

本資料のうち、枠囲みの内容は商業
機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	O2-他-F-17-0009_改1
提出年月日	2021年7月2日

女川原子力発電所第2号機 竜巻防護ネットの構造評価について

2021年7月2日
東北電力株式会社

目次

1. はじめに
2. 竜巻防護ネットの構造概要
3. 強度評価について
4. 耐震評価について
5. 設置許可段階からの設計進捗の反映事項
6. まとめ

1. はじめに

- 竜巻防護ネットに関する詳細設計申送り事項(第876回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 2020年7月14日)について, 今回工認における対応を説明する。

詳細設計申送り事項(第876回審査会合, 2020年7月14日)

No.	項目	概要
2-2	竜巻防護ネットの構造評価	設置許可段階において, ゴム支承の採用等を踏まえた構造成立性及び詳細設計段階における設計方針について説明しており, 試験や解析の結果を踏まえて詳細を説明する。

- 竜巻防護ネットの構造及び特徴を考慮した試験や解析結果を踏まえて, 竜巻防護に関する防護対策施設の構造強度評価(以下「強度評価」という。)及び耐震Sクラス施設への波及的影響を及ぼすおそれのある設備として基準地震動 S_s に対する耐震評価(以下「耐震評価」という。)について説明する。
- また, 設置許可段階からの詳細設計進捗を反映した事項についても合わせて説明する。

竜巻防護ネットの設計方針

- 竜巻防護ネットは海水ポンプ室補機ポンプエリア上面に設置し、外部事象防護対象施設に対して、竜巻による飛来物が衝突することを防止する設計とする。また、基準地震動 S_s による地震力に対して十分な構造強度を有し、下部に設置された耐震Sクラス施設に対して、波及的影響を及ぼさない設計とする。

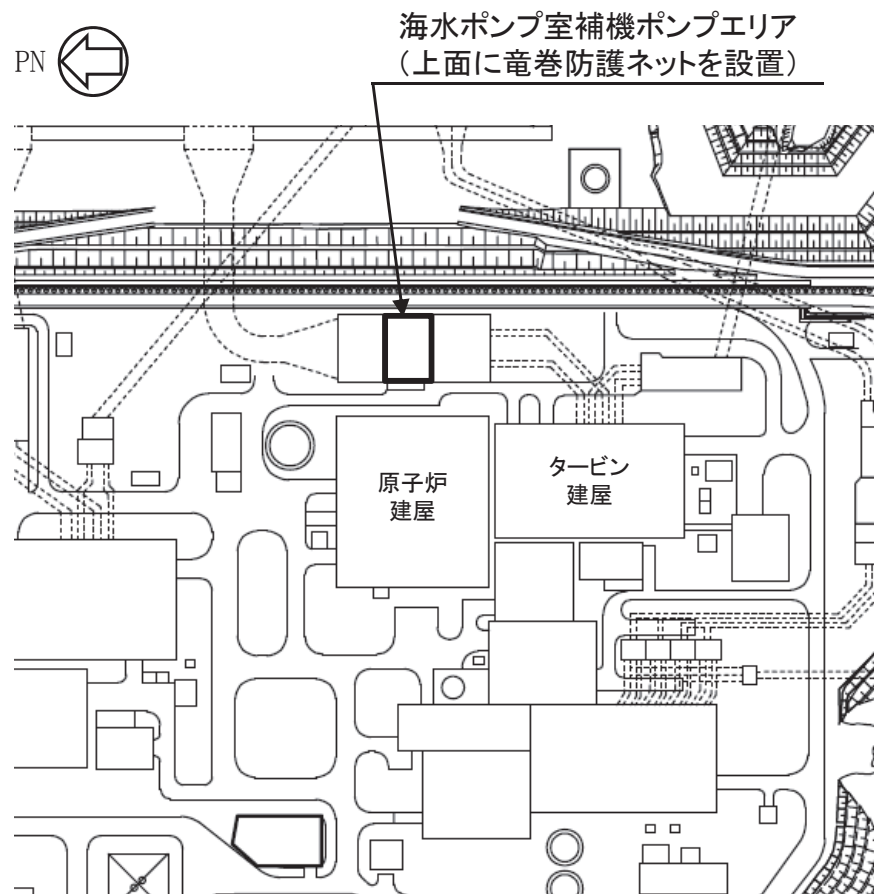


図2-1 竜巻防護ネットの設置位置図

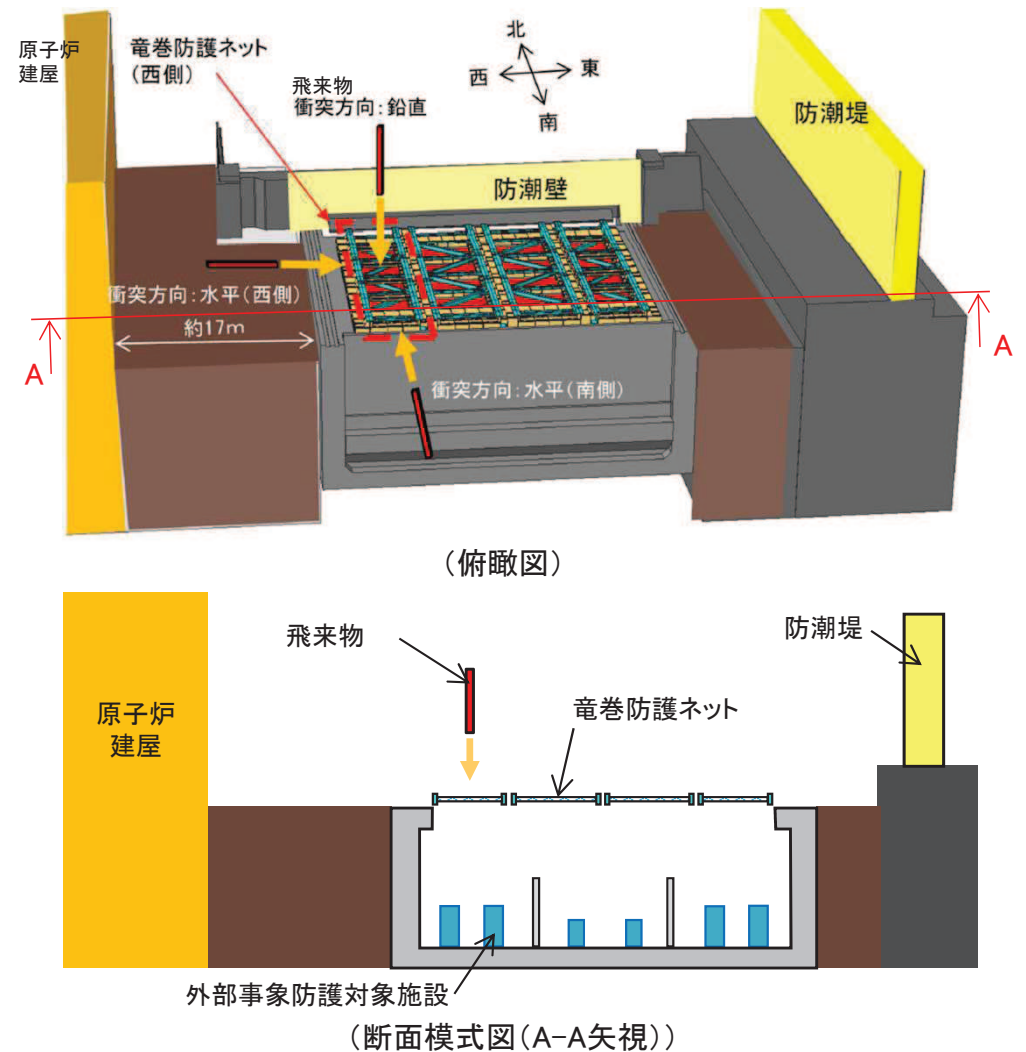


図2-2 海水ポンプ室補機ポンプエリアの模式図

竜巻防護ネットの構造及び特徴

▶ 竜巻防護ネットはネット、防護板及び支持部材（**ゴム支承、可動支承**、フレーム、大梁等）により構成する。

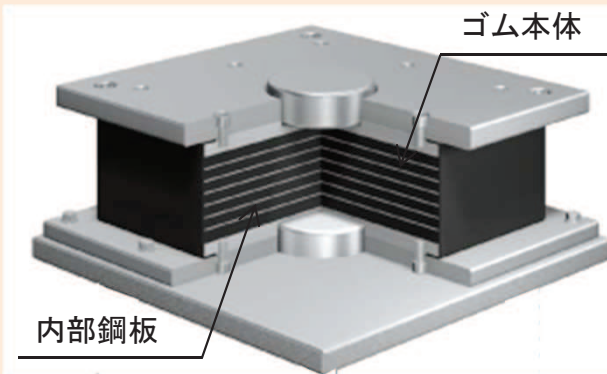
↳ **当社竜巻防護ネットの特徴・先行プラントとの差異**

ゴム支承及び可動支承の採用目的

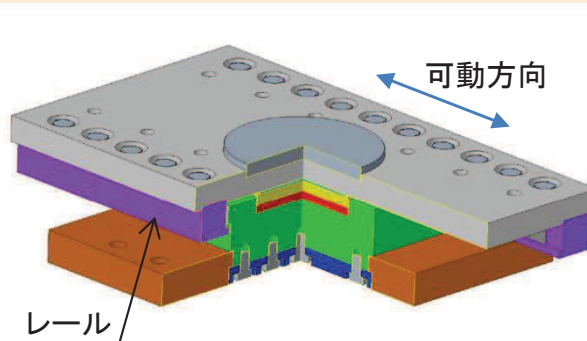
ゴム支承：アイソレート機能により竜巻防護ネットの固有値をやや長周期化し、地震時の海水ポンプ室への反力を低減すること。

可動支承：水平変位に追従する構造により、温度変化によるフレームの伸縮を吸収し、変形による荷重発生を防ぐこと。

【ゴム支承の概要図】



【可動支承の概要図】



竜巻防護ネット取付状態

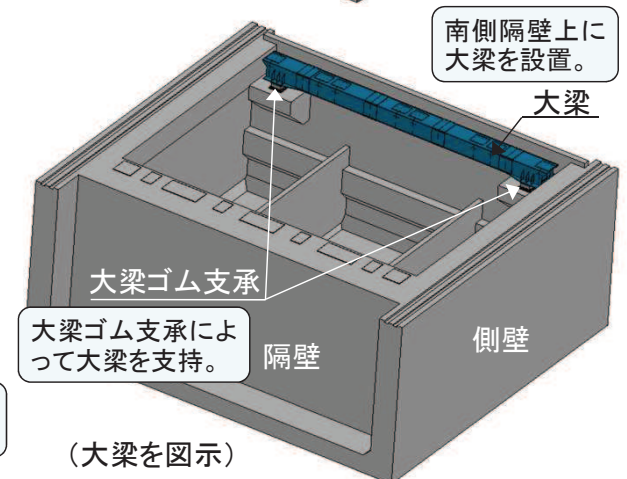
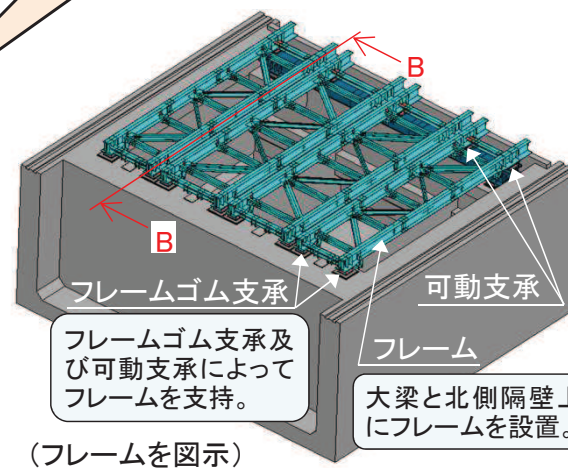
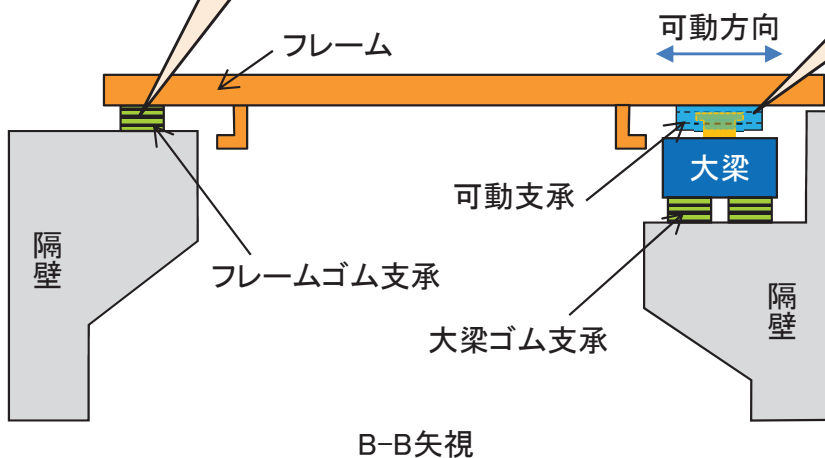
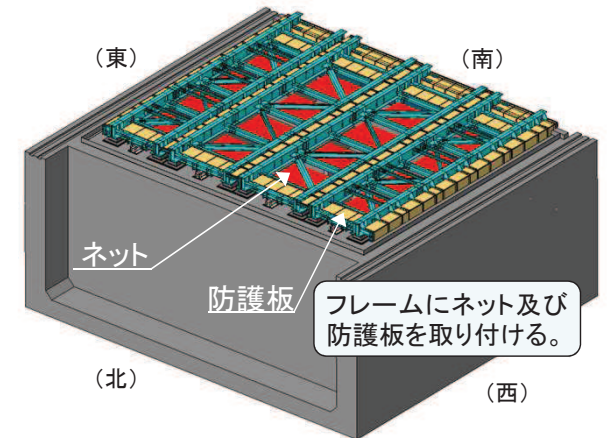


