

女川原子力発電所2号炉 竜巻防護ネットの耐震構造設計について

設計基準対象施設について（第4条 地震による損傷の防止）

平成31年2月
東北電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

目次

1. 概要
2. 基本方針
 - 2.1 要求事項
 - 2.2 構造の概要
 - 2.3 評価方針
3. 耐震評価方法
 - 3.1 解析方針
 - 3.2 設計用床応答スペクトル
 - 3.3 解析モデル及び諸元
 - 3.4 固有値解析結果
 - 3.5 荷重の設定
 - 3.6 評価対象部位
 - 3.7 評価基準値
4. 評価結果
5. まとめ

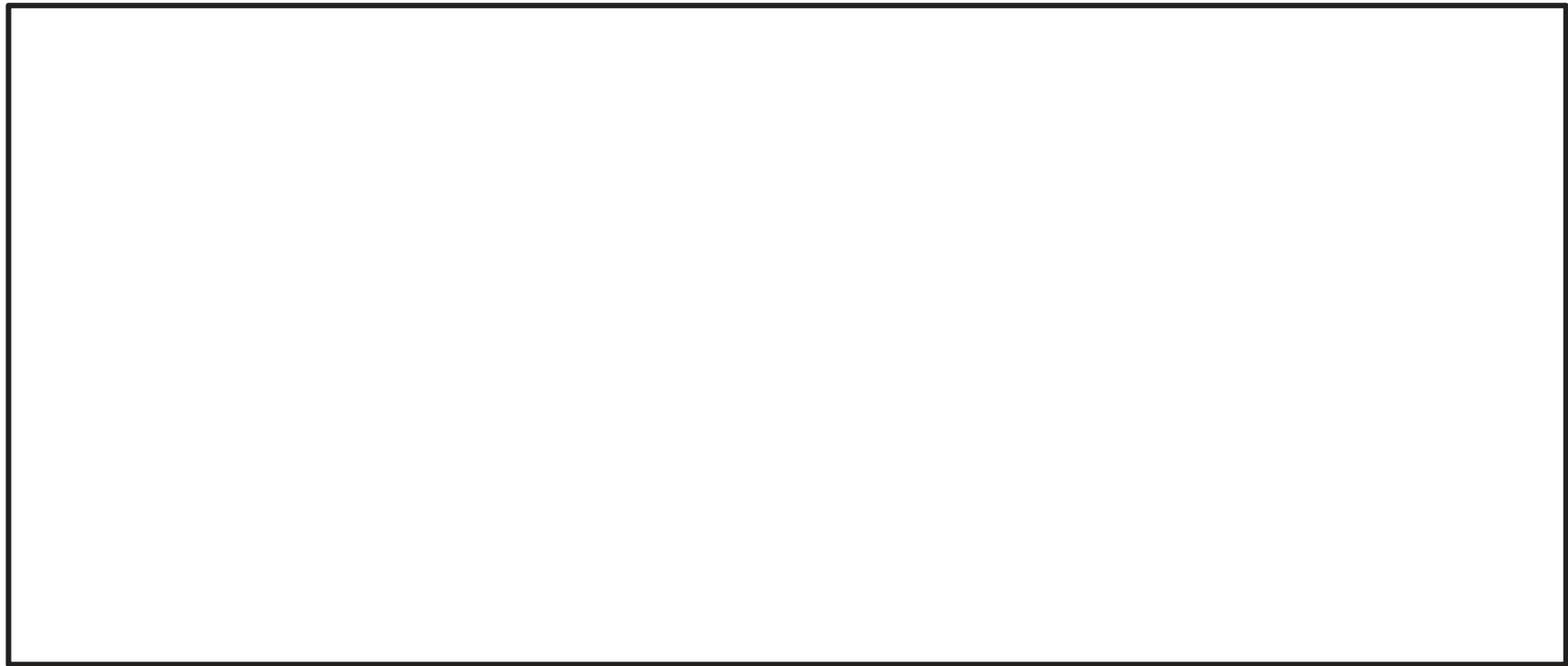
1. 概要

1. 概要

- Sクラス施設等*¹が下位クラス施設の波及的影響によってその安全機能を損なわないこと、また、重要SA施設*²が下位クラス施設の波及的影響によって重大事故等に対処するために必要な機能を損なわないことが必要である
- 本資料では、波及的影響検討で下位クラス施設として抽出された、**竜巻防護ネットについて耐震設計に係る設計方針を示すとともに、工事計画認可申請で提示する耐震評価の見通しを示す**

*1 設計基準対象施設のうち耐震重要度分類Sクラスに属する施設、その間接支持構造物及び屋外重要土木構造物

*2 重大事故等対処施設のうち常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備並びにこれらが設置される常設重大事故等対処施設



竜巻防護ネット周辺の施設配置概要図

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

2. 基本方針

2.1 要求事項

2.2 構造の概要

2.3 評価方針

2. 基本方針

2.1 要求事項 及び 2.2 構造の概要

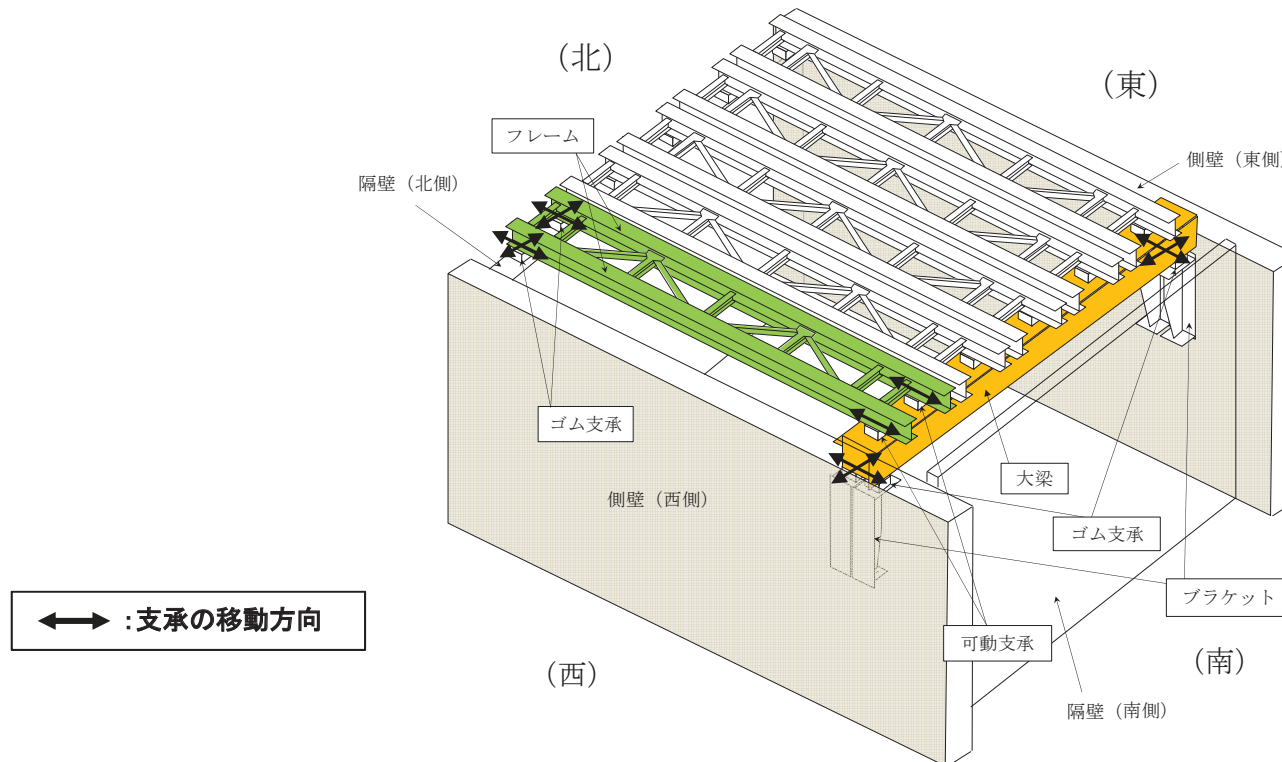
(要求事項)

