

本資料のうち、枠囲みの内容は、  
商業機密あるいは防護上の観点  
から公開できません。

伊方発電所設計及び工事計画審査資料	
資料番号	DSF-040
提出年月日	令和3年5月13日

伊方発電所3号機  
設計及び工事計画に係る説明資料  
(耐震性に関する説明書)  
(使用済燃料乾式貯蔵施設)

令和3年5月  
四国電力株式会社

## 資料 9 に係る補足説明資料

【説明する添付資料】

資料 9 耐震性に関する説明書

## 目 次

1. 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析について
2. 使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震計算について
3. 周辺施設等の波及的影響の検討について
4. 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価結果について

5. 使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震評価モデルの妥当性について

今回提出資料

5. 使用済燃料乾式貯蔵容器の耐震評価モデルの  
妥当性について

## 目 次

	頁
1. はじめに .....	5-1
2. 耐震評価方法 .....	5-1
2.1 乾式キャスクのモデル化の考え方 .....	5-3
2.2 下部トラニオン及び貯蔵架台の剛性のモデル化の考え方 .....	5-6
3. まとめ .....	5-14

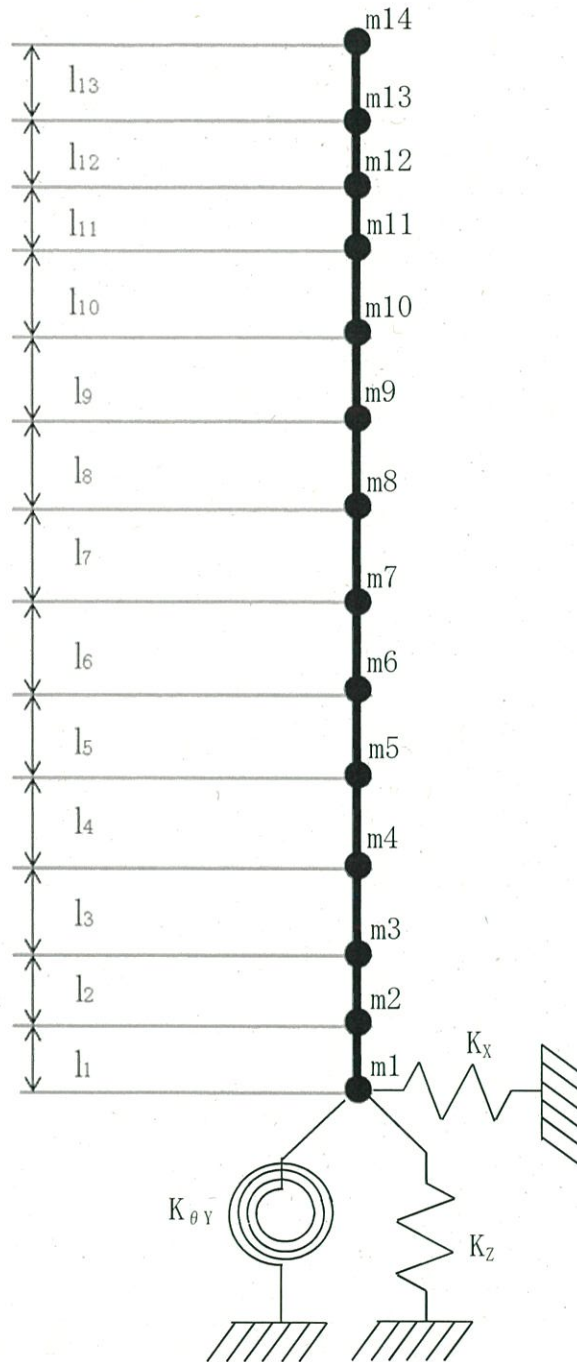
## 1. はじめに

本書は、設工認における使用済燃料乾式貯蔵容器（以下「乾式キャスク」という。）及び使用済燃料乾式貯蔵容器の貯蔵架台（以下「貯蔵架台」という。）の耐震評価のうち、固有値解析に適用した解析方法の妥当性について説明する資料である。

## 2. 耐震評価方法

今回の設工認において乾式キャスクの耐震評価では、既工認の解析方法に倣い、乾式キャスク及び貯蔵架台をはり要素及び線形ばね要素でモデル化して固有値を算出し、FRS から固有値に対応した評価用加速度を適用している。乾式キャスク及び貯蔵架台を連成した固有値解析モデル（以下「工認適用モデル」という。）を第 2.1 図に示す。工認適用モデルは、乾式キャスクをはり要素及び質点でモデル化し（以下「はりモデル」という。）、下部トラニオン及び貯蔵架台（固定装置）の剛性をばね要素でモデル化している。耐震評価に適用した解析におけるモデル化の考え方を以下に示す。

具体的には、工認適用モデルにおける乾式キャスクのモデル化の考え方を 2.1 項に示す。また、下部トラニオン及び貯蔵架台の剛性のモデル化の考え方を 2.2 項に示す。