図2-3 竜巻防護ネットの概要図

3.1 竜巻防護ネットの支持部材に対する強度評価(1/2)

(1) 竜巻防護ネットの支持部材に対する構造強度の設計方針

- 支持部材は、設計竜巻による荷重に対して、飛来物が支持部材を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載するネット及び防護板を支持する機能を維持可能な構造強度を有する設計とし、また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないために、支持部材を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。

(2) 評価方法

- 竜巻防護ネットの支持部材がその機能を維持することを、解析コード「LS-DYNA」による衝突解析により確認した。

【評価対象部位】 フレーム、大梁、ゴム支承及び可動支承

【荷重及び荷重の組合せ】 風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる(以下「設計竜巻による荷重」という。)

【許容限界】 各部材に対して以下のとおり設定。

フレーム及び大梁: 破断ひずみ

ゴム支承: JEAG4601に準じた許容応力状態IV_ASの許容応力及び道路橋示方書・同解説に準じた道路橋支承便覧の評価基準値

可動支承: 各部材の許容限界より求めた可動支承全体の許容荷重

(3) 解析モデル

- フレーム、大梁及び飛来物をシェル要素で、ゴム支承を線形ばね要素でモデル化した。

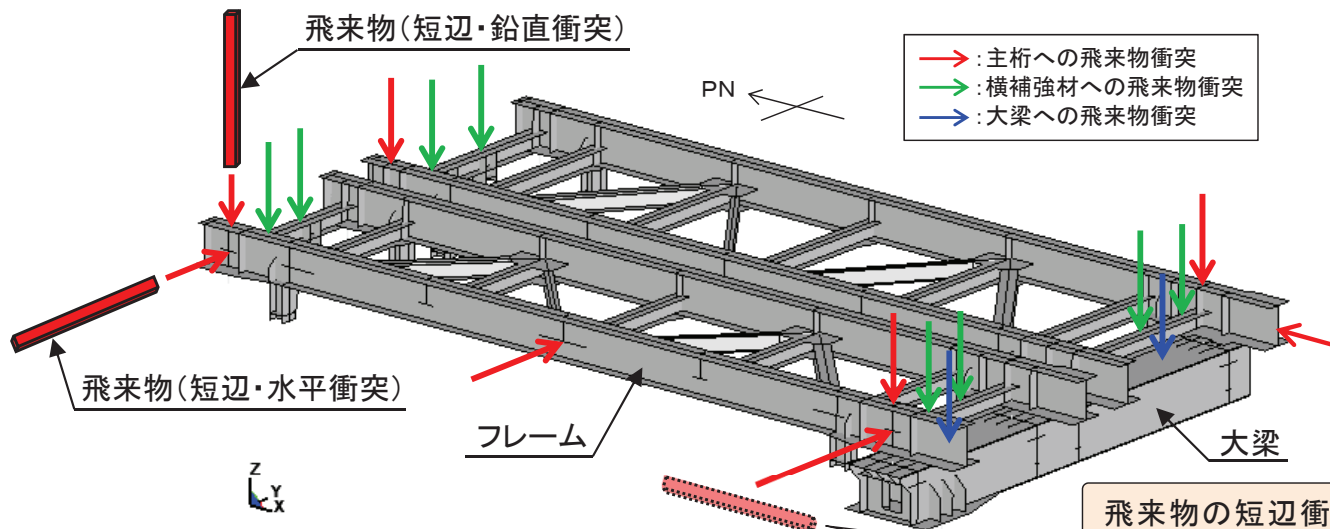


図3-1 解析モデル及び飛来物衝突位置図

表3-1 支承部の結合条件

方向	ゴム支承		可動支承
	大梁ゴム支承	フレームゴム支承	
X	弾性	弾性	自由
Y	弾性	弾性	剛
Z	弾性	弾性	剛

ゴム支承の剛性設定の考え方について次ページに示す。

飛来物の短辺衝突を基本とし、衝突解析における衝突姿勢の不確かさとして、長辺衝突による影響確認を実施した。

3.1 竜巻防護ネットの支持部材に対する強度評価(2/2)

(4) 評価に用いるゴム支承の剛性の設定

- 道路橋支承便覧に基づき算出したせん断剛性及び鉛直剛性の設計値を基本ケースとして設定し、評価を実施した。
- ゴム支承の剛性の不確かさとして、設置許可段階で実施したせん断剛性に係る各種依存性試験に加えて、詳細設計段階で新たに実施した鉛直剛性に係る各種依存性試験の結果を踏まえた剛性値を設定し、影響確認を実施した。
詳細設計段階で実施した鉛直剛性に係る各種依存性試験について3.2節及び参考1-1に示す。

表3-2 解析に入力するゴム支承の剛性値(せん断剛性/鉛直剛性の組合せ)

	剛性値(kN/mm)		
	基本ケース	不確かさケース	
		剛性変化(+側)	剛性変化(-側)
せん断剛性	3.33	5.00	2.33
鉛直剛性	972	1700	42.7
備考	道路橋支承便覧に基づく設計値を設定	各種依存性試験より得られた各項目のばらつきを+側と-側でそれぞれ重畳させ、試験結果を包含するばらつき範囲を考慮した剛性値を設定	

ゴム支承の剛性値は道路橋支承便覧に基づく設計値を基本とし、剛性の不確かさとして、各種依存性試験を踏まえて設定した剛性値による影響確認を実施した。

(5) 評価結果

- 竜巻防護ネットの支持部材の支持機能について、竜巻による飛来物の衝突解析を実施し、設計竜巻による荷重に対して、竜巻防護ネットの支持部材は十分な構造強度を有し、外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼさないことを確認した。結果の詳細について参考1-2に示す。
- 不確かさケースとして、ゴム支承の剛性のばらつき及び飛来物の長辺衝突による影響についても確認し、竜巻防護ネットの支持部材が十分な構造強度を有することを確認した。結果の詳細について参考1-3及び1-4に示す。

3.2 ゴム支承の鉛直剛性に係る各種依存性試験(1/5)

(1) 試験目的

- ゴム支承の使用環境及び竜巻影響評価の特徴(飛来物衝突等)を考慮し、ゴム支承の鉛直剛性の各種依存性を確認すること。

(2) 試験項目及び試験装置

- 試験項目について、JIS K 6411及びせん断剛性の各種依存性試験を踏まえて下表のとおり設定した。
- a. 圧縮／引張剛性確認試験からe. 熱老化特性試験については、せん断剛性の各種依存性試験と同様の二軸試験装置にて試験を実施した。f. 速度依存性試験については、落錘式衝撃試験装置を用いて試験を実施した。

表3-3 鉛直剛性に係る各種依存性試験項目

項目	試験内容	試験条件
a. 圧縮／引張剛性確認	圧縮／引張剛性の実剛性及び初期ばらつきを求める。	試験体数:10体 圧縮応力度:0.5~8.0N/mm ² 引張応力度:0.5~-2.0N/mm ²
b. せん断ひずみ依存性	複数のせん断ひずみを与えたときの圧縮／引張剛性の依存性を求める。	試験体数:1体 せん断ひずみ:±0, 50%, 75%, 100%の4水準
c. 繰返し数依存性	繰返し荷重に対する圧縮／引張剛性の依存性を求める。	試験体数:1体 繰返し数:50回
d. 温度依存性	使用環境の温度変化に対する圧縮／引張剛性の依存性を求める。	試験体数:1体 温度:-20, -10, 0, 10, 23, 40°Cの6水準
e. 熱老化特性	熱老化試験により熱老化前後の圧縮／引張剛性の経年変化を求める。	試験体数:1体 熱老化:23°C×60年相当
f. 速度依存性	ゴム支承が高速で変形したときの圧縮／引張剛性を確認する。	試験体数:1体 ゴム変形速度:1.0, 1.5, 2.0m/sの3水準となるよう付加する荷重(錘の質量及び落下高さ)を設定

3. 2 ゴム支承の鉛直剛性に係る各種依存性試験(2/5)

