (kg)

N : バスケットプレート横板の数 (段)

断面係数Zは、以下の式で与えられる。計算に用いた寸法を第5-7図に示す。

$$Z = \frac{h_1^3 \times b_1 - h_2^3 \times (b_2 + b_3 \times 2)}{6h_1} \quad (9)$$

ここで、

h_1 : バスケットプレート横板の高さ1 (mm)

b_1 : バスケットプレート横板の幅1 (mm)

b_2 : バスケットプレート横板の幅2 (mm)

h_2 : バスケットプレート横板の高さ2 (mm)

b_3 : バスケットプレート横板の幅3 (mm)

断面積Aは、以下の式で与えられる。計算に用いた寸法を5-7図に示す。

$$A = b_1 \times h_1 - h_2 \times (b_2 + b_3 \times 2) \quad (10)$$

せん断荷重Fは、以下の式で与えられる。

$$F = \frac{w \times l}{2} G_H \quad (11)$$

d. 伝熱フィンのせん断応力の算出式

底面衝突時において、伝熱フィン溶接部には、伝熱フィン及び中性子遮蔽材に生じる慣性力によりせん断応力 τ が生じる。なお、第5-8図に示すとおり、伝熱フィン溶接部は伝熱フィンに対して両側に隅肉溶接を施すが、保守側の評価として伝熱フィン溶接部のど部の面積は片側の隅肉のみを考慮して評価する。

$$\tau = \frac{(W_1 + W_2)G_v}{A} \quad (12)$$

ここで、

τ : せん断応力 (MPa)

W_1 : 伝熱フィンの軸方向単位長さ当たり重量 (kg/mm)

W_2 : 中性子遮蔽材の軸方向単位長さ当たり重量 (kg/mm)

G_v : 鉛直方向の加速度 (m/s²)

A : フィン溶接部のど部の軸方向単位長さ当たりの面積 (mm²/mm)

e. 胴 (脚部) の圧縮応力の算出式

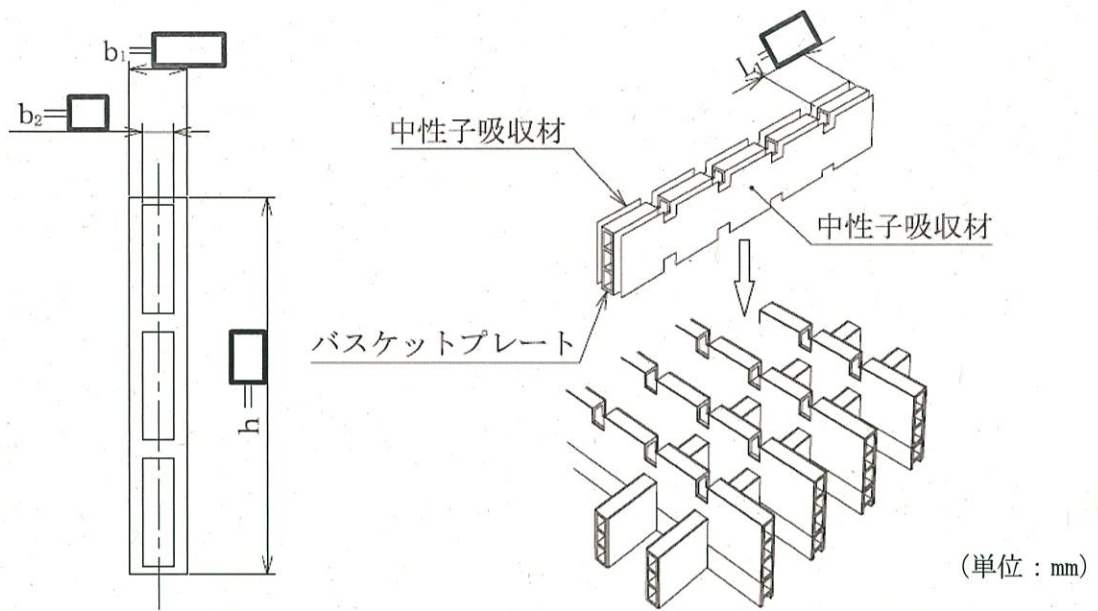
底面衝突時において、胴 (脚部) には、乾式キャスクの慣性力が作用し、衝突部近傍に圧縮応力 σ_c が生じる。

$$\sigma_c = \frac{F_v}{A_c} \quad (13)$$

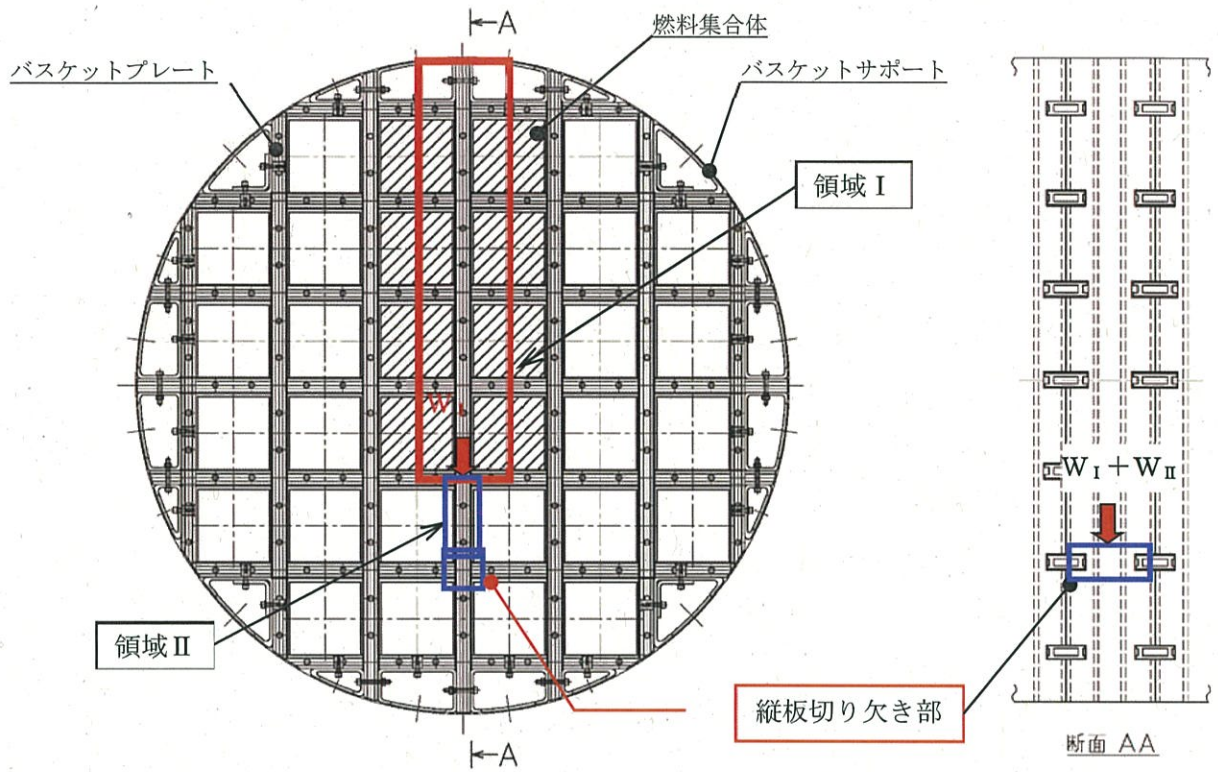
ここで、

F_v : 乾式キャスクに作用する鉛直方向荷重 (N)

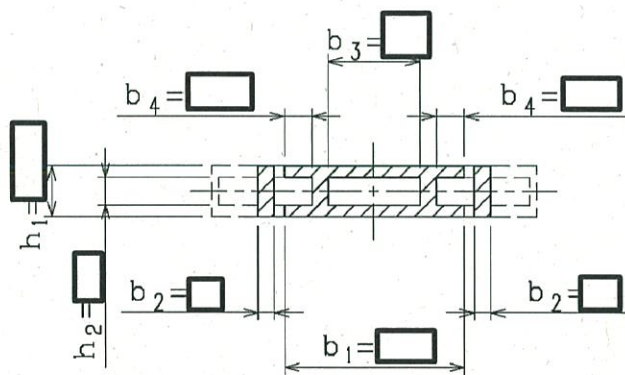
A_c : 胴 (脚部) の断面積 (mm²)



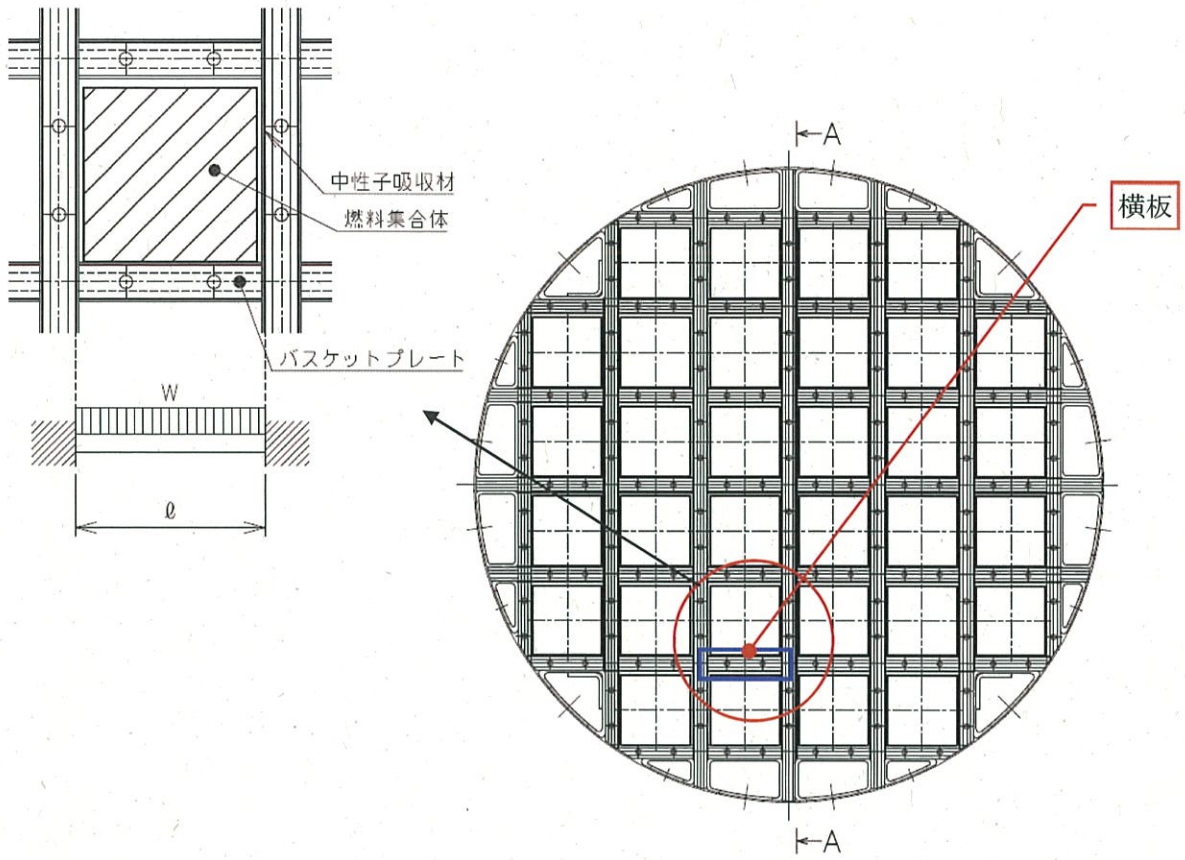
第 5-3 図 バスケットプレートのモデル図



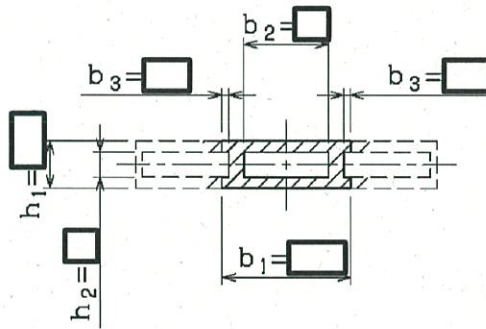
第 5-4 図 バスケットプレート縦板のモデル図



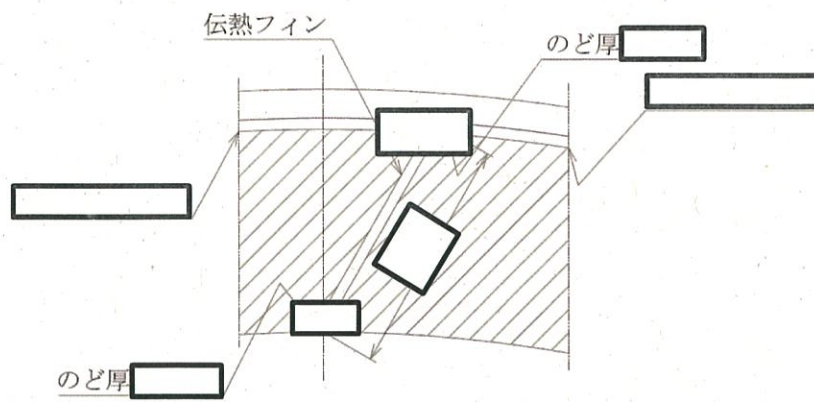
第 5-5 図 バスケットプレート縦板の断面



第5-6図 バスケットプレート横板のモデル図



第5-7図 バスケットプレート横板の断面



第5-8図 伝熱フィン溶接部のモデル図

5.2 荷重の組合せ及び許容応力

乾式キャスクにおいて、密封容器構成部材における評価部位の許容応力は、許容応力状態Ⅲ_AS及びⅣ_ASの許容限界（「原子力発電所耐震設計技術指針」，「発電用原子力設備規格設計・建設規格(2012年版)」及び「発電用原子力設備規格材料規格(2012年版)」を基に設定）を適用する。

一方、密封容器を構成しない部材における評価部位の許容応力は、「原子力発電所耐震設計技術指針」，「発電用原子力設備規格設計・建設規格(2012年版)」，「発電用原子力設備規格・材料規格(2012年版)」及び「使用済燃料貯蔵施設規格・金属キャスク構造規格(2007年版)」等を基に設定した許容限界を適用する。

密封容器構成部材における荷重の組合せ及び許容応力状態を第5-1に示す。また、許容応力を第5-2表に示す。

第5-1表 乾式キャスクにおける荷重の組合せ及び許容応力状態

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵設備	乾式キャスク	S	クラス3容器 ^(注1)	D+P+M+Ss	Ⅳ _A S ^(注2)

(注1) 密封容器構成部材（胴，一次蓋，一次蓋ボルト，胴（脚部））が該当。

(注2) 密封境界部に係る評価部位の許容応力は，審査ガイドに従いおおむね弾性範囲内となる許容限界とする必要があることから，許容応力状態Ⅲ_ASにおける一次一般膜応力の許容限界を適用する。

第5-2表 乾式キャスクの許容応力^(注1)

許容応力 状態	許 容 限 界 ^(注4)			
	一次一般膜応力	一次膜応力+ 一次曲げ応力	一次+二次応力	一次+二次+ ピーク応力
III _A S	S _y と2/3S _u の小さい方。 ただし、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については1.2S _m とする。	左欄の ^(注2) α倍の値	3S _m ^(注3)	^(注4) ^(注5) S _d 又はS _s 地震動のみによる疲労解析を行い、運転状態Ⅰ、Ⅱにおける疲労累積係数との和を1.0以下とする。
IV _A S	2/3S _u ただし、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については2/3S _u と2.4S _m の小さい方。	左欄の ^(注2) α倍の値	S _d 又はS _s 地震動のみによる応力振幅について評価する。	

(注1) 地震時に乾式キャスクの安全機能が維持される見通しを確認するために、金属キャスク構造規格 (JSME S FA1) に準じて設定する。また、一部の許容応力については、金属キャスク構造規格 (JSME S FA1) に基づき設定する。

(注2) αは純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は1.5のいずれか小さい方の値とする。

(注3) 3S_mを超える場合は弾塑性解析を行う。この場合、JSME S NC1-2012 PVB-3300 (同PVB-3313を除く) の簡易弾塑性解析を用いる。

(注4) JSME S NC1-2012 PVB-3140(6)を満たすときは、疲労解析を行うことを要しない。ただし、「応力の全振幅」は「S_d又はS_s地震動による応力の全振幅」と読み替える。

(注5) 運転状態Ⅰ、Ⅱにおいて疲労解析を要しない場合は、地震動のみによる疲労累積係数が1.0以下とする。

5.3 使用材料の許容応力

乾式キャスクの応力解析に用いる各部位の使用材料の許容応力を第5-3表に示す。

第5-3表 使用材料の許容応力

材 料	温度条件 (°C)		S _m (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	評価部位
GLF1	設計 ^(注1) 温度	115	124	185	377	一次蓋
						一次蓋シール部 (蓋側)
GLF1		105	124	186	377	二次蓋
GLF1		140	122	183	377	胴
GLF1		150	122	183	377	胴 (底板)
						胴 (脚部)
GLF1		120	124	185	377	一次蓋シール部 (胴側)
SGV480		135	155	233	426	外筒
SGV480		110	158	237	429	蓋部中性子遮蔽材 カバー
SUS304		130	137	159	429	下部端板
						底部中性子遮蔽材 カバー
SNB23-3		115	281	846	921	一次蓋ボルト
SNB23-3		105	283	850	927	二次蓋ボルト
MB-A3004- H112		190	36	56	116	バスケット
H3100 C1020P	135	— ^(注2)	54 ^(注2)	176 ^(注2)	伝熱フィン	

(注1) 設計温度は、貯蔵時の乾式キャスクの熱解析結果から評価部位毎に設定した値である。

(注2) 「JSME材料規格2012年版」に値がないため、引用規格である「ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part-D (Metric) (2007 Edition, 2008a Addenda, 2009b Addenda ASME)」の記載値を適用した。ただし、S_mの記載はないため「—」としている。

6. 貯蔵架台の応力評価

6.1 評価方法

貯蔵架台は、溶接部のない一体構造物であり、嵌め合い部で乾式キャスクを支持し、乾式キャスクの傾きを抑制している。また、基礎ボルトで貯蔵建屋床面と固定し、乾式キャスクを設置した貯蔵架台の横ずれを防止している。

以上のことから、「3.2 貯蔵架台の耐震評価箇所」に示す貯蔵架台の嵌め合い部及び基礎ボルトについて、第 6-1 図の貯蔵架台の応力評価フローに基づいて応力評価を行う。なお、本評価は、嵌め合い部の発生応力が大きい MSF-32P 用の貯蔵架台で代表する。

貯蔵架台本体の嵌め合い部の発生応力は、第 6-2 図に示す 3 次元 FEM 応力解析モデルに「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」で算出した荷重を入力し求める。3 次元 FEM 応力解析モデルの拘束条件として、基礎ボルト点をピン結合とする。

基礎ボルトの発生応力は、第 6-3 図に示すように「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」で算出した荷重より、構造公式を用いて求める。応力算出式を以下に示す。

$$M = F_{H1}h_{H1} - F_{H2}h_{H2} \quad (1)$$

$$F_V = M \div \left(\frac{l_1^2}{I_0} \times 2 + I_0 \times 6 \right) \quad (2)$$

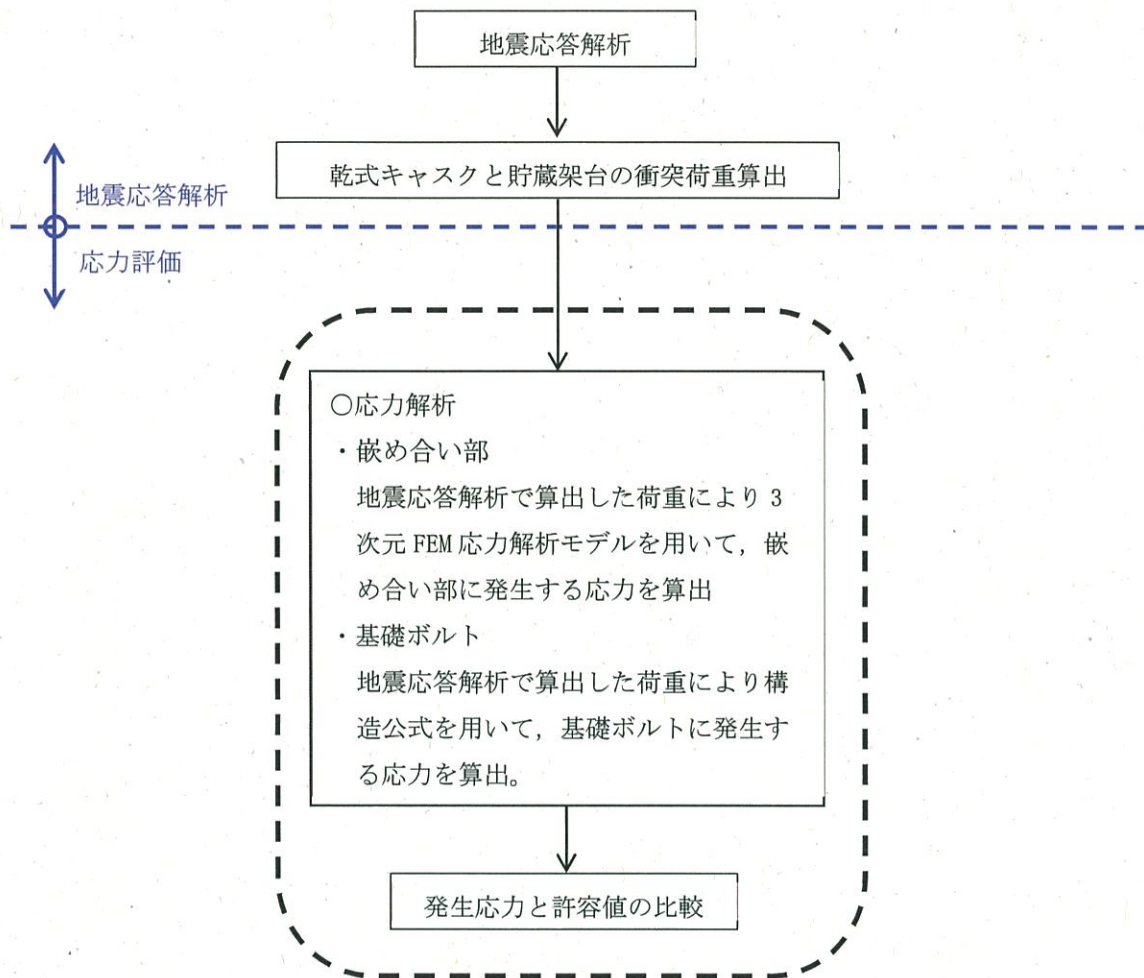
$$\sigma_t = \frac{F_V}{A_b \times 0.75} \quad (3)$$

$$F_\tau = \frac{(F_{H1} - F_{H2})}{N} \quad (4)$$

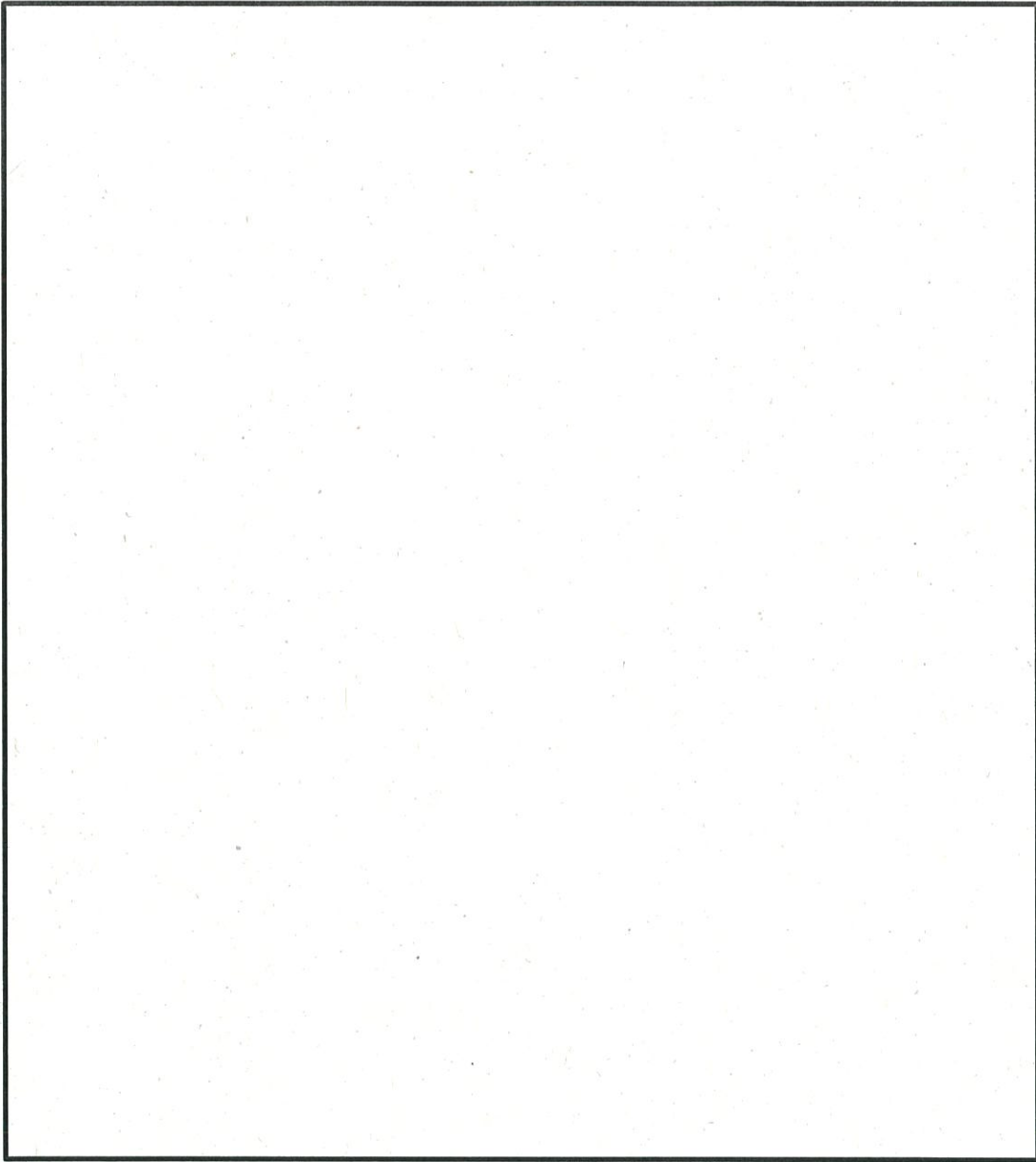
$$\sigma_\tau = \frac{F_\tau}{A_b \times 0.75} \quad (5)$$