第 2.1 図 工認適用モデル

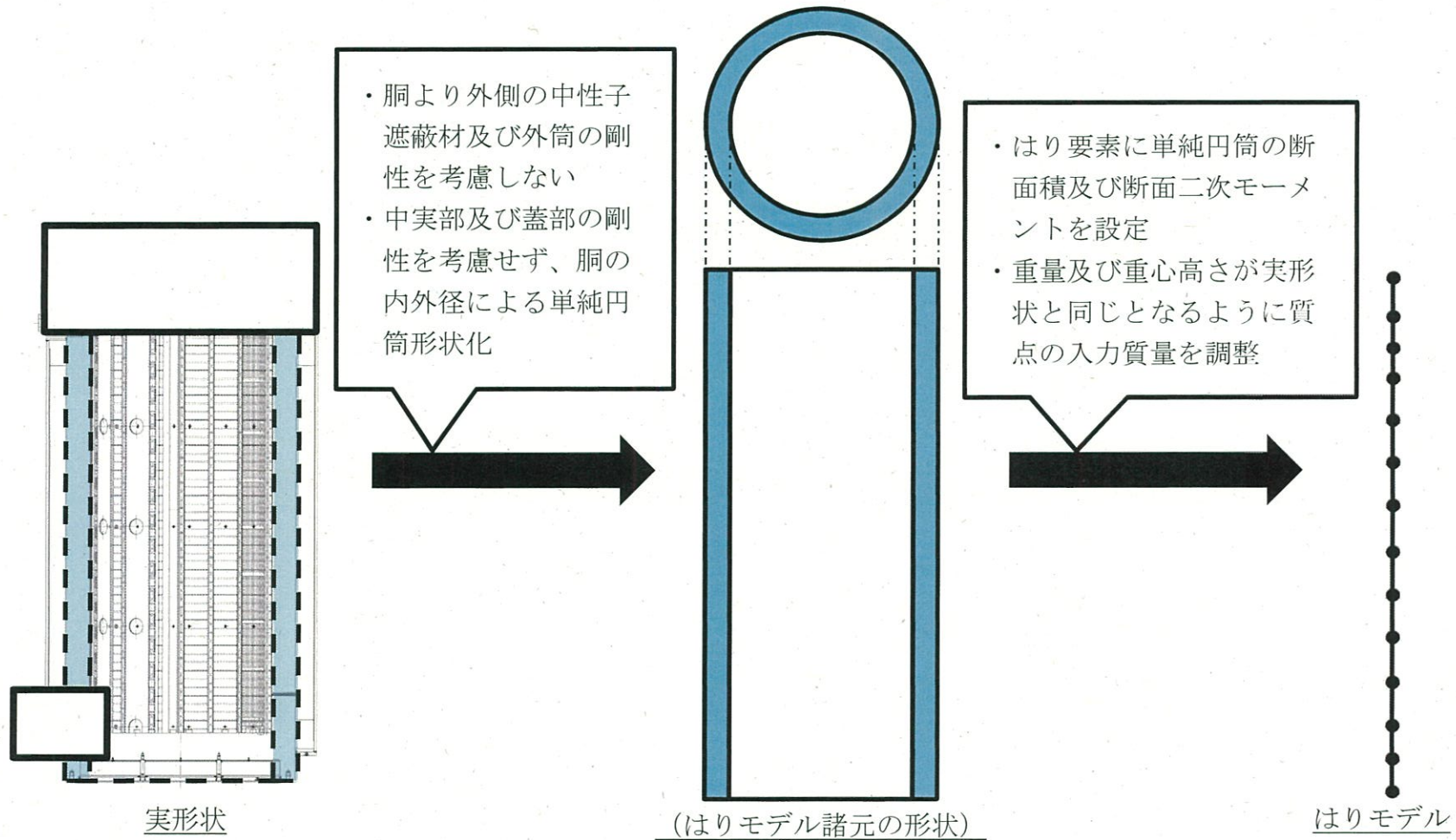
## 2.1 乾式キャスクのモデル化の考え方

乾式キャスクは、地震時にオーバル変形及びねじれ変形は生じないため、耐震評価で考慮すべき変形は曲げ変形のみであることから、はり要素及び質点でモデル化している。

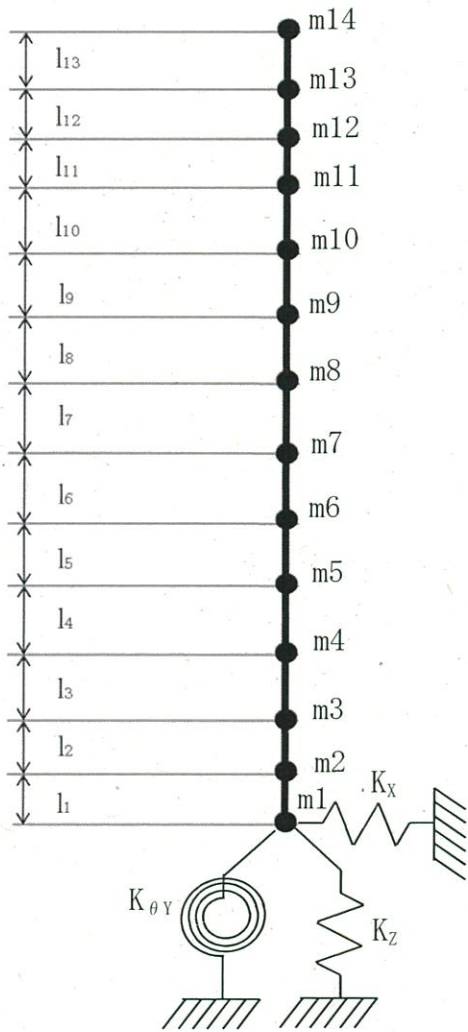
はりモデルの諸元は、胴の内外径による単純円筒を仮定した形状から設定している（第2.2図を参照）。なお、胴より外側（中性子遮蔽材及び外筒）の重量については、モデルに組み込んでいる一方で、剛性についてはモデルに組み込んでいないため、実機よりも保守的な剛性となっている。また、燃料集合体については、乾式キャスク内の燃料集合体が存在する高さ及びその近傍の複数の質点に質量を分散して設定している。（第2.2図を参照）。

なお、はりモデルの1次固有振動モード及び1次固有振動数が実機を精緻に模擬したモデルとよく一致しており、上記のモデル化方法が問題ないことを確認している（添付1を参照）。





第2.2図 乾式キャスクのはりモデル化の概要(1/2)



質点番号	燃料集合体の質量 (ton)	
	乾式キャスク (タイプ 1)	乾式キャスク (タイプ 2)
m14	0	0
m13	0.0806	0.0753
m12	1.6173	1.4273
m11	2.2868	2.0180
m10	2.2868	2.0180
m9	2.2868	2.0180
m8	2.2868	2.0180
m7	2.2868	2.0180
m6	2.2868	2.0180
m5	2.2868	2.0180
m4	1.3330	1.1763
m3	0.1896	0.1673
m2	0	0
m1	0	0