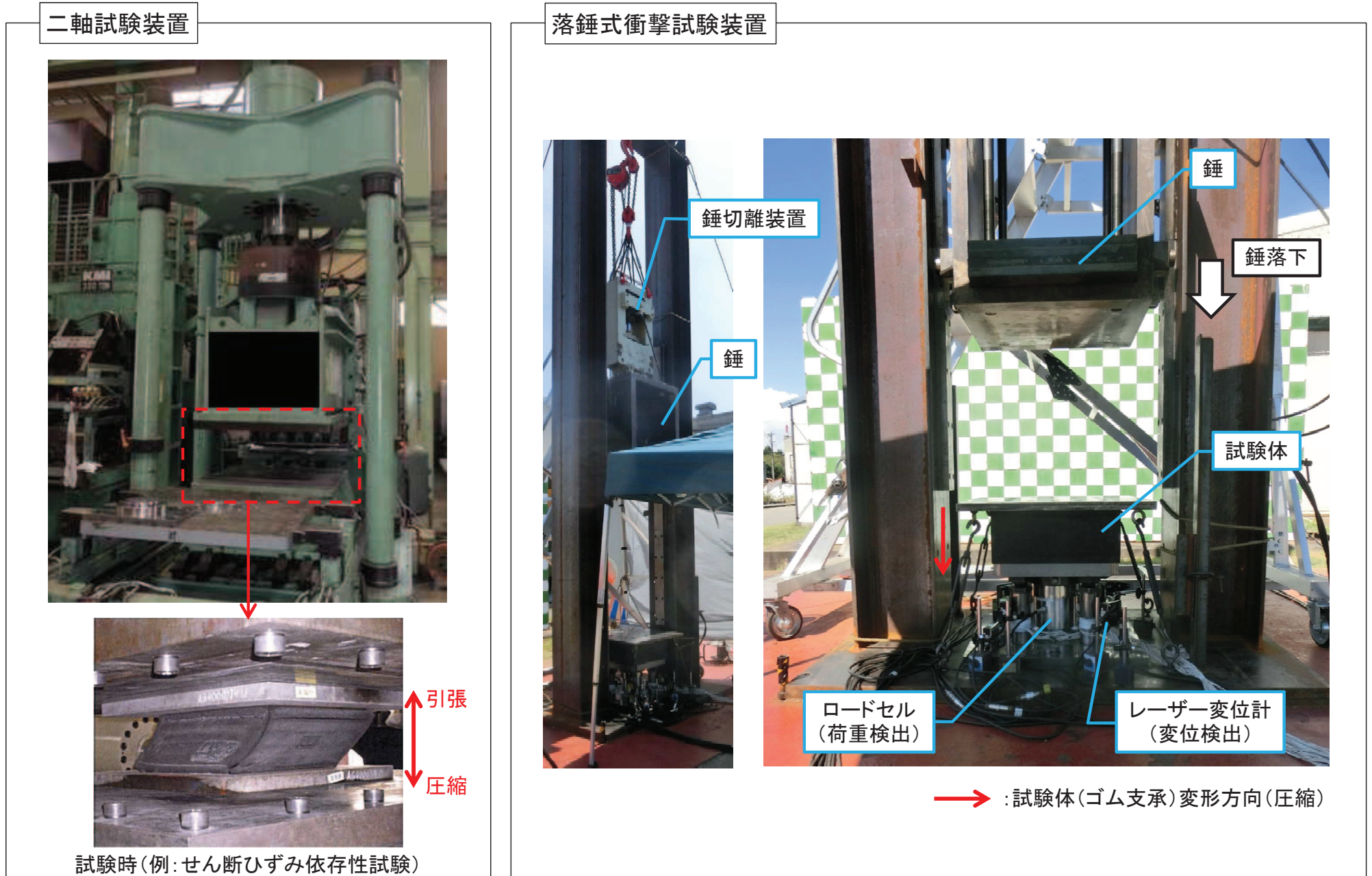


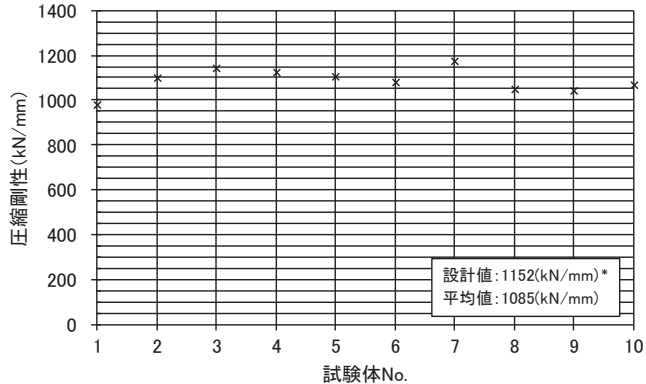
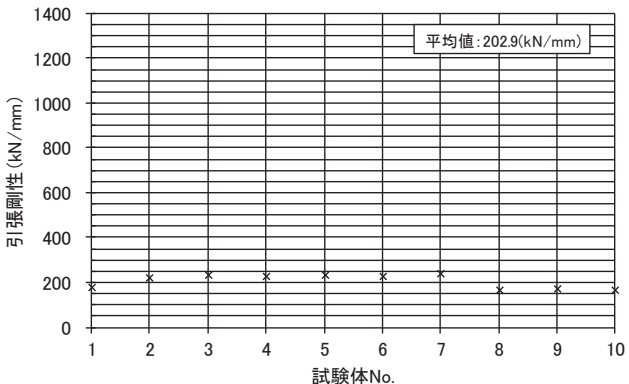
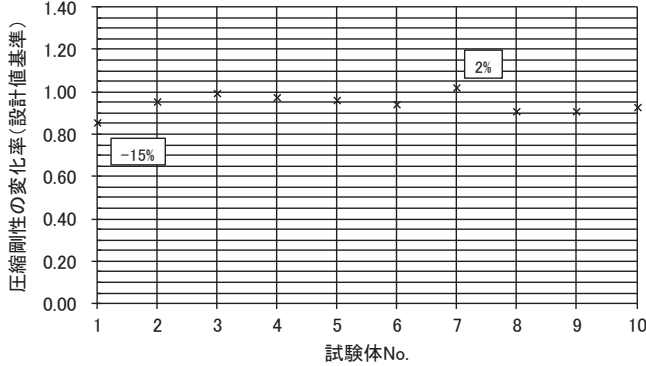
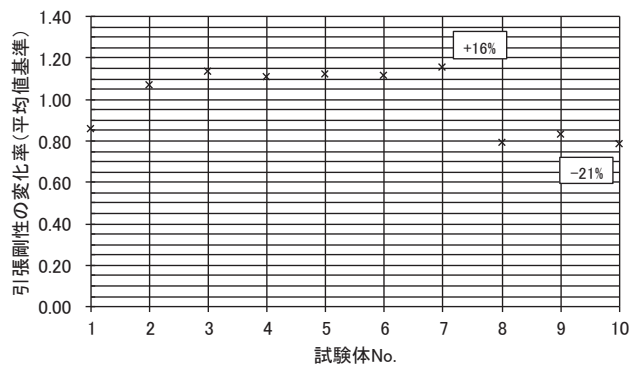
図3-2 試験装置外観

3.2 ゴム支承の鉛直剛性に係る各種依存性試験(3/5)

(3) 試験結果

- 各試験結果を表3-4示す。特に引張剛性に関して、以下の結果が得られた。
 - ✓ a. 圧縮／引張剛性確認試験において、引張剛性は圧縮剛性の20%程度であることを確認した。
 - ✓ f. 速度依存性試験において、ゴム支承の変形速度の増加に伴い、引張剛性が大きく上昇することを確認した。

表3-4 鉛直剛性に係る各種依存性試験結果(1/3)

項目	圧縮剛性	引張剛性
a. 圧縮／引張剛性確認試験		
	 <p> ✓ 圧縮剛性は、道路橋支承便覧から求める設計値とほぼ同等であることを確認した。 ✓ 圧縮剛性のばらつきはプラス側で最大+2%程度、マイナス側で最大-15%程度であり、道路橋支承便覧に規定されている製品初期ばらつき±30%以内であることを確認した。 </p>	 <p> ✓ 引張剛性は、圧縮剛性の20%程度であることを確認した。 ✓ 上記を踏まえ、引張剛性のばらつきは、本試験結果の平均値に対してプラス側で最大16%程度、マイナス側で最大-21%程度であり、道路橋支承便覧に規定されている製品初期ばらつき±30%以内であることを確認した。 </p>

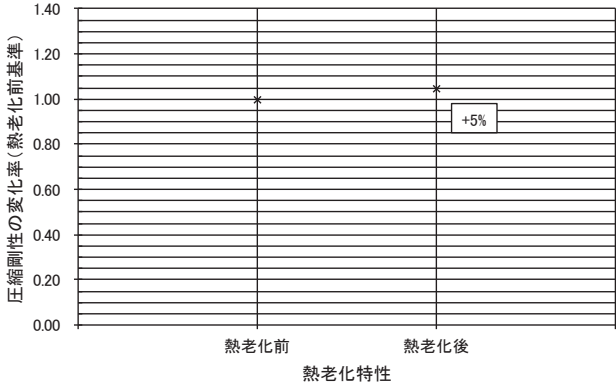
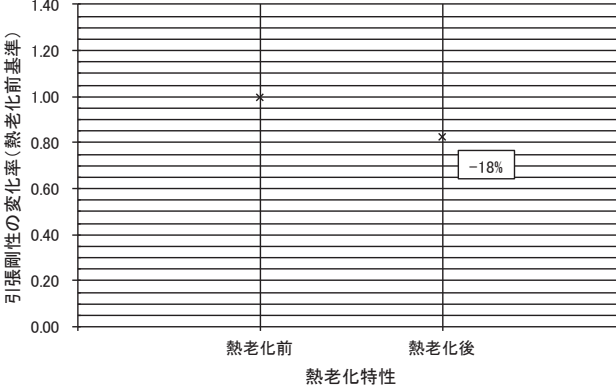
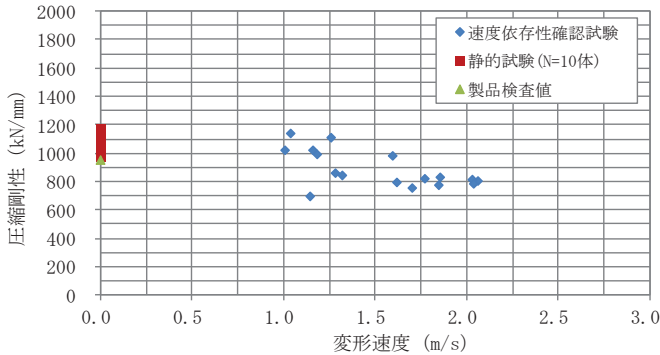
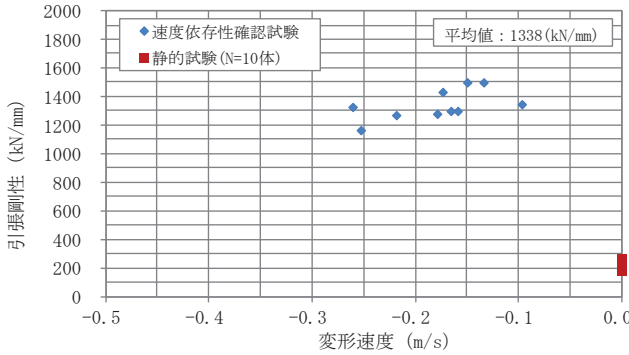
3.2 ゴム支承の鉛直剛性に係る各種依存性試験(4/5)

表3-4 鉛直剛性に係る各種依存性試験結果(2/3)

項目	圧縮剛性	引張剛性
<p>b. せん断ひずみ依存性確認試験</p>	<p>試験体にせん断ひずみを与え保持した状態における圧縮剛性の変化率は、最大で-11%程度の変化率となったことを確認した。</p>	<p>試験体にせん断ひずみを与え保持した状態における引張剛性の変化率について、ひずみの増減によらずほぼ一定の傾向を示すことを確認した。</p>
<p>c. 繰返し数依存性試験</p>	<p>試験体に繰返し水平加振50回を与えたときの圧縮剛性の変化率は、-7%程度となったことを確認した。</p>	<p>試験体に繰返し水平加振50回を与えたときの引張剛性の変化率は、-13%程度となったことを確認した。</p>
<p>d. 温度依存性確認試験</p>	<p>試験体に複数の温度条件を与えたときの圧縮剛性の変化率は、-15℃では+27%程度、40℃では-8%程度となったことを確認した。</p>	<p>試験体に複数の温度条件を与えたときの引張剛性の変化率は、-15℃では+14%程度、40℃では-4%程度となったことを確認した。</p>

3.2 ゴム支承の鉛直剛性に係る各種依存性試験(5/5)

表3-4 鉛直剛性に係る各種依存性試験結果(3/3)

項目	圧縮剛性	引張剛性
<p>e. 熱老化特性試験</p>	 <p>試験体の熱老化前後の圧縮剛性の変化率は、+5%程度となったことを確認した。</p>	 <p>試験体の熱老化前後の引張剛性の変化率は、-18%程度となったことを確認した。</p>
<p>f. 速度依存性確認試験</p>	 <p>圧縮剛性は、a. 圧縮／引張剛性確認試験(静的試験)の結果に対して有意な速度依存性はないことを確認した。</p>	 <p>引張剛性は、変形速度の増加に伴い剛性が高くなり、本試験結果の平均値は、a. 圧縮／引張剛性確認試験(静的試験)における平均値に対して約6.6倍となることを確認した。</p>

- 以上の試験結果を踏まえ、ゴム支承の剛性の不確かさに関する影響確認においては、試験結果を包含するようa. からf. の各試験結果より得られた依存性(ばらつき)を積算し、最大のばらつき範囲を考慮した剛性値を解析に入力している。
- なお、鉛直剛性に係る各種依存性試験の詳細及び補足について、参考1-1に示す。

4. 耐震評価について(1/2)

(1) 竜巻防護ネットの耐震設計方針

- 竜巻防護ネットは、落下により上位クラス施設である原子炉補機冷却海水ポンプ等が損傷することを防止するため、基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有する設計とする。

(2) 評価方法

- 竜巻防護ネットの耐震評価については、基準地震動 S_s 7波の地震応答の基本ケースに加え、地盤の不確かさを考慮し、これらを包絡した設計用床応答曲線を用いて、3次元はりモデルを用いたスペクトルモーダル解析により実施した。

【評価対象部位】 フレーム、大梁、ゴム支承及び可動支承

【荷重及び荷重の組合せ】 死荷重、積雪荷重、基準地震動 S_s による地震荷重を組み合わせる。

【許容限界】 各部材に対して以下のとおり設定。

フレーム及び大梁: JEAG4601に基づく許容応力状態 IV_A の許容応力。また、地震に伴う変位によって、部材同士の衝突や部材と海水ポンプ室躯体との衝突が発生しないことを確認するためのクリアランス評価を実施。

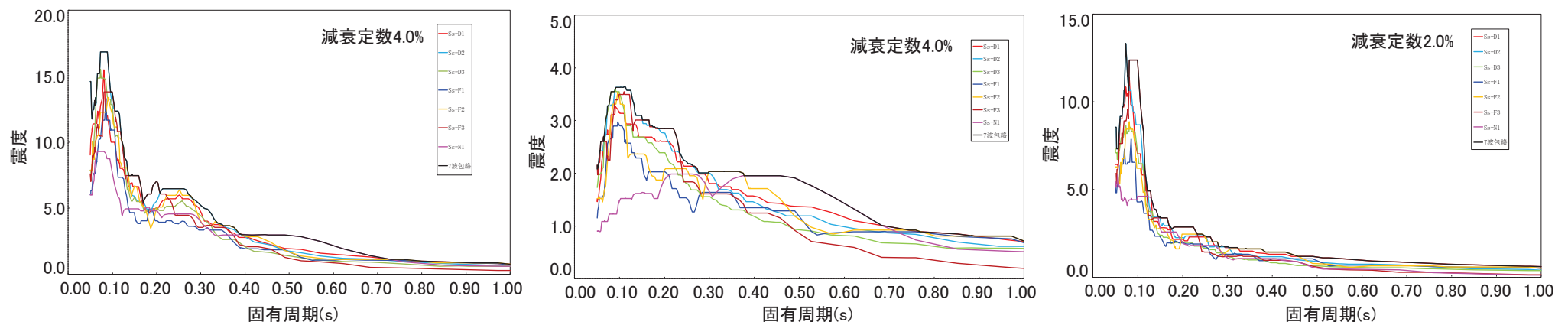
ゴム支承: JEAG4601に基づく許容応力状態 IV_A の許容応力及び道路橋示方書・同解説に基づく道路橋支承便覧の評価基準値