- 竜巻防護ネットは地震時に機能を求められるものではないので、耐震Cクラスとなるが、耐震Sクラスの非常用海水ポンプ等の上部に設置していることから、地震時の波及的影響を及ぼさないことが求められる

(構造の概要)

- 大梁とフレームの接続部には可動支承を設置し、ブラケットと大梁の接続部及び隔壁(北側)とフレームとの接続部にはゴム支承を設置する構造
- 可動支承でフレームや大梁の熱伸びによる変位を吸収し、ゴム支承のアイソレート機能*で海水ポンプ室への反力を低減する構造

* 水平方向の固有周期を長周期化することにより地震時の荷重を低減することを目的とした機能



竜巻防護ネットの概要図(南西側から見た場合)

2. 基本方針

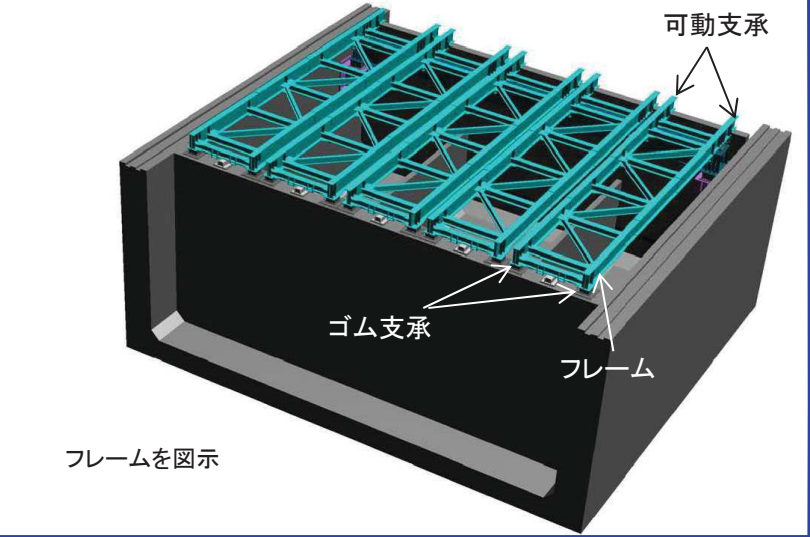
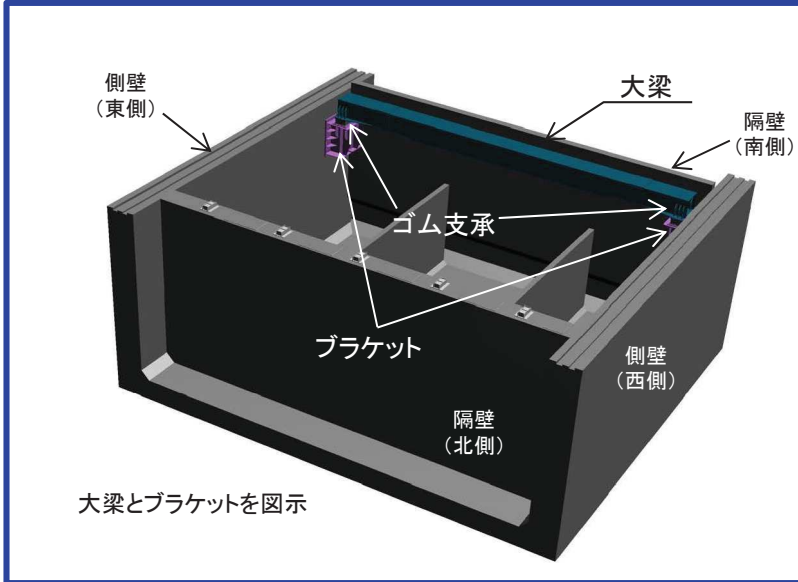
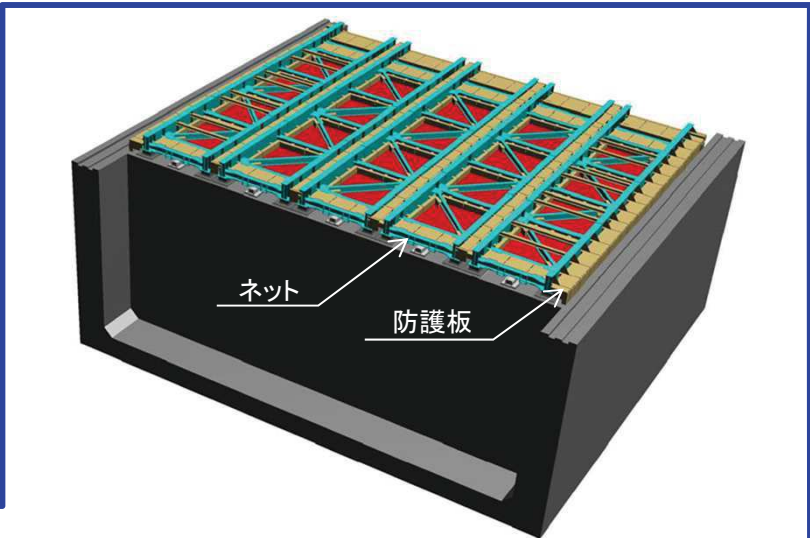
2.2 構造の概要

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

海水ポンプ室(補機エリア)