第2.2図 乾式キャスクのはりモデル化の概要(2/2)

## 2.2 下部トラニオン及び貯蔵架台の剛性のモデル化の考え方

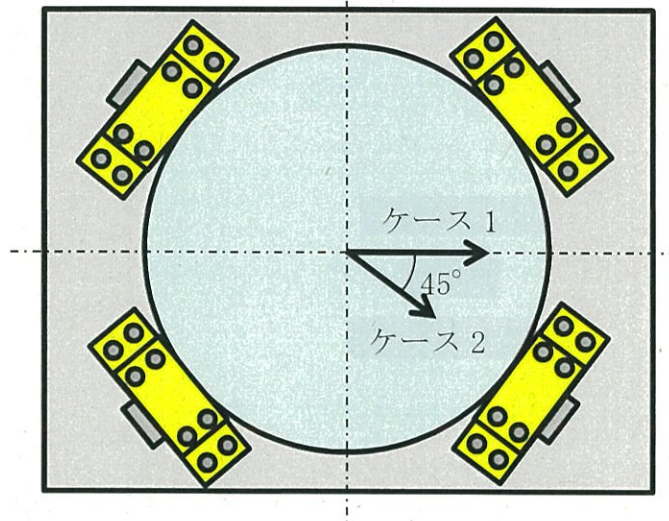
乾式キャスクは貯蔵架台に下部トラニオンを介して固定されており、地震時の乾式キャスクの応答挙動は下部トラニオン及び貯蔵架台（固定装置）により抑制される。この時の下部トラニオン及び貯蔵架台（固定装置）の剛性を線形ばねでモデル化している。

下部トラニオン及び貯蔵架台（固定装置）の剛性を模擬した線形ばねは、水平方向の並進ばね、鉛直方向の並進ばね及び回転ばねの 3 種類であり、全てばね剛性算出モデル（以下、三次元 FEM モデルと称す）による解析結果から算出している。線形ばねの算出方法の詳細を 2.2.1 項に示す。なお、三次元 FEM モデルは、地震時の乾式キャスクの挙動を精緻に模擬するために、乾式キャスクの底面及び貯蔵架台の間に非線形性を有する接触要素を設定しているが、傾き角、水平変位及び鉛直変位と入力加速度の関係が全て線形であり、回転剛性、水平方向の並進剛性及び鉛直方向の並進剛性を全て線形ばねとするモデル化に問題がないことを確認している（添付 2 を参照）。

ここで、水平方向の並進ばね及び回転ばねは、第 2.3 図に示す 2 方向（ケース 1 及び 2）で算出している。これは、乾式キャスクの傾き方向に応じた固有値を確認するためであり、ケース 1 の固有値がケース 2 よりも小さいことから（第 2.1 表及第 2.2 表を参照）、評価にはケース 1 の固有値を適用している。ただし、トラニオンに生じる荷重の計算条件は、ケース 2 の傾き方向としている。これは、ケース 1 よりもトラニオンに生じる荷重の計算値が大きくなるためである。

そのため、今回の工認評価では、ケース 1 の固有値に応じた入力加速度を用いながら、ケース 2 の傾き方向でトラニオンに生じる荷重を計算することで、保守的な荷重による評価を行っている。

なお、今回の工認のように、機器の挙動に係る周辺構造物の剛性を線形ばねでモデル化し、はりモデルと組み合わせる方法は伊方 3 号機の再稼働工認で炉内構造物等の地震応答解析に適用した実績がある。



第2.3図 ばね剛性算出における乾式キャスクの傾き方向

第2.1表 乾式キャスク（タイプ1）における1次固有振動数の比較

	ケース 1	ケース 2
水平方向の1次固有振動数 (Hz)	15.5	16.7
鉛直方向の1次固有振動数 (Hz)	38.8	

第2.2表 乾式キャスク（タイプ2）における1次固有振動数の比較

	ケース 1	ケース 2
水平方向の1次固有振動数 (Hz)	15.2	16.4
鉛直方向の1次固有振動数 (Hz)	37.5	

### 2.2.1 線形ばねの算出方法

線形ばねの算出結果を第 2.3 表及び第 2.4 表に示す。これらは全て、第 2.4 図及び第 2.5 図に示す三次元 FEM モデルによる静解析結果から算出している。この三次元 FEM モデル<sup>(注)</sup>は、下部トラニオン及び固定装置をはり要素で、それ以外の部位を三次元要素で、剛性をモデル化している。なお、燃料集合体については、乾式キャスクと締結しておらず、モデル全体の剛性に寄与しないため、考慮していない。

各線形ばねの算出方法を(1)～(3)に示す。

なお、第 2.4 図に示す三次元 FEM モデル(回転ばね剛性及び水平ばね剛性の算出に適用)は、乾式キャスクが傾こうとする方向の下部トラニオン及び固定装置をモデル化していない。この方向に位置する下部トラニオンの運動方向は鉛直下向きであり、乾式キャスクの運動を抑制する力を受け持たないためである(第 2.6 図を参照)。