可動支承: 各部材の許容限界より求めた可動支承全体の許容荷重

- なお、設置許可段階における説明内容に加え、異なる解析手法による解析結果の比較を行うなどにより、竜巻防護ネットの耐震評価手法の妥当性を確認した。詳細は参考2-1に示す。

(3) 設計用床応答曲線

- 減衰定数について、水平方向はゴム支承の変形モードが支配的であることを踏まえて4.0%と設定した。また、鉛直方向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%を用いた。



(a) 水平方向(横断面) 減衰定数4.0%

(b) 水平方向(縦断面) 減衰定数4.0%

(c) 鉛直方向 減衰定数2.0%

図4-1 設計用床応答曲線図

4. 耐震評価について(2/2)

(4) 解析モデル

- 解析コードは「DYNA2E」を使用し、竜巻防護ネットの大梁及びフレームをはり要素で、ゴム支承及び可動支承をばね要素でそれぞれモデル化した。

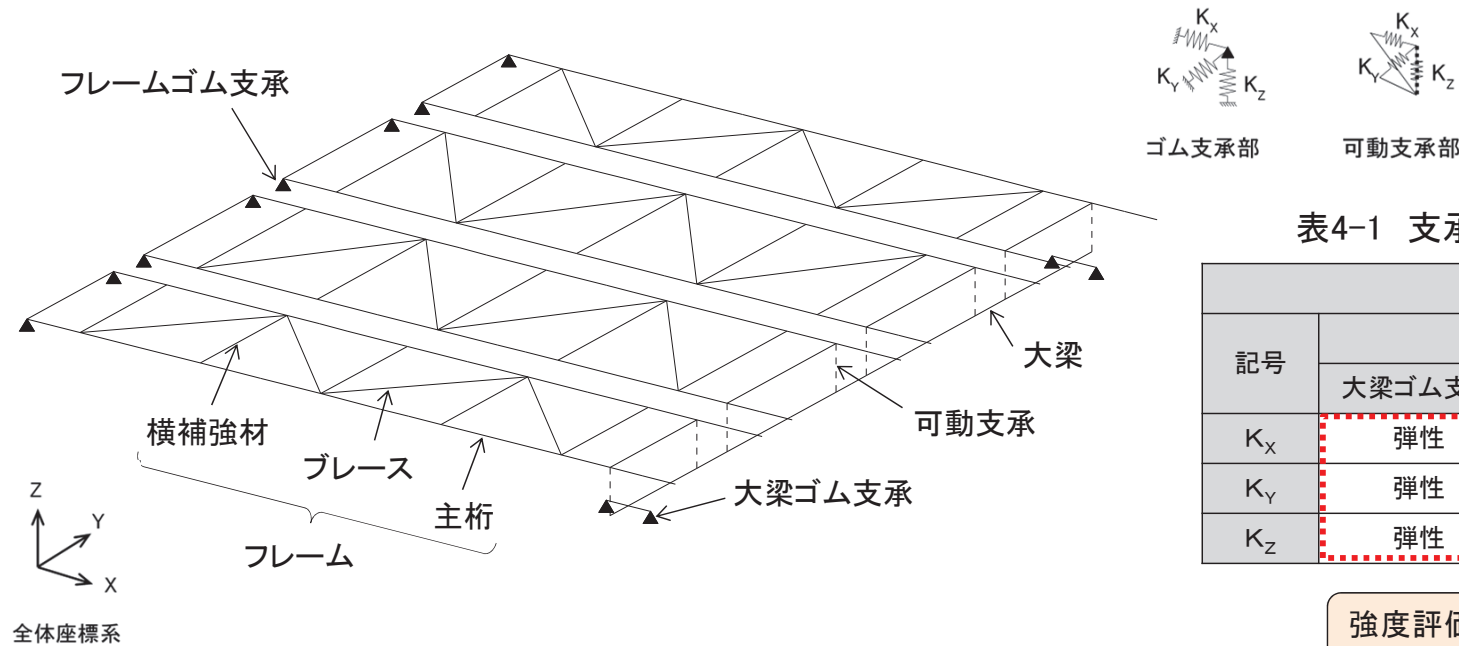


図4-2 耐震評価における解析モデル図

表4-1 支承部のばね支持条件

ばね支持条件			
記号	ゴム支承		可動支承
	大梁ゴム支承	フレームゴム支承	
K_x	弾性	弾性	自由
K_y	弾性	弾性	剛
K_z	弾性	弾性	剛

強度評価と同様の設定とし、ゴム支承の剛性のばらつきによる影響についても確認した。

(5) 評価結果

- 基準地震動Ss7波の地震応答の基本ケースに加え、地盤の不確かさを考慮し、これらを包絡した設計用床応答曲線を用いた地震応答解析を実施した結果、竜巻防護ネットは十分な構造強度を有し、耐震Sクラス施設に対して波及的影響を及ぼさないことを確認した。結果の詳細について参考2-2に示す。
- 不確かさケースとして、ゴム支承の剛性のばらつきによる影響についても確認し、竜巻防護ネットが十分な構造強度を有することを確認した。結果の詳細について参考2-3に示す。

5. 設置許可段階からの設計進捗の反映事項

➤ 強度評価及び耐震評価に当たり、詳細設計段階における以下の設計進捗を反映して評価した。

表5-1 設置許可段階からの設計進捗反映事項の概要

分類	項目	設置許可段階	詳細設計段階	検討の経緯・補足	備考
構造関係	(1) フレームゴム支承の仕様変更	(主な仕様) ゴム本体有効平面寸法: 550mm×550mm せん断弾性係数(呼び): 1.2 N/mm ² (G12)	(主な仕様) ゴム本体有効平面寸法: 800mm×800mm せん断弾性係数(呼び): 1.0 N/mm ² (G10)	ゴム支承の引張に対する 構造強度を向上させるため、フレームゴム支承の寸法等の仕様を変更し、大梁ゴム支承と同様のものとした。	詳細は参考3参照
	(2) 可動支承の仕様変更	(主な仕様) 外形寸法:長さ:1230mm 幅:339mm 高さ:229mm 鋼材材質:SS400, SM490 レール取付ボルト設置位置:水平	(主な仕様) 外形寸法:長さ:1520mm 幅:890mm 高さ:340mm 鋼材材質:SM400, SM490, SM570 レール取付ボルト設置位置:鉛直	設置許可段階よりも 構造強度を向上させるため、寸法等の仕様を変更した。 なお、可動支承の機能(水平1方向へ滑りを生じ変位を吸収する機能)に変更はない。	
	(3) フレーム基数の変更	フレームを 5基 設置する構造とする。	フレームを 4基 設置する構造とする。	海水ポンプ室補強に伴い、東西開口幅が狭くなったことから、フレーム基数及び幅を見直した。	
	(4) 大梁の支持方法の変更	既設南側隔壁は壁厚が薄くフレームを支持できないため、 東西側壁にブラケットを設置し大梁を支持する。	補強する 南側隔壁上にて大梁を支持する。	海水ポンプ室補強を踏まえ、ブラケットを設置し大梁を支持するとしていた構造から、補強する南側隔壁にて大梁を支持する構造とした。	
強度評価関係	(5) 機能維持に関する方針の変更	<ul style="list-style-type: none"> ✓ フレームゴム支承について、2つのうち1つ以上のゴム支承の機能が維持されることを許容限界とする。 ✓ また、ゴム支承の機能が損なわれる可能性を考慮して、ストッパーについても竜巻影響評価上、機能維持が必要な設備とする。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ いずれの支承部についても構造強度上の性能目標を満足することを許容限界とする。 ✓ また、これに伴い、ストッパーに評価上期待しない方針(ストッパーは機能維持のための必要部材ではない)とする。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 支承部の仕様変更及び各種依存性試験を踏まえた解析におけるゴム支承の剛性の設定方針を踏まえ、ゴム支承の機能維持方針について見直した。 ✓ ストッパーは機能維持のための必要部材ではないが、ポンプ点検等による竜巻防護ネットフレームの取り付け及び取り外しを考慮し、道路橋示方書の落橋防止構造の考え方を参考に評価することとした。 	

6. まとめ

強度評価

- ゴム支承の鉛直剛性に係る各種依存性試験を実施した。試験結果を踏まえ、設置許可段階で実施したせん断剛性の各種依存性試験も考慮し、解析に入力するゴム支承の剛性を設定した。
- 強度評価について、衝突解析を実施し、十分な構造強度を有することを確認した。
- 不確かさ(ゴム支承の剛性のばらつき及び飛来物の長辺衝突)に対する影響についても、十分な構造強度を有することを確認した。

耐震評価

- 耐震評価について、3次元はりモデルを用いたスペクトルモーダル解析を実施し、十分な構造強度を有することを確認した。
- 不確かさ(ゴム支承の剛性のばらつき)に対する影響についても、十分な構造強度を有することを確認した。

参考資料

参考1 強度評価に関する補足

- 参考1-1 ゴム支承の鉛直剛性に係る各種依存性試験について
- 参考1-2 強度評価結果(基本ケース)
- 参考1-3 強度評価結果(ゴム支承の剛性の不確かさケース)
- 参考1-4 強度評価結果(飛来物衝突姿勢の不確かさケース)

参考2 耐震評価に関する補足

- 参考2-1 耐震評価手法の妥当性確認
- 参考2-2 耐震評価結果(基本ケース)
- 参考2-3 耐震評価結果(ゴム支承の剛性の不確かさケース)

参考3 設置許可段階からの設計進捗に関する補足

試験項目の検討について(1/2)

▶ ゴム支承の鉛直剛性に係る各種依存性試験は、JIS K 6411及びせん断剛性の各種依存性試験を参考に、鉛直剛性に係る試験への適用を検討した。

参考表1-1 ゴム支承の鉛直剛性に係る試験項目の検討(1/2)

JIS K 6411			せん断剛性に係る各種依存性試験		鉛直剛性に係る各種依存性試験	
特性	試験項目	原理	試験内容	備考	試験内容	備考
圧縮及びせん断特性	圧縮特性	試験体に一定の圧縮力を載荷した状態での圧縮力-鉛直変位特性から圧縮剛性を求める。	-	せん断剛性に関する試験でないため対象外	試験体に一定の圧縮力又は引張力を載荷した状態で荷重-変位曲線から圧縮又は引張剛性を算出する。また、基準値に対する測定値の変化率(初期ばらつき)を求める。	-
	せん断特性	試験体に一定の圧縮力を載荷した状態でせん断変形を与え、せん断特性を求める。	-	道路橋支承便覧の基準値を適用するため省略	-	鉛直剛性に関する試験でないため対象外
せん断特性の各種依存性	せん断ひずみ依存性	試験体に一定圧縮力を載荷した状態で複数水準のせん断変位を与え、せん断特性のせん断ひずみ依存性を求める。	圧縮応力1N/mm ² 相当の圧縮力を載荷した状態で複数水準のせん断ひずみにおける正負繰返し加振を行い、せん断剛性を算出する。せん断ひずみ175%の測定値を基準として各測定値との変化率を求める。	-	試験体に複数水準のせん断ひずみを与え保持した状態で、圧縮力又は引張力を載荷し、鉛直荷重-変位曲線から圧縮剛性又は引張剛性を算出する。せん断ひずみ0%の測定値を基準とし、各測定値との変化率を求める。	-
	圧縮応力度依存性	試験体に複数水準の圧縮力を載荷した状態でせん断変位を与え、せん断特性の圧縮応力度依存性を求める。	複数水準の圧縮力を載荷した状態でせん断ひずみ175%による正負繰返し加振を行い、せん断剛性を算出する。圧縮応力1N/mm ² 相当の圧縮力時の測定値を基準として、各測定値との変化率を求める。	-		-
	振動数依存性	試験体に一定圧縮力を載荷した状態で複数水準の水平振動数のせん断変形を与え、せん断特性の振動数依存性を求める。	圧縮応力1N/mm ² 相当の圧縮力を載荷した状態で各振動数にてせん断ひずみ175%による正負繰返し加振を行い、せん断剛性を算出する。振動数0.5Hzの測定値を基準として各測定値との変化率を求める。	-	試験体に複数水準の速度を有した錘によって圧縮力又は引張力を載荷し、荷重-変位曲線から圧縮又は引張剛性を算出する。静的な圧縮又は引張剛性を基準として、各速度における圧縮又は引張剛性の変化率を求める。	(以下「速度依存性試験」という。)
	繰返し数依存性	試験体に一定圧縮力を載荷した状態で繰返しせん断変位を連続して与え、せん断特性の繰返し数に対する依存性を求める。	圧縮応力1N/mm ² 相当の圧縮力を載荷した状態でせん断ひずみ175%による正負繰返し加振を行い、せん断剛性を算出する。その後、せん断ひずみ175%による正負繰返し加振を50回を行い、せん断剛性を算出する。50回加振前の測定値を基準として50回加振後の測定値との変化率を求める。	-	せん断ひずみ175%による正負繰返し加振を行う前及び行った後の試験体に圧縮力又は引張力を載荷し、荷重-変位曲線から圧縮又は引張剛性を算出する。50回加振前の測定値を基準として50回加振後の測定値との変化率を求める。	-