ここで、

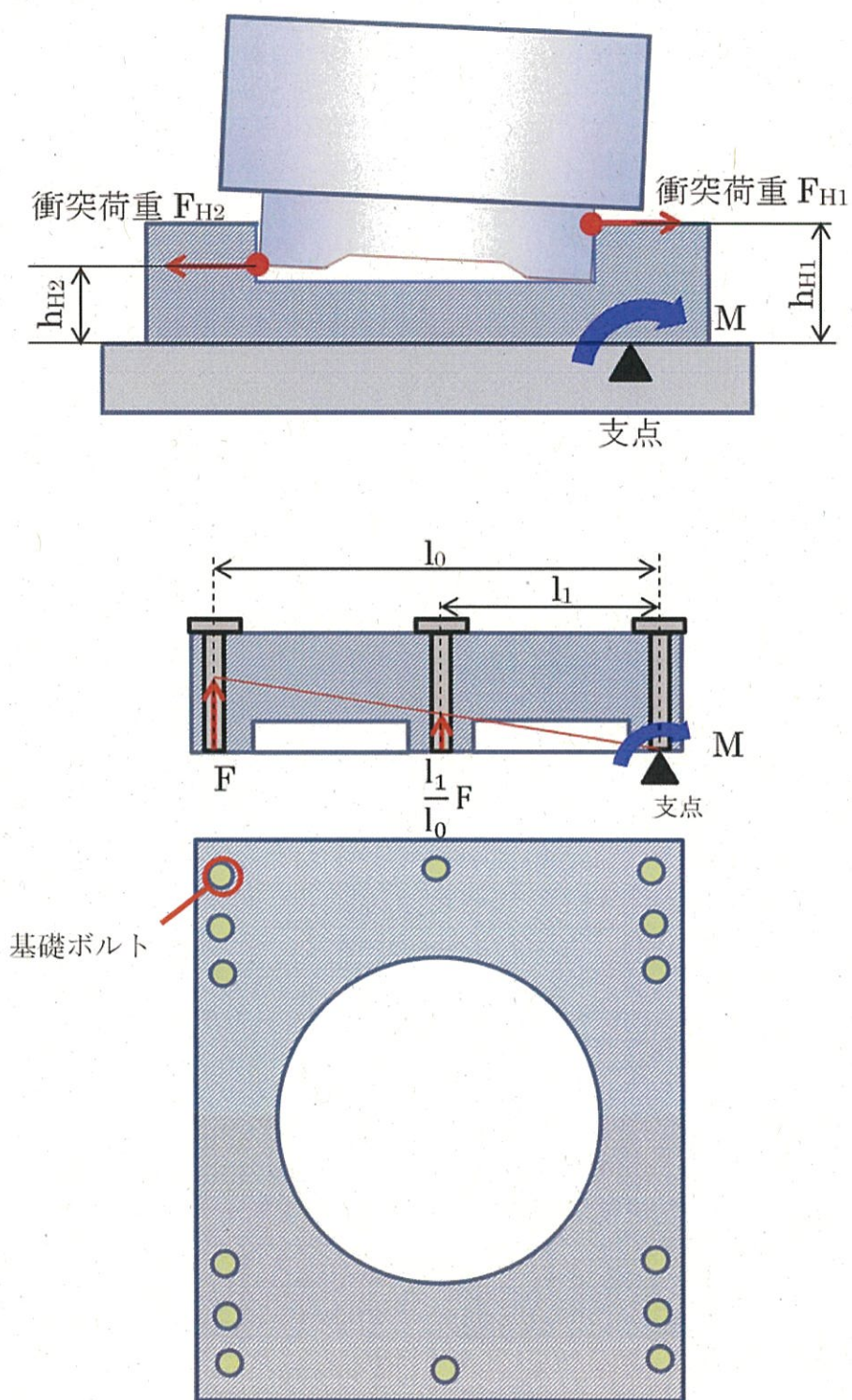
- M : 貯蔵架台に生じる回転モーメント (N・m)
- F_{H1} : 衝突点 1 の水平方向の応答荷重 (N)
- F_{H2} : 衝突点 2 の水平方向の応答荷重 (N)
- h_{H1}, h_{H2} : 支点から衝突点 1 及び 2 までの距離 (m)
- F_V : 基礎ボルト 1 本あたりの引張荷重 (N)
- σ_t : 基礎ボルト 1 本あたりの引張応力 (MPa)
- I_0, I_1 : 支点から基礎ボルトまでの距離 (m)
- A_b : 基礎ボルトの軸部断面積 (mm²)
- F_τ : 基礎ボルト 1 本あたりのせん断荷重 (N)
- N : 基礎ボルトの本数 (本)
- σ_τ : 基礎ボルト 1 本あたりのせん断応力 (MPa)



第 6-1 図 貯蔵架台の応力評価フロー



第 6-2 図 貯蔵架台応力評価用 3 次元 FEM モデル



第 6-3 図 基礎ボルトの応力算出に用いる諸元

6.2 荷重の組合せ及び許容応力

貯蔵架台の評価部位の許容応力は、許容応力状態IV_ASの許容限界（「原子力発電所耐震設計技術指針」，「発電用原子力設備規格設計・建設規格(2012年版)」及び「発電用原子力設備規格材料規格(2012年版)」を基に設定）を適用する。

貯蔵架台の荷重の組合せ及び許容応力状態は第6-1表に示す乾式キャスクの許容応力のうち、許容応力状態IV_ASの許容限界を適用する、許容応力を第6-2表に示す。

第6-1表 貯蔵架台の荷重の組合せ及び許容応力状態

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵設備	貯蔵架台	S	クラス3支持構造物	D+P+M+Ss	IV _A S

第6-2表 許容応力（クラス3支持構造物）

許容応力状態	許容限界 ^{(注1)(注2)(注3)} (ボルト以外)		許容限界 ^(注2) (ボルト等)	
	一次応力		一次応力	
	せん断	曲げ	引張	せん断
IV _A S	$1.5f_s^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$

(注1) 「鋼構造設計規準 SI単位版」(2002年日本建築学会)等の幅厚比の制限を満足させる。

(注2) 応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対しても評価を行う。

(注3) 耐圧部に溶接等により直接取り付けられる支持構造物であって耐圧部と一体の応力解析を行うものについては、耐圧部と同じ許容応力とする。

6.3 使用材料の許容応力

貯蔵架台の応力解析に用いる各部位の使用材料の許容応力を第6-3表に示す。

第6-3表 使用材料の許容応力

評価部位	材料	温度条件 (°C)		S _y (MPa)	S _u (MPa)	F* (MPa)
貯蔵架台 嵌め合い部	SF490A	最高使用 温度 (注1)	65	233	452	279
基礎ボルト	SNB23-3	雰囲気 温度 (注2)	50	884	982	687

(注1) 貯蔵架台と接する貯蔵建屋コンクリート床面の制限温度 (65°C) における値である。

(注2) 乾式キャスクの除熱評価に設定している乾式キャスクの周囲温度 (50°C) における値である。

7. 乾式キャスクの転倒評価

7.1 評価方法

乾式キャスク「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」の評価条件における最大傾き角 θ_{MAX} と幾何学的に転倒する角度を比較することで乾式キャスクが地震時に転倒しないことを確認する。

地震時の最大傾き角 θ_{MAX} は、「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」に示す乾式キャスクの水平方向衝突時の幾何学的な位置関係を解くことで算出される。算出式を以下に示す。なお、諸元については「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」に示す。

$$l = R \cos(\theta_{max} + \beta) \quad (1)$$

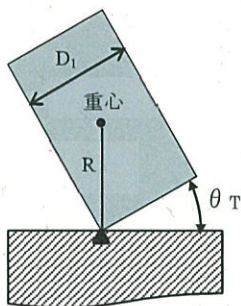
$$x_1 + x_2 = d \cdot \tan\theta_{max} + D_I \cdot \cos\theta_{max} - D_O \quad (2)$$

$$h_1 = R \sin(\theta_{max} + \beta) - d \quad (3)$$

$$h_2 = R \sin(\theta_{max} + \beta) - D_I \cdot \sin\theta_{max} \quad (4)$$

7.2 許容限界

転倒評価における許容限界は、乾式キャスク単体が縦置きされている状態で、幾何学的に転倒する状態である乾式キャスク重心が回転中心の直上に位置する時の角度を用いる（第7-1図参照）。転倒角の算出式を以下に示す。



第7-1図 乾式キャスク転倒時の位置関係

$$\theta_T = \sin^{-1} \left(\frac{D_1/2}{R} \right) \quad (5)$$

ここで、

- θ_T : 乾式キャスクの転倒角(°)
- D_1 : 乾式キャスク底部の外径 (m)
- R : 回転中心と重心位置との距離 (m)

8. 評価結果

8.1 乾式キャスクの評価結果

乾式キャスクの応力評価結果、疲労評価結果及び機能維持評価結果を第8-1表及び第8-2表に示す。乾式キャスクの各評価部位について、「5.1 評価方法」にて求めた発生応力は「5.2 荷重の組合せ及び許容応力」にて定めた許容限界を満足しており、設計用地震力に対して十分な構造強度を有しており、機能を維持することを確認した。

第8-1表 基準地震動 S_s に対する応力評価及び疲労評価の結果 (1/7)

評価対象設備	評価部位	応力評価				疲労評価			
		応力分類	発生値 (MPa)		許容限界 (MPa)	疲労累積係数		許容限界 (-)	
			傾き 衝突時	底面 衝突時		傾き 衝突時	底面 衝突時		
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	一次蓋	一次一般膜応力	7	2	251	-	-	-	
		一次局部膜+ 一次曲げ応力	12	15	377	-	-	-	
		一次応力+ 二次応力	9	11	372	0.0004	0.0004	1	
	二次蓋	一次一般膜応力	9	3	251	-	-	-	
		一次局部膜+ 一次曲げ応力	32	17	377	-	-	-	
		一次応力+ 二次応力	11	12	372	0.0004	0.0004	1	

第8-1表 基準地震動 S_s に対する応力評価及び疲労評価の結果 (2/7)

評価対象設備	評価部位	応力評価				疲労評価			
		応力分類	発生値 (MPa)		許容限界 (MPa)	疲労累積係数		許容限界 (-)	
			傾き 衝突時	底面 衝突時		傾き 衝突時	底面 衝突時		
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	胴	一次一般膜応力	11	6	251	-	-	-	
		一次局部膜 +一次曲げ応力	12	7	377	-	-	-	
		一次応力 +二次応力	69	25	366	0.013	0.0004	1	
	胴 (底板)	一次一般膜応力	39	3	251	-	-	-	
		一次局部膜 +一次曲げ応力	45	21	377	-	-	-	
		一次応力 +二次応力	96	21	366	0.02	0.0002	1	
胴 (脚部)	一次局部膜応力	104	22	377	-	-	-		
	(衝突部) 一次 局部膜応力	-	24	377	-	-	-		
		一次応力 +二次応力	284	33	366	0.45	0.00025	1	

第8-1表 基準地震動 S_s に対する応力評価及び疲労評価の結果 (3/7)

評価対象設備	評価部位	応力評価				疲労評価		
		応力分類	発生値 (MPa)		許容限界 (MPa)	疲労累積係数	許容限界 (一)	
			傾き 衝突時	底面 衝突時				
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	外筒	引張応力	25	25	279	/	/	
		圧縮応力	42	2	279	/	/	
		せん断応力	19	9	161	/	/	
		曲げ応力	93	40	279	/	/	
		組合せ応力	105	42	279	/	/	
	下部端板	引張応力	11	4	214	/	/	
		圧縮応力	28	2	214	/	/	
		せん断応力	20	5	123	/	/	
		曲げ応力	129	31	214	/	/	
		組合せ応力	129	30	214	/	/	

第8-1表 基準地震動 S_s に対する応力評価及び疲労評価の結果 (4/7)

評価対象設備	評価部位	応力評価				疲労評価			
		応力分類	発生値 (MPa)		許容限界 (MPa)	疲労累積係数	許容限界 (一)		
			傾き 衝突時	底面 衝突時			傾き 衝突時	底面 衝突時	
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設 使用済燃料貯蔵施設 乾式キャスク	蓋部 中性子遮蔽材 カバ-	引張応力	—	—	284	/	/	/	/
		圧縮応力	3	3	284	/	/	/	/
		せん断応力	2	2	164	/	/	/	/
		曲げ応力	6	9	284	/	/	/	/
		組合せ応力	13	13	284	/	/	/	/
	底部 中性子遮蔽材 カバ-	引張応力	13	10	214	/	/	/	/
		圧縮応力	101	1	214	/	/	/	/
		せん断応力	53	11	123	/	/	/	/
		曲げ応力	109	43	214	/	/	/	/
		組合せ応力	195	55	214	/	/	/	/

第8-1表 基準地震動 S_s に対する応力評価及び疲労評価の結果 (5/7)

評価対象設備	評価部位	応力評価				疲労評価			
		応力分類	発生値 (MPa)		許容限界 (MPa)	疲労累積係数	許容限界 (一)		
			傾き衝突時	底面衝突時				傾き衝突時	底面衝突時
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	一次蓋シール部 (蓋側)	一次応力 +二次応力	66	63	185	/	/		
		一次応力 +二次応力	17	19	185	/	/		
使用済燃料貯蔵施設	一次蓋シール部 (胴側)	平均引張応力	260	248	846	-	-		
		平均引張応力+ 曲げ応力	281	250	846	0.0002	0.0002		
乾式キャスク	一次蓋ボルト	平均引張応力	260	248	846	-	-		
		平均引張応力+ 曲げ応力	281	250	846	0.0002	0.0002		

第8-1表 基準地震動 S_s に対する応力評価及び疲労評価の結果 (6/7)

評価対象設備	評価部位	応力評価				疲労評価				
		応力分類	発生値 (MPa)		許容限界 (MPa)	疲労累積係数		許容限界 (-)		
			傾き衝突時	底面衝突時		傾き衝突時	底面衝突時			
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵施設	乾式キャスク	二次蓋ボルト	平均引張応力	235	213	618	-	-	-
				平均引張応力+曲げ応力	296	246	927	0.0002	0.0002	1

第8-1表 基準地震動 S_b に対する応力評価及び疲労評価の結果 (7/7)

評価対象設備	評価部位	応力評価				疲労評価		
		応力分類	発生値 (MPa)		許容限界 (MPa)	疲労累積係数		許容限界 (一)
			傾き 衝突時	底面衝突 時		傾き 衝突時	底面 衝突時	
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	乾式 キャスク	バスケット プレート (最下段)	-	5	67	/	/	/
			1	-	77	/	/	/
		バスケット プレート (横板)	1	-	100	/	/	/
使用済 燃料貯 蔵施設	バスケット プレート (横板)	せん断 応力	1	-	43	/	/	/

第8-2表 基準地震動 S_g に対する機能維持評価結果

評価対象設備	評価部位	応力分類	発生値	許容限界	備考
			MPa	MPa	
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設					
使用済燃料貯蔵施設	伝熱フィン	せん断応力	2	101	—
乾式キャスク					

8.2 貯蔵架台の評価結果

貯蔵架台の耐震評価結果を第8-3表に示す。「6.1 評価方法」にて求めた発生応力は「6.2 荷重の組合せ及び許容応力」にて定めた許容限界を満足しており、設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを確認した。

なお、架台の定着部は、原則としてボルトの限界引き抜き力に対して、コンクリート設計基準強度及びせん断力算定断面積による引き抜き耐力が上回るよう埋込深さを算定することで、基礎ボルトに対して十分な余裕を持つように設計する。

第8-3表 基準地震動 S_b に対する応力評価結果

評価対象設備	評価部位	応力分類	発生値 ^(注1)	許容限界	備考
			MPa	MPa	
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	貯蔵架台 嵌め合い部	曲げ応力	98	322	—
		せん断応力	27	161	—
	貯蔵架台 基礎ボルト	引張応力	124	687	—
		せん断応力	78	396	—
		組み合わせ応力	124	687	—

8.3 乾式キャスクの転倒評価結果

乾式キャスクの転倒評価結果を第8-4表に示す。「7.1 評価方法」にて求めた傾き角は「7.2 許容限界」にて定めた幾何学的に転倒する角度を下回っており、設計用地震力に対して転倒しないことを確認した。

第8-4表 基準地震動Ssによる転倒評価結果

評価対象設備	傾き角	転倒角
乾式キャスク		

乾式キャスク底部と貯蔵架台の嵌め合い部の隙間設定及び深さ設定の考え方について

1. 概要

カップホルダ式貯蔵架台は、乾式キャスク底部を貯蔵架台に設けた凹部に嵌め合うことで地震力に対して乾式キャスクを保持する構造である。ここで、乾式キャスク底部と貯蔵架台の嵌め合い部の隙間が大きい場合は、幾何学的に乾式キャスクの傾き量が増加する。一方、隙間が小さい場合は、幾何学的に乾式キャスクの傾き量が減少するが、乾式キャスクを貯蔵架台へ設置する際の作業性が低下するため、ある程度の隙間量を確保する必要がある。これらの相反する事項を考慮し、乾式キャスクの設置作業に支障がなく、貯蔵時に地震が発生した場合の傾き量を最小に抑えるように乾式キャスク底部と貯蔵架台の隙間量を設定する必要がある。

伊方発電所で取り扱う乾式キャスク（MSF-24P 型及び MSF-32P 型）底部と貯蔵架台の隙間設定は、貯蔵時の乾式キャスクの傾き量を最小限とし、かつ、熱膨張等を考慮しても乾式キャスクの貯蔵架台への設置作業に支障がない隙間として、2 項に示す乾式キャスクの熱膨張等を考慮して、常温時の乾式キャスク底部と貯蔵架台の径方向隙間を \square m と設定している。また、乾式キャスクが傾いた際に乾式キャスクの下部端板が貯蔵架台上面と接触しないように軸方向の嵌め合い深さを \square mm とした。また、試験供試体の隙間は、実機の製造公差を考慮した最大径方向隙間量に対応する隙間 \square m) を設定した。

以下にその考え方をまとめる。

2. 径方向隙間設定の考え方

(1) 径方向の隙間量について

① 貯蔵架台への設置時の径方向隙間量

乾式キャスクは、使用済燃料からの崩壊熱により乾式キャスク各部の温度が上昇した状態で乾式貯蔵施設へ搬入されるため、乾式キャスクは若干の熱膨張をしている。一方、貯蔵架台は乾式貯蔵施設に保管されているため、基本的に室温になっている。このため、熱膨張した乾式キャスクを膨張していない貯蔵架台に嵌め込む際が最も隙間が小さい状態となり、この状態で設置作業に支障がない隙間量を設定する必要がある。乾式貯蔵施設搬入時は、乾式キャスク底部は熱膨張により直径が \square 大きくなるため、常温時の乾式キャスク底部と貯蔵架台の径方向隙間を \square とすることで、熱膨張を考慮した乾式キャスクを室温状態の貯蔵架台に設置する際の隙間量は \square となり、設置作業に支障がない隙間量となる。

② 貯蔵時の嵌め合い部の径方向隙間量

乾式キャスクを貯蔵架台へ設置し、貯蔵状態となれば、乾式キャスクから貯蔵架台へ熱が伝導し、貯蔵架台の温度が上昇して熱膨張する。このため、貯蔵

架台の嵌め合い部の直径が熱膨張により増加し、嵌め合い部の径方向隙間量は設置時に比べて大きくなる。ここで、乾式キャスク底部の温度は常に貯蔵架台の温度以上となり、乾式キャスク底部と貯蔵架台は同じ材料であるため、乾式キャスク底部と貯蔵架台に温度差がある時の隙間量は常に [] となる。したがって、貯蔵時の嵌め合い部の径方向隙間量は①に示す設置時の値から大きくなるが、その最大値は乾式キャスク底部と貯蔵架台が同じ温度となる時の隙間量であり、常温時の設定値が最大の隙間量となる。

(2) 最大径方向隙間量について

乾式キャスク底部の直径は、 [] mm、貯蔵架台の直径は、 [] mm であり、隙間量は [] mm (ノミナル値) となる。(図1参照)

ここで、乾式キャスク底部外径の製造公差は []、貯蔵架台の製造公差は [] と定めていることから、隙間量が [] mm を超えることはない。

なお、乾式キャスク底部外径の熱膨張量は貯蔵開始時が最も大きいため、乾式キャスクと貯蔵架台の隙間は、図2に示すとおり貯蔵開始時が最も小さく、時間経過とともに [] mm (ノミナル値) に近づく。

※1 : MSF-32P 型, ※2 : MSF-24P 型

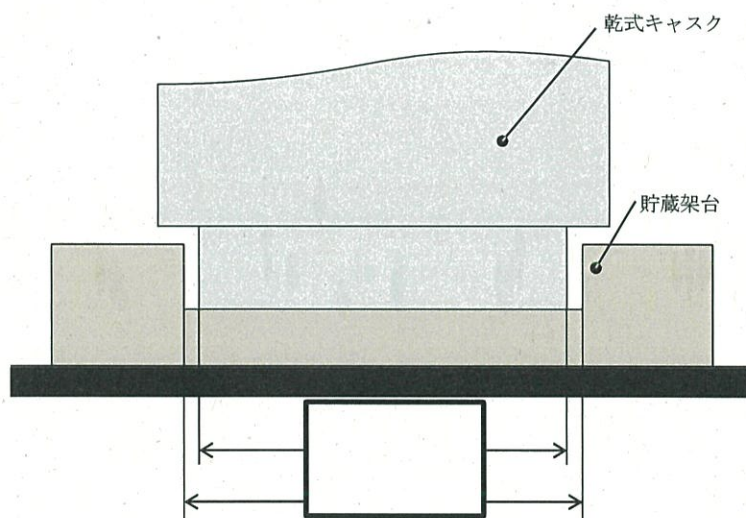


図1. 乾式キャスク底部と貯蔵架台の隙間量

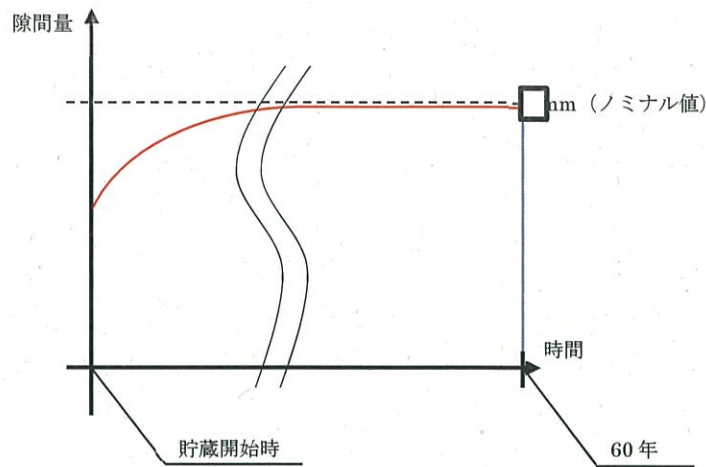


図2. 時間経過による乾式キャスクと貯蔵架台の隙間量の変化

2. 軸方向の嵌め合い部深さの考え方

乾式キャスク底部と貯蔵架台の勘合部の深さが浅い場合は、傾いた際に乾式キャスクが架台から抜ける可能性がある。一方、深さが深い場合は、乾式キャスクが傾いた際に、乾式キャスクの下部端板が貯蔵架台上面に衝突する可能性がある（図3）。これらを考慮し、乾式キャスクが傾いた際に乾式キャスクの下部端板と貯蔵架台上面の隙間に余裕があり、かつ、貯蔵時に地震が発生した場合の傾き量を最小に抑えるように、常温時の貯蔵架台勘合部のノミナル深さを mm に設定した。

なお、熱膨張を考慮した場合、乾式キャスク及び貯蔵架台ともに膨張するため、ノミナル深さより隙間量が縮まることはない。

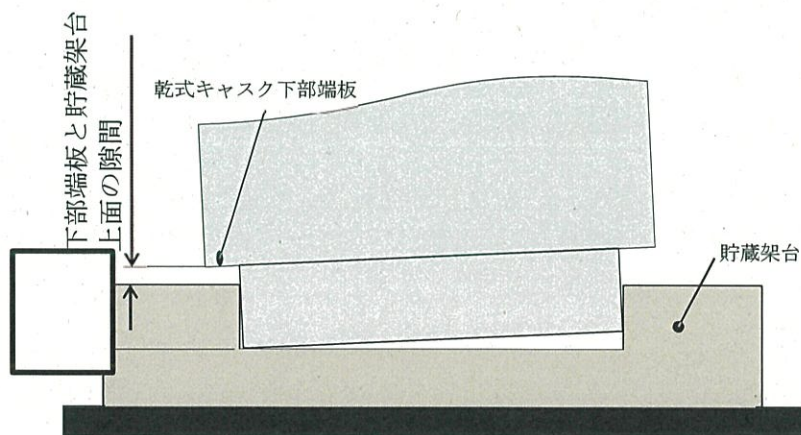


図3. 乾式キャスク傾き時の下部端板との相関図

加振試験による耐震評価式の構築・検証について

1. 概要

貯蔵架台に設置した乾式キャスクの地震時の挙動を把握し、地震時に乾式キャスクと貯蔵架台に発生する荷重の算出に用いる耐震評価式の構築・検証を行うために加振試験を実施した。

本資料では、その内容について説明する。

2. 地震時の乾式キャスクに想定される挙動

地震時に貯蔵架台に設置した乾式キャスクに発生すると考えられる挙動を第 2-1 図に示す。

これらの挙動のうち、滑り挙動は、貯蔵架台と乾式キャスク底面との摩擦力を介して地震力が乾式キャスクに伝播して発生するものであり、乾式キャスクが貯蔵架台の嵌め合い部で滑り、衝突することで荷重が発生するが、その荷重は摩擦等により小さくなると考えられる。