竜巻防護ネット取付状態

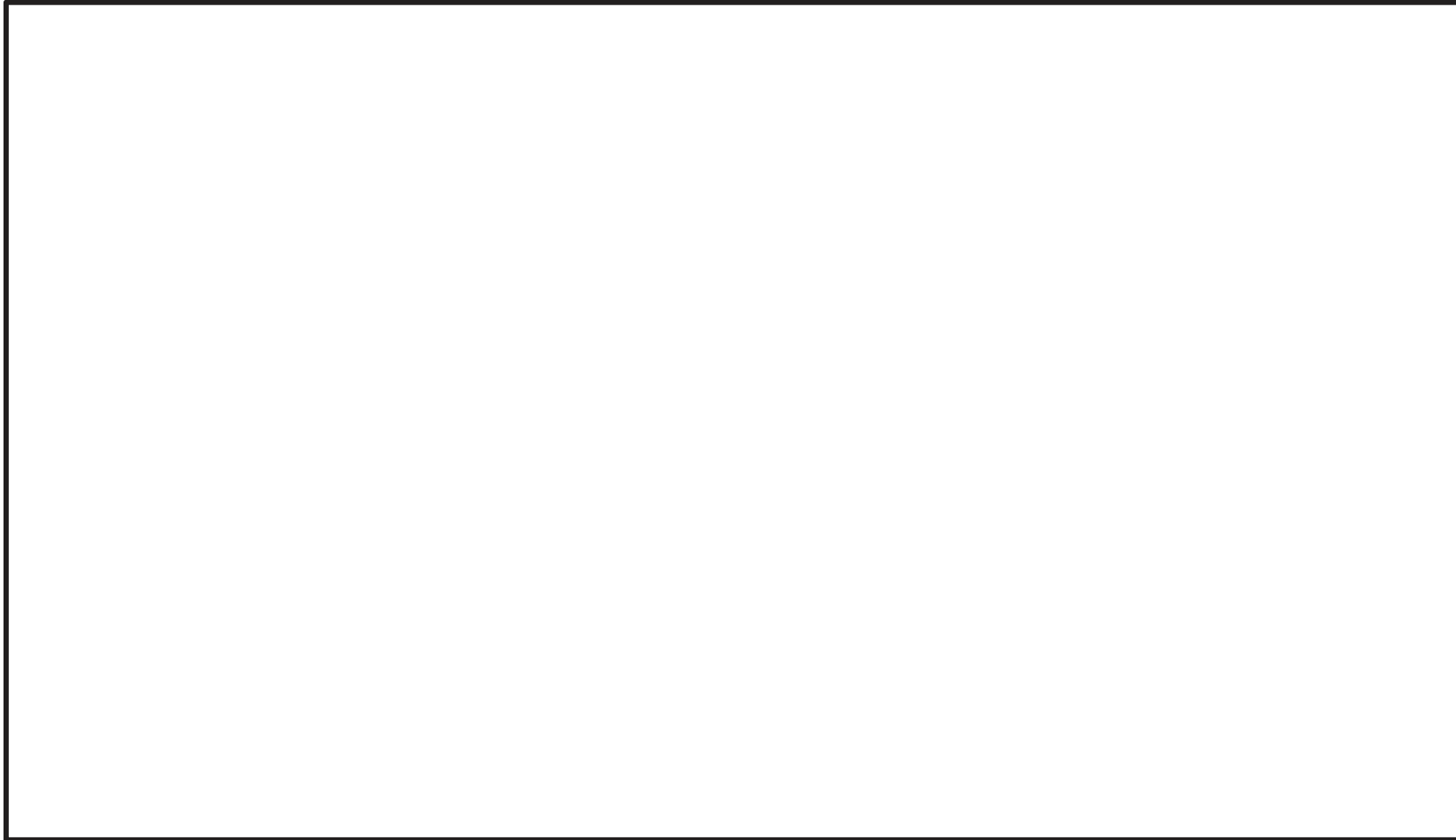


竜巻防護ネットの概要図(北西側から見た場合)

2. 基本方針

2.2 構造の概要

- ゴム支承の採用は、ゴム支承のアイソレート機能により竜巻防護ネットの固有値をやや長周期化することで、海水ポンプ室への反力を低減することを目的としている



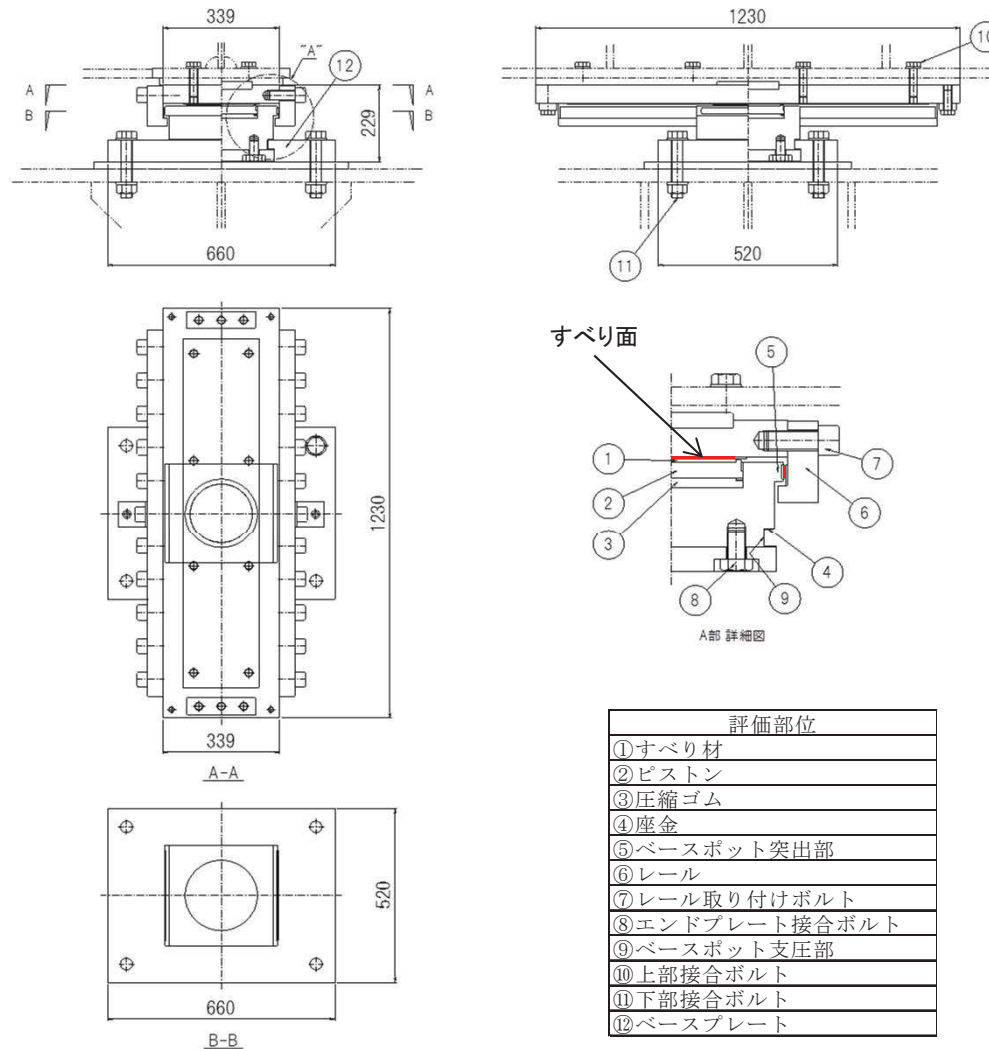
本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密又は防護上の観点から公開できません。