試験項目の検討について(2/2)

参考表1-1 ゴム支承の鉛直剛性に係る試験項目の検討(2/2)

JIS K 6411			せん断剛性に係る各種依存性試験		鉛直剛性に係る各種依存性試験	
特性	試験項目	原理	試験内容	備考	試験内容	備考
せん断特性の各種依存性	温度依存性	試験体を複数水準の温度に保持して、一定圧縮力を載荷した状態でせん断変位を与え、せん断特性の環境温度の変化に対する依存性を求める。	各温度で加熱された試験体に圧縮応力1N/mm ² 相当の圧縮力を載荷した状態でせん断ひずみ175%による正負繰返し加振を行い、せん断剛性を算出する。23℃の測定値を基準として各温度におけるせん断剛性との変化率を求める。	—	各温度で加熱された試験体に圧縮力又は引張力を載荷し、荷重-変位曲線から圧縮又は引張剛性を算出する。23℃の測定値を基準として各温度における圧縮又は引張剛性との変化率を求める。	—
	せん断変形性能	試験体に一定の圧縮力を載荷した状態でせん断変形を与え、積層ゴムが破断又はせん断力-せん断変位曲線において、せん断力が急激に低下するなどの安定性が失われる限界を求める。	—	依存性を求める試験でないため対象外	—	鉛直剛性に関する試験でないため対象外
引張特性	試験体にせん断変位0又は一定のせん断変形を与えた状態で引張力を加え、その引張力-引張変位曲線において降伏又は破断が生じる時点の引張力及びせん断変位を求める。	—	—	道路橋支承便覧の中で確認されているため省略	—	道路橋支承便覧の中で確認されているため省略
耐久性	熱老化特性	積層ゴムの各特性における経年劣化を熱老化試験から求める試験であり、熱老化後、せん断特性及び終局特性を測定し、熱老化前に対する熱老化後の変化率から、積層ゴムの熱老化特性を求める。	圧縮応力1N/mm ² 相当の圧縮力を載荷した状態でせん断ひずみ175%による正負繰返し加振を行い、せん断剛性を算出する。その後60年相当の熱老化を行い、熱老化前と同様にせん断剛性を算出する。熱老化前の測定値を基準として熱老化後の測定値との変化率を求める。	—	試験体に圧縮力又は引張力を載荷し、荷重-変位曲線から圧縮又は引張剛性を算出する。その後60年相当の熱老化を行い、熱老化前と同様に圧縮又は引張剛性を算出する。熱老化前の測定値を基準として熱老化後の測定値との変化率を求める。	—
	クリープ	積層ゴムの長期圧縮力によるクリープひずみの予測方法であり、試験体にせん断変形を与えずに、一定の圧縮力を載荷し、規定時間経過後の圧縮変位を計測し、長期間後のクリープひずみを予測する。	—	せん断剛性に関する試験でないため対象外	—	鉛直剛性に関する試験でないため対象外
	繰返し圧縮疲労	試験体に一定のせん断変位を与えた状態で圧縮力を繰返し与え、圧縮特性及びせん断特性の繰返し回数による依存性を求める。	—	—	圧縮による繰返し荷重を受ける構造でないため対象外	—
緩速変形特性	緩速変形特性	橋梁の上部構造の温度変化による伸縮によって生じるような低速のせん断変形弾性係数を求める。	—	変形速度によりせん断剛性が変化する免震支承ではないため対象外	—	鉛直剛性に関する試験でないため対象外

試験体及び試験条件に関する補足

➤ 鉛直剛性に係る各種依存性試験項目に対する試験体について以下に示す。

参考表1-2 鉛直剛性に係る各種依存性試験項目と試験体

試験	測定項目	試験体		
		適用規格	形状	せん断弾性係数
a. 圧縮／引張剛性確認 b. せん断ひずみ依存性 c. 繰返し数依存性 d. 温度依存性 f. 速度依存性	圧縮剛性 引張剛性	JIS K 6411-2012 標準試験体No.3*	有効平面寸法 400mm×400mm 総ゴム厚 54mm(9mm×6層)	1.0N/mm ²
e. 熱老化特性試験		JIS K 6411-2012 標準試験体No.2*	有効平面寸法 240mm×240mm 総ゴム厚 30mm(5mm×6層)	1.0N/mm ²

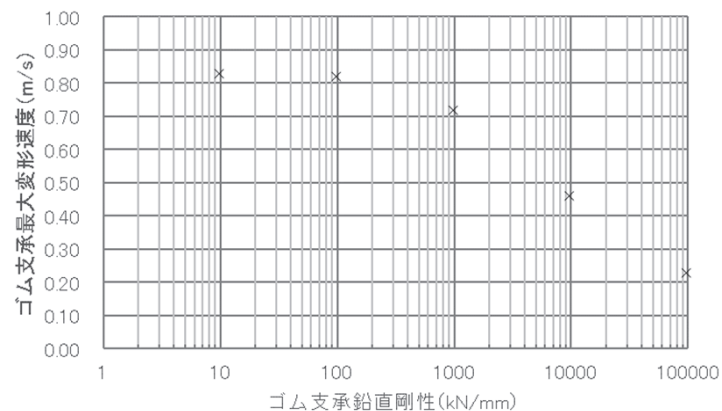
注記* : JIS K 6411で寸法等が規定されている試験体(試験項目毎にJISに規定されている標準試験体寸法のうち、大きい(実機寸法に近い)供試体を選定。)

➤ 速度依存性試験の試験条件の検討について、以下に補足する。

- ✓ ゴム支承直上のフレームに飛来物が衝突した場合の衝突解析を実施し、得られたゴム支承変形速度を基に試験条件を設定した。ここで、衝突解析によるゴム支承の変形速度は解析時の鉛直剛性の影響を受け、鉛直剛性が小さいほど変形速度が大きくなると考えられるため、剛性値をパラメータにした衝突解析を実施し、鉛直剛性に対するゴム支承変形速度の傾向を踏まえて試験条件を設定した。
- ✓ 解析結果を踏まえ、速度依存性が存在する場合、一般的には速度が速くなると剛性が大きくなることから、変形速度の最大値(0.83m/s)を包絡するよう、目標とするゴム支承の変形速度を1.0m/sとして試験を実施することとした。その際、参考としてより大きな速度である1.5m/s及び2.0m/sについても試験を実施することとした。

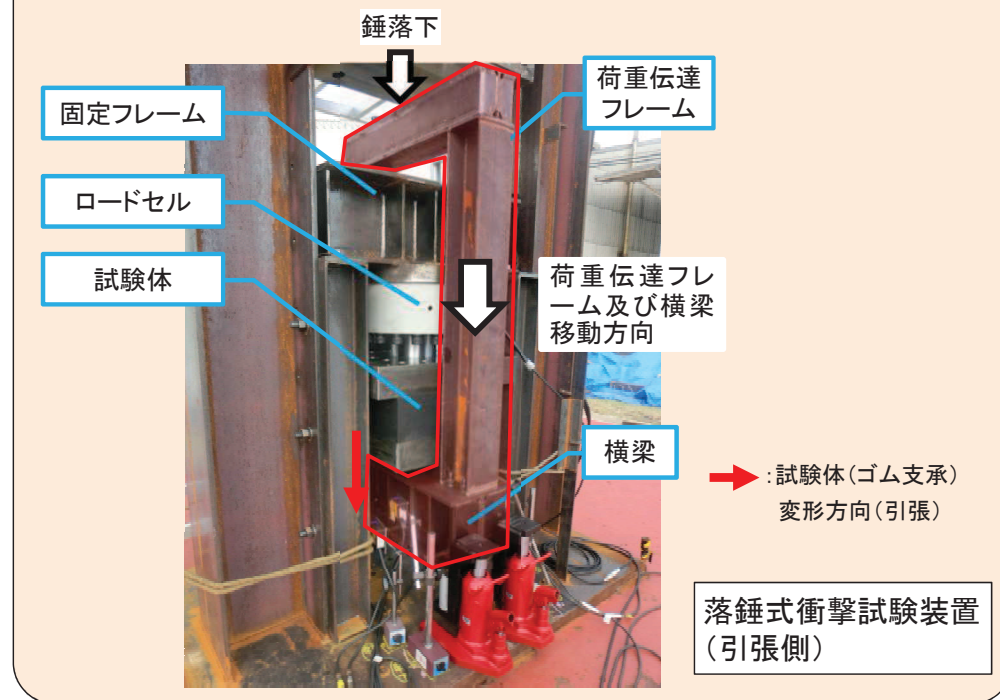
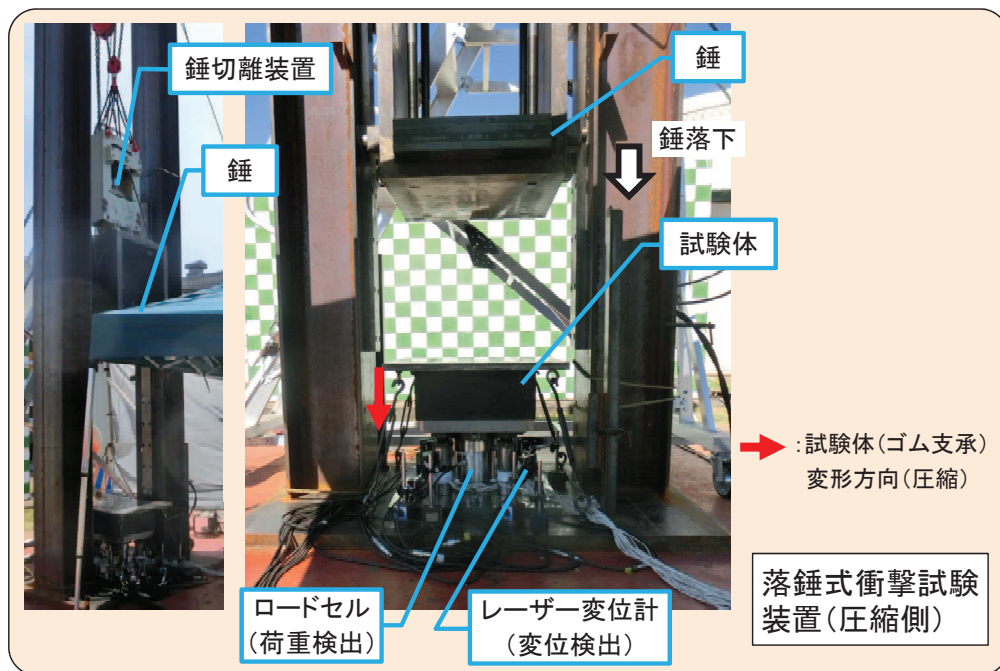
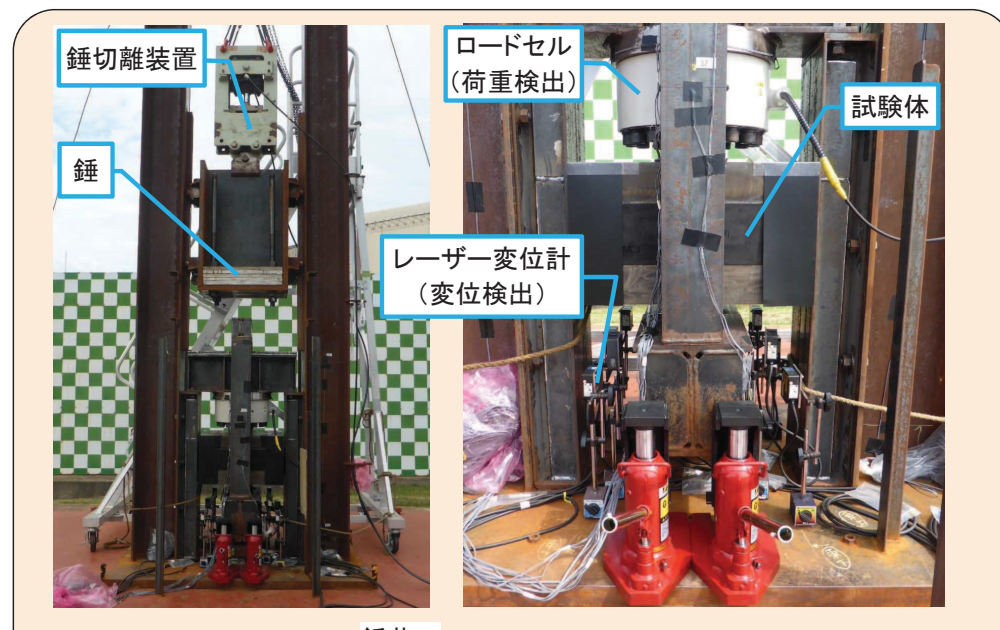
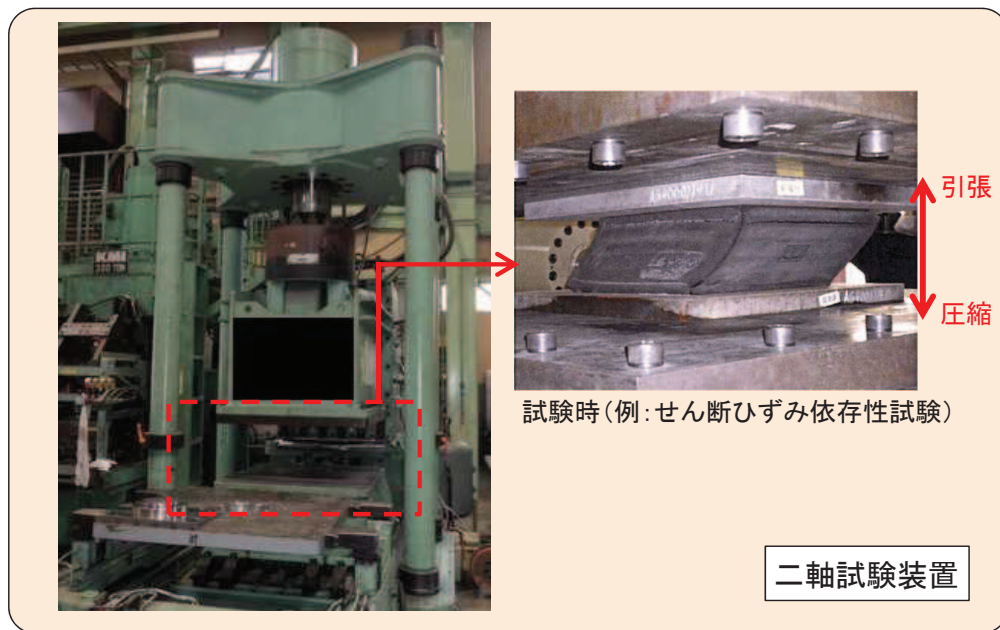
参考表1-3 ゴム支承の鉛直剛性と最大変形速度の関係