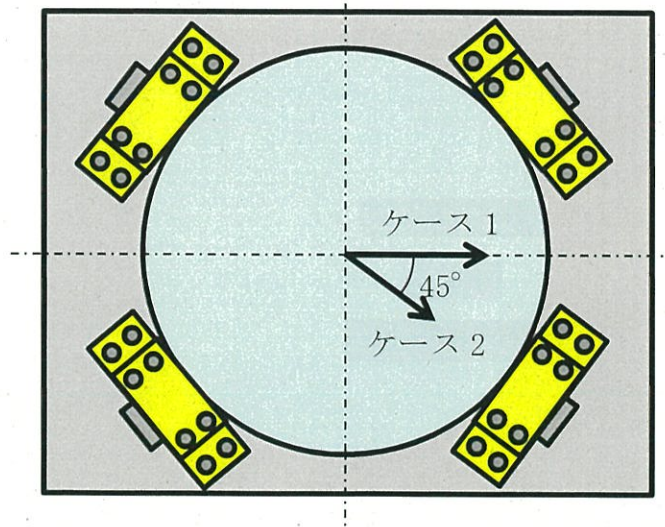
(注) 線形ばねの算出に適用した三次元 FEM モデルは、妥当な条件で固有値解析を行うことが困難である。この三次元 FEM モデルには、乾式キャスク底面及び貯蔵架台の接触状態を模擬するために、これらの接触面に接触要素を設定しているが、固有値解析には、これらの接触面を固着する条件しか適用できないためである。なお、固着条件で算出した固有値は約 25Hz であり、評価に適用している固有値(15.4Hz)と比較して大幅に非保守側の結果となる。

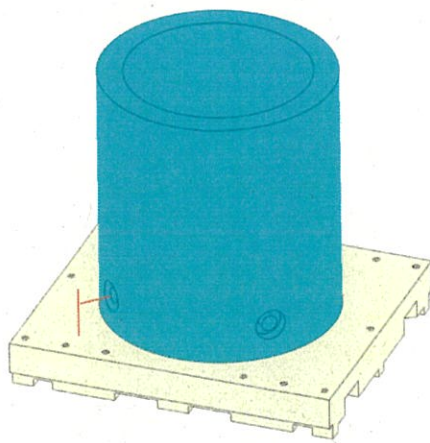
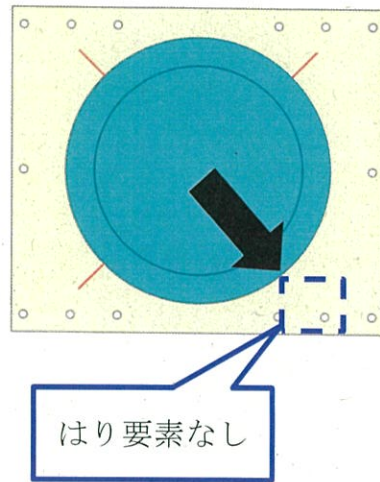
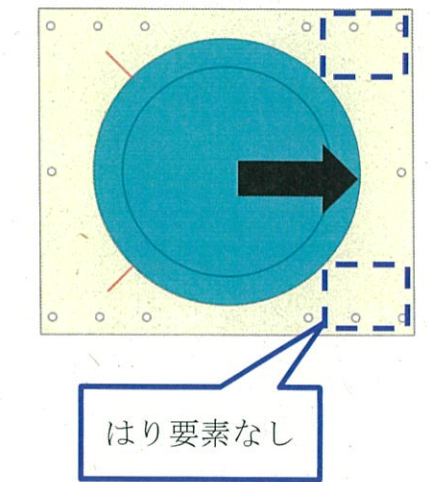
第2.3表 乾式キャスク（タイプ1）におけるばね剛性の算出結果

ばね剛性	剛性値	
	ケース 1 (下図参照)	ケース 2 (下図参照)
回転ばね剛性 (N・m/rad)	$1.924 \times 10^{10}$	$1.904 \times 10^{10}$
水平ばね剛性 (N/m)	$2.889 \times 10^9$	$5.164 \times 10^9$
鉛直ばね剛性 (N/m)	$7.286 \times 10^9$	

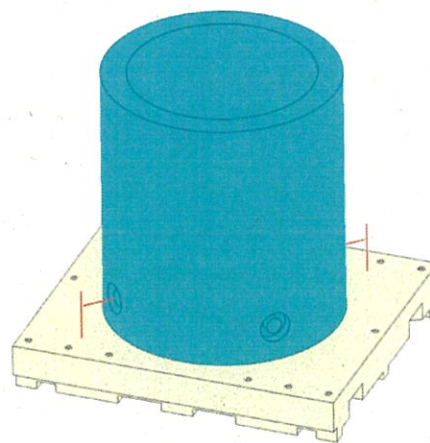
第2.4表 乾式キャスク（タイプ2）におけるばね剛性の算出結果

ばね剛性	剛性値	
	ケース 1 (下図参照)	ケース 2 (下図参照)
回転ばね剛性 (N・m/rad)	$1.766 \times 10^{10}$	$1.740 \times 10^{10}$
水平ばね剛性 (N/m)	$2.860 \times 10^9$	$5.126 \times 10^9$
鉛直ばね剛性 (N/m)	$6.748 \times 10^9$	