ゴム支承の構造図

2. 基本方針

2.2 構造の概要

- 可動支承を採用することで、フレームや大梁の熱伸びによる変位を吸収する構造とし、メンテナンス性(分解作業の作業性)を向上することを目的としている

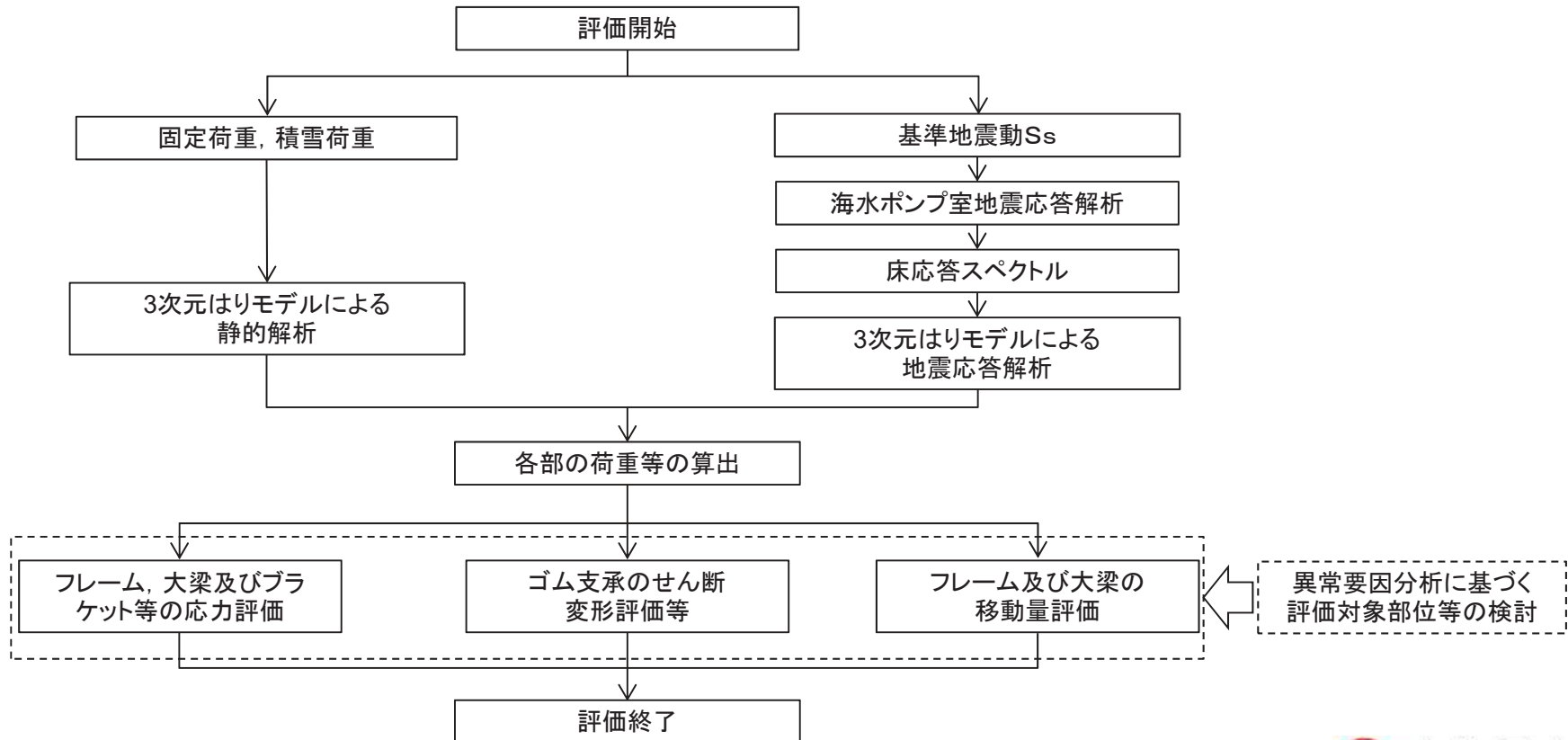


可動支承の構成部品図

2. 基本方針

2.3 評価方針

- 竜巻防護ネットの耐震評価は、基準地震動 S_s による地震力に対して応力評価及び変形評価を行い、崩壊又は落下によって上位クラス施設へ波及的影響を及ぼさないことを確認する
- フレーム、大梁及び支持機構(ゴム支承、可動支承)等をモデル化した3次元はりモデルによる地震応答解析を実施する
- 基準地震動 S_s によって鋼製部材に発生する応力とゴム支承に発生するせん断変形等が評価基準値内であることを確認する
- また、地震時のフレーム及び大梁の移動量が部材間のクリアランスを超えないことにより、部材同士が接触しないことを確認する
- なお、竜巻防護ネットの評価対象部位については異常要因分析に基づき検討した



3. 耐震評価方法

3.1 解析方針

3.2 設計用床応答スペクトル

3.3 解析モデル及び諸元

3.4 固有値解析結果

3.5 荷重の設定

3.6 評価対象部位

3.7 評価基準値

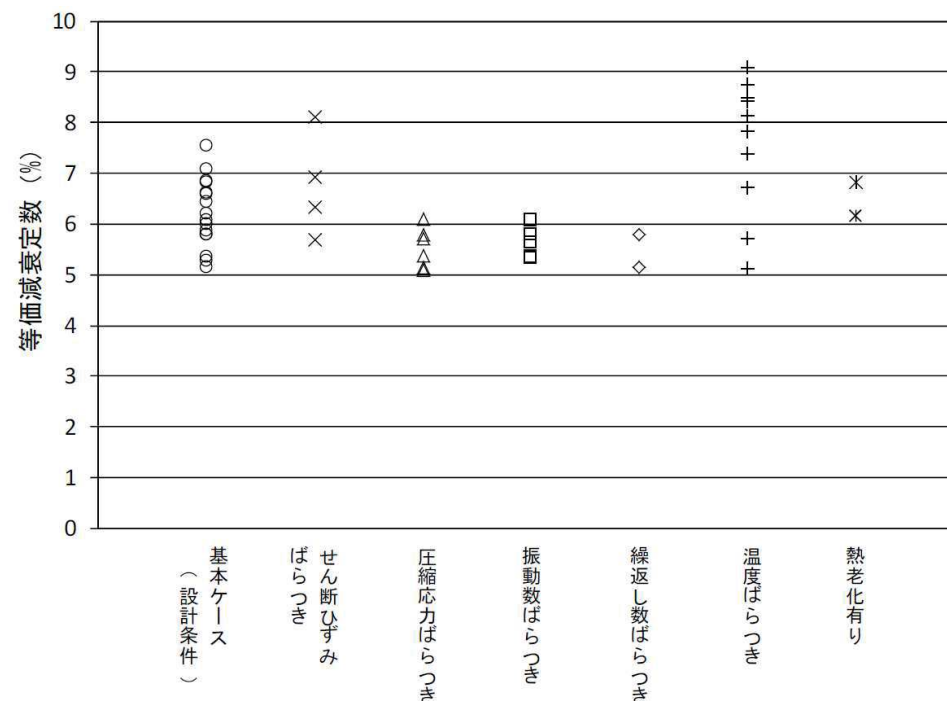
3. 耐震評価方法

3.1 解析方針

- 竜巻防護ネットの耐震評価は、フレーム、大梁及び支承等を評価部位として、3次元はりモデルを用いた弾性応力解析により各部の応力や変位を求める
- 動的応答解析手法は**スペクトルモーダル解析法**とし、**各振動モードの最大応答の重ね合わせにはSRSS法**を用いる
- 減衰定数は、**水平方向**ではゴム支承の変形が主体であり、ゴム支承の等価減衰定数は各種試験結果より5.0%以上のデータが確認されていることから、**保守性を考慮して減衰定数を4.0%**とする。**鉛直方向**についてはゴム支承の応答影響が小さいため、**ボルト構造物の減衰定数である2.0%**(JEAG4601)とする

竜巻防護ネットの解析方針一覧

項目	内容
モデル化方針	フレーム、大梁及び支承等をはり要素及びばね要素にて3次元にモデル化
解析手法	スペクトルモーダル解析 (各振動モードの重ね合わせはSRSS法)
解析コード	DYNA2E Version 8.0
減衰定数	水平: 4.0% 鉛直: 2.0%