解析ケース		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
鉛直剛性(kN/mm)		9.72	97.2	972	9720	97200
ゴム支承 変形速度 (m/s)	最大(引張側)	0.44	0.41	0.48	0.42	0.23
	最小(圧縮側)	-0.83	-0.82	-0.72	-0.46	-0.20
	絶対値最大	0.83	0.82	0.72	0.46	0.23



参考図1-1 ゴム支承の鉛直剛性と最大変形速度の関係

試験装置外観



参考図1-2 試験装置外観

試験結果に対する考察(1/2)

➤ ゴム支承の鉛直剛性に係る各種依存性試験に関して、特に、静的な引張剛性確認試験において引張側で低い剛性を示したこと、また、速度依存性試験において引張剛性に速度依存性が発現したことについて考察した。

参考表1-4 鉛直剛性に係る各種依存性試験結果(1/2)

	圧縮剛性	引張剛性	考察
a. 圧縮／引張剛性確認試験	<p>設計値:1152(kN/mm)* 平均値:1085(kN/mm)</p>	<p>平均値:202.9(kN/mm)</p>	<p>✓ 一般に、ゴム支承のゴム(天然ゴム)材料単体に着目すると、天然ゴムは粘弾性材料であり速度依存性を有すること、また、圧縮側の剛性に対して引張側の剛性が小さいことが知られていることから、本試験で圧縮剛性に対して引張剛性が小さくなったことについて、ゴム支承においてもゴム材料自体の性質が表れたものと考えられる。</p>
	<p>注記*: 道路橋支承便覧より算出した、試験体の鉛直剛性の設計値</p> <p>圧縮剛性の変化率(設計値基準)</p>	<p>引張剛性の変化率(平均値基準)</p>	
	<p>✓ 圧縮剛性は、道路橋支承便覧から求める設計値とほぼ同等であることを確認した。</p> <p>✓ 圧縮剛性のばらつきはプラス側で最大+2%程度、マイナス側で最大-15%程度であり、道路橋支承便覧に規定されている製品初期ばらつき±30%以内であることを確認した。</p>	<p>✓ 引張剛性は、圧縮剛性の20%程度であることを確認した。</p> <p>✓ 上記を踏まえ、引張剛性のばらつきは、本試験結果の平均値に対してプラス側で最大16%程度、マイナス側で最大-21%程度であり、道路橋支承便覧に規定されている製品初期ばらつき±30%以内であることを確認した。</p>	

試験結果に対する考察(2/2)

参考表1-4 鉛直剛性に係る各種依存性試験結果(2/2)

	圧縮剛性	引張剛性	考察
f 速度依存性確認試験	<p>速度依存性確認試験 静的試験(N=10体) 製品検査値</p>	<p>速度依存性確認試験 静的試験(N=10体) 平均値: 1338 (kN/mm)</p>	<p>✓ 圧縮側の剛性低下傾向について、錘の落下距離が大きくなるにしたがい、錘切り離し時のわずかな回転力により錘衝突時に傾斜角が増えたことが要因と考えられる。</p> <p>✓ 速度依存性に関して、既往文献にて、ゴムの拘束による影響を定性的に評価する指標である一次形状係数S_1が小さい場合、ゴム支承が速度依存性(振動数依存性)を示すことが報告されている。また、一次形状係数S_1は鉛直剛性の算出に用いる係数であることを踏まえ、圧縮側については、S_1が既往文献の値より大きいことから($S_1=8.33$)、ゴム材料自体の特性が出にくく、今回の試験範囲において速度依存性が見られない結果となったと考えられる。一方で、引張側については、静的な引張剛性確認試験において、圧縮剛性に対して引張剛性が小さかったことにより、ゴム材料自体が持つ速度依存性を有する特性が発現したものと考えられる。</p>
	<p>✓ 圧縮剛性は、a. 圧縮／引張剛性確認試験(静的試験)の結果に対して有意な速度依存性はないことを確認した。なお、変形速度が大きくなるにしたがって剛性が低下する傾向が見られたが、一般に速度依存性は変形速度の増加に応じて剛性が高くなる特性であることを踏まえ、速度依存性がないと判断した。</p>	<p>✓ 引張剛性の速度依存性試験については、変形速度の増加に伴い剛性が高くなり速度依存性があることを確認した。なお、変形速度が圧縮側に比べて小さいが、これは、ゴムの速度依存性により変形が抑制されたことによるものと考えられる。</p>	

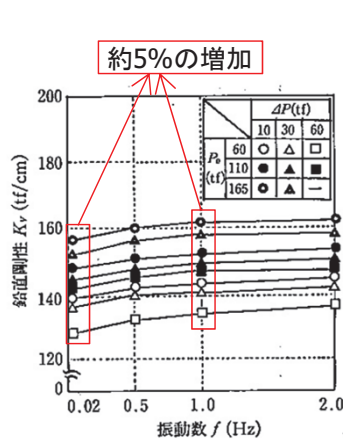


図-1 鉛直剛性変化率¹⁾
($G=5.6, 1,000(230)-48 \times 5, S_1=4, S_2=4.2$)

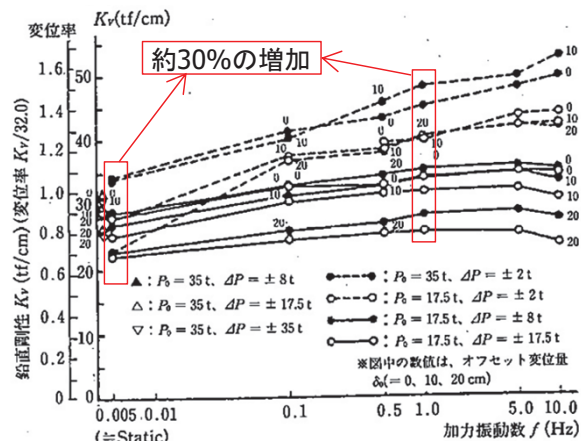


図-2 鉛直剛性変化率²⁾
($G=5.6, 520(110)-32 \times 8, S_1=3.2, S_2=2.0$)

注記*: 免震用積層ゴムハンドブック, (社)日本ゴム協会, 理工図書より抜粋。図-1の一次形状係数 $S_1=4$ の場合は、鉛直剛性が準静的に対し1.0Hzで約5%増加し、図-2の一次形状係数 $S_1=3.2$ の場合は、鉛直剛性が準静的に対し1.0Hzで約30%増加している。

試験結果を踏まえたゴム支承の剛性の設定

ゴム支承の剛性のばらつき範囲の整理

➤ 各項目のばらつきを積算することにより、ゴム支承の物性の不確かさとして考慮する剛性のばらつき範囲を設定した。

参考表1-5 せん断剛性のばらつき設定

項目	変化率	
	剛性変化(+側)	剛性変化(-側)
基準値(kN/mm)	3.33 ^{*1}	3.33 ^{*1}
初期ばらつき	+10%	-10%
繰返し数依存性	—	-10%
温度依存性	+25%	-5%
熱老化依存性	+10%	—
積算値	+45%	-25%
考慮するばらつき範囲	+50%	-30%
ばらつきとして考慮する剛性値(kN/mm)	5.00	2.33

参考表1-6 鉛直剛性のばらつき設定

項目	変化率			
	剛性変化(+側)		剛性変化(-側)	
	圧縮剛性	引張剛性	圧縮剛性	引張剛性
基準値(kN/mm)	972 ^{*1}	1130 ^{*2}	972 ^{*1}	171 ^{*3}
初期ばらつき	+30%	+30%	-30%	-30%
せん断ひずみ依存性	—	—	-15%	—
繰返し数依存性	—	—	-10%	-15%
温度依存性	+30%	+15%	-10%	-5%
熱老化特性	+5%	—	—	-20%
積算値	+65%	+45%	-65%	-70%
考慮するばらつき範囲(剛性値(kN/mm))	+70% (1660)	+50% (1700)	-70% (291)	-75% (42.7)
ばらつきとして考慮する剛性値(kN/mm)	1700 ^{*4}		42.7 ^{*5}	

解析に inputs ゴム支承の剛性設定

➤ **強度評価及び耐震評価に用いるゴム支承の剛性は下記のとおり設定した。**

参考表1-7 評価に用いるゴム支承の剛性の設定(せん断/鉛直剛性の組合せ)

	剛性値(kN/mm)		
	基本ケース	不確かさケース	
		剛性変化(+側)	剛性変化(-側)
せん断剛性	3.33	5.00	2.33
鉛直剛性	972	1700	42.7

道路橋支承便覧より求めるせん断剛性及び鉛直剛性の設計値

各種依存性試験より得られたばらつき範囲をプラス側とマイナス側でそれぞれ重畳させ、最大のばらつき範囲を考慮した値

注記

- *1: 設計条件における基本ケースの剛性値(道路橋支承便覧に基づき算出する設計値)
- *2: 速度依存性試験結果を基準値として考慮する
- *3: 静的な引張剛性試験結果を基準値として考慮する
- *4: 圧縮剛性及び引張剛性について、それぞれの基準値にばらつきを考慮した場合の剛性が大きい方を考慮する
- *5: 圧縮剛性及び引張剛性について、それぞれの基準値にばらつきを考慮した場合の剛性が小さい方を考慮する

強度評価結果

- 竜巻防護ネットの支持部材の支持機能について、竜巻による飛来物の衝突解析を実施し、風圧力による荷重、飛来物衝突による衝撃荷重等の設計竜巻荷重に対して、竜巻防護ネットの支持部材は十分な構造強度を有し、支持機能が維持され、外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼさないことを確認した。