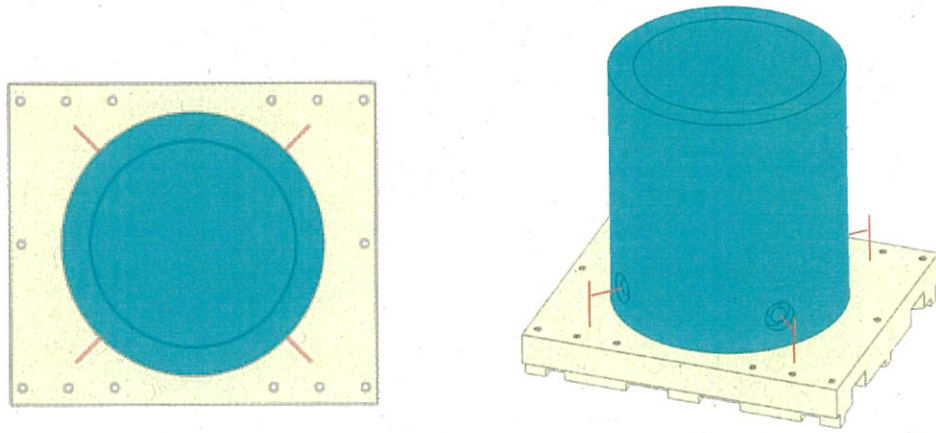


ケース1の傾き方向

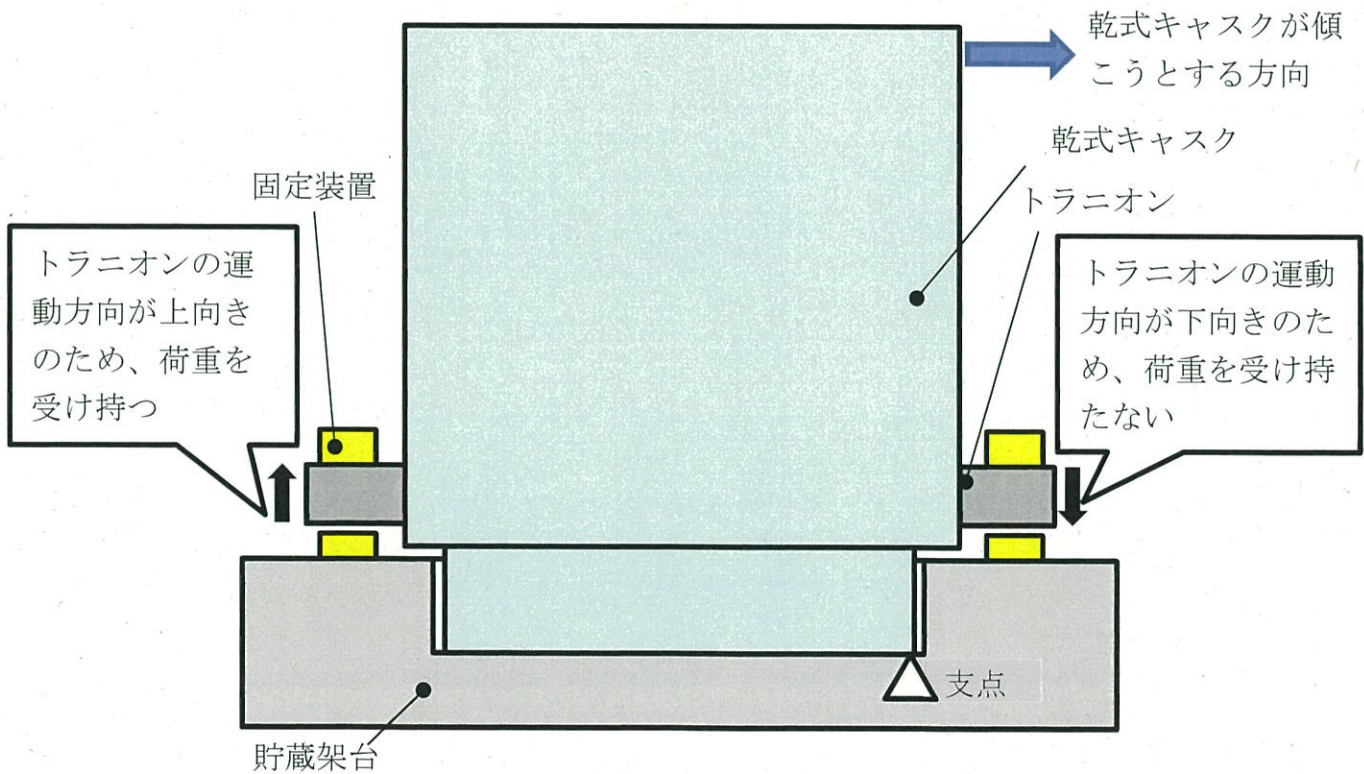


ケース2の傾き方向

第2.4図 三次元FEMモデル (水平方向)



第 2.5 図 三次元 FEM モデル (鉛直方向)



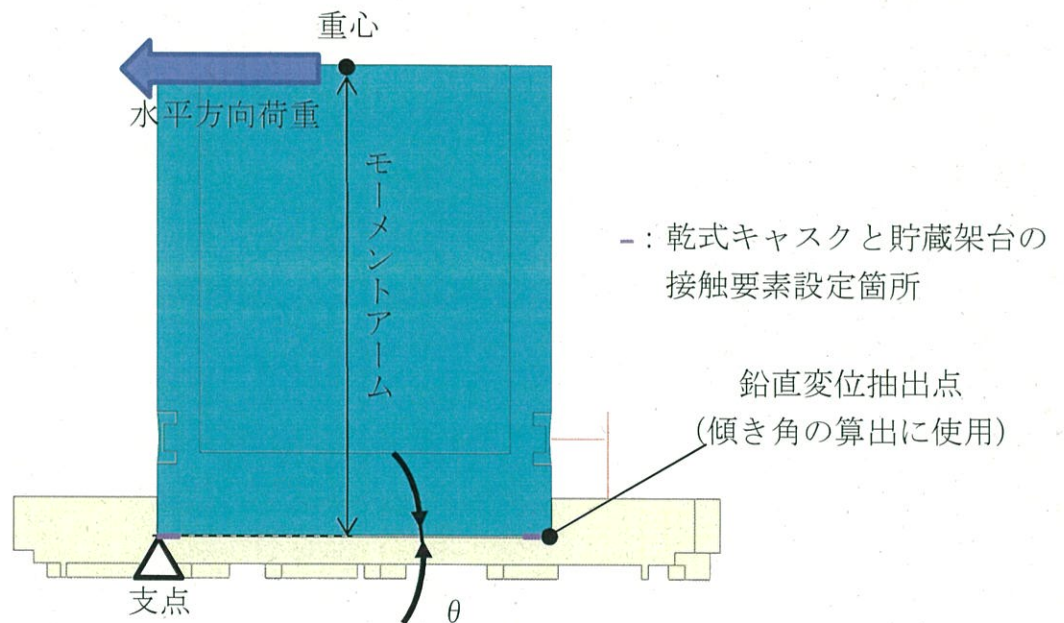
第2.6図 回転モーメントのつり合い



(1) 回転ばね剛性の算出方法

三次元 FEM モデルの乾式キャスクの重心に水平方向荷重を負荷することで、第 2.7 図のように乾式キャスクが傾こうとする。その時の傾き角、負荷した荷重及びモーメントアームを(1)式に代入して算出している。

$$\text{回転ばね剛性} = \frac{\text{水平方向荷重} \times \text{モーメントアーム}}{\text{傾き角 } \theta} \dots (1)$$