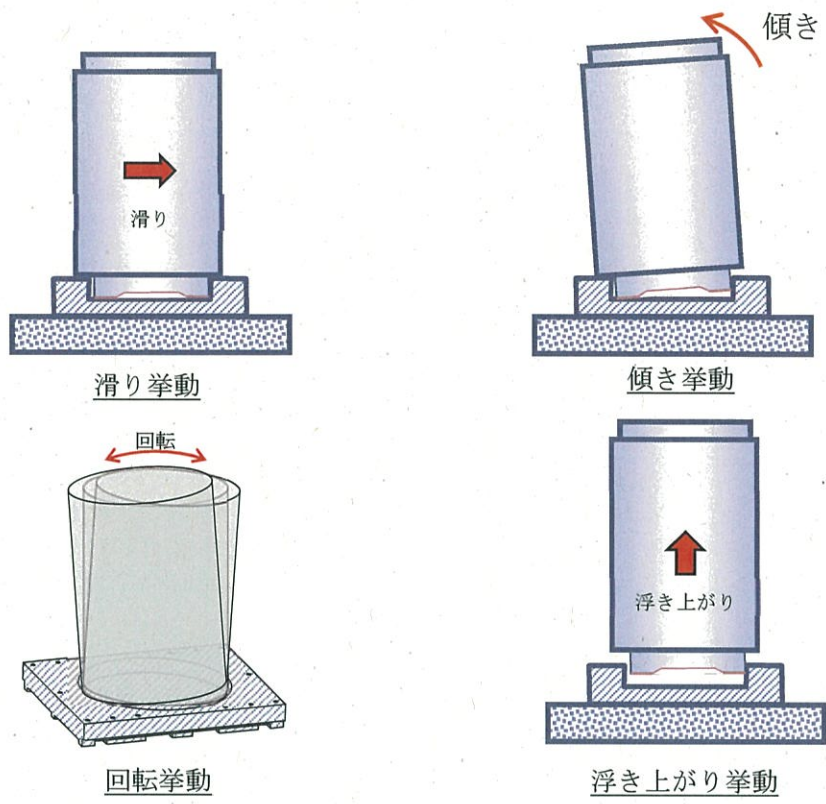
傾き挙動は、ある一方向（径方向）へ乾式キャスクが傾く挙動であり、乾式キャスクの運動エネルギーが、ある一方向へ集中し貯蔵架台と衝突する。そのため、乾式キャスクの運動エネルギーの全てが荷重として、乾式キャスクおよび貯蔵架台に作用すると考えられる。

回転挙動は、貯蔵架台の嵌め合い部内面に沿って乾式キャスクが回転する運動であり、乾式キャスクの運動エネルギーは回転エネルギーに変換されるため、乾式キャスクおよび貯蔵架台に発生する荷重は傾き挙動に比べて小さくなると考えられる。

浮き上がり挙動は、乾式キャスクが鉛直方向へ浮き上がる運動であり、設置場所における鉛直方向地震力が 1G を超えると発生すると考えられる。伊方発電所における乾式キャスクの設置位置では鉛直方向加速度は 1G を超えない見込みであるため、浮き上がり挙動は発生しないと考えられる。

そのため、乾式キャスクの耐震評価式の構築にあたっては、傾き挙動時に貯蔵架台と衝突する挙動を元に構築することで安全側に大きな荷重が算出される式になると考えられる。また、その時に発生する荷重は、乾式キャスクが地震力により加速することで蓄える運動エネルギー及び地震力によって傾くことで蓄える位置エネルギーを因子として決まると考えられる。

以上の考えが妥当であることを確認し、耐震評価式を構築するために試験計画を検討し、加振試験を実施した。



第 2-1 図 地震時における乾式キャスクの挙動

3. 試験計画

乾式キャスクの挙動の把握及び耐震評価式の構築・検証のために実施した加振試験の試験計画を説明する。具体的な加振試験の実施内容及びその試験結果を用いた検討内容を第 3-1 表に示す。

加振試験は、「3.1 試験供試体」にて示す試験供試体を用いて実施し、「3.2 試験の計測方法」にて得られた結果から、乾式キャスクの挙動の把握及び耐震評価式の構築・検証を行った。

第 3-1 表 加振試験による検討内容

試験波		検討内容	記載箇所
正弦波 (1 軸)		<ul style="list-style-type: none"> 乾式キャスクの地震時の挙動の把握及び耐震評価式の構築 地震時の乾式キャスクの挙動を把握し、耐震評価に用いる耐震評価式を構築する。 	3. 正弦波試験
周波数分割波 (1 軸)	短周期	<ul style="list-style-type: none"> 周波数特性による乾式キャスクの挙動への影響検討 正弦波試験で確認された乾式キャスクの挙動が地震波の周波数特性の影響を受けるか確認する。 周波数特性による耐震評価式への影響検討 正弦波試験で構築した乾式キャスクの耐震評価式が周波数特性の影響を受けるか確認する。 	4. 周波数分割波試験
	中周期		
	長周期		
仮想 Ss 波 (3 軸)		<ul style="list-style-type: none"> 3 方向地震時の耐震評価式の適用性の確認 1 軸方向の加振試験結果より構築・検証した耐震評価式が 3 方向地震時の乾式キャスクの耐震評価に適用可能か確認する。 	5. 仮想 Ss 波試験
伊方 Ss-1 波 (3 軸)		<ul style="list-style-type: none"> 実機への適用性の確認 上記の試験結果から妥当性が確認された耐震評価式が実機の評価に適用可能か確認する。 	6. 伊方 Ss-1 波試験

3.1 試験供試体

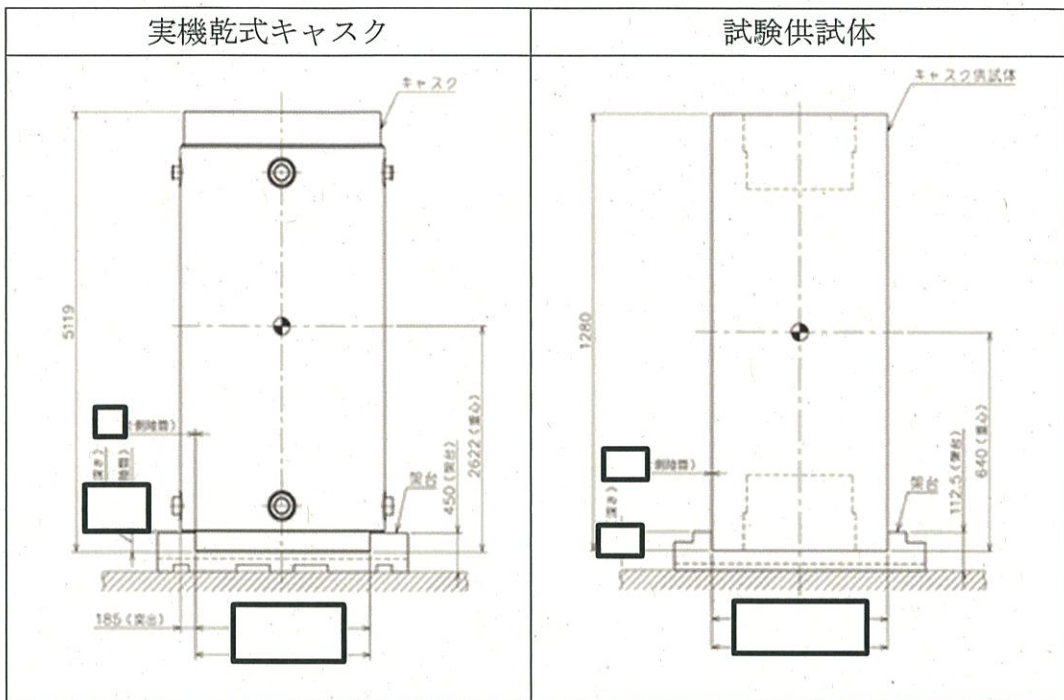
試験供試体の製作にあたって、実機乾式キャスクのMSF-21P型、MSF-24P型及びMSF-32P型について、その寸法から適当である型式をモデルとして選定した。本試験では、地震時の乾式キャスクの挙動及び発生する荷重を把握することが目的であるため、重心周りの慣性モーメントが最も小さく、傾きやすいため、貯蔵架台に衝突した際のひずみ量を計測しやすいと考えられるMSF-21P型を試験供試体のモデルとして用いることとし、加振試験に用いる試験供試体には実機乾式キャスクの1/4スケール模擬体を使用した。

第3-1図に実機乾式キャスク（MSF-21P型）及び試験供試体の構造比較を、第3-2図に加振試験台上に設置された試験供試体を、第3-2表に試験のスケール設定方針を、第3-3表に試験供試体と伊方発電所で行う実機乾式キャスクの寸法比較を示す。

第3-2表に示す通り、試験供試体の長さを1/4とし、それに伴い質量を1/64（ $= (1/4)^3$ ）とする一方、時間を1/2とすることで、実機乾式キャスクと発生する加速度を合わせている。回転モーメントに対して、慣性モーメントのスケールが小さく、実機に対して、より傾きやすい設定を用いた。また、試験供試体では、貯蔵架台嵌め合い部と乾式キャスク底部の直径のクリアランスもその他の寸法と同じく、実機クリアランスに対して1/4とした。この際、実機クリアランスには、製造公差や熱膨張で想定される最大値を想定しており、慣性モーメントの設定と合わせて、より乾式キャスクが傾きやすい条件での試験実施を意図した。

また、試験供試体はMSF-21P型の乾式キャスクをモデルとしているため、伊方発電所で行うMSF-24P型及びMSF-32P型とは型式が異なるが、第3-3表に示すとおり、乾式キャスクの寸法のうち、地震時の挙動において重要な因子と考えられる底部径及び底部径と貯蔵架台のクリアランスに加え、重心高さ、質量、重心まわりの慣性モーメント等の基本パラメータに差はなく、地震時の幾何学的な挙動はMSF-21P型、MSF-24P型及びMSF-32P型いずれも同様である。また、滑り挙動については、形状に関係なく、摩擦係数と地震慣性力の関係より決まり、回転、傾き挙動の誘発は慣性モーメントにより決まる。ここで、MSF-21P型は、伊方発電所で行うMSF-24P型及びMSF-32P型より慣性モーメントが小さく、より傾きやすい型式であるため、ひずみ量を計測しやすい。そのため、試験結果で得られるひずみは伊方発電所で行うMSF-24P型及びMSF-32P型でも適用可能である。

以上から、試験供試体を用いた加振試験の結果及び加振試験結果より構築する耐震評価式は、伊方発電所で行う乾式キャスクにも適用できる結果であると考えられる。



第 3-1 図 実機乾式キャスク (MSF-21P 型) 及び試験供試体の構造比較



第 3-2 図 加振試験台上に設置された試験供試体

第 3-2 表 試験のスケール設定方針

物理量	単位	次元	スケール
長さ	[m]	L	1/4
質量	[kg]	M	1/64
時間	[s]	T	1/2
加速度	[m/s ²]	LT^{-2}	1
慣性モーメント	[kg・m ²]	ML^2	1/1024 ^(*)
荷重	[N]	MLT^{-2}	1/64
回転モーメント	[N・m]	ML^2T^{-2}	1/256
角度	[rad]	—	1

(*) 試験供試体の実際の慣性モーメントはさらに小さく、実機に対して、より傾きやすい設定で試験を実施した。

第 3-3 表 試験供試体と実機乾式キャスクの寸法比較

乾式キャスク 型式	加振モデル		実機	
	試験供試体	MSF-21P	MSF-24P	MSF-32P
傾き角 ^(注1) (°)				
乾式キャスク 底部の外径 (1) (mm)				
貯蔵架台嵌め合 い部の内径(2) (mm)				
クリアランス (2)-(1) (mm)				
貯蔵架台嵌め合 い部の深さ (mm)				
重心高さ (mm)	640 ^(注2) 【2560】 ^(注3)	2622	2632	2635
質量 (kg)	2000 ^(注2) 【128000】 ^(注4)	113100	116100	117000
重心まわりの慣 性モーメント (kg・m ²)	2.67×10 ² ^(注2) 【2.73×10 ⁵ 】	3.11×10 ⁵	3.21×10 ⁵	3.25×10 ⁵

(注1) () 内の数値は詳細傾き角を参考に記載。

(注2) 【 】 内の数値は実機に換算した値を参考に記載。

(注3) 実機の全長は 5119 (mm) であり，試験供試体と乾式キャスクにおける全長に
対する重心高さの比は以下のとおりであり，有意な影響はない。

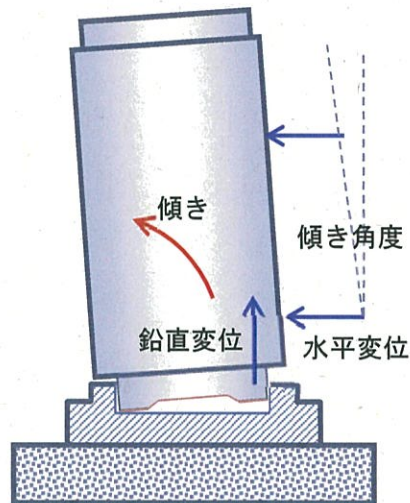
乾式キャスク 型式	試験供試体	MSF-21P	MSF-24P	MSF-32P
全長に対する重 心高さの比	0.50	0.51	0.51	0.51

(注4) 以下のとおり，スケール比の誤差は軽微であり，有意な影響はない。

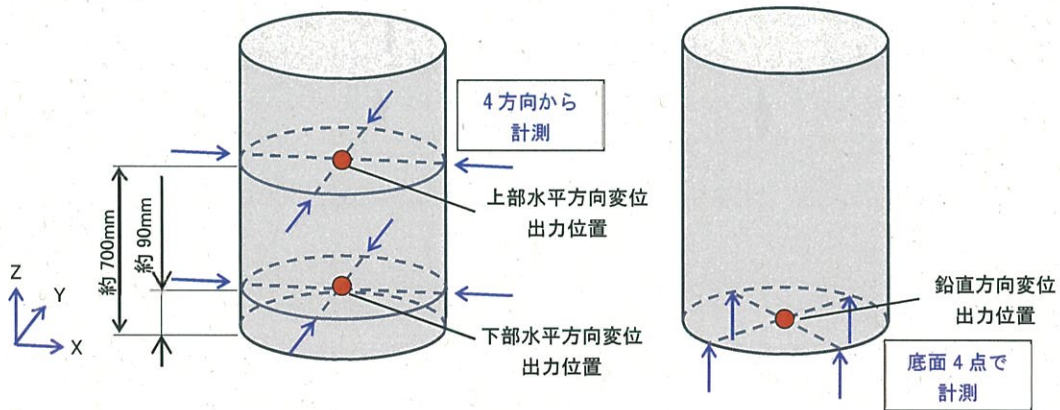
	スケール則	加振モデル
質量のスケール比	$\left(\frac{1}{4}\right)^3$	$\left(\frac{1}{3.84}\right)^3$

3.2 試験の計測方法

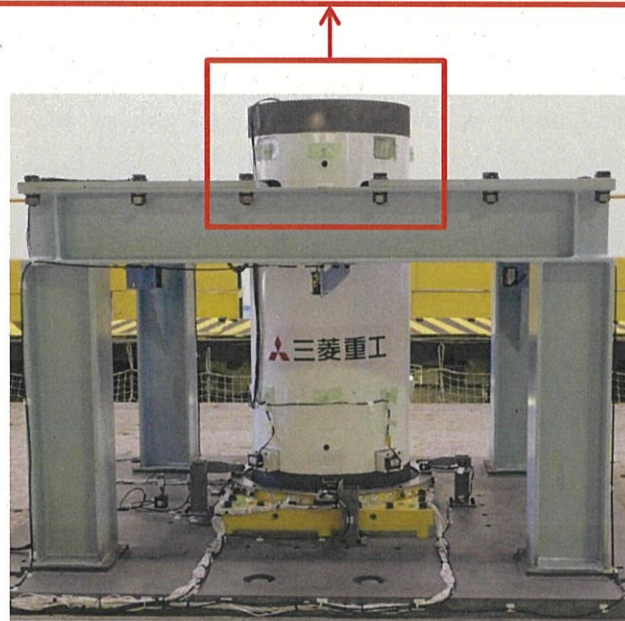
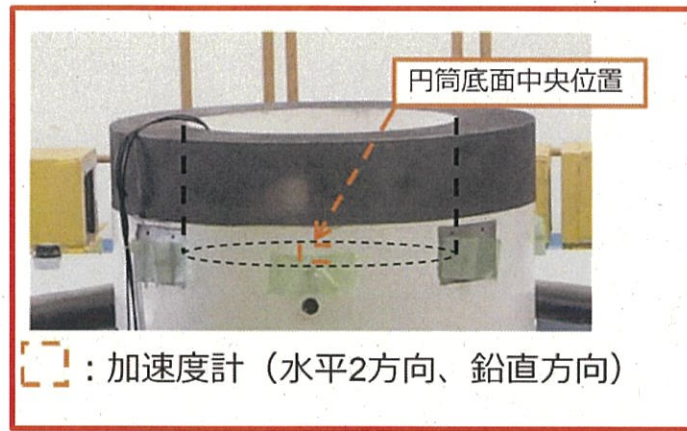
本試験では、乾式キャスクの挙動の把握、及び乾式キャスクと貯蔵架台の衝突時に径方向及び鉛直方向に発生する荷重を計測するために、試験供試体の水平／鉛直変位（第 3-3 図及び第 3-4 図）、試験供試体の応答加速度（第 3-5 図）並びに貯蔵架台嵌め合い部上面及び脚部の側面にひずみゲージを設置（第 3-6 図）する。



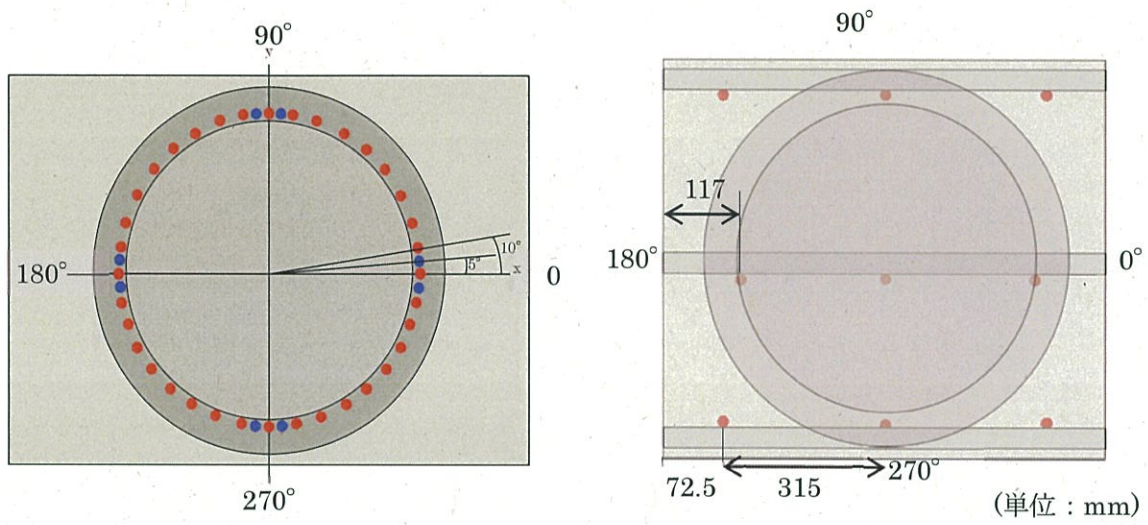
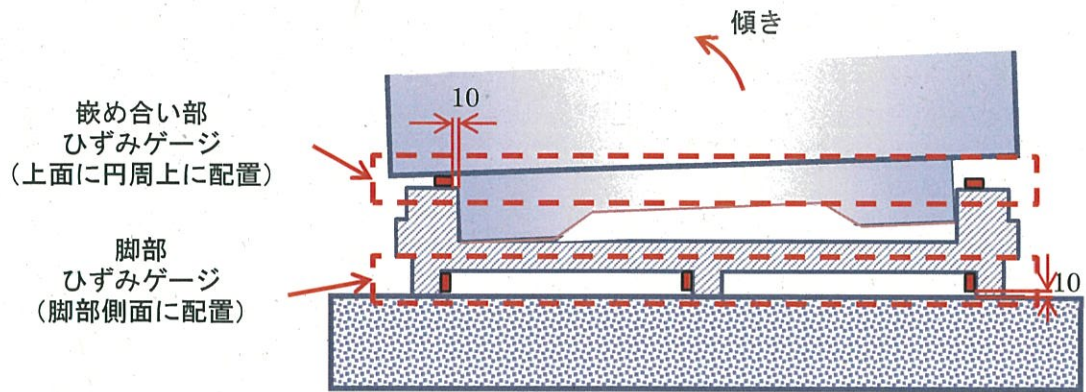
第 3-3 図 試験供試体水平／鉛直変位計測



第 3-4 図 変位の出力位置



第 3-5 図 試験供試体応答加速度の計測



第3-6図 貯蔵架台嵌め合い部のひずみ計測

4. 正弦波試験

地震時の乾式キャスクの挙動を把握し、耐震評価において、地震応答解析に用いる耐震評価式を構築するために「3. 試験計画」に示す試験装置を用いて、単純な1軸正弦波による加振試験を実施した。試験に用いた加振波を「4.1 加振波」に示す。

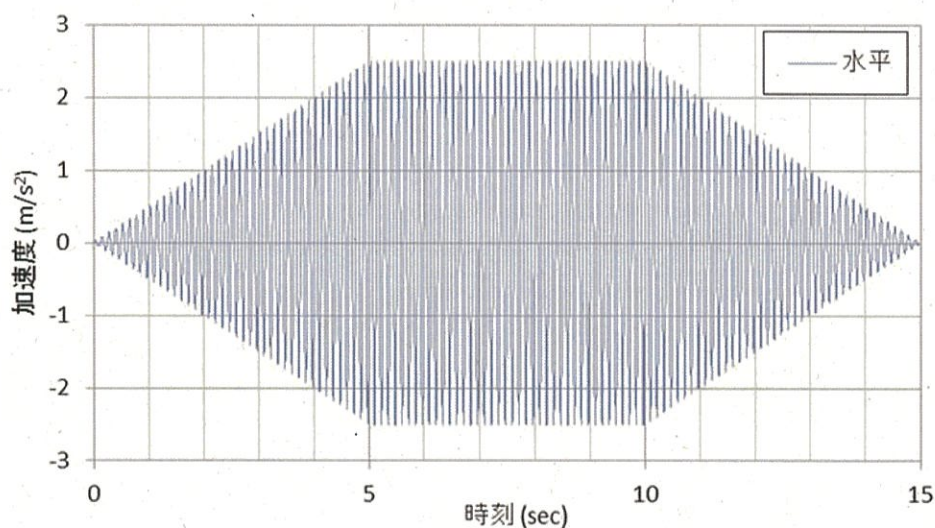
加振試験の結果を「4.2 試験結果」に、加振試験の結果より構築した、地震応答解析に用いる耐震評価式を「4.3 耐震評価式の構築」に、耐震評価式の検証の結果を「4.4 耐震評価式の検証」に示す。

4.1 加振波

第4-1表に、本試験に適用した加振波及び加振方向を示す。また、第4-1図に時刻歴波形を示す。

第4-1表 加振波及び加振方向

加振波	加振方向	備考
8Hz 正弦波	水平1方向	加振加速度： 2.5m/s^2 加振振幅：1mm



第4-1図 正弦波 時刻歴波形

4.2 試験結果

第 4-2 図に、正弦波加振試験の計測結果として、試験供試体の水平方向変位及び鉛直方向変位（出力位置は第 3-4 図参照）、貯蔵架台に生じた径方向圧縮ひずみ（嵌め合い部に複数設置したひずみゲージにより計測した値のうち最大値）、鉛直方向圧縮ひずみ（脚部に複数設置したひずみゲージにより計測した値のうち最大値）を示す。

図中で分類した各挙動の特徴は以下の通りである。

- ・ 滑り挙動 : 水平方向のみ変動し、鉛直方向変位がほぼゼロを維持
- ・ 傾き挙動 : 水平方向変位が 1 方向に変動、または X 方向と Y 方向が同位相で変動し、鉛直方向変位がゼロ近くから変動
- ・ 回転（楕円）挙動 : 鉛直方向変位が正の値を維持、かつ、水平方向変位と Y 方向変位の周期が $1/2\pi$ ずれる

なお、正弦波加振試験では、加振方向が X 方向のみであることから、Y 方向の振幅が小さく、楕円軌道を描くが、これも回転挙動のひとつである

さらに、X 方向と Y 方向の周期が異なる場合、楕円軌道を描きつつ、位相が一致するタイミングで傾き挙動に近い挙動が発生することもある

第 4-3 図に、正弦波試験の計測結果として、試験供試体の水平方向上部変位及び水平方向下部変位から得られた試験供試体の挙動を示す。地震時の試験供試体の挙動は以下のとおり整理される。

- ・ 地震時の乾式キャスクには、滑り、回転、傾き挙動が発生する。
- ・ 摩擦力を超える加速度が加わると滑りが発生する。
- ・ 滑りが隙間量よりも大きくなると嵌め合い部側面に試験供試体が接触し、試験供試体が傾く。傾いた試験供試体は入力波の振幅にあわせて傾き状態から正立状態に戻り、逆方向に滑る。この挙動を繰り返す。
- ・ 1 方向加振に対して、初期段階では 1 方向に振動し、傾き挙動を示すが、試験供試体底部及び貯蔵架台嵌め合い部の異なる直径の円筒形であり、衝突時に周方向に荷重が分散されるため試験供試体が楕円軌道を描くようになる。この時の衝突荷重が大きければ周方向へ運動する量が大きくなり、より円軌道に近い挙動を示すと考えられる。
- ・ 試験供試体は入力波と同じ周期で滑り/傾き挙動を繰り返し、長時間加振しても応答が増幅しない。
- ・ 入力波の加速度が小さくなることに伴い挙動も小さくなり、最終的に停止する。

各挙動に対して、代表時刻における、水平面での試験供試体の変位を示すリサーチ図を第 4-4 図～第 4-6 図に示す。

ここで、試験供試体及び貯蔵架台に発生する荷重が最も厳しい挙動について、水平方向の衝突で発生する「貯蔵架台嵌め合い部径方向圧縮ひずみ」及び鉛直方向の衝突で発生する「貯蔵架台の鉛直方向圧縮ひずみ」を基に検証する。

(1) 貯蔵架台嵌め合い部径方向圧縮ひずみ

第 4-2 図 に示す通り、加振波の加速度が小さい間では試験供試体の滑り挙動が発生しているが、この時には大きな径方向圧縮ひずみは見られない。加振波のピークである 5～11 秒の間では回転挙動と傾き挙動が発生しており、傾き挙動時は径方向圧縮ひずみのピーク (116μ) が見られ、回転挙動に移行した時には径方向圧縮ひずみが減少することが確認された。

以上の結果から、傾き挙動の時に大きな径方向圧縮ひずみが発生することが確認された。これは、傾き挙動は試験供試体の運動方向と地震力の作用方向が一致しており、試験供試体の持つエネルギーの多くが径方向圧縮ひずみとして衝突部に発生するのに対し、回転挙動では試験供試体の持つエネルギーが径方向圧縮ひずみと円運動に分散されるためと考察される。また、径方向圧縮ひずみは、加振波の大きさ、すなわち地震力の大きさに応じ、傾き挙動時の径方向圧縮ひずみが大きくなっていることを確認した。