参考表1-8 竜巻防護ネットの支持部材の構造強度評価結果

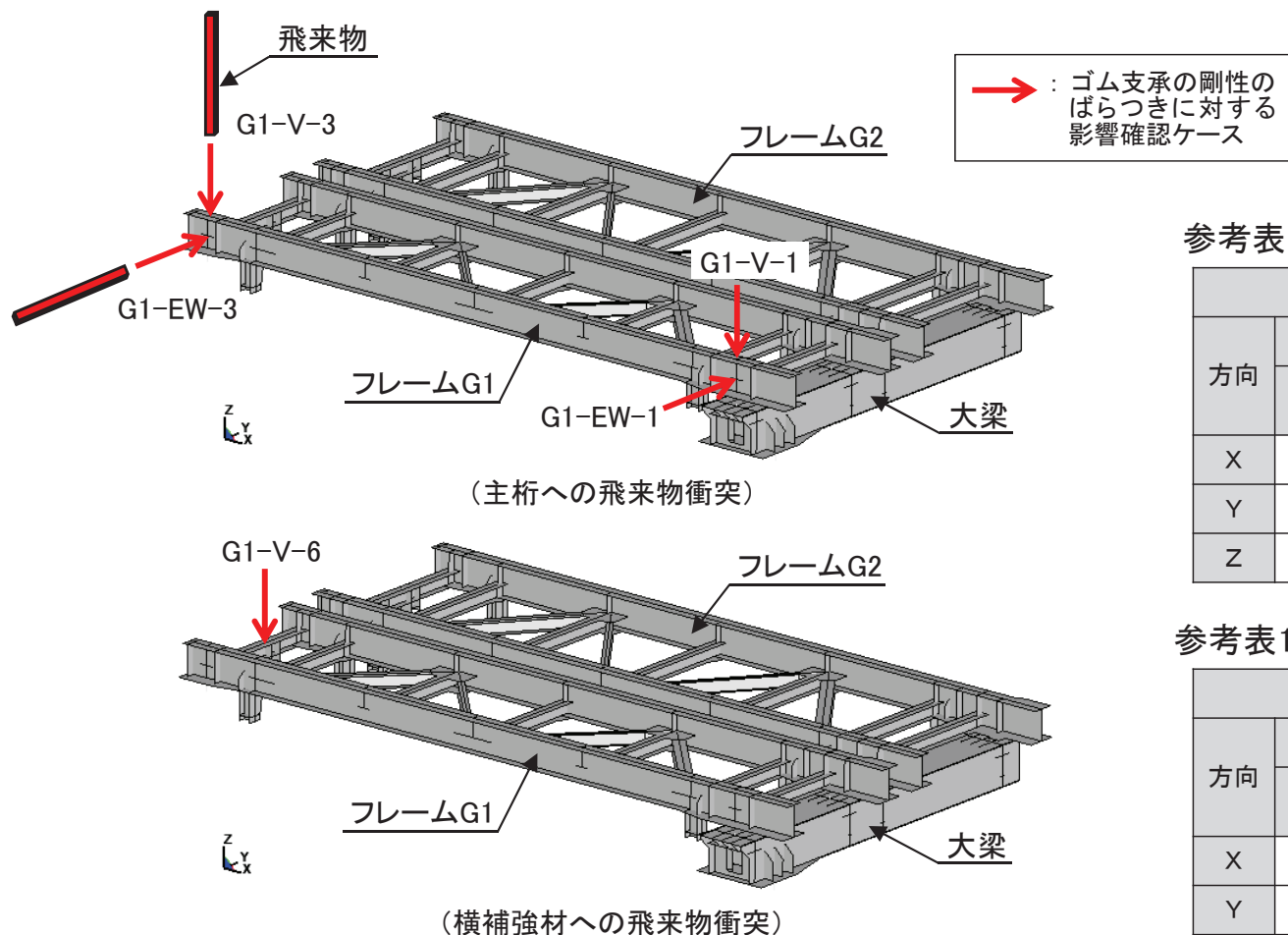
評価対象部位		評価項目	発生値(MPa)	許容限界(MPa)	
フレーム	主桁	ひずみ*1			
	横補強材	ひずみ*1			
大梁	大梁	ひずみ*1			
フレーム ゴム支承	ゴム支 承本体	ゴム本体	引張応力	1.1	2.0
			せん断ひずみ*2	70	250
		圧縮応力	2	23	
		内部鋼板	引張応力	22	280
		取付ボルト	組合せ応力	95	420
		基礎ボルト	組合せ応力	71	257
大梁 ゴム支承	ゴム支 承本体	ゴム本体	引張応力	0.2	2.0
			せん断ひずみ*2	65	250
		圧縮応力	1	23	
		内部鋼板	引張応力	11	280
		取付ボルト	組合せ応力	76	420
		基礎ボルト	組合せ応力	37	257
可動支承	構造部材	水平荷重*3	1275	2900	
		鉛直荷重(圧縮)*3	641	5600	
		鉛直荷重(引張)*3	564	1800	

注記 *1:発生値, 許容限界は無次元
 *2:発生値, 許容限界は無次元(%)
 *3:発生値, 許容限界の単位(kN)

枠囲みの内容は、商業機密の観点から公開できません。

ゴム支承の剛性のばらつきに対する影響確認結果(強度)(1/2)

- ゴム支承の剛性のばらつきに対する影響について、ゴム支承の剛性の変化が評価に与える影響が大きいのは、支承部に対してであると考えられることから、フレームゴム支承及び可動支承部近傍の飛来物衝突に関して、ゴム支承の剛性のばらつきによる影響を確認した。また、基本ケース全体の結果を踏まえて裕度が小さいケースに対しても影響確認を実施した。
- 解析モデル及び解析ケースを以下に示す。



参考表1-9 支承部の結合条件(剛性変化+側)

支承部の結合条件			
方向	ゴム支承剛性値(kN/mm)		可動支承
	大梁ゴム支承 (剛性変化+側)	フレームゴム支承 (剛性変化+側)	
X	5.00	5.00	自由
Y	5.00	5.00	剛
Z	1700	1700	剛

参考表1-10 支承部の結合条件(剛性変化-側)

支承部の結合条件			
方向	ゴム支承剛性値(kN/mm)		可動支承
	大梁ゴム支承 (剛性変化-側)	フレームゴム支承 (剛性変化-側)	
X	2.33	2.33	自由
Y	2.33	2.33	剛
Z	42.7	42.7	剛

参考図1-4 解析モデル及び解析ケース

ゴム支承の剛性のばらつきに対する影響確認結果(強度)(2/2)

➤ いずれのケースについても支持部材に発生するひずみ、応力等は許容限界を超えず、構造強度上の評価方針を満足することを確認した。

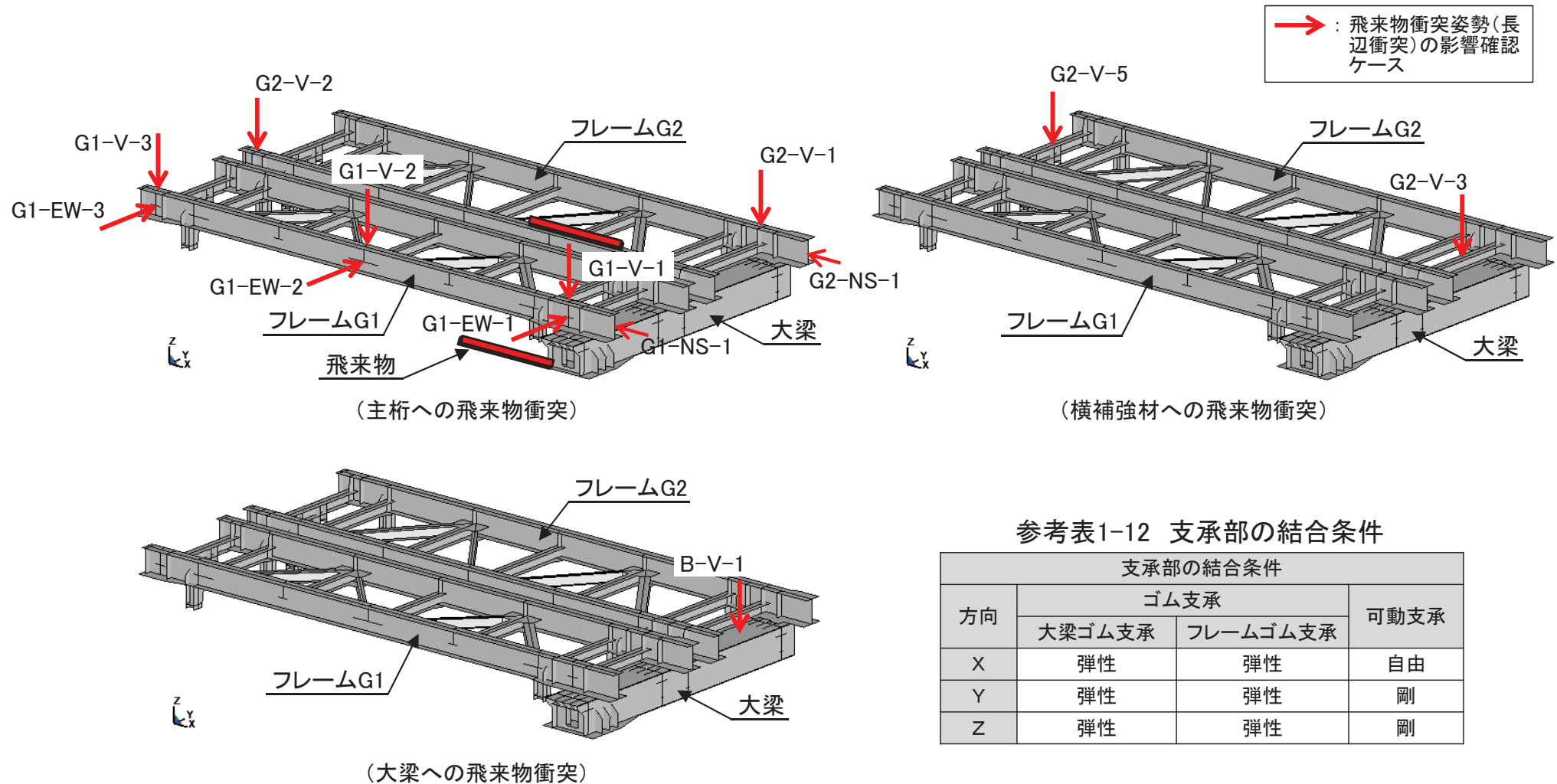
参考表1-11 ゴム支承の剛性のばらつきの評価結果

評価対象部位		評価項目	G1-EW-1		G1-EW-3		G1-V-1		G1-V-3		G1-V-6		許容限界											
			ゴム支承 剛性変化 +側	ゴム支承 剛性変化 -側	ゴム支承 剛性変化 +側	ゴム支承 剛性変化 -側	ゴム支承 剛性変化 +側	ゴム支承 剛性変化 -側	ゴム支承 剛性変化 +側	ゴム支承 剛性変化 -側	ゴム支承 剛性変化 +側	ゴム支承 剛性変化 -側												
フレーム	主桁	ひずみ																						
	横補強材	ひずみ																						
大梁	大梁	ひずみ																						
			西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側		
フレーム ゴム支承	ゴム本体	引張応力	0.2	0.1	0.1	0.1	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.6	0.4	0.2	0.2	1.4	1.2	0.2	0.2	2.0 MPa	
		せん断ひずみ	40	45	85	94	44	48	91	99	40	44	85	94	40	44	85	94	40	44	85	94	250 %	
		圧縮応力	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	23 MPa
	内部鋼板	引張応力	11	11	0	0	11	11	11	11	11	11	11	11	22	11	11	11	22	22	11	11	280 MPa	
	取付ボルト	組合せ応力	72	76	64	70	93	90	71	76	78	76	67	71	75	97	70	73	103	97	70	72	420 MPa	
	基礎ボルト	組合せ応力	47	50	44	47	57	58	48	51	49	49	44	47	60	57	45	48	87	80	45	48	257 MPa	
大梁 ゴム支承	ゴム本体	引張応力	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	2.0 MPa	
		せん断ひずみ	46	96	44	91	43	91	43	91	43	91	43	91	43	91	43	91	43	91	43	91	250 %	
		圧縮応力	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	23 MPa
	内部鋼板	引張応力	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	280 MPa
	取付ボルト	組合せ応力	66	64	60	60	79	61	58	61	68	61	68	61	68	61	68	61	68	61	61	61	420 MPa	
	基礎ボルト	組合せ応力	34	31	31	29	39	30	30	31	34	30	31	34	30	31	34	30	31	34	30	30	257 MPa	
可動支承	水平荷重		1249	752	1316	721	529	329	520	365	587	390	621	379	447	215	458	191	394	234	478	198	2900 kN	
	鉛直荷重(圧縮)		372	265	332	268	221	230	177	191	701	101	735	150	99	50	150	115	107	211	179	218	5600 kN	
	鉛直荷重(引張)		356	419	448	322	247	259	211	239	397	192	272	253	108	121	168	223	101	289	199	346	1800 kN	