第2.7図 回転ばね剛性算出の概要

(2) 水平ばね剛性の算出方法

剛性算出に用いる解析は、回転ばね剛性と同じである。水平ばね剛性は、(2)式のように、水平方向の負荷荷重を乾式キャスクの横滑りによる変位で割ることで算出している。

$$\begin{aligned} \text{水平ばね剛性} &= \frac{\text{水平方向荷重}}{\text{乾式キャスクの横滑りによる変位}} \\ &= \frac{\text{水平方向荷重}}{\text{解析で算出した水平変位}-\text{傾きによる水平変位}} \cdots (2) \end{aligned}$$

$$\text{傾きによる水平変位} = \text{乾式キャスク底部外径} \times (1 - \cos \theta) \cdots (3)$$

(3) 鉛直ばね剛性の算出方法

鉛直ばね剛性は、三次元 FEM モデルの乾式キャスクの重心に鉛直上向き方向<sup>(注)</sup>の荷重を負荷した時の重心の鉛直方向変位量、及び負荷した荷重を(4)式に代入して算出している。

$$\text{鉛直ばね剛性} = \frac{\text{鉛直方向荷重}}{\text{重心の鉛直方向変位}} \cdots (4)$$

(注) 鉛直下向き方向に荷重を負荷した場合は、乾式キャスクが貯蔵架台に押し付けられることから、上向きに荷重を負荷した場合よりも高い剛性となるため、上向きを代表としている。

### 3. まとめ

本資料では、乾式キャスク及び貯蔵架台の耐震評価に適用した固有値解析モデルについて、2.1 項にて乾式キャスクのモデル化の考え方を、2.2 項にて剛性のモデル化の考え方を検討した。

本モデル化の考え方は、炉内構造物等の地震応答解析に適用した実績があり、各検討において、工認適用モデルと三次元 FEM モデル等の比較により、適切にモデル化されていることを確認した。

## 三次元要素モデルとはりモデルの固有値解析結果の比較

乾式キャスク（タイプ 1）における三次元要素モデル及びはりモデルにおける固有値解析結果の比較を第 1 表に示す。また、乾式キャスク（タイプ 2）における三次元要素モデル及びはりモデルにおける固有値解析結果の比較を第 2 表に示す。乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）において、はりモデルの 1 次固有振動モード及び 1 次固有振動数は共に三次元要素モデルとよく一致している。

第1表 1次固有振動数の比較 (乾式キャスク (タイプ1))

モデル化要素	三次元要素	はり要素及び質点
1次固有振動モード		
1次固有振動数 [Hz]	41.5	41.2

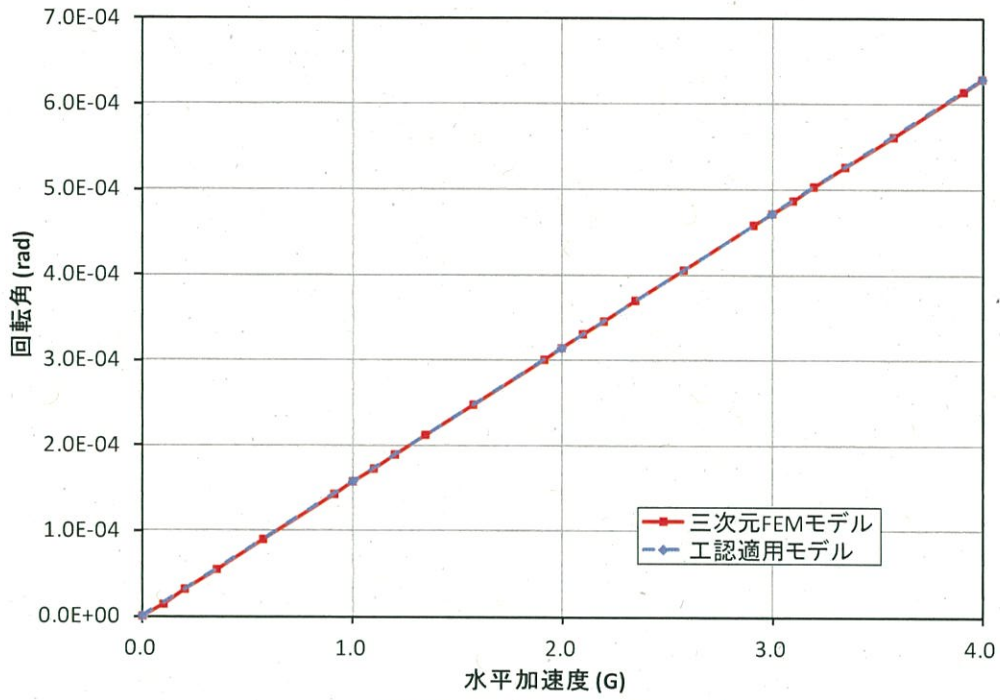
第2表 固有振動数の比較 (乾式キャスク (タイプ2))