各種試験*より得られた等価減衰定数の測定結果

* JIS K6411に基づく試験

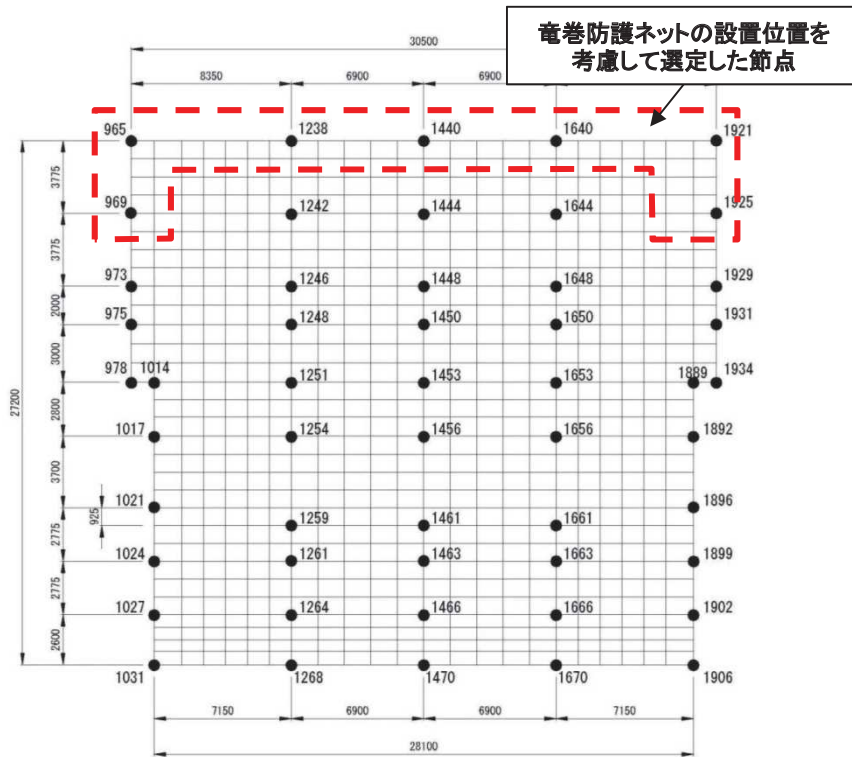


3. 耐震評価方法

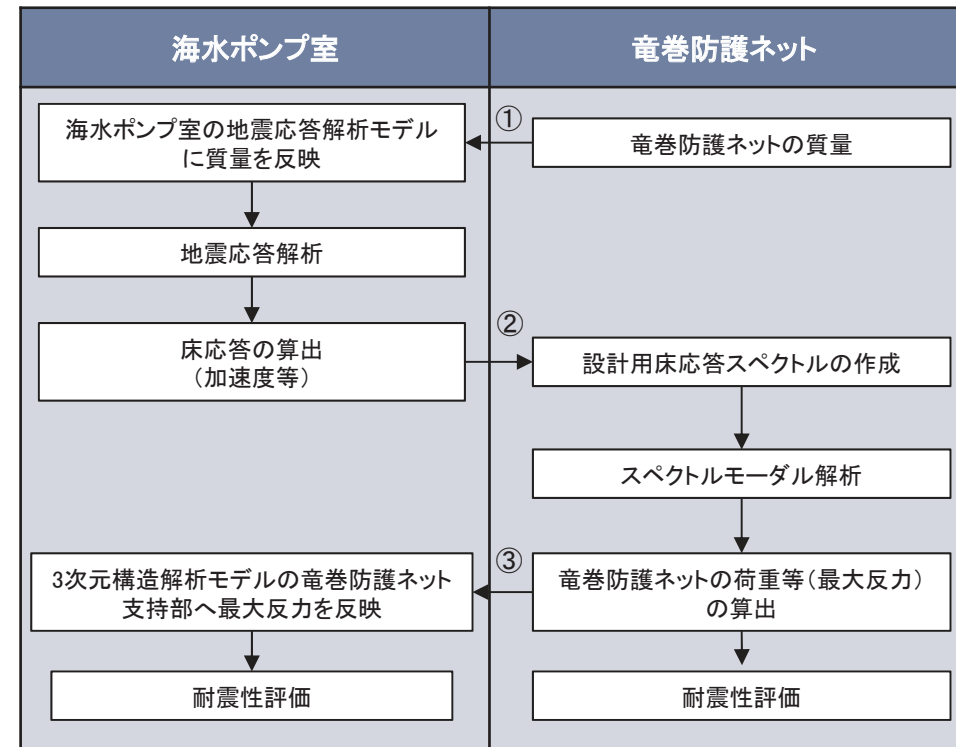
3.2 設計用床応答スペクトル

- 竜巻防護ネットに適用する床応答スペクトルは、**竜巻防護ネットの設置位置を考慮して**、海水ポンプ室地震応答解析モデル*から**適用する節点を選定し**、**選定した節点の応答スペクトルを包絡したスペクトル**を用いる
- スペクトルは**周期軸方向に±10%拡幅**して、設計用床応答スペクトルを作成する
- 竜巻防護ネットと海水ポンプ室の耐震設計における相互関係は以下のとおり
 - ① 竜巻防護ネットの質量を海水ポンプ室の地震応答解析モデルに反映する
 - ② 海水ポンプ室の地震応答解析結果から、竜巻防護ネットの設計用床応答スペクトルを作成する
 - ③ 竜巻防護ネットのスペクトルモーダル解析から算出された最大反力を海水ポンプ室の3次元構造解析モデルへ反映する

* 海水ポンプ室の地震応答解析モデルについては現在、審査を進めているところであるため、審査結果を踏まえて設定する海水ポンプ室モデルの地震応答については工認段階で設計へ反映する



海水ポンプ室の地震応答解析モデル図



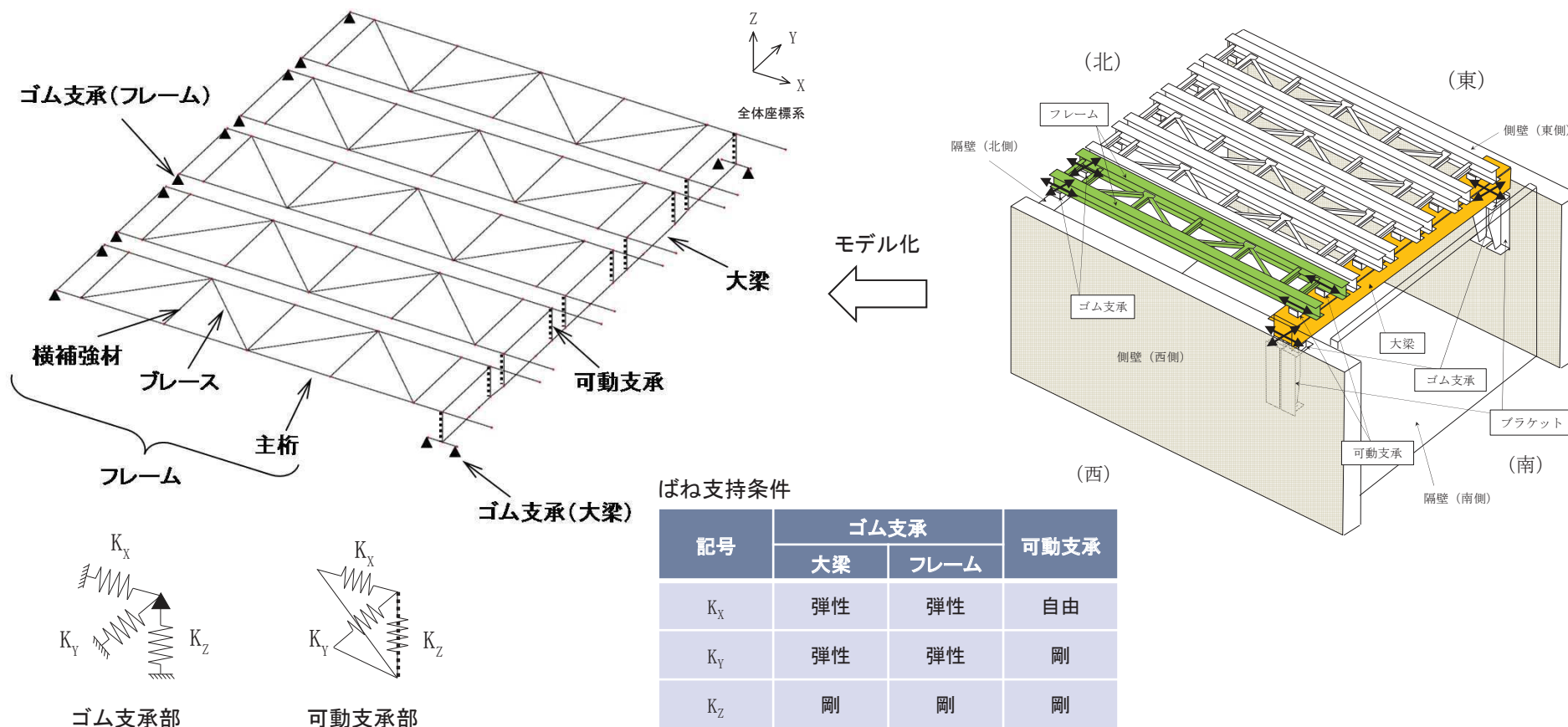
耐震設計における竜巻防護ネットと海水ポンプ室の相互関係

3. 耐震評価方法

3.3 解析モデル及び諸元

(解析モデル)

- **大梁及びフレーム**(主桁, 横補強材, ブレース)の各部材は**線形はり要素**でモデル化する
- **ゴム支承**は**線形ばね要素**でモデル化する
- 可動支承部は, X, Y, Zの3方向のばねを介して荷重を伝達するモデルとし, **可動支承の拘束方向であるY方向とZ方向は剛のばね**, **可動方向であるX方向は拘束フリーのばね**とする