(2) 貯蔵架台の鉛直方向圧縮ひずみ

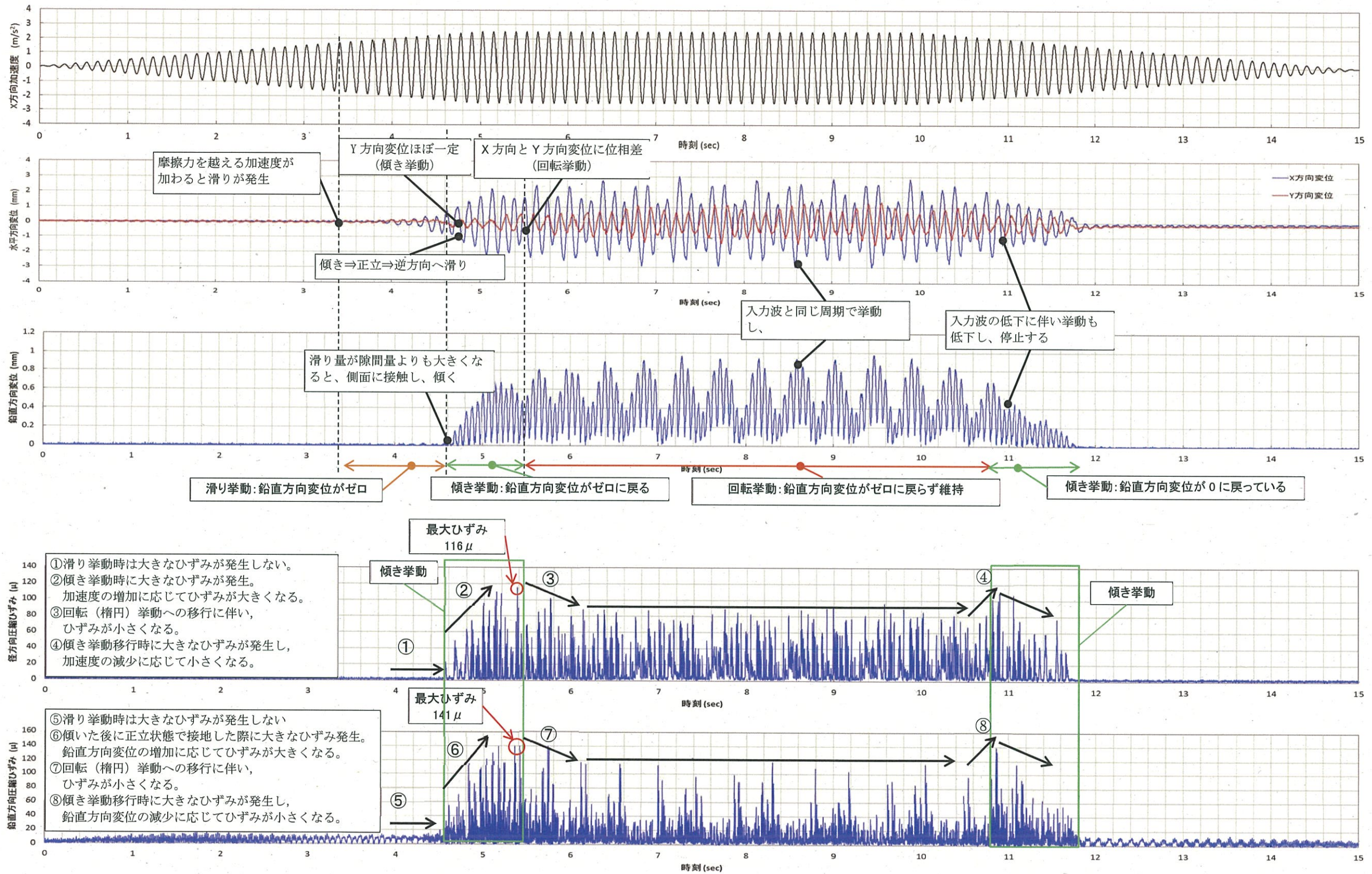
第 4-2 図 に示す通り、滑り挙動では明瞭な鉛直方向圧縮ひずみは見られない。傾き挙動で鉛直変位が 0 に近い時間で大きな鉛直方向圧縮ひずみが発生しており、傾き挙動時に鉛直方向圧縮ひずみのピークが見られた。

以上の結果から、傾き挙動の時に大きな鉛直方向圧縮ひずみが発生することが確認された。これは、傾き挙動で試験供試体が倒れることで鉛直方向の変位が大きくなり、より大きな運動エネルギーが鉛直方向圧縮ひずみとして衝突時に発生するためと考察される。また、大きな鉛直方向圧縮ひずみは、鉛直方向変位が大きい時に発生しており、鉛直方向変位の大きさ、すなわち試験供試体が傾き時の重心高さに応じ、傾き挙動時の鉛直方向圧縮ひずみが大きくなっていることを確認した。

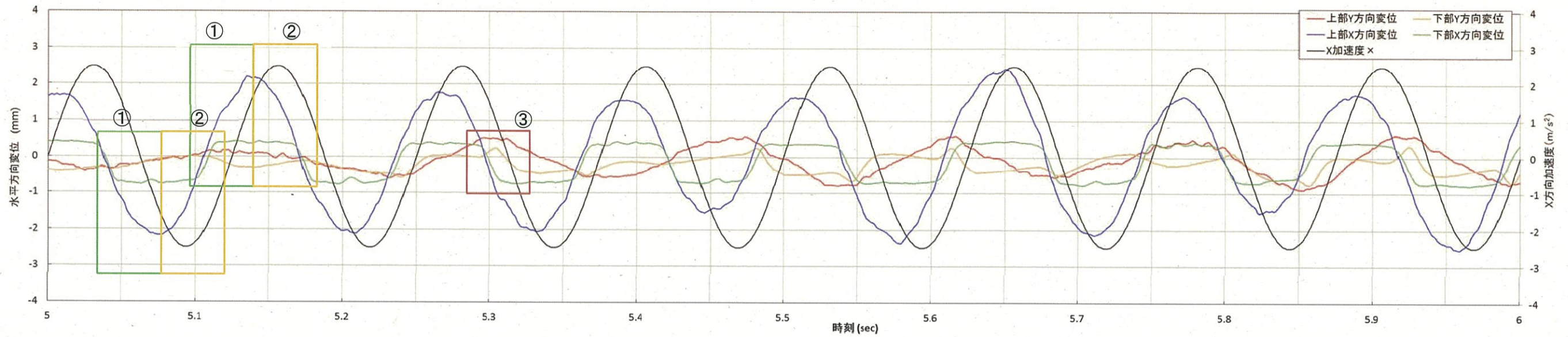
正弦波加振試験の結果より、貯蔵架台上に設置された試験供試体の地震時の挙動が、滑り挙動、回転（楕円）挙動、傾き挙動であることが確認された。合わせて、傾き挙動において、径方向、鉛直方向に大きなひずみが生じることを確認した。また、径方向のひずみは入力された地震力の大きさに応じて大きくなっているため、乾式キャスクに発生する径方向の荷重は、傾き挙動時に貯蔵架台と衝突した時に地震力に応じて、大きくなることを確認した。

一方、鉛直方向のひずみは試験供試体が傾いた時の鉛直方向変位（重心高さ）に応じて大きくなる傾向があるため、乾式キャスクに発生する鉛直方向の荷重は、地震力により乾式キャスクが傾いたときに蓄えられる位置エネルギーに応じて、大きくなることを確認した。

以上の結果から、乾式キャスクに大きな荷重が発生するのは傾き挙動時であり、その時に地震力により加速することで蓄えられる運動エネルギー及び地震力によって傾くことで蓄えられる位置エネルギーを因子として荷重が発生していることから、それらをパラメータとして、荷重が算出されるよう耐震評価式を構築することとした。耐震評価式の構築の考え方を「4.3 耐震評価式の構築」に示す。

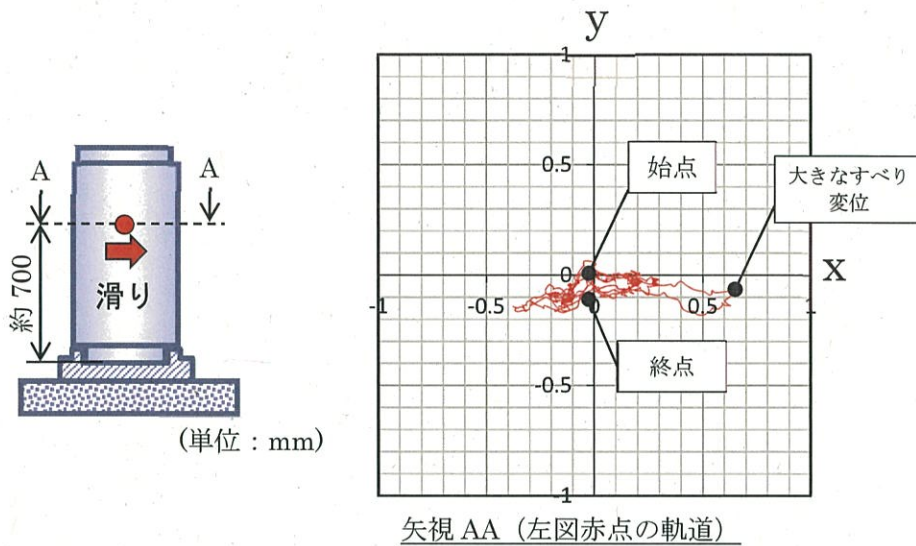


第4-2図 正弦波試験の計測結果

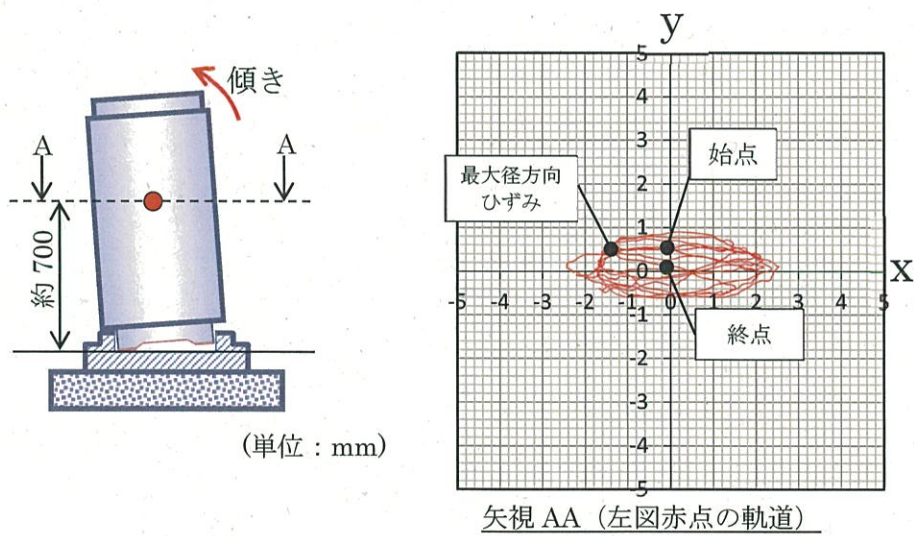


- ① X 方向加速度によって試験供試体に慣性力が働き、加速度と反対の方向に変位が生じている。この時、上部 X 方向変位と下部 X 方向変位が一致している時は X 方向に滑りが発生しており、貯蔵架台に衝突することで傾きが発生し、上部 X 方向変位が大きくなり、下部 X 方向変位は一定となっている。
- ② 傾きが収束すると反対方向に滑り、また貯蔵架台と衝突したところから傾いている。
- ③ 貯蔵架台との衝突時に、試験供試体と貯蔵架台で円筒同士の接触によって Y 方向の荷重が発生しており、Y 方向の傾き挙動が発生し、試験供試体の挙動が回転（楕円）挙動に近づく。

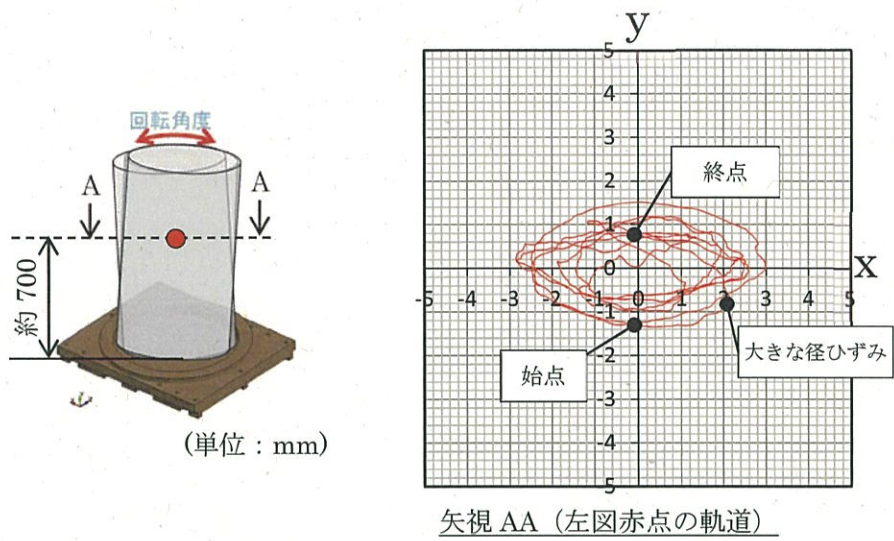
第 4-3 図 正弦波試験の試験供試体変位計測結果



第 4-4 図 滑り挙動 (時刻 4~4.5sec の例)



第 4-5 図 傾き挙動 (時刻 5~6sec の例)



第 4-6 図 回転（楕円）挙動（時刻 9～10sec の例）

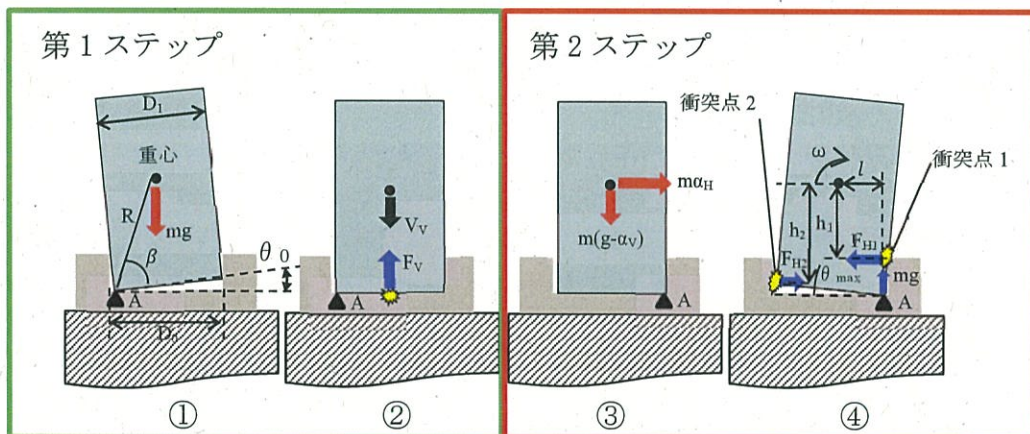
4.3 耐震評価式の構築

「4.2 試験結果」より，試験供試体の挙動として滑り挙動，回転挙動及び傾き挙動が確認され，そのうち傾き挙動において，試験供試体と貯蔵架台が衝突する時に地震力と重心高さに応じて荷重が発生することが確認できた。

この時の試験供試体の挙動を以下に示す内容で考察し，参考資料1「4.3 評価手法及び諸元」に示す地震応答解析に用いる耐震評価式を構築した。

- (1) 耐震評価式の構築にあたり，試験供試体が貯蔵架台に衝突する時の運動エネルギーを求め，エネルギー保存則を用いて衝突荷重を算出する。また，この時に径方向荷重算出には地震力を，鉛直方向荷重算出には試験供試体の重心高さを加味することで，正弦波試験で確認されたそれぞれの影響を考慮する。

試験供試体の運動エネルギーはその速度に比例するため，貯蔵架台衝突時の速度が最大になるよう，乾式キャスクと貯蔵架台のクリアランスは最大値とし，幾何学的な最大傾き角度から貯蔵架台中心部を摩擦等により減速せず通過し，貯蔵架台に衝突する挙動をモデルとして耐震評価式を構築した。モデルを第4-7図に示す。



第4-7図 試験供試体の傾き挙動のモデル

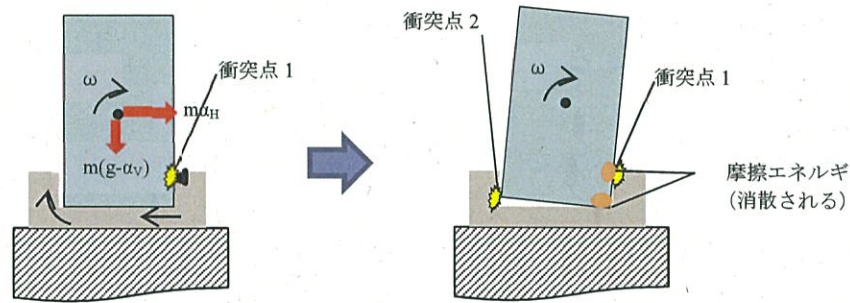
- (2) 傾き状態から正立状態になる時の鉛直方向速度 V_v (第1ステップ)

正弦波試験の結果から，鉛直方向圧縮ひずみの因子が重心高さであることが確認されたため，試験供試体の重心位置が高くなるよう，傾いた状態①から自由落下で正立状態に至る②までの挙動より，試験供試体が貯蔵架台嵌め合い部底面に衝突する直前の試験供試体の鉛直方向速度 V_v の算出式を構築した。算出式の構築にあたっては，試験供試体が傾いた状態①の時の重心高さを考慮した。

(3) 貯蔵架台嵌め合い部衝突直前の試験供試体の角速度 ω (第2ステップ)

正弦波試験の結果より、試験供試体は、正立状態で滑り、嵌め合い部側面に衝突した後、傾き挙動を生じる。この時、試験供試体が最も傾く挙動は、衝突点1を支点として、試験供試体が嵌め合い部の中を滑って傾き、第4-8図(b)のように嵌め合い部の反対側の側面に衝突するまで傾く場合であり、この挙動より、衝突直前の試験供試体回転速度 ω を算出する耐震評価式を構築した。耐震評価式の構築にあたっては、地震力が径方向圧縮ひずみの因子であることが確認されたため、地震力を考慮した。

考慮する地震力は、JEAG4601のFRSの計算方法と同様に地震慣性力を重心位置にZPAを用いることとし、JEAG4601における剛構造物の強度評価に対する考え方を踏まえ、床応答のZPAに対する貯蔵架台の動的応答による増分を2割とした1.2ZPAを使用する。



(a) 試験供試体が側面に衝突 (b) 試験供試体が傾き反対側面に衝突

第4-8図 試験供試体が傾き、嵌め合い部内で最大角度に到達するまでの挙動

なお、加振試験では挙動が移行する際に傾き支点の移動や側面の接触による摩擦によって、試験供試体がつエネルギーが消散しているが、耐震評価式に保守性を考慮する観点から、摩擦等によるエネルギーの消散はないとし耐震評価式を構築した。

以上の考え方にに基づき、構築した地震応答解析における耐震評価式を参考資料1「4.3 評価手法及び諸元」に示す。

4.4 耐震評価式の検証

「4.2 試験結果」より得られた荷重と、「4.3 耐震評価式の構築」により構築した耐震評価式より算出した荷重を比較し、耐震評価式の妥当性を確認する。

正弦波試験で観察された試験供試体の回転挙動と傾き挙動における径方向圧縮ひずみ及び鉛直方向荷重（加速度）と、試験供試体諸元及び幾何学的に決まる初期傾き角 θ_0 を用いて耐震評価式より算出した径方向圧縮ひずみ及び鉛直方向荷重（加速度）を比較した結果を第4-2表、第4-9図及び第4-10図に示す。

正弦波試験の結果と耐震評価式より算出した荷重の比較の結果、耐震評価式より求めた荷重は試験結果を上回っていることを確認した。

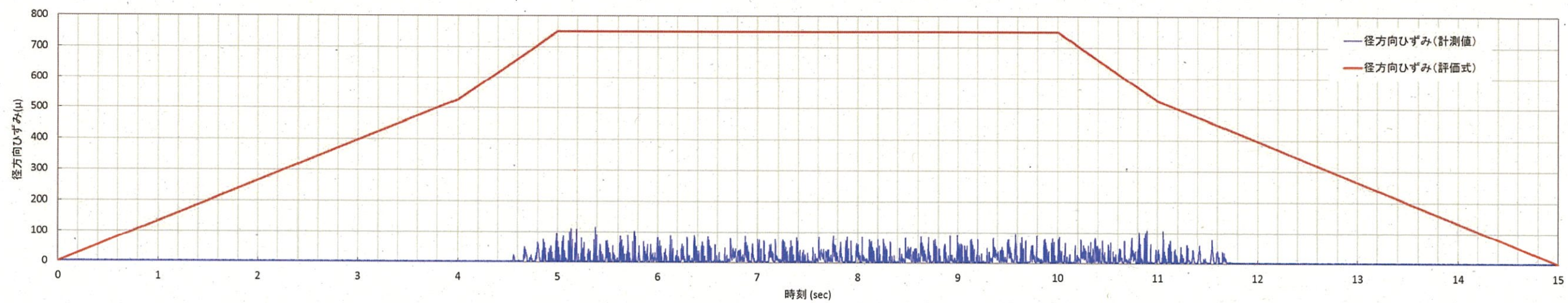
これは、耐震評価式では、荷重の算出にあたり、摩擦等によるエネルギーの消散を考慮せず、交番荷重である地震力を傾き方向に衝突時まで入力し続け、乾式キャスクがもつエネルギーを全て衝突荷重としたことによって、正弦波試験の結果から得られた荷重より保守的な結果になったと考えられる。

また、試験の結果から地震力が大きな領域でのひずみ量は回転挙動と傾き挙動それぞれでほぼ一定の大きさとなる。正弦波試験は同じ大きさ、特性の波を繰り返し入力する試験であり、繰り返し入力しても振動の増幅等は発生していないことから、試験は1回であるが、正弦波を繰り返し入力していることで、ばらつきの影響は考慮されている。

第4-2表 比較結果

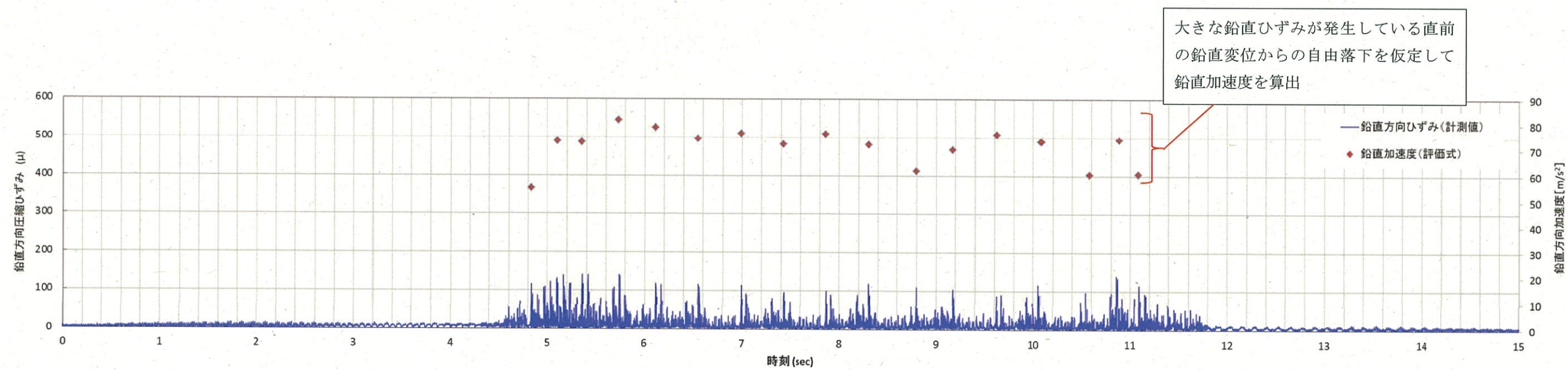
	半径方向		鉛直方向		
	圧縮ひずみ (μ)		衝突加速度 (G)		鉛直ひずみ (μ)
	計測値	評価式	計測値	評価式	計測値
回転挙動 (注1)	102	749	2.5	22	118
傾き挙動	116		2.1		141

(注1)：回転挙動中の傾き挙動時に発生。



(径方向ひずみの評価式の計算条件： $\theta_0=1.2$ 度， $\alpha_H=2.5\text{m/s}^2$ (5秒~10秒)， $\alpha_V=0\text{m/s}^2$)

第 4-9 図 正弦波加振試験の計測結果 (径方向圧縮ひずみ)



第 4-10 図 正弦波加振試験の計測結果 (鉛直方向圧縮ひずみ)

5. 周波数成分分割波試験

「4. 正弦波試験」で把握した試験供試体の挙動が、地震波の周波数特性の影響を受けるか確認するために、「3. 試験計画」に示す試験装置を用いて、短周期（10～45Hz 卓越）、中周期（4～15Hz 卓越）及び長周期（1～6Hz 卓越）の加振波による1軸加振試験を実施した。試験に用いた加振波を「5.1 加振波」に示す。