モデル化要素	三次元要素	はり要素及び質点
1次固有振動モード	 <p>完全拘束</p>	 <p>完全拘束</p>
1次固有振動数 [Hz]	42.1	42.0

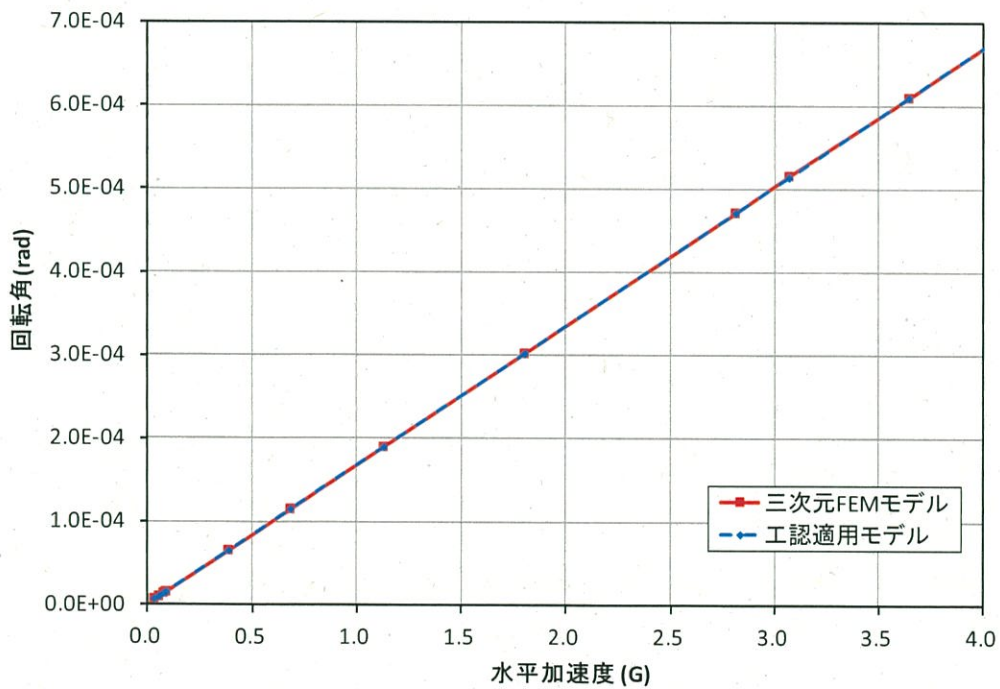
## 三次元 FEM モデルで算出した傾き角及び変位と入力加速度の関係

工認適用モデルにおける乾式キャスクの重心位置に加速度を入力して算出した傾き角、水平方向変位及び鉛直方向変位について、乾式キャスク（タイプ 1）及び乾式キャスク（タイプ 2）の結果を第 1 図～第 3 図に示す。

第 1 図～第 3 図に示した結果より、工認適用モデルの重心位置に加速度を入力して算出した傾き角、水平方向変位及び鉛直方向変位が、三次元 FEM モデルの算出値とよく一致していることを確認した。



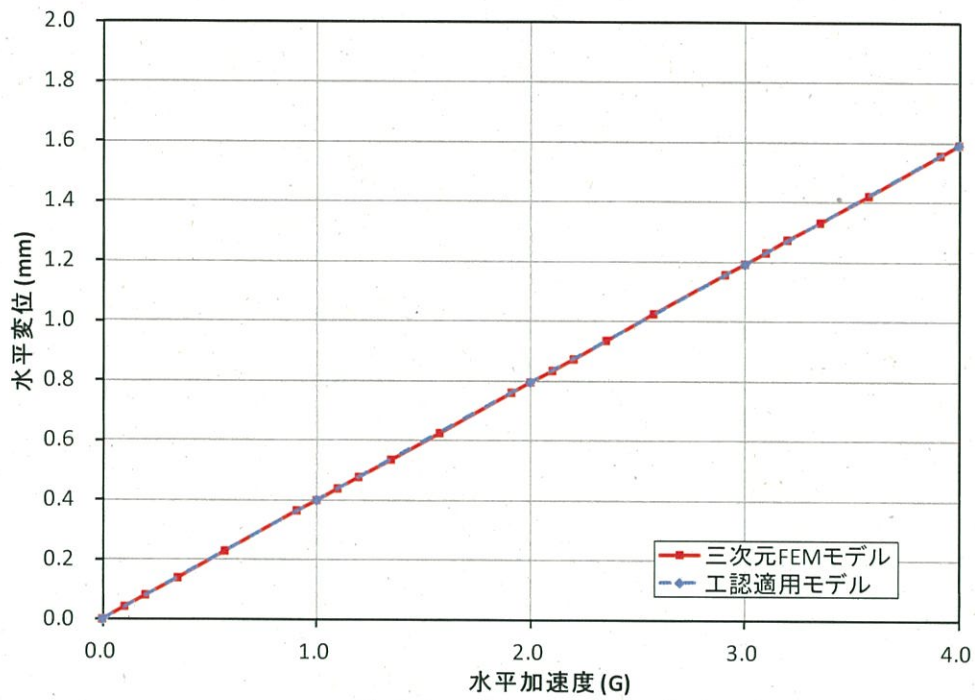
乾式キャスク (タイプ1)