竜巻防護ネット解析モデル図

3. 耐震評価方法

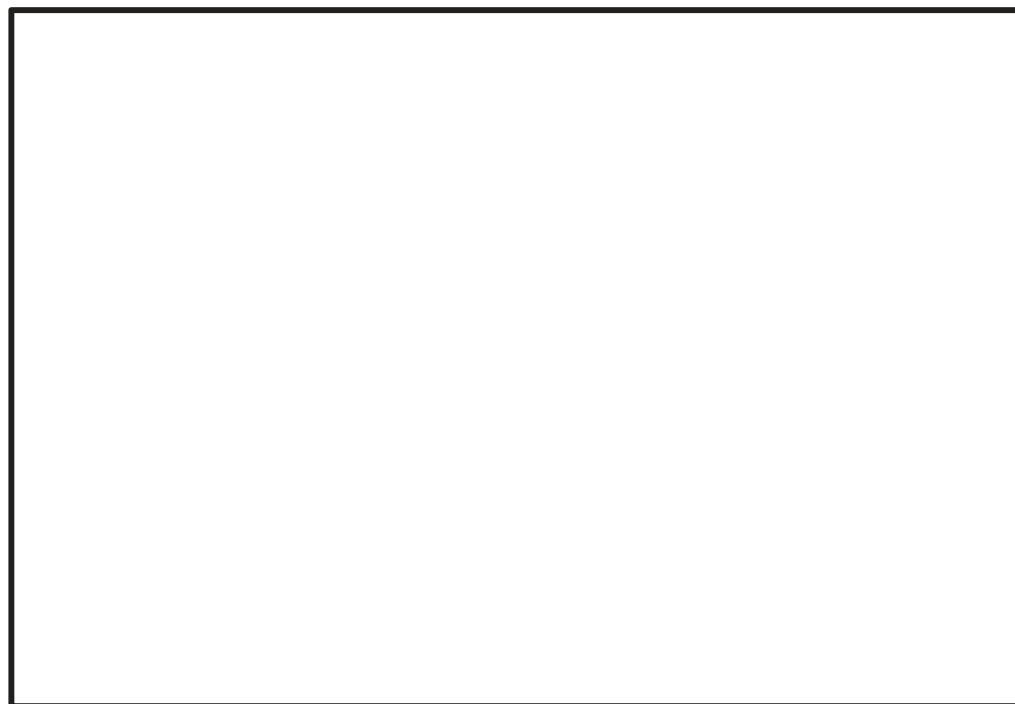
3.3 解析モデル及び諸元

(解析諸元)

- 竜巻防護ネットにおいて、特徴的な構造であるゴム支承の設計諸元、構造図を以下に示す
- **ゴム支承の鉛直剛性**については、十分に高いことから**剛条件としてモデル化**している

ゴム支承の設計諸元

項目	大梁ゴム支承	フレームゴム支承
支承種類	地震時水平力分散型ゴム支承	
ゴム体種類	天然ゴム(NR)	
ゴム体有効平面寸法(mm)	800×800	550×550
総ゴム厚(mm) (ゴム厚(mm)×層数)	192 (24×8層)	135 (15×9層)
せん断弾性係数(N/mm ²)	1.0(G10)	1.2(G12)
水平剛性(kN/mm)	3.333	2.689
鉛直剛性(kN/mm)	972	863



ゴム支承の構造図

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密又は
防護上の観点から公開できません。

3. 耐震評価方法

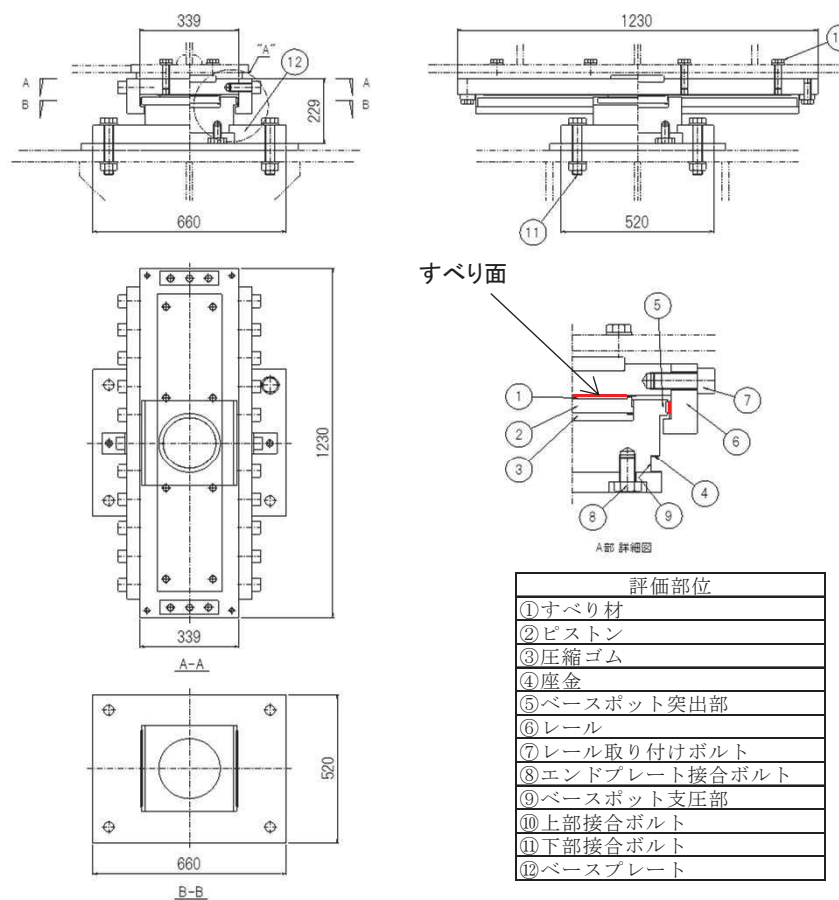
3.3 解析モデル及び諸元

(解析諸元)

- 竜巻防護ネットにおいて、特徴的な構造である可動支承の設計仕様，構成部品図を以下に示す
- 可動支承は、**フレームの軸方向(X方向)へ滑る構造のため、拘束フリーとしてモデル化している**

可動支承の仕様

項目	仕様
すべり材	ポリアミド MC703HL
	ステンレス SUS304 SUS316
圧縮ゴム	クロロプレン系合成ゴム
鋼材 (レール等)	SS400 SM490
ベースプレート寸法	660mm × 520mm
レール寸法	1230mm × 339mm



可動支承の構成部品図

3. 耐震評価方法

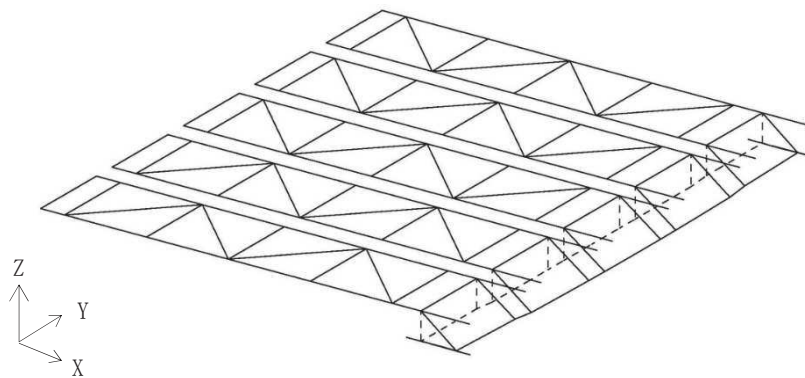
3.4 固有値解析結果

- 大梁とフレームについて、X, Y, Z方向の1次モードを示しているが、**いずれも1秒以下の固有周期**となっており、一般的な免震装置の固有周期である2~4秒に比べて十分剛側の設備である
- 大梁及びフレームの**水平方向**の1次モードはそれぞれ**ゴム支承が変形するモード**が支配的になっており、**鉛直方向**の1次モードは**鋼材の変形が支配的**なモードとなる