加振試験の結果を「5.2 試験結果」に、耐震評価式の検証結果を「5.3 耐震評価式の検証」に示す。

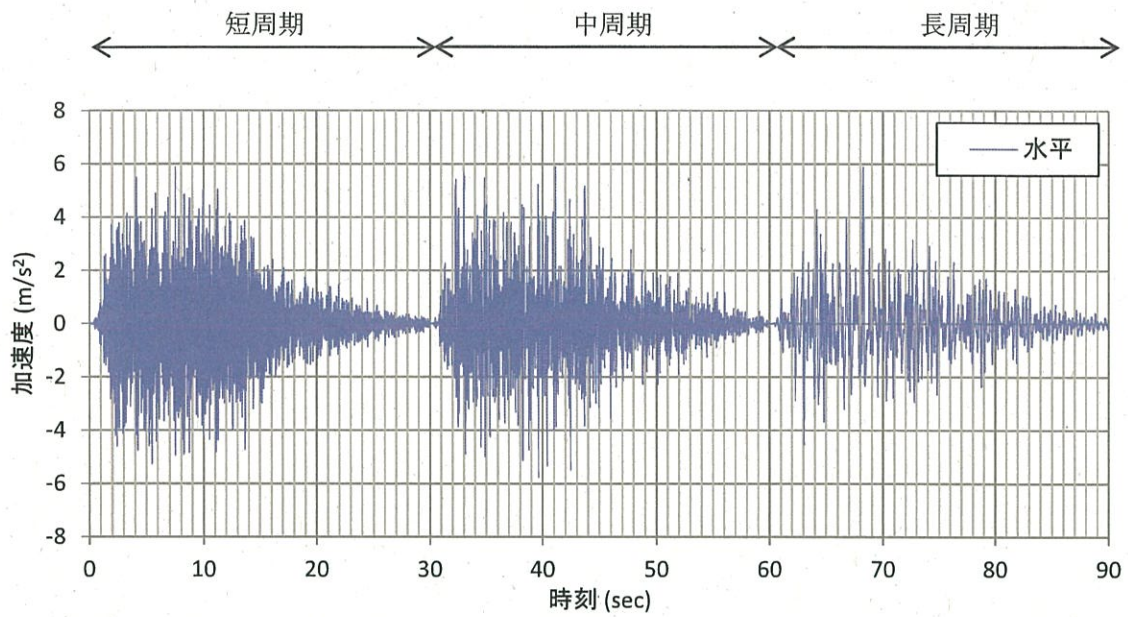
5.1 加振波

第5-1表に、本試験に適用した加振波及び加振方向を示す。また、第5-1図に時刻歴波形及びFRSを示す。

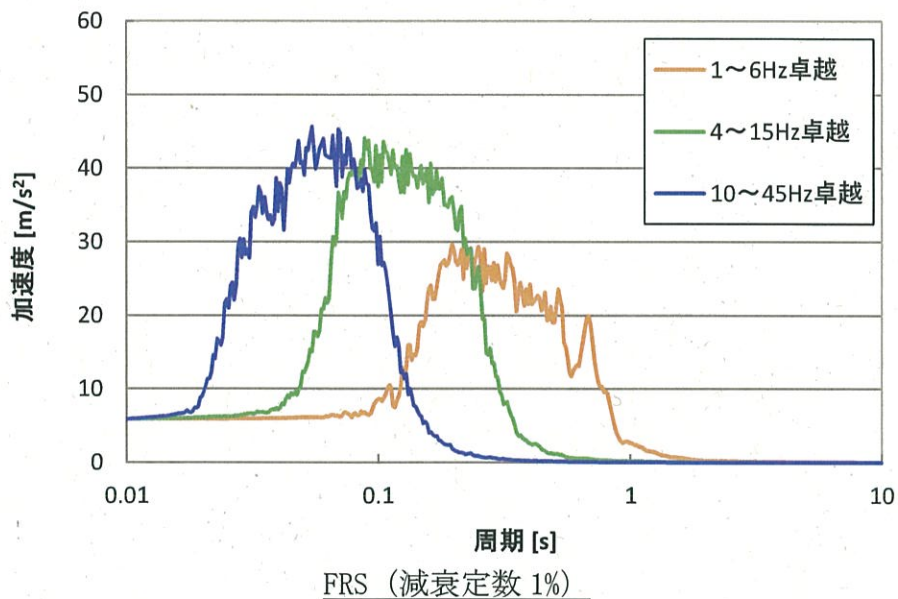
第5-1表 加振波及び加振方向

周波数成分分割波		備考	
短周期	水平1方向	水平方向のZPA (m/s ²)	5.88
		周期成分	10～45Hz 卓越 ^{※1}
中周期		水平方向のZPA (m/s ²)	5.88
		周期成分	4～15Hz 卓越 ^{※1}
長周期		水平方向のZPA (m/s ²)	5.88
		周期成分	1～6Hz 卓越 ^{※1}

※1 周波数成分は、加振波ベースのものを示す



時刻歴波



第 5-1 図 周波数成分分割波 時刻歴波形及び FRS

5.2 試験結果

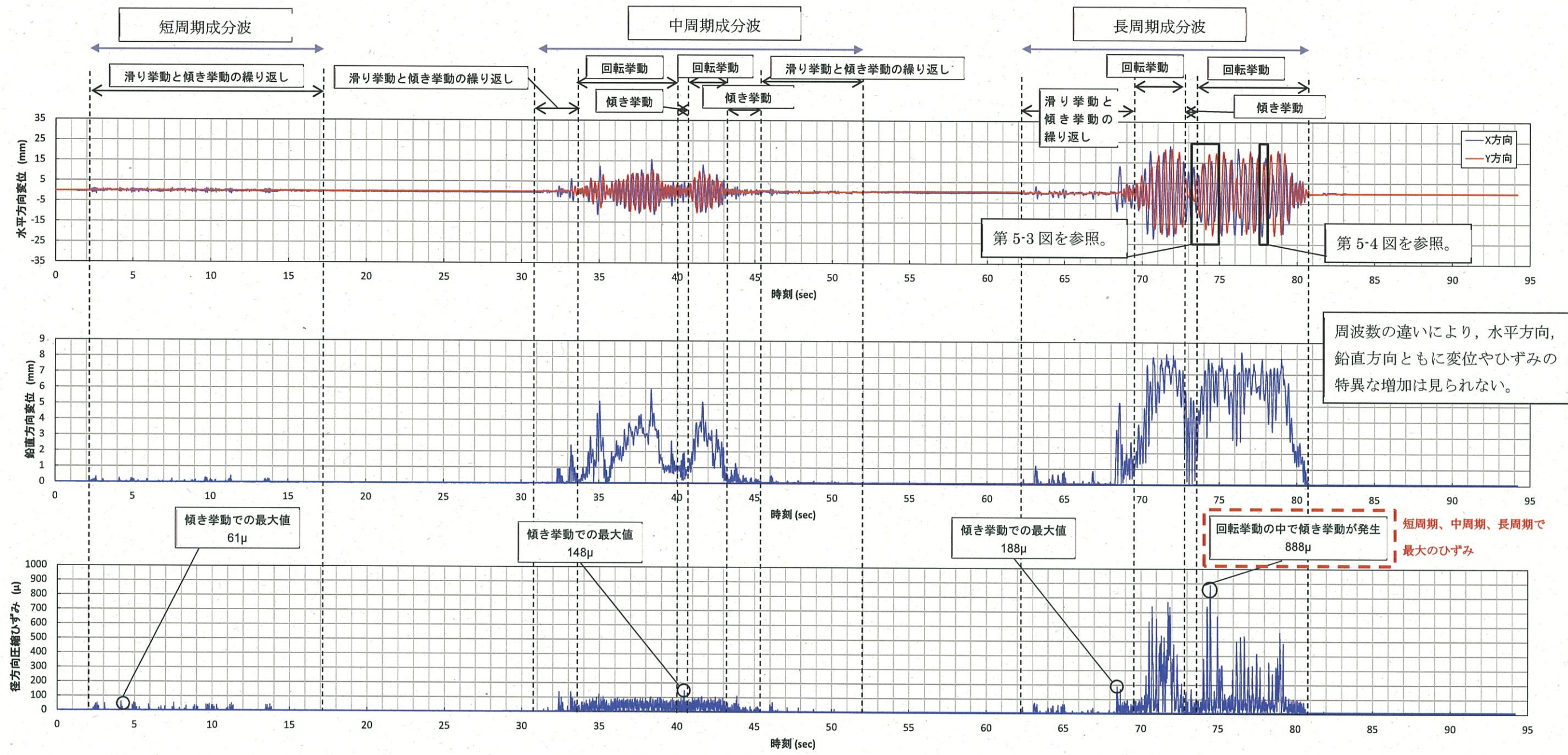
第 5-2 図に、周波数成分分割波試験の計測結果として、試験供試体の水平方向変位及び鉛直方向変位（出力位置は第 3-4 図参照）、貯蔵架台に生じた径方向圧縮ひずみ（嵌め合い部に複数設置したひずみゲージにより計測した値のうち最大値）を示す。

周波数成分分割波試験の結果より、試験供試体の挙動は以下のとおり整理される。

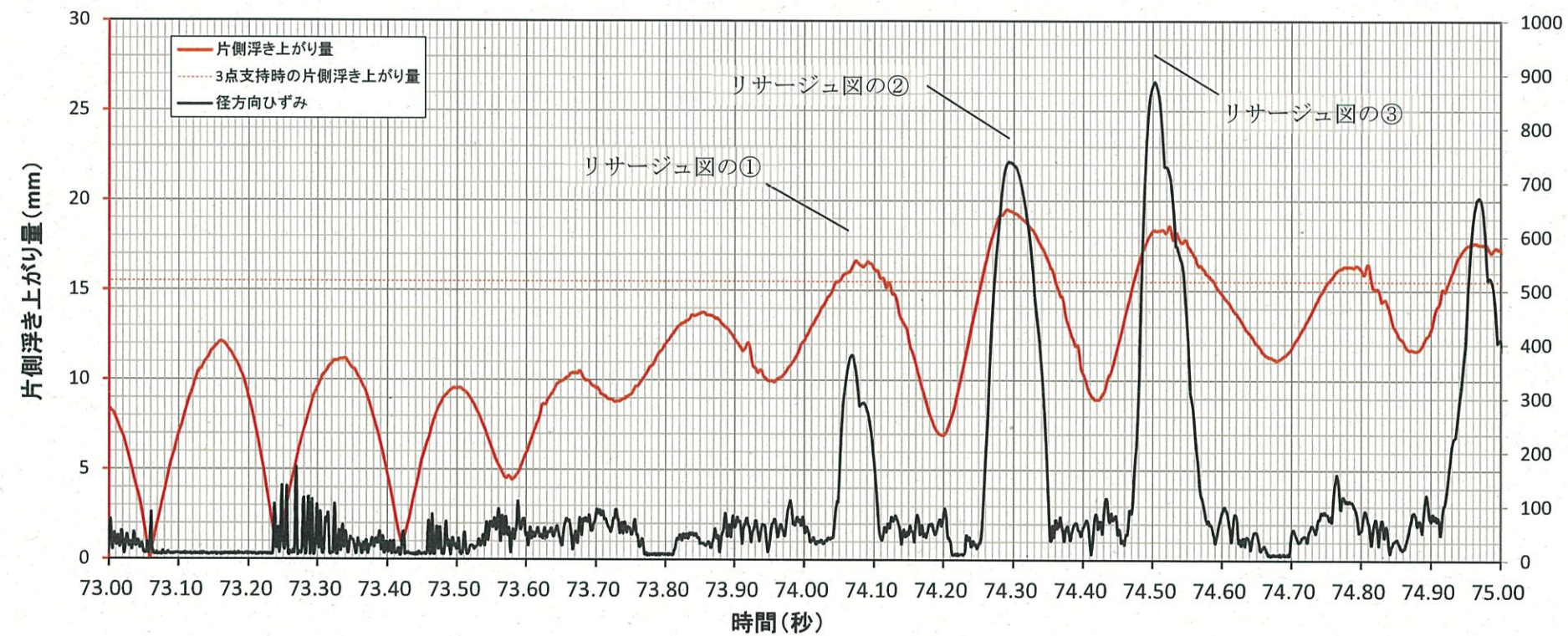
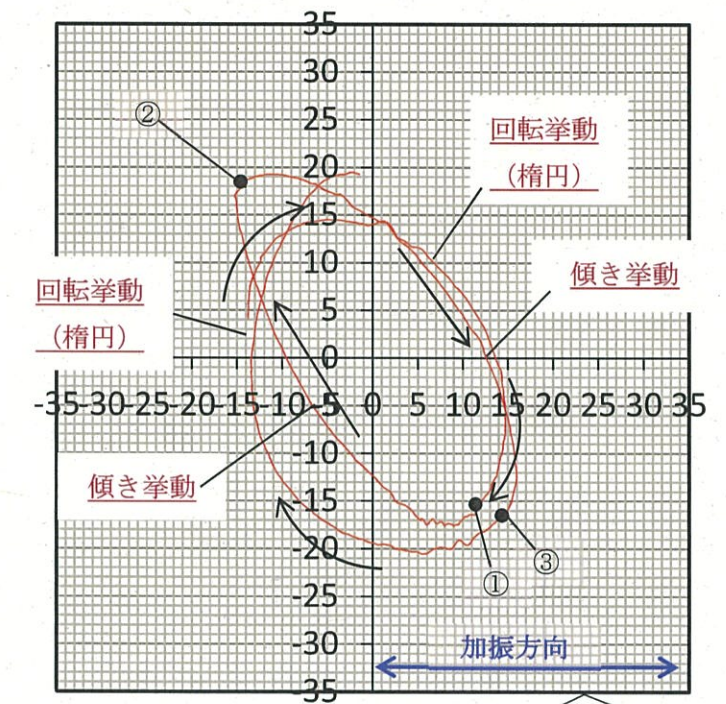
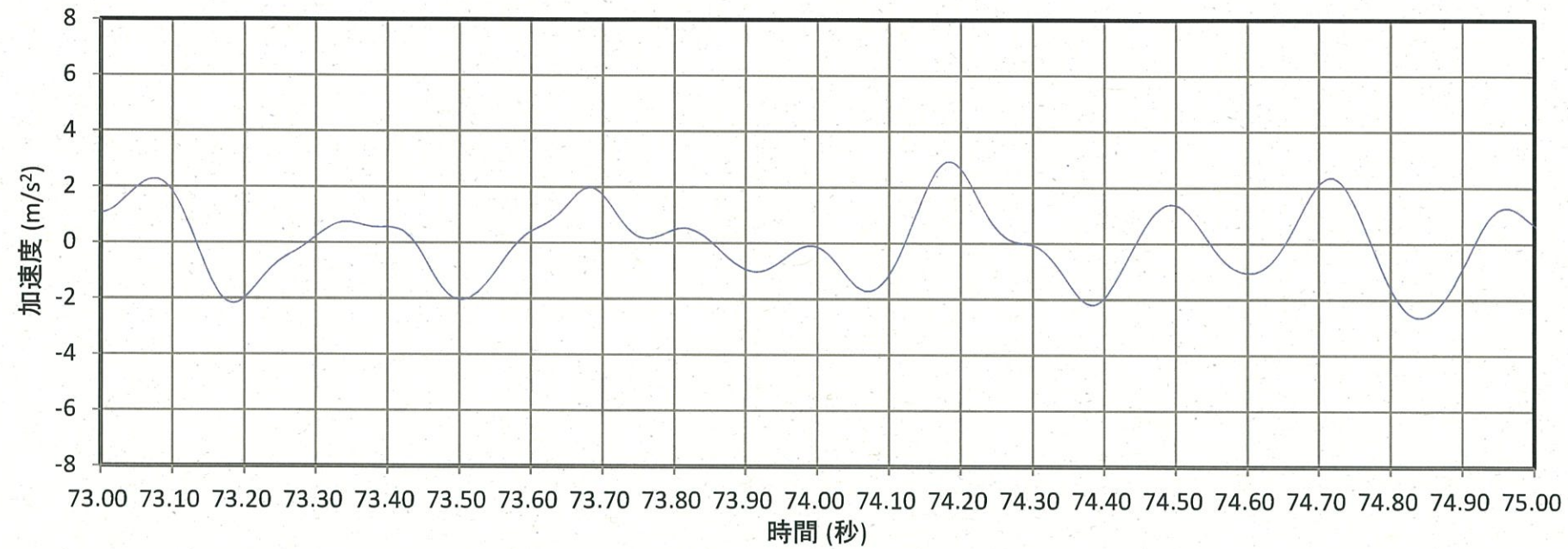
- ・滑り、回転、傾き挙動は「4. 正弦波試験」で確認したとおり発生する。なお、「4. 正弦波試験」での試験供試体の回転挙動は楕円軌道であったが、周波数成分分割波試験においては、より円軌道に近い挙動となっている。これは、正弦波試験に比べて入力加速度が大きいこと、貯蔵架台嵌め合い部との衝突荷重が大きくなり、周方向へ運動する量が大きくなり、より円軌道に近い挙動を示したものと考えられる。
- ・短周期地震では、地震慣性力のベクトルが短期間に変わること、滑り挙動の時に径方向に衝突せず、傾き挙動、回転挙動が発生しなかった。中／長周期地震では、「4. 正弦波試験」と同様の挙動が確認できた。
- ・中周期地震において、回転挙動より傾き挙動時に発生する荷重が厳しい結果となった。
- ・長周期地震において、回転挙動の中で発生した傾き挙動での最大ひずみが 888μ となり、短／中周期地震での結果に比べて大きな荷重が発生している。これは試験供試体に入力される慣性力のベクトルが同じ方向に比較的長く続くため、傾き挙動が長く続いた結果であると考察される。
- ・周波数の違いにより、水平方向、鉛直方向ともに変位やひずみの特異な増加は見られなかったため、試験供試体に入力される加速度が特定の周期帯で拘束系に発生するような、共振は発生せず、加速度の増幅はないことを確認した。
- ・軌道が円に近い回転挙動では、径方向ひずみが小さいことを確認した。

以上より、試験供試体の挙動は、地震波の特性によらず、「4. 正弦波試験」で確認したとおり、滑り挙動、回転挙動及び傾き挙動が発生し、このうち傾き挙動時に試験供試体と貯蔵架台に大きな径方向圧縮ひずみが発生することを確認した。

なお、長周期地震においては、大きな荷重が発生する傾向があり、「4. 正弦波試験」で考察したとおり、試験供試体の径方向の荷重は地震力に応じて大きくなることを確認した。

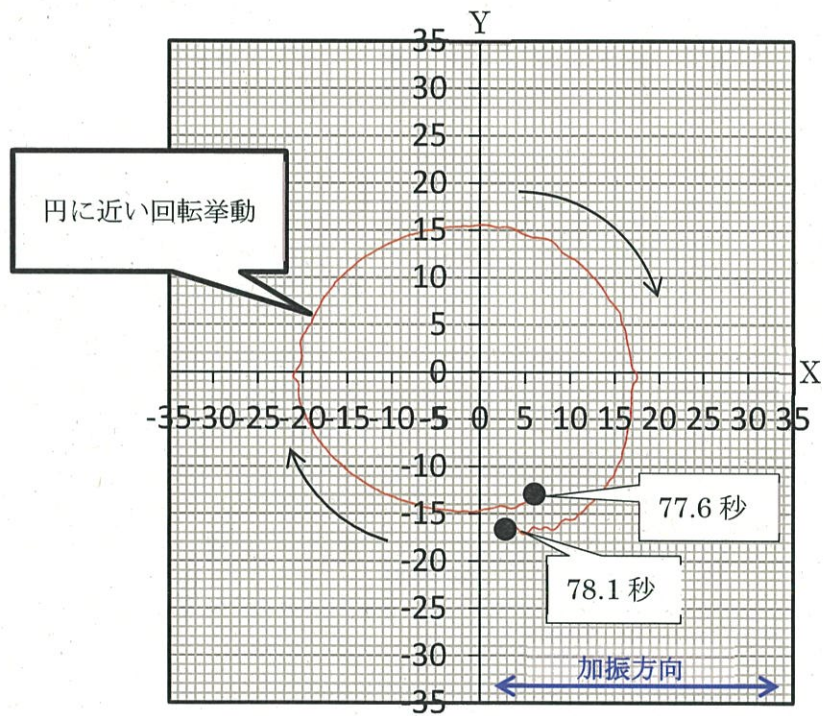
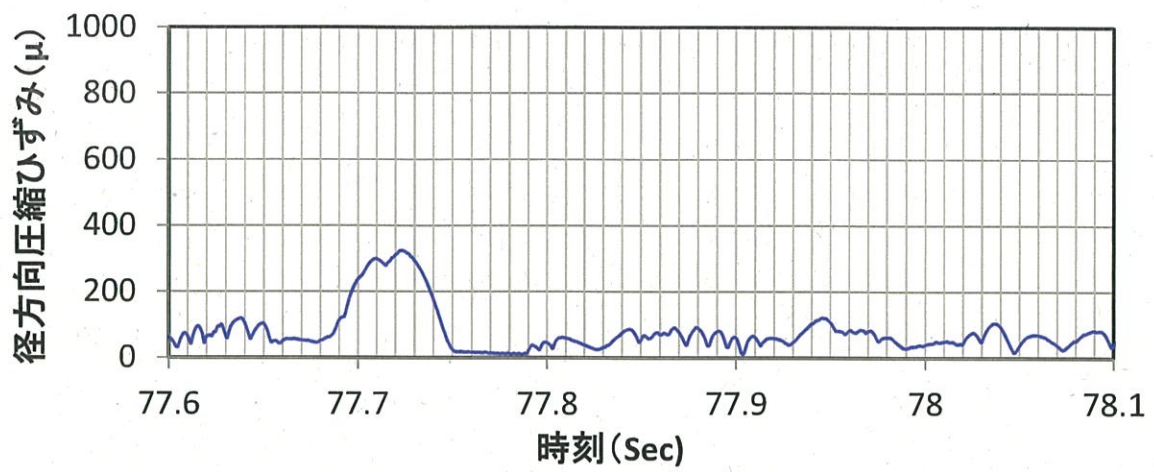


第 5-2 図 周波数成分分割波加振試験の計測結果



- ① (ひずみ約 380 μ)
回転挙動から傾き挙動へ移行するタイミング
- ② (ひずみ約 740 μ)
傾き挙動によりひずみが発生。
- ③ (ひずみ 888 μ)
傾き挙動により最大ひずみが発生。その後、回転挙動へ移行。

第 5-3 図 最大径方向ひずみ発生時刻近傍の挙動分析図



第5-4図 乾式キャスクの挙動分析（径方向ひずみが小さい時間帯）

5.3 耐震評価式の検証

「5.2 試験結果」より得られた荷重と、「4.3 耐震評価式の構築」により構築した耐震評価式より算出した荷重を比較し、耐震評価式の妥当性を確認する。

周波数成分分割波試験で観察された試験供試体の回転挙動と傾き挙動における径方向圧縮ひずみ及び鉛直方向荷重（加速度）を、試験供試体諸元及び幾何学的に決まる初期傾き角 θ_0 を用いて耐震評価式より算出した径方向圧縮ひずみ及び鉛直方向荷重（加速度）と比較した結果を第5-4表に示す。

周波数成分分割波試験は加振波の周波数特性で乾式キャスクが特異な挙動を示すか確認するために実施したため、試験回数は1回であるが、周波数成分分割波試験の結果と耐震評価式より算出した荷重の比較の結果、耐震評価式より求めた荷重は試験結果を上回っており、耐震評価式が十分な保守性を確保していることを確認した。

第5-4表 比較結果

	半径方向		鉛直方向		
	圧縮ひずみ (μ)		衝突加速度 (G)		鉛直ひずみ (μ)
	計測値	評価式	計測値	評価式	計測値 ^(注3)
回転挙動	888 ^(注1)	1700	- ^(注2)	22	-
傾き挙動	188		4.0		-

(注1) 回転挙動中の傾き挙動時に発生。

(注2) 回転挙動では試験供試体底面が貯蔵架台と衝突しないため、衝突加速度は発生しない。

(注3) 周波数成分分割波では鉛直ひずみを計測していない。

6. 仮想 Ss 波試験

1 軸方向の加振試験である「4. 正弦波試験」及び「5. 周波数成分分割波試験」より妥当性が確認された耐震評価式が、3 軸方向地震時の耐震評価に適用可能か確認するために、「3. 試験計画」に示す試験装置を用いて、仮想 Ss 波による 3 軸同時加振試験を実施した。試験に用いた加振波を「6.1 加振波」に示す。

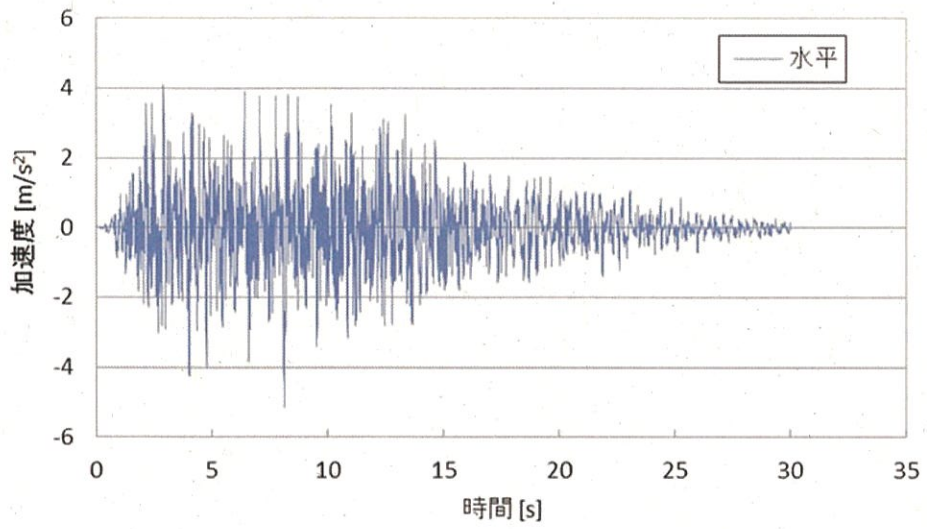
加振試験の結果を「6.2 試験結果」に、耐震評価式の検証の結果を「6.3 耐震評価式の検証」に示す。

6.1 加振波

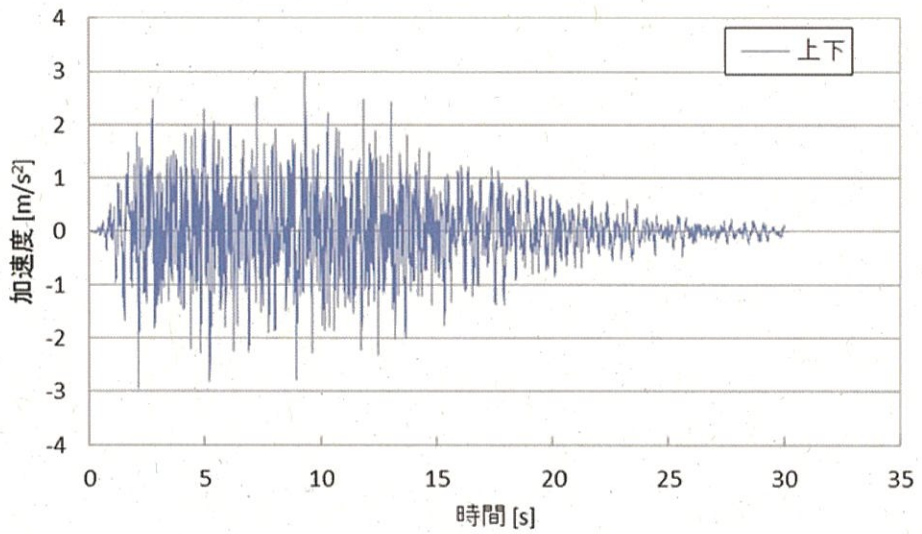
第 6-1 表に、本試験に適用した加振波及び加振方向を示す。また、第 6-1 図に時刻歴波形を示す。

第 6-1 表 加振波及び加振方向

加振波	加振方向	備考	
仮想波	水平 2 方向及び鉛直方向	水平方向の ZPA (m/s^2)	5.15
		鉛直方向の ZPA (m/s^2)	3.00



水平方向



鉛直方向

第 6-1 図 仮想 Ss 波 時刻歴波形

6.2 試験結果

第 6-2 図に、仮想 Ss 波の試験結果として、試験供試体の水平方向変位及び鉛直方向変位（出力位置は第 3-4 図参照）、貯蔵架台に生じた径方向圧縮ひずみ（嵌め合い部に複数設置したひずみゲージにより計測した値のうち最大値）、鉛直方向圧縮ひずみ（脚部に複数設置したひずみゲージにより計測した値のうち最大値）を示す。