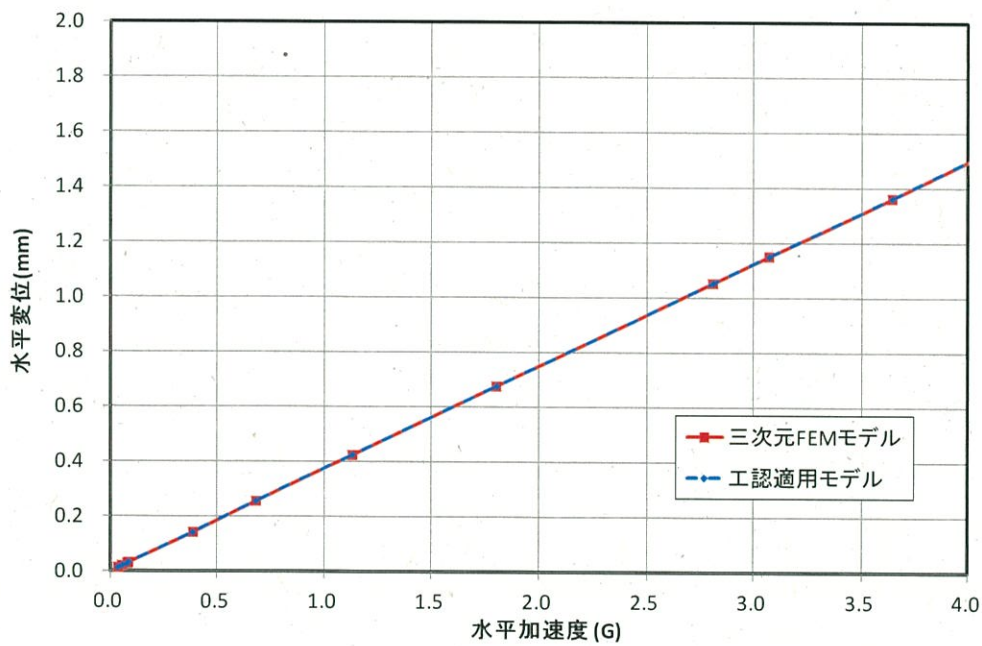
乾式キャスク (タイプ2)

第1図 乾式キャスクの傾き角の比較



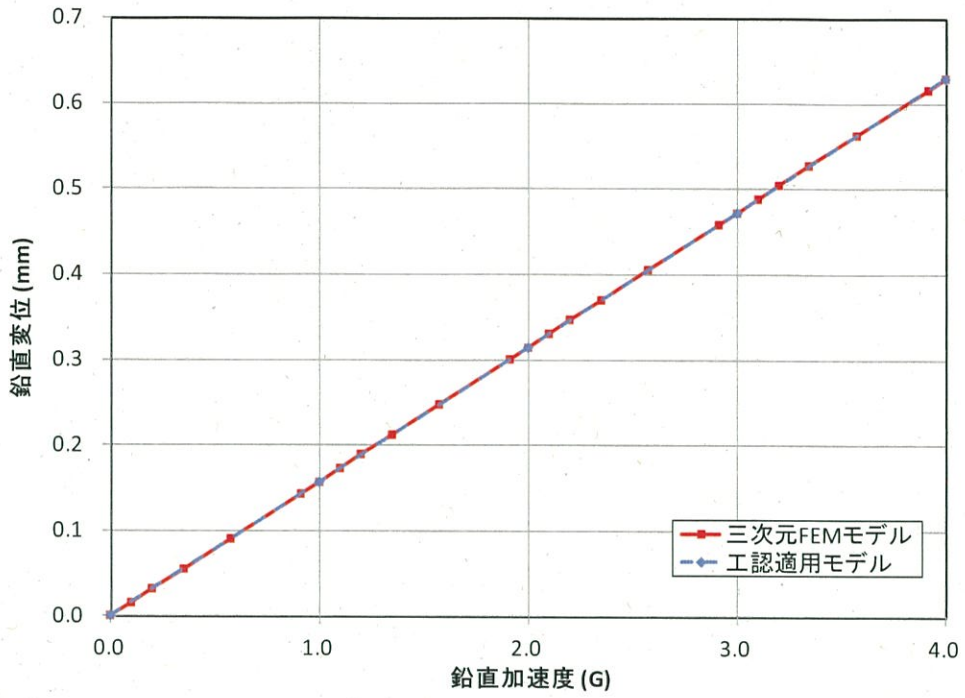


乾式キャスク (タイプ 1)

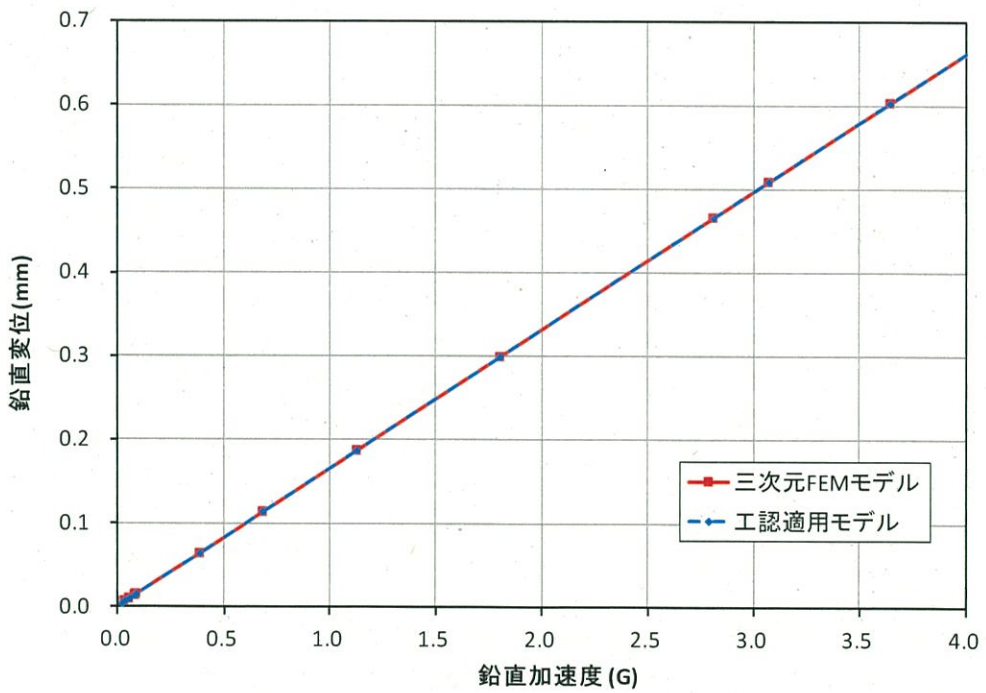


乾式キャスク (タイプ 2)

第2図 乾式キャスクの水平変位の比較



乾式キャスク (タイプ 1)



乾式キャスク (タイプ 2)

第3図 乾式キャスクの重心位置における鉛直方向変位の比較