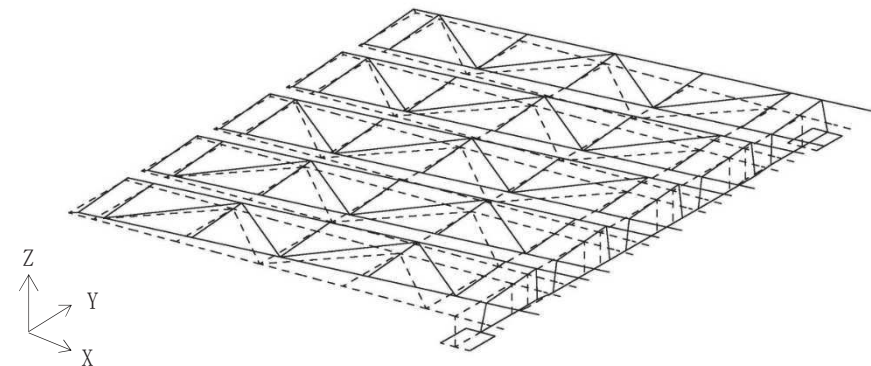
固有値解析結果

主要モード	固有周期 (秒)
大梁 水平X方向 1次	0.50
大梁 水平Y方向 1次	0.86
大梁 鉛直Z方向 1次	0.34

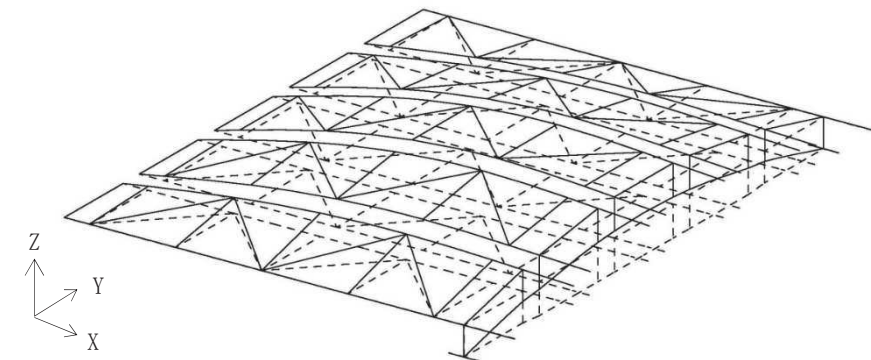
----- 変形前
 ———— 変形後



大梁 水平X方向 1次



大梁 水平Y方向 1次



大梁 鉛直Z方向 1次

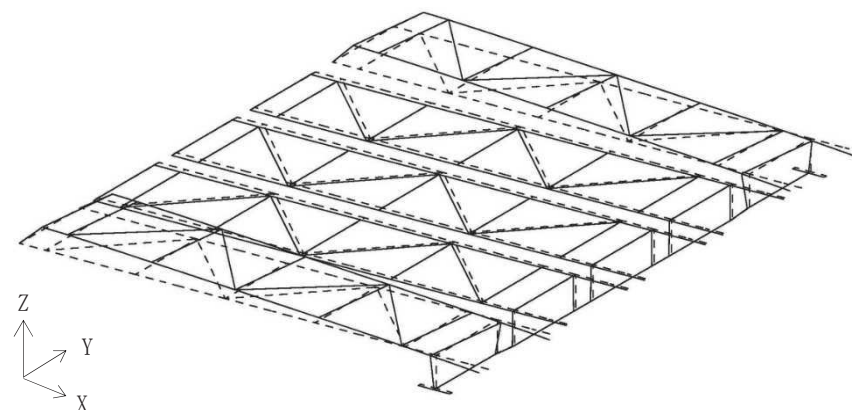
モード図(1/2)

3. 耐震評価方法

3.4 固有値解析結果

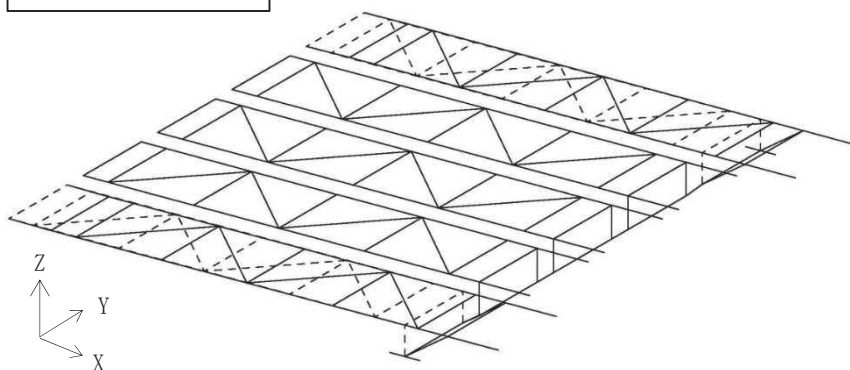
固有値解析結果

主要モード	固有周期 (秒)
フレーム 水平X方向 1次	0.77
フレーム 水平Y方向 1次	0.43
フレーム 鉛直Z方向 1次	0.29

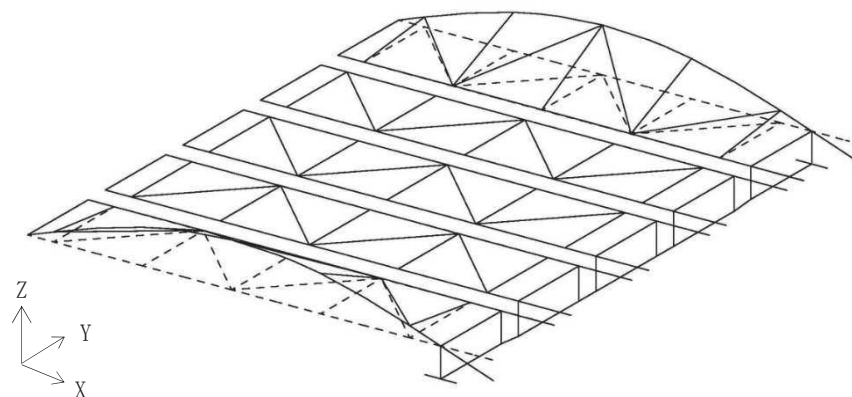


フレーム 水平Y方向 1次

----- 変形前
 ———— 変形後



フレーム 水平X方向 1次



フレーム 鉛直Z方向 1次

モード図(2/2)

3. 耐震評価方法

3.5 荷重の設定

(荷重の設定)

➤ 竜巻防護ネットの耐震評価においては、以下の荷重を考慮する

①**固定荷重(G)**・・・竜巻防護ネットの各構成部品(ネット, フレーム, 大梁, ブラケット等)の自重を固定荷重として考慮する

②**積雪荷重(S)**・・・地震荷重との組合せに用いる積雪荷重は下記式より算出する

$$S=0.35 \times \rho \times d \times A \text{ (N)}$$

ρ : 積雪の単位重量 (N/cm/m²)

d : 垂直積雪量 (cm)

A : 水平投影面積 (m²)

③**地震荷重(Ks)**・・・地震荷重は地震応答解析より算出する

(荷重の組合せ)

➤ 地震時の評価は、地震力及び地震力以外の荷重を組み合わせることとし、**地震力は水平2方向及び鉛直1方向を考慮し、各方向の組合せはSRSS法を用いる**

荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
Ss地震時	G+S+Ks

3. 耐震評価方法

3.6 評価対象部位

- 竜巻防護ネットの耐震評価は、地震によるネット架構等の崩壊又は落下により上位クラス施設への影響を防止することが目的であることから、この目的を達成するために耐震評価が必要となる評価部位を異常要因分析から抽出している

地震時における異常要因分析の例

評価対象		作用荷重	損傷モード	評価項目	評価基準値	設計要求事項	
ネット (金網部)	ネット	水平方向の地震荷重 鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重	破断によるネット の落下	地震時に作用する荷重は竜巻飛来物衝突時に作用する荷重よりも小さいため、耐震性の評価は竜巻飛来物衝突評価に包絡される			
	ネット取付部材						
	組立ボルト						
フレーム	主桁	水平方向の地震荷重 鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重	破断、座屈破壊 によるフレームの 落下	引張応力 せん断応力 圧縮応力 曲げ応力	JEAG4601・補-1984の許容 応力	3次元はりモデルによる応答解析に よって算出した荷重から、部材の応力 評価を実施	
	横補強材						
	ブレース		破断による落下	地震時に作用する荷重は竜巻飛来物衝突時に作用する荷重よりも小さいため、耐震性の評価は竜巻飛来物衝突評価に包絡される			
	防護板取付金具						
	防護板						
	防護板取付ボルト						
大梁	大梁フレーム	水平方向の地震荷重 鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重	破断、座屈破壊に よる落下	引張応力 せん断応力 圧縮応力 曲げ応力	JEAG4601・補-1984の許容 応力	3次元はりモデルによる応答解析に よって算出した荷重から、部材の応力 評価を実施	
							ブラケット 本体
アンカーボルト	破断による大梁 の落下	引張応力 せん断応力					