計測データより、地震時の試験供試体の挙動は、「4. 正弦波試験」で確認したとおり、滑り挙動、回転挙動及び傾き挙動であり、このうち傾き挙動時に試験供試体と貯蔵架台に大きな荷重が発生することを確認した。なお、回転挙動においては、ほとんどが楕円軌道を描いており、また、X 方向と Y 方向の水平方向変位が同位相となり、傾き挙動に近い挙動（直線運動での貯蔵架台側面への衝突及び試験供試体が正立状態での接地）となって、大きな径方向圧縮ひずみ及び鉛直方向圧縮ひずみが発生することを確認した。

ここで、試験供試体及び貯蔵架台に発生する荷重が最も厳しい挙動について、水平方向の衝突で発生する「貯蔵架台嵌め合い部径方向ひずみ」及び鉛直方向の衝突で発生する「貯蔵架台の鉛直方向ひずみ」を基に検証する。

(1) 貯蔵架台嵌め合い部径方向ひずみ

径方向圧縮ひずみは、第 6-2 図(d) に示す通り、滑り挙動では大きなピークが見られず、回転挙動での最大値は 734μ （ただし、回転挙動中に傾き挙動に近い挙動が発生した際に計測）、傾き挙動での最大値は 771μ であり、最大のひずみは傾き挙動で発生していることを確認した。

架台嵌め合い部径方向圧縮ひずみが最大となるタイミング(5.7sec 付近)の水平変位と径方向圧縮ひずみの関係及び水平面における試験供試体の挙動を示したリサージュ曲線を第 6-3 図に示す。第 6-3 図に示す通り、X 方向変位と Y 方向変位が同位相となり、試験供試体が直線的な運動で架台側面に衝突したことにより、貯蔵架台嵌め合い部に大きなひずみが発生したことがわかる。

回転挙動中で架台嵌め合い部径方向圧縮ひずみが最大となるタイミング(11.6sec 付近)の水平変位と径方向圧縮ひずみの関係及び水平面における試験供試体の挙動を示したリサージュ曲線を第 6-4 図に示す。第 6-4 図に示すとおり、回転挙動中に大きな径方向ひずみが発生したタイミングでは、回転挙動中に X 方向と Y 方向の変位が同位相に近づいており、傾き挙動に近い直線的な挙動で架台側面に衝突し、大きな径方向ひずみが発生していることを確認した。

(2) 貯蔵架台の鉛直方向ひずみ

鉛直方向圧縮ひずみは、第 6-2 図(e) に示す通り、滑り挙動では明瞭なピークが少なく、回転挙動での最大値は 218μ （ただし、回転挙動中に傾き挙

動に近い挙動が発生した際に計測), 傾き挙動での最大値は 231μ であった。

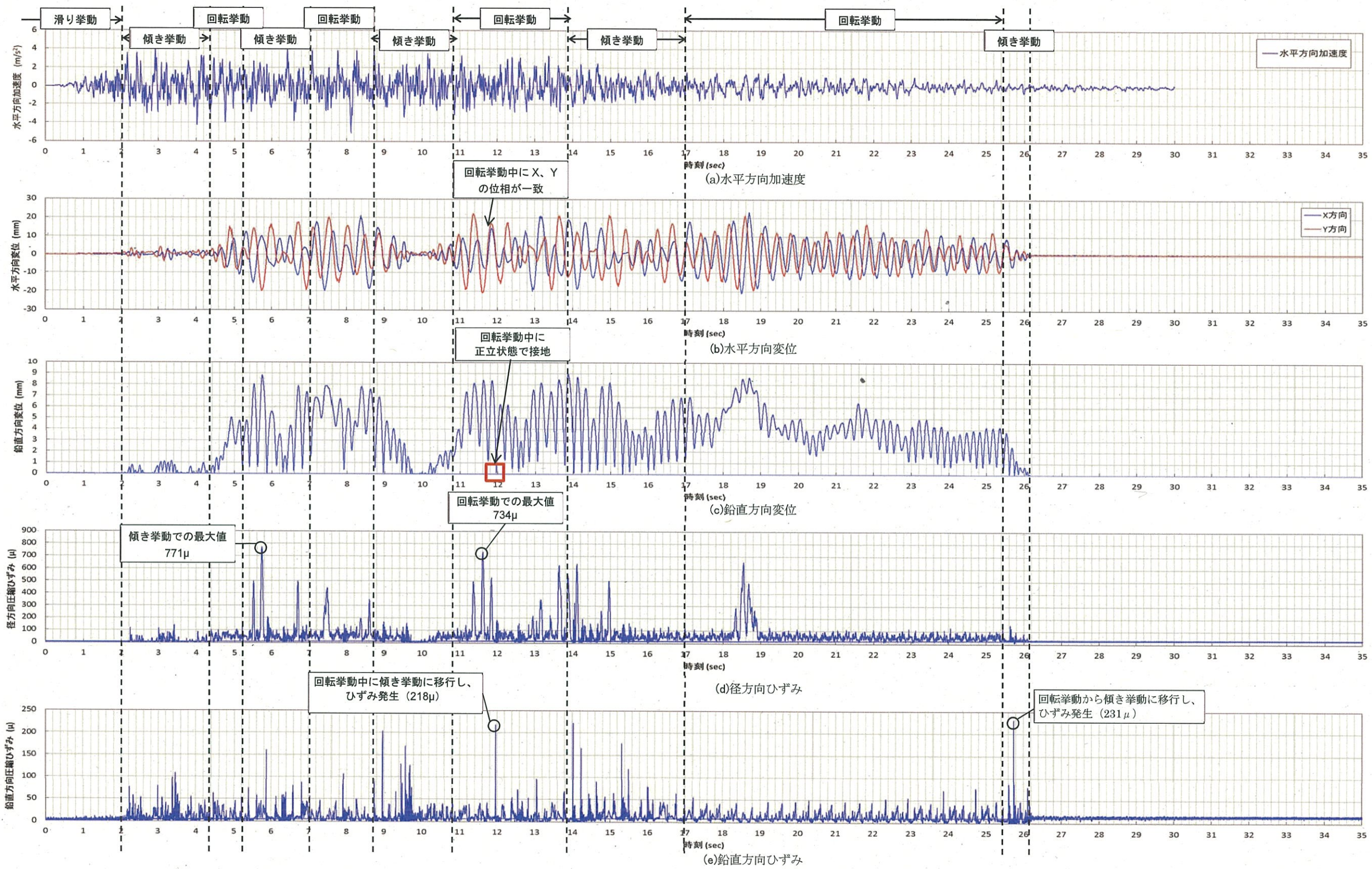
架台底面の鉛直方向ひずみが最大となるのは, 応答終盤 (約 25.7 秒) であり, これは地震力が小さくなるに従い回転挙動から傾き挙動へ移行する際に試験供試体が正立状態で貯蔵架台底面に接地し, ひずみ発生していると考えられる。

回転挙動中の最大鉛直ひずみが発生するタイミング (約 12sec) では, 第 6-4 図に示すとおり, 回転運動中に X 方向と Y 方向の変位が同位相に近づいており, X 方向と Y 方向鉛直変位が同時に 0 となった際に, キャスクが正立状態で貯蔵架台に接地し, 大きな鉛直方向ひずみが発生していることを確認した。

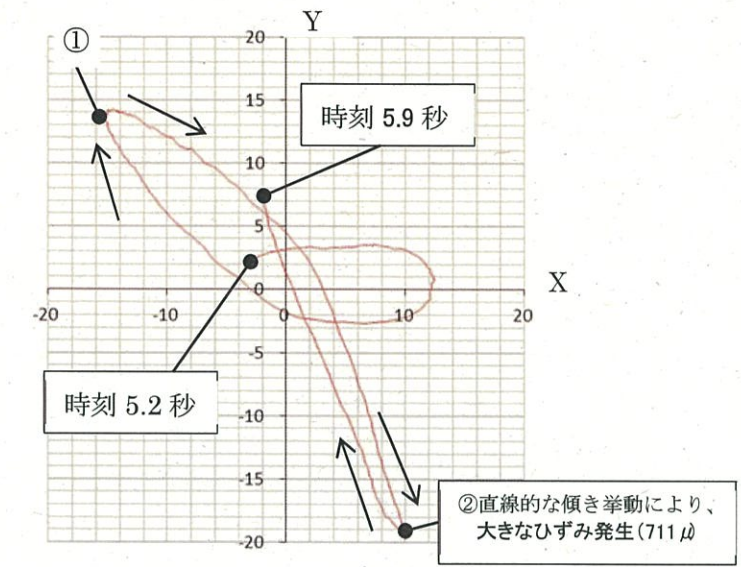
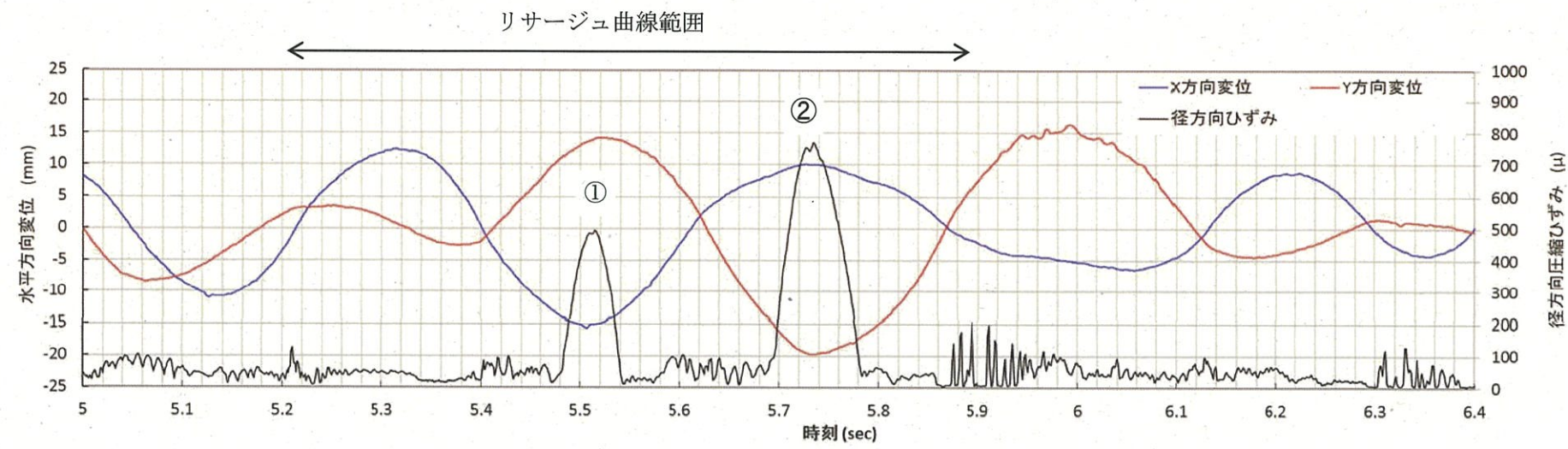
以上より, 試験供試体の挙動は, 実機相当の 3 軸方向の地震波に対しても「4. 正弦波試験」及び「5. 周波数成分分割波試験」にて確認された挙動と同様に滑り挙動, 回転挙動及び傾き挙動が発生し, このうち傾き挙動時に試験供試体と貯蔵架台が衝突することで, 径方向は地震力, 鉛直方向は正立状態で接地する直前の鉛直方向変位 (重心高さ) に応じた荷重が発生することが確認できた。

また, 鉛直方向の地震力によって, 試験供試体が浮き上がったたり, 鉛直方向の荷重が「4. 正弦波試験」及び「5. 周波数成分分割波試験」の結果に比べて増幅するような傾向はみられなかった。

なお, これらの挙動は 4 回の試験で同様の挙動を示すことが確認されている。

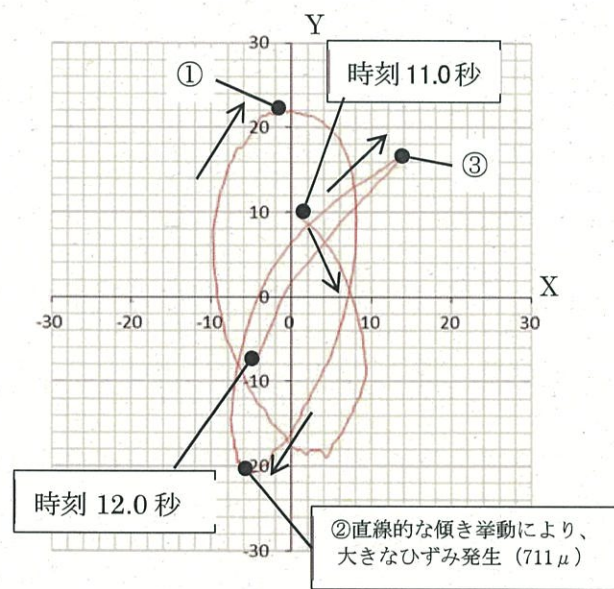
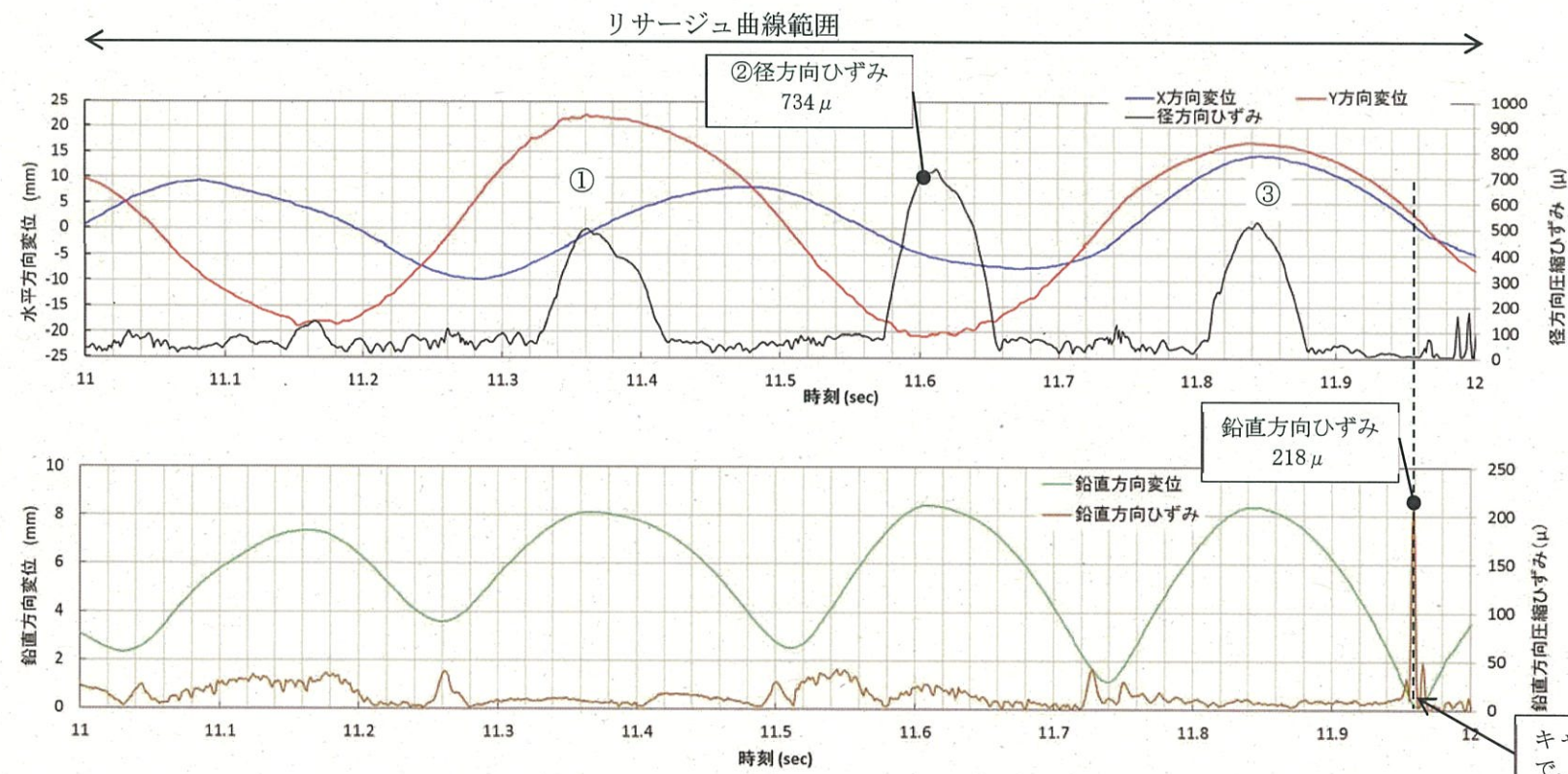


第 6-2 図 仮想 Ss 波加振試験の計測結果 (1 回目)



リサーチ曲線 (5.2 秒~5.9 秒)

第 6-3 図 仮想 Ss 波 傾き挙動分析結果 (1 回目)



リサーチ曲線 (11 秒~12 秒)

第 6-4 図 仮想 Ss 波 回転挙動分析結果 (1 回目)

6.3 耐震評価式の検証

「6.2 試験結果」より得られた荷重と、「4.3 耐震評価式の構築」により構築した耐震評価式より算出した荷重を比較し、耐震評価式の妥当性を確認する。

仮想 Ss 波試験で観察された試験供試体の回転挙動と傾き挙動における径方向圧縮ひずみ及び鉛直方向荷重（加速度）を、試験供試体諸元及び幾何学的に決まる初期傾き角 θ_0 を用いて耐震評価式より算出した径方向圧縮ひずみ及び鉛直方向荷重（加速度）と比較した結果を第 6-2 表に示す。

仮想 Ss 波試験の結果と耐震評価式より算出した荷重の比較の結果、耐震評価式より求めた荷重は試験結果を上回っており、耐震評価式が十分な保守性を確保していることを確認した。

また、第 6-2 図に示すとおり、仮想 Ss 波試験で確認されたひずみの大きさにはある程度のばらつきがあるが、いずれも、耐震評価式より算出したひずみ量を下回っており、耐震評価式がもつ保守性地震時の乾式キャスクが示す荷重のばらつきは包絡されていると考えられる。

第 6-2 表 比較結果

		半径方向			鉛直方向					
		圧縮ひずみ (μ)		評価値	衝突加速度 (G)		鉛直ひずみ ^(注1) (μ)			
		計算値 ^(注1)	評価値		計算値 ^(注1)	評価値	計算値 ^(注1)	評価値		
回転挙動	1回目	734 ^(注2) (101%)	平均 728	2200	-	-	22	218 (198%)	平均 110	
	2回目	741 ^(注2) (102%)						73 (66%)		
	3回目	653 ^(注2) (90%)						83 (75%)		
	4回目	785 ^(注2) (108%)						66 (60%)		
傾き挙動	1回目	771 (84%)	平均 914	2200	平均 4.5	4.8 (107%)	22	231 (86%)	平均 268	
	2回目	981 (107%)						5.1 (113%)		337 (126%)
	3回目	999 (109%)						3.8 (84%)		200 (75%)
	4回目	906 (99%)						4.4 (98%)		303 (113%)

(注1) () 内の数値は、各挙動で算出された計算値（4回分）の平均値に対する相対比率である。

(注2) 回転挙動中の傾き挙動時に発生。

(注 3) 回転挙動では試験供試体底面が貯蔵架台と衝突しないため、衝突加速度は発生しない。

7. 伊方 Ss-1 波試験

「4. 正弦波試験」、「5. 周波数成分分割波試験」及び「6. 仮想 Ss 波試験」にて確認した耐震評価手法が、実機に適用可能か確認するために、「3. 試験計画」に示す試験装置を用いて、伊方 Ss-1 波による 3 軸同時加振試験を実施した。試験に用いた加振波を「7.1 加振波」に示す。

加振試験の結果を「7.2 試験結果」に、耐震評価式の検証の結果を「7.3 耐震評価式の妥当性の検証」に示す。

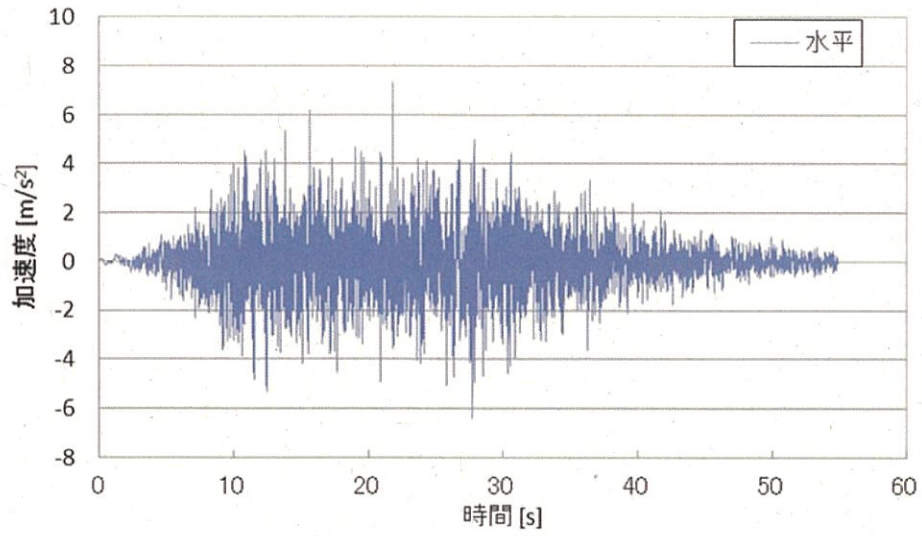
7.1 加振波

第 7-1 表に、本試験に適用した加振波及び加振方向を示す。また、第 7-1 図に時刻歴波形を示す。

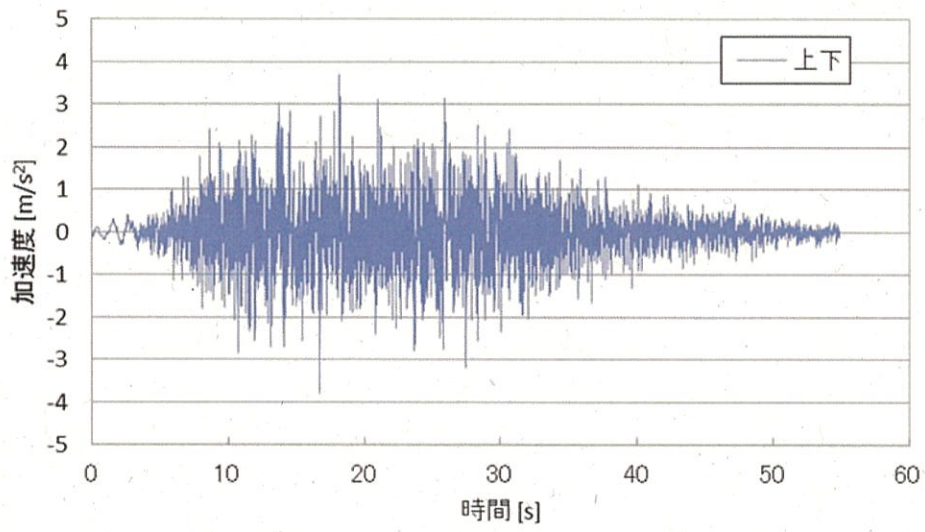
加振試験は、試験供試体を設置した加振試験台にて、同じ波で 4 回繰り返し実施した。

第 7-1 表 加振波及び加振方向

加振波	加振方向	備考
基準地震動 Ss-1	水平 2 方向及び鉛直方向	21m 盤の地震応答を用いる



水平方向



鉛直方向

第 7-1 図 伊方地震波 時刻歴波形

7.2 試験結果

第7-2図に、伊方 Ss-1 波加振試験の計測結果として、試験供試体の水平方向変位及び鉛直方向変位（出力位置は第3-4図参照）、貯蔵架台に生じた径方向圧縮ひずみ（嵌め合い部に複数設置したひずみゲージにより計測した値のうち最大値）、鉛直方向圧縮ひずみ（脚部に複数設置したひずみゲージにより計測した値のうち最大値）を示す。図中で分類したように、試験供試体の挙動は、滑り挙動、回転挙動、傾き挙動であることを確認した。また、傾き挙動、及び回転挙動で最大の径方向圧縮ひずみが発生している時刻付近の詳細な挙動分析結果をそれぞれ、第7-3図、第7-4図に示す。

各挙動に対して、代表時刻における、水平面での試験供試体の変位を示すリサージュ図を第7-5図～第7-7図に示す。

計測データより、地震時の試験供試体の挙動は、「4. 正弦波試験」で確認したとおり、滑り挙動、回転挙動及び傾き挙動であり、このうち傾き挙動時に試験供試体と貯蔵架台に大きな荷重が発生することを確認した。

ここで、試験供試体及び貯蔵架台に発生する荷重が最も厳しい挙動について、水平方向の衝突で発生する「貯蔵架台嵌め合い部径方向ひずみ」及び鉛直方向の衝突で発生する「貯蔵架台の鉛直方向ひずみ」を基に検証する。

(1) 貯蔵架台嵌め合い部径方向ひずみ

径方向圧縮ひずみは、第7-2図(c)に示す通り、滑り挙動では大きなピークが見られず、回転挙動での最大値は 579μ 、傾き挙動での最大値は 804μ であり、傾き挙動の値が支配的であった。

第7-2図から、31sec 付近のデータを第7-8図、第7-9図に示す。貯蔵架台嵌め合い部径方向ひずみが最大となるタイミング（30.6sec 付近）では、試験供試体の片側浮き上がり量が大きく、試験供試体に大きな水平応答加速度が発生していることから、試験供試体が衝突したことにより貯蔵架台嵌め合い部に大きなひずみが発生したことがわかる。水平面における試験供試体の挙動を追ったリサージュ図も、このタイミングで試験供試体が傾き挙動にあったことを示しており、傾き挙動において、地震力の大きさに応じて、試験供試体と貯蔵架台に最大のひずみが生じたことを確認した。

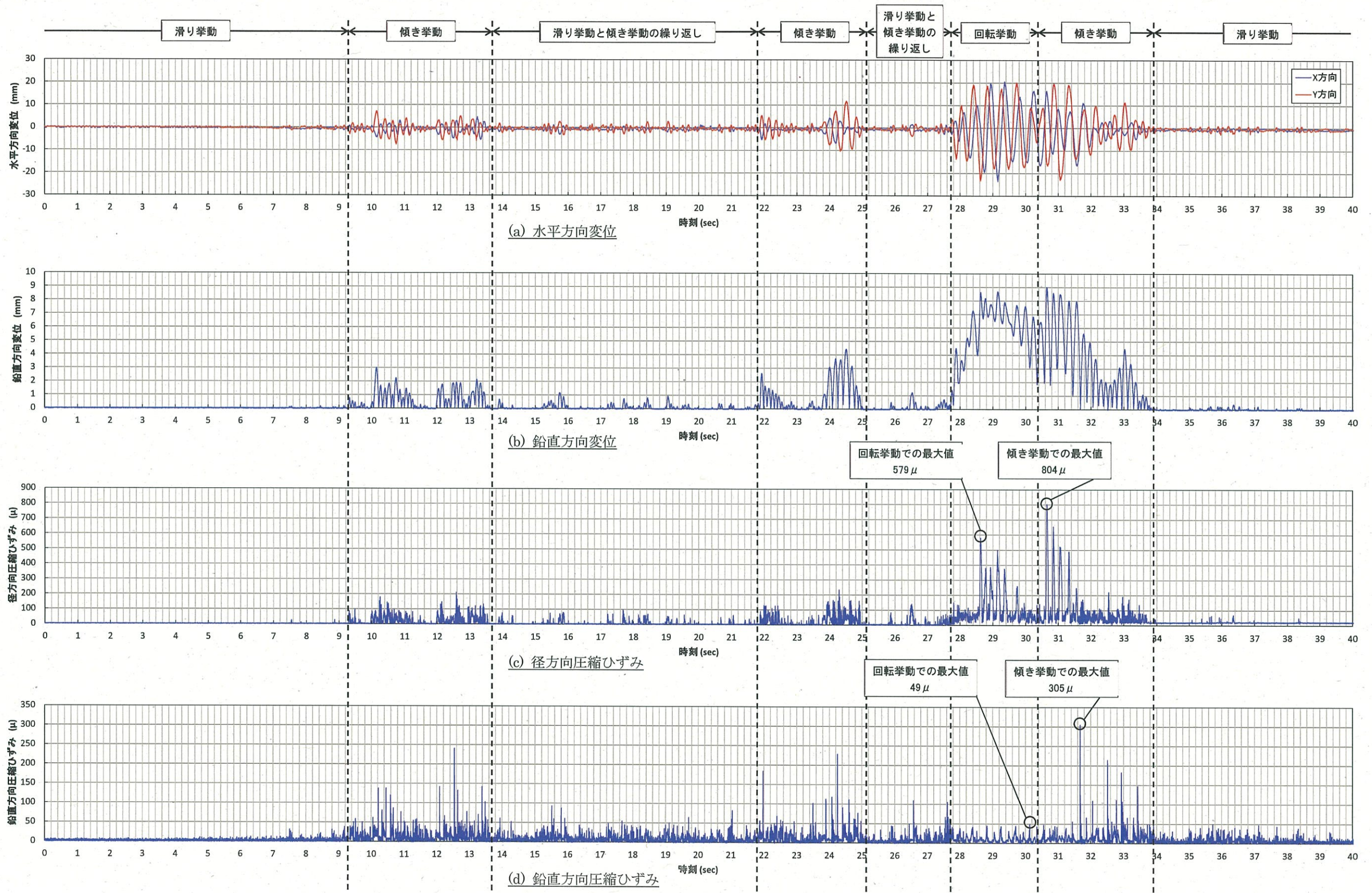
回転挙動において発生している最大値の 579μ については、第7-4図から、回転挙動中に傾き挙動に近い直線的な挙動が発生し、これにより架台側面に衝突し、大きなひずみが発生していることがわかる。

(2) 貯蔵架台の鉛直方向ひずみ

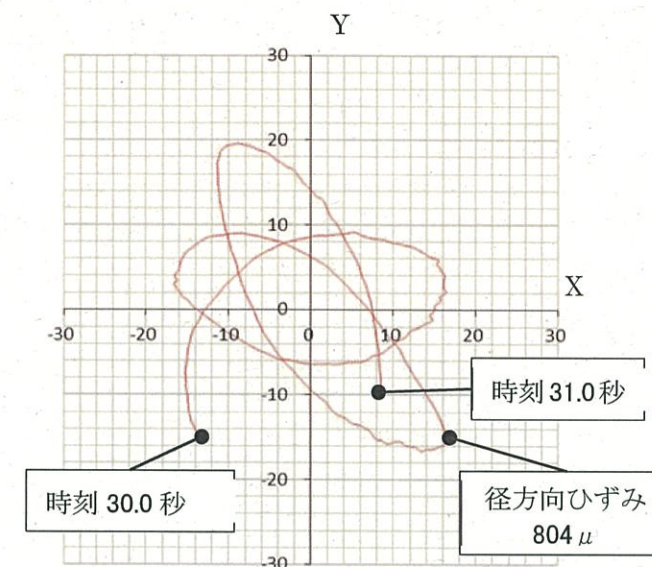
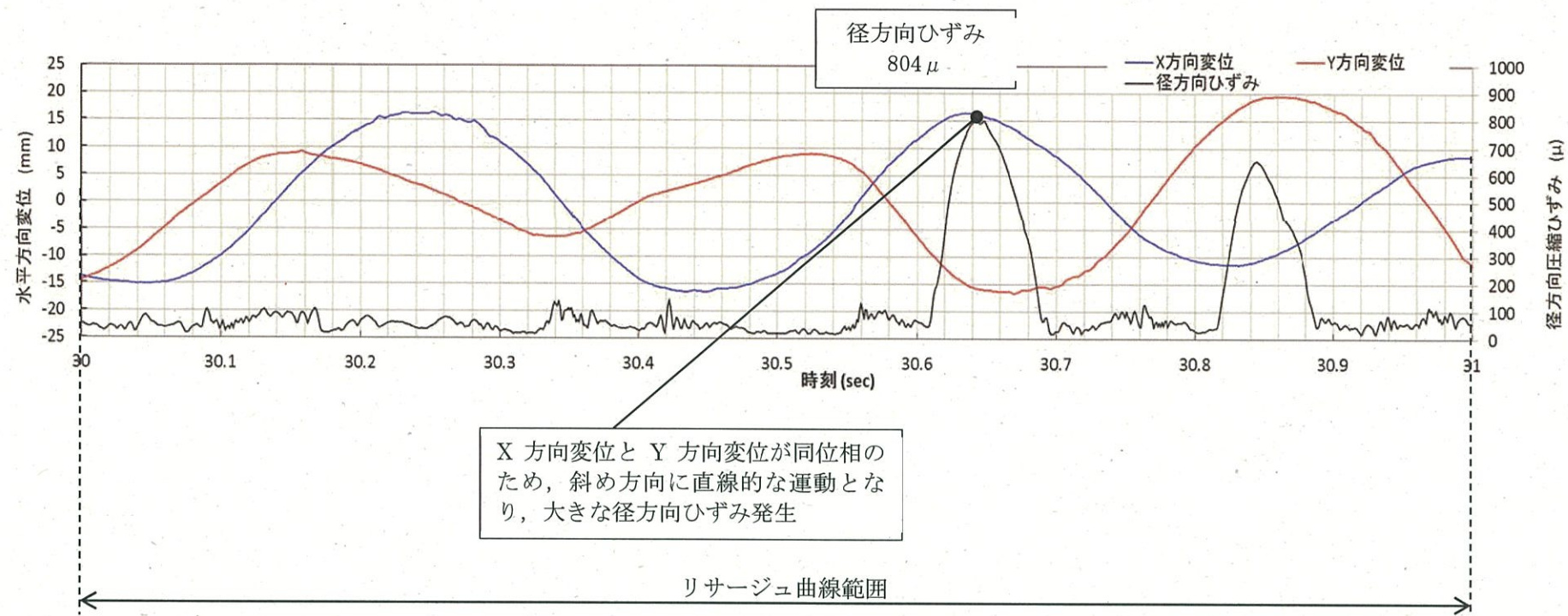
鉛直方向圧縮ひずみは、第7-2図(d)に示す通り、滑り挙動では明瞭なピークが少なく、回転挙動での最大値は 49μ 、傾き挙動での最大値は 305μ であり、傾き挙動において貯蔵架台に対して最大の鉛直方向荷重が作用していることがわかる。

以上より、試験供試体の挙動は、実機の地震波に対しても「4. 正弦波試験」、
「5. 周波数成分分割波試験」及び「6. 仮想 S s 波試験」にて確認された挙動
と同様に滑り挙動、回転挙動及び傾き挙動が発生し、このうち傾き挙動時に試
験供試体と貯蔵架台が衝突することで、径方向は地震力、鉛直方向は重心高さ
に応じて大きな荷重が発生することが確認できた。なお、これらの挙動は4回
の試験で同様の挙動を示すことが確認されている。

また、「3. 試験計画」にて確認したとおり、地震時の幾何学的な挙動は MSF-
21P 型、MSF-24P 型及び MSF-32P 型いずれも同様であり、試験供試体のモデル
に用いた、MSF-21P 型が伊方発電所で取り扱う MSF-24P 型及び MSF-32P 型より
傾きやすくひずみ量を計測しやすく、伊方 Ss-1 波試験でも傾き挙動で最も大
きなひずみを計測しているため、本試験の結果は伊方発電所で取り扱う MSF-
24P 型及び MSF-32P 型でも適用可能である。

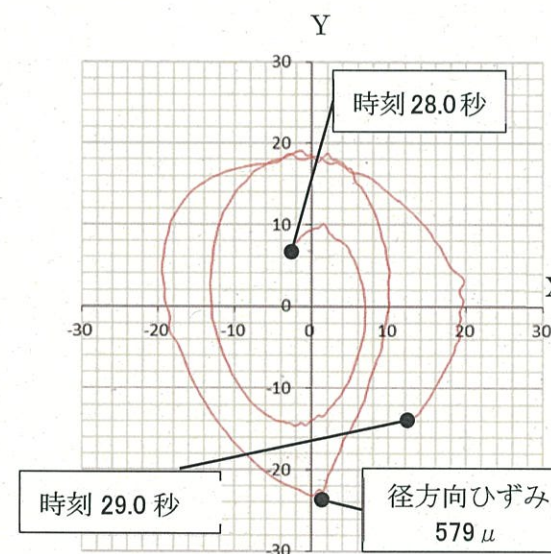
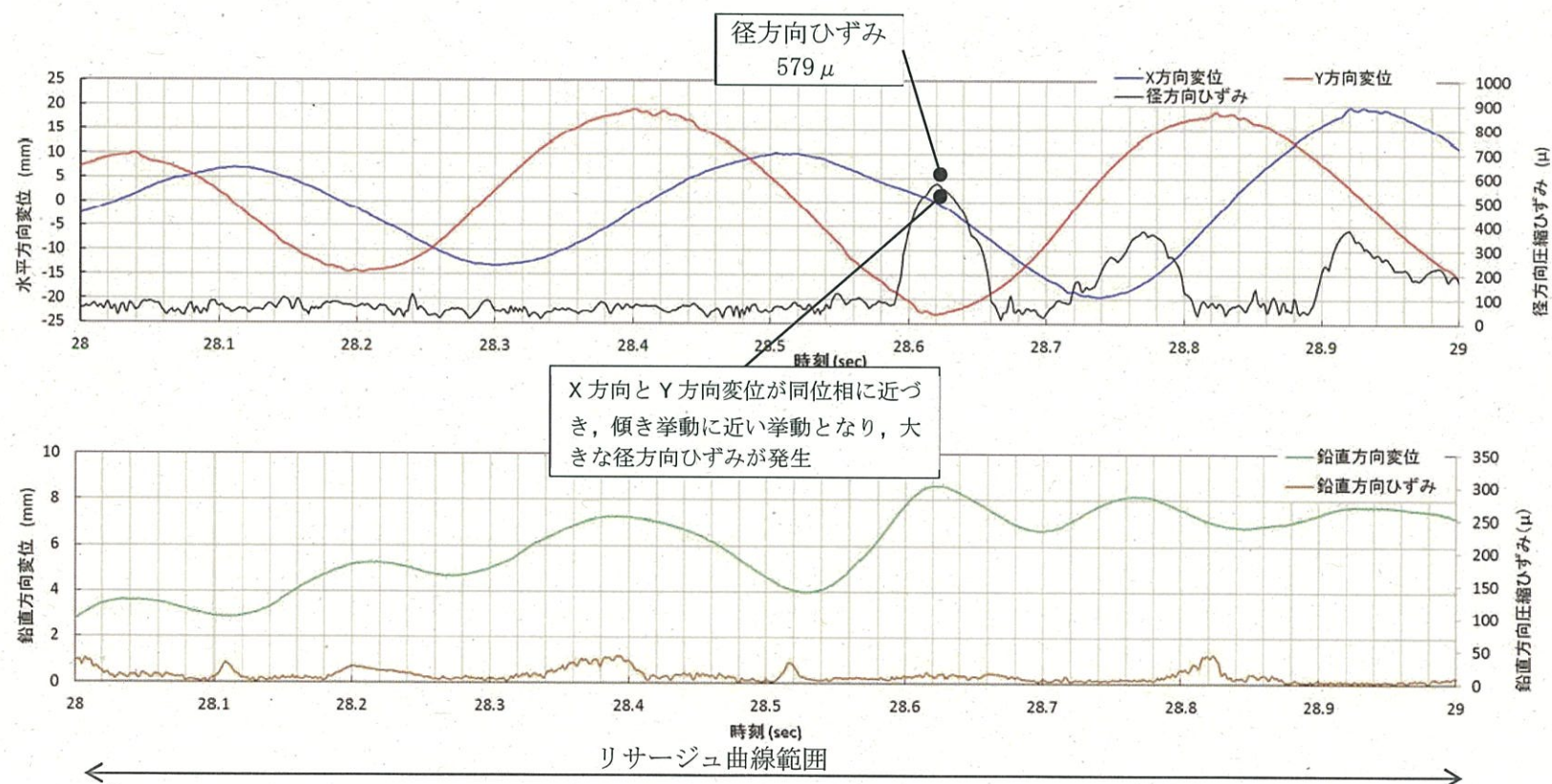


第7-2図 加振試験の計測結果 (1回目の例)



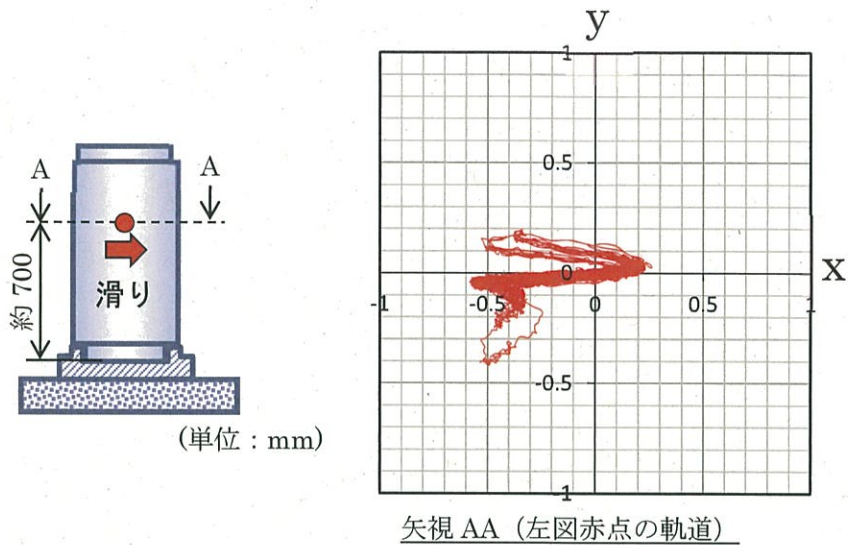
リサージュ曲線 (30 秒~31 秒)

第7-3図 伊方 Ss-1 波 傾き挙動分析結果 (1回目)

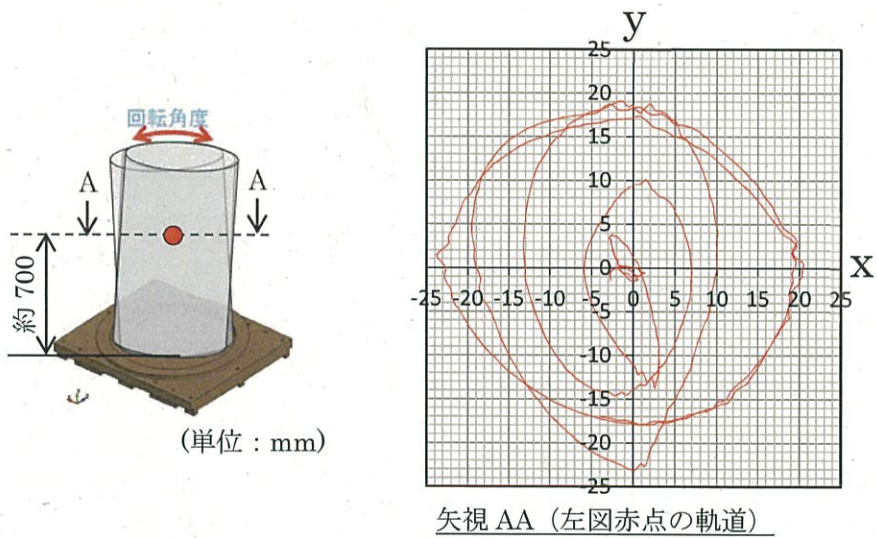


リサージュ曲線 (28 秒~29 秒)

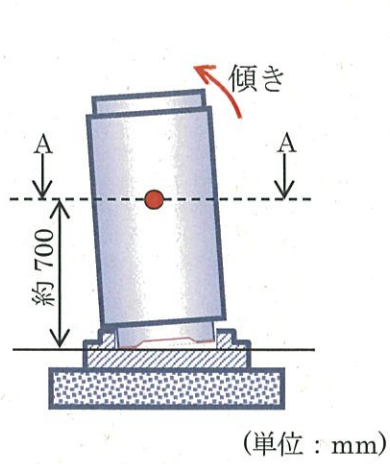
第7-4図 伊方 Ss-1 波 回転挙動分析結果 (1回目)



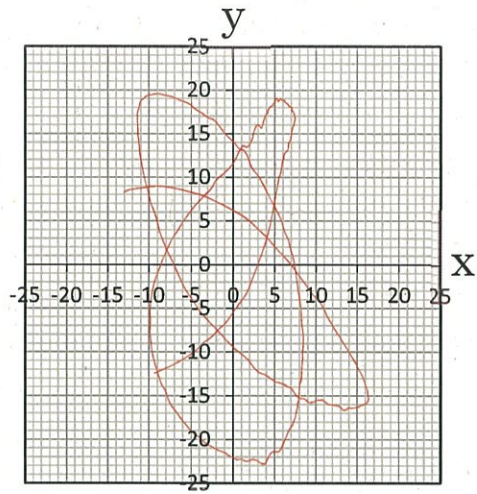
第 7-5 図 滑り挙動 (時刻 0.5~5.5sec の例)



第 7-6 図 回転挙動 (時刻 27.5~29.5sec の例)

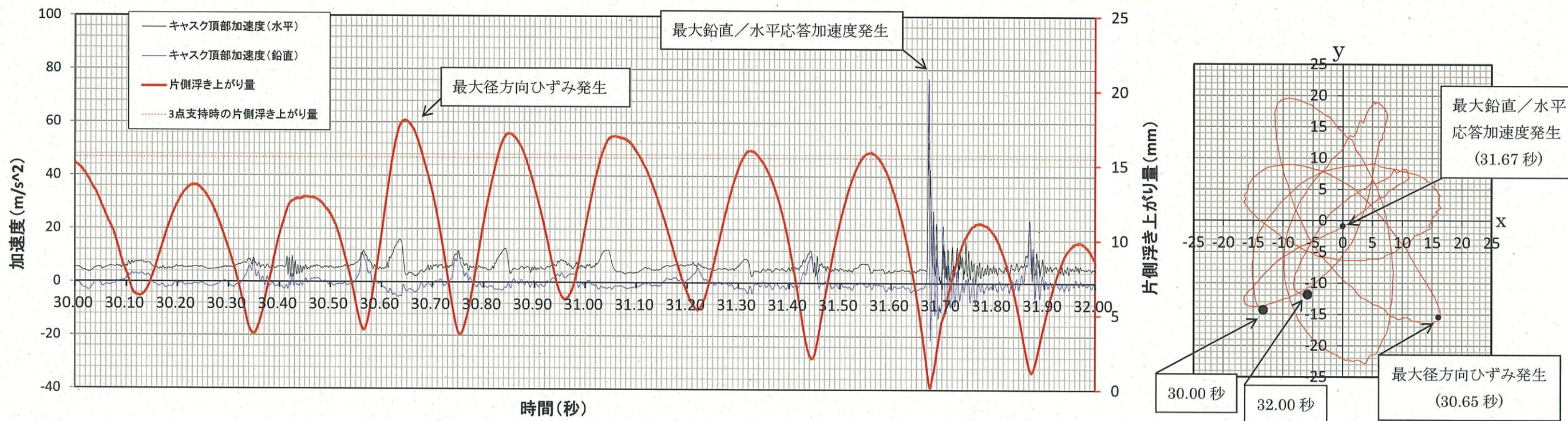


(単位 : mm)

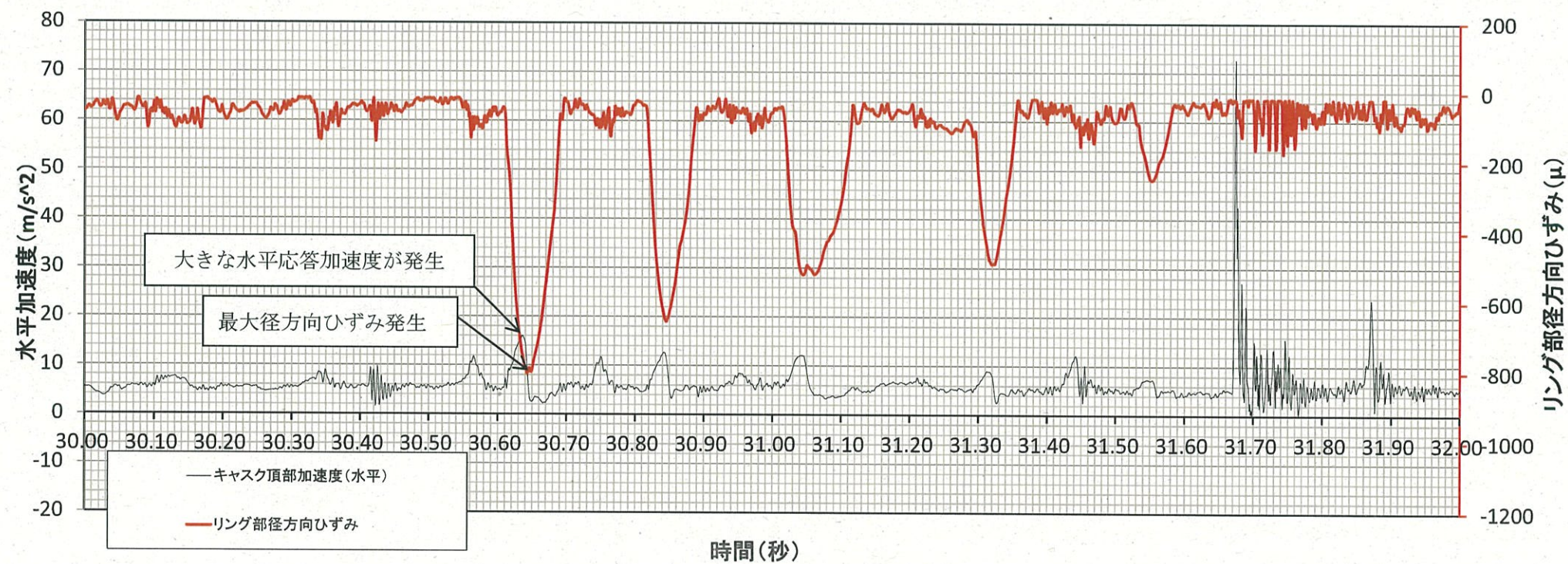


矢視 AA (左図赤点の軌道)

第 7-7 図 傾き挙動 (時刻 30.5~31.5sec の例)



第7-8図 試験供試体水平/鉛直応答加速度と片側浮き上がり量の関係 (径方向最大ひずみ発生時間近傍)



第7-9図 試験供試体水平応答加速度とリング部径方向最大ひずみの関係

7.3 耐震評価式の妥当性の検証

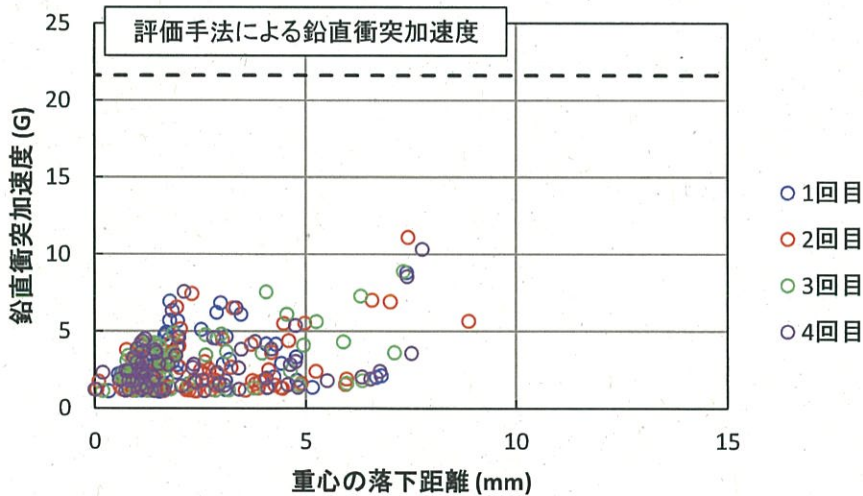
「7.2 試験結果」より得られた荷重と、「4.3 耐震評価式の構築」により構築した耐震評価式より算出した荷重を比較し、耐震評価式の妥当性を確認する。

7.3.1 試験供試体及び貯蔵架台に生じる鉛直方向荷重の算出方法の妥当性

地震応答解析のうち、試験供試体及び貯蔵架台に生じる鉛直方向荷重の算出にあたっては、「4.3 耐震評価式の構築」に示す幾何学的な3点接触の状態にある試験供試体が傾き、貯蔵架台底部に至る挙動を考慮し、エネルギーのつり合い式より試験供試体が貯蔵架台に衝突した時の荷重を算出している。

耐震評価式より算出される鉛直方向の荷重（衝突荷重）と、伊方 Ss-1 波試験にて、試験供試体頂部加速度計のデータから算出した鉛直方向荷重（衝突荷重）と、その荷重（加速度）が発生するまでの重心の落下距離を整理した結果を第 7-10 図に示す。なお、伊方 Ss-1 波試験は、4 回試験を実施しており、それぞれの試験結果を示す。

加振試験で生じた鉛直方向荷重（加速度）は、11G 程度であるのに対して、試験供試体諸元及び幾何学的に決まる初期傾き角 θ_0 を用いて、「4.3 耐震評価式の構築」にて構築した評価式により算出した鉛直方向荷重は、22G と大きな保守性を有している。