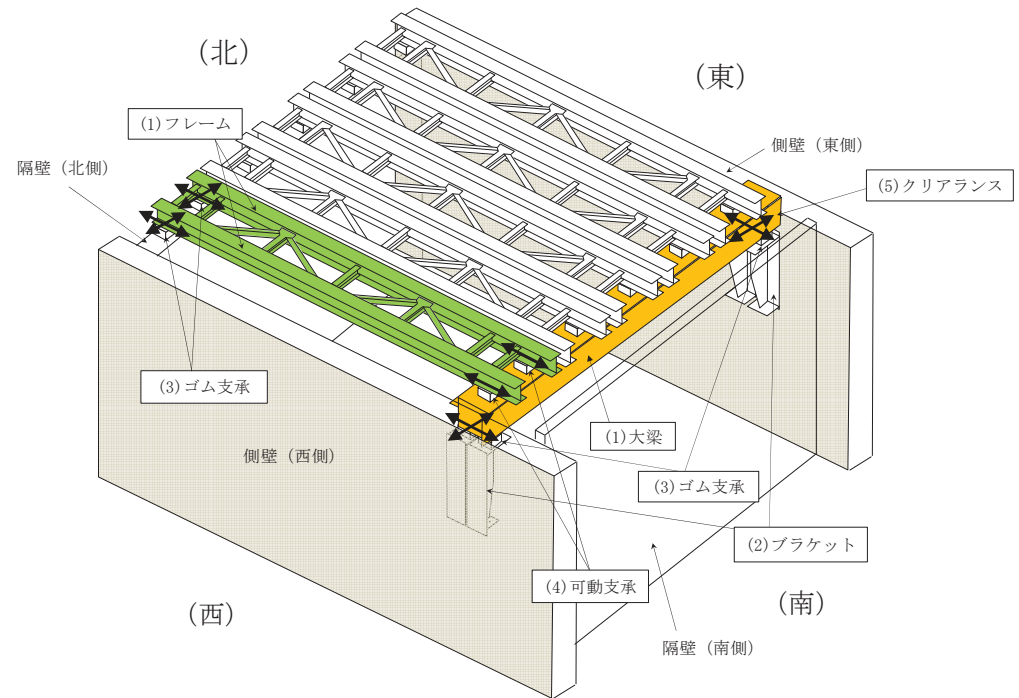
3. 耐震評価方法

3.6 評価対象部位

▶ 異常要因分析の結果から抽出した評価対象部位は以下のとおり

異常要因分析より抽出した評価対象部位

評価対象部位		
フレーム, 大梁	フレーム	主桁
		横補強材
		ブレース
	大梁	大梁フレーム
ブラケット		ブラケット本体
		アンカーボルト
		ゴム支承本体
ゴム支承	フレームゴム支承	ゴム支承取付ボルト
		アンカーボルト
		大梁ゴム支承
		ゴム支承本体
		ゴム支承取付ボルト
可動支承		荷重評価
		クリアランス評価
		クリアランス評価
クリアランス評価	フレーム/隔壁接続部	クリアランス評価
	大梁/ブラケット接続部	クリアランス評価
	フレーム/大梁接続部	クリアランス評価



竜巻防護ネットの概要図

3. 耐震評価方法

3.7 評価基準値

- ▶ 竜巻防護ネットが上位クラスへの波及的影響を及ぼさないことを確認するための、各評価対象部位の評価基準値は以下の考え方で設定する。
- 鋼製部材についてはJEAG4601を適用する
 - ゴム支承については道路橋示方書を適用する
 - 可動支承については各部品の許容値より算出した許容荷重を適用する
 - クリアランス評価は各部材間の位置関係より求められるクリアランスを許容値として適用する

応力解析評価における評価基準値

部位	評価方法	評価基準値
フレーム, 大梁	部材に発生する応力が評価基準値を超えないこと	許容応力状態IV _A Sの許容応力
ブラケット	部材に発生する応力が評価基準値を超えないこと	許容応力状態IV _A Sの許容応力
ゴム支承 (フレーム, 大梁)	支承に発生する応力が評価基準値を超えないこと	「道路橋示方書・同解説V耐震設計編(H14.3)」に基づく評価基準値
		許容応力状態IV _A Sの許容応力(取付ボルト)
可動支承	支承に発生する荷重が許容荷重を超えないこと	支承を構成するそれぞれの部品の許容値より算出した許容荷重*
	支承の移動量がストッパーまでのクリアランスを超えないこと	ストッパーまでのクリアランス
クリアランス評価	部材に発生する移動量が部材間のクリアランスを超えないこと	部材間のクリアランス

* 支承の構成部品の中で最弱となる部位を特定し、当該部位が損傷する荷重を許容荷重と設定し、地震応答解析で算出される可動支承部の荷重と比較する

4. 評価結果

4. 評価結果

- 竜巻防護ネットに対する耐震評価の結果、各評価対象部位の評価項目の発生値は全て許容基準値を下回っており、竜巻防護ネットが海水ポンプ室の上位クラス施設へ波及的影響を及ぼさないことを確認した

耐震評価結果*1

評価対象*2		評価項目	発生値	評価基準値	裕度		
フレーム	主桁	組合せ	225 (MPa)	343 (MPa)	1.52		
大梁	大梁フレーム	組合せ	253 (MPa)	364 (MPa)	1.43		
ブラケット	アンカーボルト	引張応力	146 (MPa)	275 (MPa)	1.88		
ゴム支承	大梁ゴム支承	ゴム支承 本体	ゴム本体	せん断ひずみ	126	250	1.98
	フレームゴム支承	ゴム支承 本体	ゴム本体	せん断ひずみ	140	250	1.78
可動支承	構造部材	鉛直荷重	276 (kN)	350 (kN)	1.26		
クリアランス評価	大梁／ブラケット 接続部	X方向	移動量	150 (mm)	250 (mm)	1.66	
	フレーム／隔壁 接続部	X方向	移動量	169 (mm)	300 (mm)	1.77	
	フレーム／大梁 接続部	X方向	移動量	225 (mm)	400 (mm)	1.77	

*1 本評価結果は暫定値(Ss-D1,D2,F1,F2,N1の結果のうち最も厳しい結果)

*2 各評価部位について最も裕度が小さい部位を記載

5. まとめ

5. まとめ

- 女川2号炉竜巻防護ネットは、上位クラス施設である非常用海水ポンプ等に対して波及的影響を及ぼすおそれがないよう基準地震動 S_s に対して損傷しない構造が要求される
 - 竜巻防護ネットの構造設計では、海水ポンプ室の特徴、設備メンテナンス性等を踏まえ、可動支承でフレームや大梁の熱伸びによる変位を吸収し、ゴム支承のアイソレート機能で海水ポンプ室への反力を低減する構造として、波及的影響を防止する設計とした
 - このため、耐震評価では、竜巻防護ネットの構造特徴を考慮した地震応答解析モデルを設定するとともに、異常要因分析結果に基づき評価対象部位、評価項目、評価基準値を検討した
 - 基準地震動 S_s 暫定値に対する竜巻防護ネットの耐震評価を実施し、構造健全性が確保できることを確認した
 - 以上より、竜巻防護ネットは波及的影響を及ぼさないことの見通しを得た

- 今後は工認段階で、基準地震動 S_s -D1～N1(全7波)に対する耐震評価を実施して、地震による波及的影響を及ぼさないことを説明する
- また、工認段階では、審査結果を踏まえて設定する海水ポンプ室の地震応答解析モデルによる解析結果を竜巻防護ネットの耐震設計に適用するとともに、地盤の不確かさ等についても検討する