(※) 落下開始～衝突荷重が最大となる地点までの落下距離をプロットしている。
4 回の試験結果の比較を第 7-2 表に示す。

第 7-10 図 加振試験で観察された鉛直衝突荷重とその重心の落下距離

第7-2表 貯蔵架台のひずみの比較結果

項目		伊方 Ss-1 波試験 ^(注1)		
鉛直方向最大圧縮ひずみ(μ)	回転挙動 ^(注2)	1回目	49 (98%)	平均 49.75
		2回目	49 (98%)	
		3回目	56 (113%)	
		4回目	45 (90%)	
	傾き挙動	1回目	305 (83%)	平均 366
		2回目	430 (118%)	
		3回目	262 ^(注3)	
		4回目	363 (99%)	

(注1) () 内の数値は、各挙動で算出された計算値 (4回分) の平均値に対する相対比率である。

(注2) 回転挙動中の傾き挙動時に発生。

(注3) 3回目の伊方 Ss-1 波試験では、傾き挙動時に大きな加速度が発生せず、大きな荷重が発生しなかった。そのため、3回目の結果を除き、大きな荷重が計測された試験結果を比較する。

7.3.2 試験供試体及び貯蔵架台に生じる水平方向荷重の算出方法の妥当性

地震応答解析のうち、試験供試体及び貯蔵架台に生じる水平方向荷重の算出にあたっては、「4.3 耐震評価式の構築」に示すとおり、底面衝突前の試験供試体の運動エネルギーの水平成分に相当する角速度で底面衝突後に試験供試体が上昇をはじめ、地震力を定常的に負荷しながら、嵌め合い部の二側面への衝突に至る挙動を考慮し、エネルギーのつり合い式及びモーメントのつり合い式より試験供試体が貯蔵架台に衝突した時の荷重を算出している。

加振試験にて計測された貯蔵架台嵌め合い部のひずみに対して、試験供試体諸元を用いて、「4.3 耐震評価式の構築」により構築した評価式により算出したひずみを比較した結果を第 7-3 表に、加振試験にて最大のひずみを計測した 2 回目の結果の計測位置を第 7-11 図に、評価手法により最大ひずみを算出した位置を第 7-12 図に、評価手法により算出した径方向ひずみと試験で計測された径方向ひずみのグラフの比較を第 7-13 図に示す。

耐震評価手法により算出したひずみは、大きく加振試験の結果を上回っており、試験供試体及び貯蔵架台に生じる水平方向荷重は、十分な保守性が確保されていることを確認した。

第7-3表 貯蔵架台のひずみの比較結果

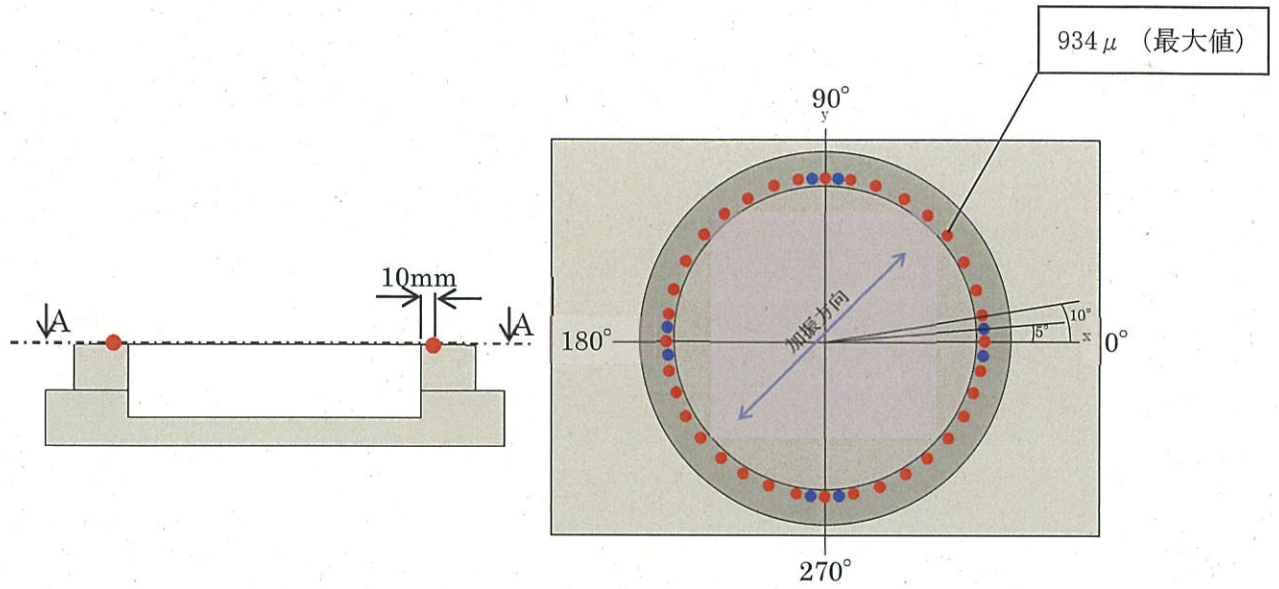
項目	伊方 Ss-1 波試験	本評価手法
径方向最大圧縮ひずみ (μ)	1 回目	804 ^(注1)
	2 回目	934 ^(注1)
	3 回目	646 ^(注2)
	4 回目	762 ^(注1)
		2700

(注 1) 最大ひずみが生じた傾き挙動時の値

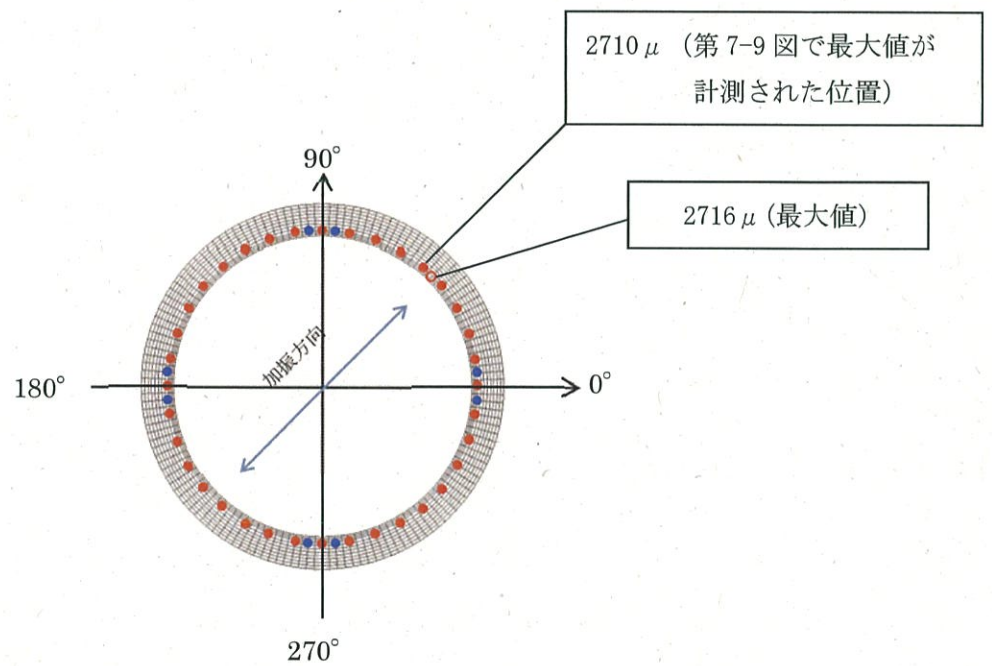
(注 2) 最大ひずみが生じた回転挙動中の傾き挙動時の値。なお、3 回目の加振試験の結果については、試験供試体が傾いたタイミングで大きな加速度が発生せず、傾き挙動において大きな荷重が発生する状況とならなかったものと考えられる。つまり、回転挙動時に傾き挙動時を上回るひずみが発生する可能性を示すものではない。

試験供試体から貯蔵架台に地震時に入力される水平方向荷重の立ち上がり時間は、加振試験では 0.04sec 程度（径方向ひずみが 0.04sec 程度で 1000 μ 程度に上昇する過程を想定）であり、スケール則から、実機乾式キャスクでは更に長い値が想定される。一方、入力を受ける底面固定した実機の貯蔵架台は、1 次モードの固有周期が 0.005sec 程度であり、入力荷重の立ち上がり時間はこれに対して十分に長い。このことから、参考資料 1 に示す貯蔵架台の応力評価では、上記のとおり保守性が確保された水平方向荷重を 3 次元 FEM 応力解析モデルに静的に付与している。

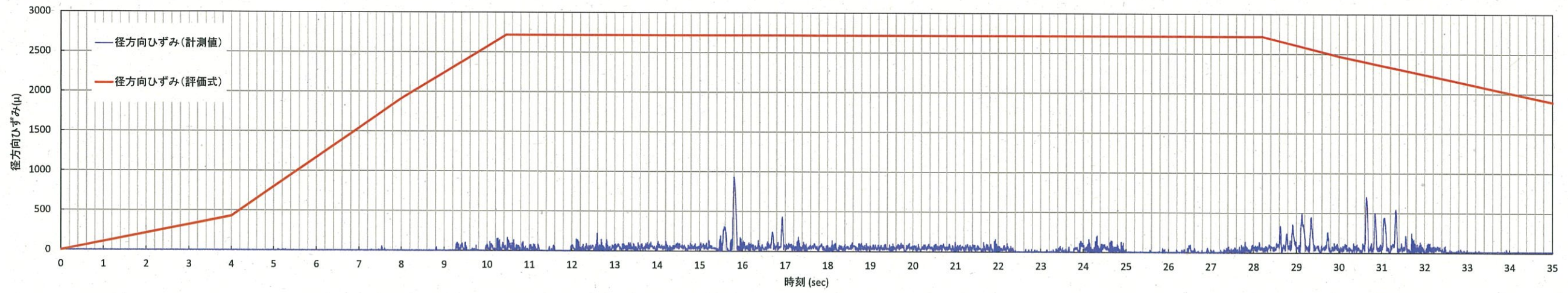
また、第 7-2 図等に示すとおり、伊方 Ss-1 波試験で確認されたひずみの大きさはある程度のばらつきがあるが、いずれも、耐震評価式より算出したひずみ量を下回っており、耐震評価式がもつ保守性で地震時の乾式キャスクが示す荷重のばらつきは包絡されていると考えられる。



第 7-11 図 加振試験にて最大のひずみを計測した位置



第 7-12 図 評価手法により最大ひずみを算出した位置



(径方向ひずみ評価式の計算条件 : $\theta = 1.2$ 度, $\alpha_H = 7.3 \text{ m/s}^2$, $\alpha_V = 3.65 \text{ m/s}^2$)

第 7-13 図 伊方 Ss-1 加振試験結果 (径方向ひずみ)

8. まとめ

加振試験の結果から、「2. 地震時の乾式キャスクに想定される挙動」のとおり、貯蔵架台上に設置された試験供試体の地震時の挙動が、滑り挙動、回転挙動、傾き挙動であり、そのうち傾き挙動により試験供試体と貯蔵架台が衝突する時に大きな荷重が発生することを確認した。

また、乾式キャスクに大きな荷重が発生するのは傾き挙動時であり、その時に地震力により加速することで蓄える運動エネルギー及び地震力によって傾くことで蓄える位置エネルギーを因子として荷重が発生していることから、それらをパラメータとして、荷重が算出されるよう耐震評価式を構築し、正弦波試験、周波数分割波試験、仮想 Ss 波試験及び伊方 Ss-1 波試験の試験結果から得られる荷重と耐震評価式から得られる荷重を比較することで、耐震評価式では試験結果を上回る荷重が算出され、保守性を有しており、乾式キャスクの耐震評価に用いることが妥当であることを確認した。

これらの結果は試験供試体を用いた加振試験から得られたものであるが、「3.1 試験供試体」に示すように、試験供試体の幾何学的な挙動は伊方発電所に設置する乾式キャスクと同様であることに加え、大きな荷重が発生する傾き挙動に関して、慣性モーメントが伊方発電所に設置する乾式キャスクより小さく、より傾きやすい試験となっているため、試験供試体を用いた試験結果は伊方発電所に設置する乾式キャスクに適用可能である。

以上の結果から、参考資料1「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」に示すように、この耐震評価式を用いて、伊方発電所に設置する乾式キャスクの耐震評価を行うことは妥当であることが検証できた。

乾式キャスク及び貯蔵架台の耐震安全性評価に関する妥当性

項目	乾式キャスクの耐震設計	許認可実績・準拠規格・基準	各項目に対する妥当性	各項目の保守性
設計条件	・乾式キャスクを基礎に固定した貯蔵架台に設置することにより、横滑りを制限する。 ・乾式キャスクは貯蔵架台に固定せず、地震による慣性力により貯蔵架台の嵌め合い部（凹部）内で挙動するが、転倒しない構造とする。			
耐震重要度分類	乾式キャスク Sクラス (基準地震動Ssによる地震力に対して機能を維持する) 貯蔵架台 Sクラスの直接支持構造部 (基準地震動Ssによる地震力に対して機能を維持する)			
構造・配置、据付計画	乾式キャスク 貯蔵架台には固定せず、貯蔵架台に設けた凹部に縦置きで嵌め込み貯蔵する。 貯蔵架台 基礎ボルトにて建屋床面に固定する。			
主体構造	乾式キャスク 核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則第6条又は第7条及び第11条に定める技術上の基準に適合する乾式キャスクであり、蓋部、胴部で構成する。内部に使用済燃料集合体を所定の幾何学的配置に維持するためのバスケットを有し、胴部には伝熱フィンが取り付けられている。 貯蔵架台 溶接部のない一体化構造物であり、表面に乾式キャスクを設置するための凹部を設ける。			
耐震評価の基本方針	乾式キャスク・貯蔵架台（基礎ボルト含む）が設計用地震力に対して十分な構造強度を有していること、および乾式キャスクが転倒しないことを確認する。解析による評価を実施することとし、解析の妥当性をモックアップ加振試験により確認する。			
地震時の応答（乾式キャスクの挙動）	乾式キャスクは、地震時に、貯蔵架台の凹部内で滑り・傾き・回転挙動が発生する。（鉛直方向地震力は重力加速度を超えないため、伊方では浮き上がりは発生しない）	-	乾式キャスクは凹部内で固定されていないため、地震の慣性力により滑りや傾き挙動が発生する。また、凹部側面が曲面であるため、乾式キャスクが凹部側面にそって回転挙動を発生する場合もある。ただし、凹部側面で挙動が制限されているため、貯蔵架台に対して大きくずれたり、転倒したりすることはない。また、鉛直地震力は重力加速度を超えないため、乾式キャスクが浮き上がりは生じない。	耐震評価上最も厳しい傾き挙動を選定しているが、挙動選定結果自体には、保守性を有していない。
評価対象とする挙動	耐震評価上最も厳しい傾き挙動を選定	-	以下のSIN波加振試験結果より、傾き挙動が耐震評価上最も厳しいため、傾き挙動を評価対象としたことは妥当である。 ・滑り挙動では、貯蔵架台に大きなひずみが生じない。 ・加振台への入力が一様であっても、傾き挙動から回転挙動に移行すると、貯蔵架台のひずみが小さくなる。	
設計用地震動	基準地震動Ssを用いる。なお、設置許可では乾式キャスクの安全機能が損なわれない見直しを確認するため、暫定的に乾式貯蔵建屋設置地盤での地震応答（Ss-1）を用いて耐震評価を実施する。	既許可の基準地震動Ssを用いることは、従前から既工認で実施している。	左記のとおり、既許可の基準地震動Ssを用いており、妥当である。	基準地震動Ss策定時に考慮した保守性以上の保守性はない。
設計用減衰定数	エネルギー保存則を解くための運動方程式には、設計用減衰定数の項は不要	認可実績があるエネルギー保存則を用いたキャスク落下時の衝突解析においても、運動方程式中に設計用減衰定数を考慮していない。	運動方程式を解く際に、機器減衰を考慮せず、入力された地震慣性力が全て運動エネルギーに変換されるとしており、妥当である。	衝突挙動において存在する減衰を評価上は考慮しておらず、保守性がある。
固有周期	エネルギー保存則を解くための運動方程式には、固有周期の項は不要	認可実績があるエネルギー保存則を用いたキャスク落下時の衝突解析においても、運動方程式中に固有振動数を考慮していない。	ガタを有する非線形挙動において固有モード、振動数の概念はない。実際に、短/中/長周期成分に分割した加振波で加振試験を実施した所、周期成分により、共振のような周波数特性を有する挙動は、観測されなかった。	エネルギー保存則の運動方程式を解く際に、物理的に固有周期が不要であるだけであり、保守性の考慮には関係ない。
設計用地震力	キャスク重心に入力する慣性力として1.2ZPAで評価（水平2方向、鉛直方向）	運動方程式を解く際に、重心位置に地震慣性力（最大値はZPA）を入力する考え方は、JEA4601のFRSの計算方法と同一である。なお、JEA4601における剛構造物の強度評価に対する考え方を踏まえ、床応答のZPAに対する貯蔵架台の動的応答による増分を2割とした1.2ZPAを使用する。	左記に記載のとおり、物理的には、運動方程式を解く際は、地震慣性力（最大値はZPA）を重心位置に入力することは妥当である。なお、加振試験時に共振のような周波数特性を有する挙動が観測されていないこと、また各加振試験より得られた荷重と、各加振試験の諸元を用いた耐震評価式から算出した荷重を比較し、耐震評価式の検証を行った結果、耐震評価式は、加振試験の結果に比べ、保守的に大きな荷重が算出されることが確認されたことからキャスク重心位置に地震慣性力を入力することは妥当であると判断する。	運動方程式を解く際は、時々刻々の地震慣性力を入力すれば良いところ、保守的にその最大値であるZPAを、JEA4601における剛構造に対する応答増幅の考え方に従い2割増しして入力しており、保守性がある。
2方向影響の考慮	2方向影響を考慮する	水平2方向の加速度をSRSS（この度の影響評価ではXY方向の最大加速度を√2倍している）として考慮することは、工認実績あり。	水平2方向で最大加速度を同時に常時作用させており、より厳しい評価となるため妥当である。	本評価手法では、水平2方向で最大加速度を同時に常時作用させており、保守的である。
応答解析モデル	幾何学的な寸法からエネルギー保存則に基づく運動方程式を設定しており、応答解析モデルは作成していない。			
地震力の入力位置	水平・鉛直地震力をキャスク重心位置へ入力する	設計用地震力の項を参照	同左	同左
地震時荷重の算定箇所	地震により、乾式キャスクと貯蔵架台の衝突が発生する箇所の荷重を算定する。	大きな荷重が発生する衝突箇所に着目し、荷重の算定箇所を選定する手法は、燃料集合体の電機飛来物評価等で認可実績あり。	地震により、乾式キャスクと貯蔵架台の衝突が発生する箇所、つまり、大きな荷重が発生する箇所の荷重を算定していることから、妥当である。	地震荷重の算定箇所においては、保守性を有していない。
荷重の算定手法	エネルギー保存則を用いた評価式を本評価のために新たに策定し、衝突荷重を算定	エネルギー保存則を用いた衝突評価としては、キャスク落下時の衝突荷重を算定する手法として許認可実績あり。ただし、乾式キャスクの評価に適したエネルギー保存則を解くための運動方程式は、今回の申請に当たり、加振試験結果から新規に作成している。	キャスクが貯蔵架台凹部内で傾いた状態から傾き挙動を開始し、自由落下により貯蔵架台底部に衝突するときのエネルギーから鉛直方向の衝突荷重を算出している。貯蔵架台底部に衝突後、キャスクが貯蔵架台凹部側面に衝突するまで、水平・鉛直方向に入力加速度（1.2ZPA）がキャスクに作用するとしてエネルギーを算出し、そのエネルギーから貯蔵架台への衝突荷重を算出している。本手法の妥当性については、別添2別紙2で確認した。	加振試験結果より、乾式キャスク及び貯蔵架台に作用する荷重は、以下の因子であることが判明した。 ・鉛直方向荷重は、地震力によって蓄えられた位置エネルギー（重心高さ）に応じて発生する。 ・水平方向荷重は、地震力の大きさに応じて発生する。荷重の評価手法において、以下の考慮をすることで、保守性を有している。 ・キャスクと貯蔵架台との隙間を想定される最大値に設定することで、キャスクの傾き角を最大に見積もることで、蓄えられるエネルギー量の最大値を算出し、衝突挙動に対して同等以上となるよう配慮している。 ・キャスクが有する運動エネルギーが全て貯蔵架台のひずみエネルギーに変換されるものとして荷重を算出しており、摩擦等によるエネルギー消費を無視している。以上の評価手法が有する保守性を伊方Ss-1波等の加振試験結果と比較した所、2倍程度の保守性を有していることを確認した。
使用解析コード等	ABAQUS Ver. 6.12-3：バスケット、伝熱フィン及び胴（脚部）の衝突部以外 構造公式：上記以外のキャスク及び貯蔵架台（基礎ボルト含む）	【解析コード】 ABAQUSによる3次元FEMモデルを用いた応力解析は炉内構造物の強度・耐震評価で工認実績あり。 【構造公式】 単純な構造の部位に対して、構造公式により手計算で耐震評価を実施することは、従前から既工認で実施している。	【解析コード】 ABAQUSコードは応力解析に適用できるコードとして検証されており、妥当である。 【構造公式】 左記のとおり、構造公式により耐震評価を実施することは、従前の工認で実施している内容であり、妥当である。	【解析コード】 解析コードの検証において、理論値と一致していることを確認しており、保守性を有していない。 【構造公式】 構造公式自体が、理論式であり、保守性を有していない。
評価モデル	キャスクおよび貯蔵架台を突撃寸法で3次元FEMモデル化	ABAQUSによる3次元FEMモデルを用いた応力解析は炉内構造物の強度・耐震評価で工認実績あり。	キャスク及び貯蔵架台の実形状を精緻にモデル化しており、妥当である。	突撃寸法で評価しており、保守性は有していない。
材質・温度	キャスク及び貯蔵架台の材質について、機器等の区分に従い、使用可能な材料を選定。また、適切な温度を設定。	【材料】 キャスク及び貯蔵架台の材質はJSME材料規格に規定された材料である。（準拠規格：JSME材料規格2012年版） 【温度】 最大崩壊熱量（32P：14.8kWh）を超える設計崩壊熱量（32P：16.9kWh）を入力してキャスクの温度を評価する手法については、設計承認にて認可実績あり。また、許容限界設定に当たり熱解析結果を基に設定した設計温度を適用している。	【材料】 突撃で使用している材料の物性値をJSME材料規格に基づき設定しており、妥当である。 【温度】 キャスクは貯蔵時の熱解析で算出された温度を元に設定した設計温度を適用しており、貯蔵架台はコンクリートの基準温度を採用しており、妥当である。	【材料】 材料については、規格値を適用しており、使用材料の最低強度を適用している。 【温度】 許容限界設計に当たり、熱解析結果を基に設定した設計温度を適用しており、保守的な熱量を入力していることから突撃より高めとなり、許容限界が小さめに設定される。
評価部位	乾式キャスク、貯蔵架台（基礎ボルト含む）について安全機能維持の確認に必要な部位全て	安全機能維持に必要な部位を評価部位に設定する方針は既工認と同じ考え方である。	ガイドの審査方針に従い、キャスクの4つの安全機能維持の確認に必要な部位及び貯蔵架台の機能維持に必要な部位を評価部位に設定しており、妥当である。	評価部位の選定においては、保守性を有していない。
設計用荷重	乾式キャスク及び貯蔵架台（嵌め合い部）：3次元FEMモデルに地震応答解析で求めた荷重を入力 基礎ボルト：構造公式に地震応答解析で求めた荷重を入力	【3次元FEM】 地震応答解析で算出した荷重を静的モデルに設計用荷重として入力する手法については炉内構造物や主機管台にて工認実績あり。 【基礎ボルト】 構造公式に地震応答解析で求めた荷重を入力する手法については、1次冷却材管にて工認実績あり。	【3次元FEM】 地震応答解析で算出した荷重を妥当性が確認された解析コードで構築した3次元FEMに入力しており、妥当である。 【基礎ボルト】 基礎ボルトの応力評価においては、地震応答解析で求めた荷重を構造公式に与えており、妥当である。	地震応答解析で求めた荷重をそのまま入力しており、地震応答解析時に考慮した保守性以上の保守性はない。
荷重の入力方法	3次元FEMモデルに地震応答解析で求めた衝突荷重を静的に入力する	地震応答解析で算出した荷重を静的モデルに設計用荷重を入力する手法については炉内構造物や主機管台にて工認実績あり。また、強制変位として入力する手法については一次系配管にて工認実績あり。	荷重作用時間が十分長いので、静的解析として扱うことは、妥当である。	地震応答解析で求めた荷重をそのまま入力しており、地震応答解析時に考慮した保守性以上の保守性はない。
荷重の組合せ	地震時の荷重に加え、貯蔵時の自重、温度等を考慮する	既工認どおり、JEA4601に基づき、地震荷重と他の荷重の組合せを考慮している。	左記のとおり、JEA4601に基づき荷重の組合せを設定することは、従前の工認で実施している内容であり、妥当である。	荷重の組合せは、JEA4601に従い地震と組み合わせるべき荷重を考慮しているもので保守性は有していない。
応力分類	各部位の耐震クラス及び機器等の区分における評価項目に応じて設定	既工認どおり、JEA4601に基づき、耐震クラス及び機器等の区分における評価項目に応じた応力分類を設定している。	左記のとおり、JEA4601に基づき応力分類を設定することは、従前の工認で実施している内容であり、妥当である。	評価する応力分類を規定しているだけであり、保守性は有していない。
許容限界	【強度評価】 塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有する許容限界として、認可実績があるJEA4601で設定している許容応力状態IVの許容限界を適用する。なお、密封境界部については、審査ガイドで、おおむね弾性範囲とすることが求められており、これを担保する許容限界として、認可実績があるJEA4601で設定している許容応力状態IIIの許容限界を適用する。 【転倒評価】 キャスクの転倒：重心位置が回転支線の水平方向位置を超えない傾き角度	【強度評価】 塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有する許容限界として、認可実績があるJEA4601で設定している許容応力状態IVの許容限界を適用する。なお、密封境界部については、審査ガイドで、おおむね弾性範囲とすることが求められており、これを担保する許容限界として、認可実績があるJEA4601で設定している許容応力状態IIIの許容限界を適用する。 【転倒評価】 重心位置が回転支線の水平方向位置を超えない傾き角度を許容限界として設定している。この方針は、使用済燃料ラックにおける転倒評価と同じ方針であり、工認実績あり。	左記のとおり、認可実績のある許容限界を設定しており、妥当である。	【強度評価】 許容応力状態IVAS及びIIIASの許容限界については、JEA4601・補-1984許容応力編参考資料I「許容応力設定の背景」に記載されているように、保守性を考慮し設定されている。 【転倒評価】 許容限界には、保守性を有していないが、貯蔵架台に設置された乾式キャスクは、許容限界に対して十分余裕がある範囲に傾き量が制限される。

：許認可実績・準拠規格・基準において、妥当性に対する検討が特に必要な項目