枠囲みの内容は、商業機密の観点から公開できません。

飛来物衝突方向に対する影響確認結果(1/3)

- 飛来物衝突姿勢(長辺衝突)に関する影響について飛来物衝突姿勢(長辺衝突)に関する影響については、飛来物が長辺衝突しうる評価ケースに対して影響を確認した。
- 解析モデル及び解析ケースを以下に示す。



参考表1-12 支承部の結合条件

支承部の結合条件			
方向	ゴム支承		可動支承
	大梁ゴム支承	フレームゴム支承	
X	弾性	弾性	自由
Y	弾性	弾性	剛
Z	弾性	弾性	剛

参考図1-5 解析モデル及び解析ケース

飛来物衝突方向に対する影響確認結果(2/3)

参考表1-13 長辺衝突の評価結果(1/2)

評価対象部位		評価項目	G1-EW-1		G1-EW-2		G1-EW-3		G1-NS-1		G1-V-1		G1-V-2		G1-V-3		許容限界
フレーム	主桁	ひずみ															
	横補強材	ひずみ															
大梁	大梁	ひずみ															
			西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	
フレーム ゴム支承	ゴム本体	引張応力	0.4	0.3	0.5	0.5	0.4	0.6	0.2	0.2	0.3	0.2	0.4	0.3	0.5	0.4	2.0 MPa
		せん断ひずみ	60	66	62	68	64	70	64	70	60	66	60	66	60	66	250 %
		圧縮応力	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	23 MPa
	内部鋼板	引張応力	11	11	11	11	11	11	0	11	11	11	11	11	11	11	280 MPa
	取付ボルト	組合せ応力	84	88	97	100	93	109	73	78	78	75	87	82	95	91	420 MPa
	基礎ボルト	組合せ応力	51	53	56	59	56	62	48	51	48	49	52	52	54	54	257 MPa
大梁 ゴム支承	ゴム本体	引張応力	0		0.1		0		0		0.1		0.1		0.1		2.0 MPa
		せん断ひずみ	68		66		65		64		64		64		64		250 %
		圧縮応力	1		1		1		1		1		1		1		23 MPa
	内部鋼板	引張応力	11		11		11		11		11		11		11		280 MPa
	取付ボルト	組合せ応力	67		68		61		59		67		70		66		420 MPa
	基礎ボルト	組合せ応力	35		35		31		29		34		35		34		257 MPa
可動支承	水平荷重		2792	1689	818	538	770	496	647	364	816	451	580	373	605	340	2900 kN
	鉛直荷重(圧縮)		843	590	577	522	568	543	439	207	3156	451	365	187	345	208	5600 kN
	鉛直荷重(引張)		718	715	573	647	492	578	351	274	1629	438	440	282	377	278	1800 kN

注記*: 全断面の破断に至らないことを確認している。

枠囲みの内容は、商業機密の観点から公開できません。

飛来物衝突方向に対する影響確認結果(3/3)

参考表1-13 長辺衝突の評価結果(2/2)

評価対象部位		評価項目	G2-NS-1		G2-V-1		G2-V-2		G2-V-3		G2-V-5		B-V-1		許容限界
フレーム	主桁	ひずみ													
	横補強材	ひずみ													
大梁	大梁	ひずみ													
			西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	
フレーム ゴム支承	ゴム本体	引張応力	0.3	0.2	0.3	0.2	0.5	0.5	0.4	0.4	0.9	0.8	0.3	0.3	2.0 MPa
		せん断ひずみ	49	58	46	54	45	53	45	53	45	53	45	53	250 %
		圧縮応力	0	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
	内部鋼板	引張応力	0	11	11	11	22	11	11	11	11	11	11	11	280 MPa
	取付ボルト	組合せ応力	67	70	65	66	58	63	75	80	70	72	64	72	420 MPa
	基礎ボルト	組合せ応力	41	45	40	42	47	51	43	47	59	60	39	44	257 MPa
大梁 ゴム支承	ゴム本体	引張応力	0		0		0		0		0		0		2.0 MPa
		せん断ひずみ	65		64		64		64		64		64		250 %
		圧縮応力	1		1		1		1		1		1		23 MPa
	内部鋼板	引張応力	11		11		11		11		11		11		280 MPa
	取付ボルト	組合せ応力	59		63		60		60		58		64		420 MPa
	基礎ボルト	組合せ応力	30		32		31		31		28		33		257 MPa
可動支承	水平荷重	544	560	749	642	510	383	1545	1509	570	388	1057	828	2900 kN	
	鉛直荷重(圧縮)	235	392	543	4244	220	245	503	440	212	156	594	585	5600 kN	
	鉛直荷重(引張)	307	358	814	1678	349	320	689	467	295	279	734	844	1800 kN	

注記*: 全断面の破断に至らないことを確認している。

枠囲みの内容は、商業機密の観点から公開できません。

設置許可段階における説明の概要

- ゴム支承及び可動支承を用いた構造物の地震応答解析手法にスペクトルモーダル解析を選定した理由及び適切性について、支承部のモデル化の考え方や減衰定数の設定の考え方と合わせて説明した。
- 地震荷重の組合せ法について、ゴム支承及び可動支承を用いた構造物に対してSRSS法を適用することの妥当性について説明した。

■ 竜巻防護ネットの耐震設計においては、設計用床応答スペクトルの±10%拡幅によって地震応答の不確かさを容易に設計に反映することができることに加え、複数の地震応答を包絡して設計ができるため、保守的かつ簡便に設計が実施可能であることなどの理由からスペクトルモーダル解析法を採用している。

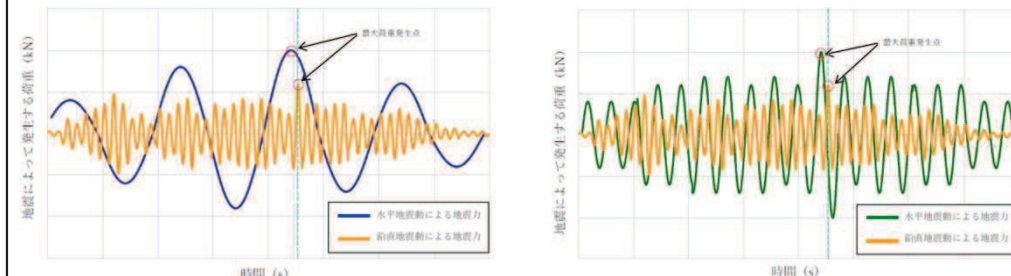
■ スペクトルモーダル解析法の適用性について以下のとおり確認した。

- 竜巻防護ネットに適用している道路橋示方書、道路橋支承便覧及び原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG4601)のほかに、免震型施設の設計に適用する原子力発電所免震構造設計技術指針(JEAG4614)における地震応答、解析手法の選定に係る考え方を確認した結果、いずれにも線形解析の場合はスペクトルモーダル解析や時刻歴応答解析の適用が可能であり、非線形解析が必要な施設については時刻歴応答解析の適用を推奨していることを確認した。
- 竜巻防護ネットに係る設計内容を確認した結果、本設備は線形挙動を示すことを確認した。
 - 一 竜巻防護ネットの構造(支承部を除く)は鋼材で構成されており、線形応答範囲内の設計としている。
 - 一 竜巻防護ネットのゴム支承は、ほぼ線形の挙動を示す設計であり、道路橋示方書、道路橋支承便覧において等価線形の設定が認められていること、また、物性確認試験を実施しほぼ線形の挙動を示すことを確認している。
 - 一 可動支承は、滑りが生ずる構造であるものの、可動支承の反対側に設置されているゴム支承によって制限されるため、ほぼ線形の挙動を示すことになる。
 - 一 減衰定数は、ゴム支承の減衰が支配的となる水平方向については、ゴム支承の物性試験結果を踏まえて保守的な設定とし、鉛直方向についてはJEAG4601に基づき2.0%と設定している。
- 以上の検討結果から、構造全体として線形挙動を示す構造物であるため、スペクトルモーダル解析は適用可能であると判断している。

■ なお、工認段階において、時刻歴応答解析結果と比較するなどして、スペクトルモーダル解析を適用することの妥当性について検証する。

2019年4月16日
第705回審査会合(資料1-2-1)

- 竜巻防護ネットの固有周期は1秒以下であることを確認しており、一般的な免震装置を用いた建物の固有周期である2~4秒に比べて剛側である。
- 固有周期が剛側である場合には、柔側の設備に比べ、水平方向の最大荷重と鉛直方向の最大荷重が重畳する可能性は低くなることから(概念図参照)、他の施設と同様に、竜巻防護ネットにおいても地震荷重の組合せはSRSS法を適用している。
- なお、工認段階において、時刻歴応答解析を実施して地震時挙動を確認するなどして、各方向の地震荷重の組合せに対するSRSS法の適用性について詳細な検討を実施する。



免震型の施設(水平方向の固有周期が4秒の例)

竜巻防護ネット(水平方向の固有周期0.83秒)

水平地震動による地震力と鉛直地震動による地震力の重畳の概念図

地震荷重の組合せ法におけるSRSS法の適用性の確認

- 竜巻防護ネットの基準地震動 S_s に対する構造健全性は以下の評価手法を用いて確認しており、これらの設計手法について異なる解析手法との比較を行うなどして、その妥当性を説明する。
 - 3次元はりモデルを用いたスペクトルモーダル解析を適用
 - 地震荷重(水平／鉛直)の組合せにはSRSS法を適用
 - 荷重の組合せは、死荷重＋積雪荷重＋地震荷重を考慮
- 地震荷重の組合せ法におけるSRSS法の適用に関して、時刻歴代数和による荷重の組合せによる評価結果と、SRSS法による荷重の組合せによる評価結果を比較し、結果の差異は小さいことから、SRSS法の適用が妥当であることを確認した。

参考表2-1 地震荷重の組合せ法におけるSRSS法の適用性に係る妥当性確認結果

ケースNo.	(I)		(II)	
	地震応答解析	時刻歴応答解析		同左
a. 応答解析条件				
地震動の種類	S_s -D2		同左	
加振条件	水平・鉛直同時入力加振		水平・鉛直単独加振	
地震荷重(水平／鉛直)の組合せ	時刻歴代数和		SRSS(水平2方向＋鉛直)	
入力する地震動	加速度時刻歴		同左	
ゴム支承の解析モデル	等価線形モデル(3.46 kN/mm)		同左	
減衰の設定	ひずみエネルギー比例型減衰法 鋼製部材:2.0%, ゴム支承:4.5%		同左	
b. 評価結果(単位:MPa)	発生応力	許容限界(裕度)	発生応力	許容限界(裕度)
主桁	170	343(2.01)	168	343(2.04)
大梁	185	343(1.85)	185	343(1.85)
横補強材	137	343(2.50)	137	343(2.50)
ブレース	16	63(3.93)	16	63(3.93)

非線形構造部材を含む構造物に対するスペクトルモーダル解析の適用性の確認

- 非線形構造部材を含む構造物に対するスペクトルモーダル解析の適用性に関して、スペクトルモーダル解析法による評価結果と、時刻歴解析による評価結果を比較し、結果の差異は小さいことからスペクトルモーダル解析の適用が妥当であることを確認した。

参考表2-2 非線形構造部材を含む構造物に対するスペクトルモーダル解析の適用性に係る妥当性確認結果

ケースNo.	(Ⅲ)		(Ⅳ)		(Ⅴ)	
地震応答解析法	時刻歴応答解析		時刻歴応答解析		スペクトルモーダル解析	
a. 応答解析条件						
地震動の種類	Ss-D2		同左		同左	
加振条件	水平・鉛直単独加振		同左		同左	
地震荷重(水平／鉛直)の組合せ	SRSS(水平2方向＋鉛直)		同左		同左	
入力する地震動	加速度時刻歴		加速度時刻歴		加速度応答スペクトル(拡幅無)	
ゴム支承の解析モデル	非線形モデル(非線形の荷重-変位特性を入力)		等価線形モデル(3.46 kN/mm)		等価線形モデル(3.46 kN/mm)	
減衰の設定	ひずみエネルギー比例型減衰法 鉄骨:2.0%, ゴム支承:0%(減衰は履歴特性で考慮されるため)		水平:4.0%一律 鉛直:2.0%一律		水平:4.0%一律 鉛直:2.0%一律	
b. 評価結果(単位:MPa)	発生応力	許容限界(裕度)	発生応力	許容限界(裕度)	発生応力	許容限界(裕度)
主桁	173	343(1.98)	171	343(2.00)	178	343(1.92)
大梁	188	343(1.82)	186	343(1.84)	184	343(1.86)
横補強材	130	343(2.63)	142	343(2.41)	151	343(2.27)
ブレース	16	63(3.93)	16	63(3.93)	14	63(4.50)

地震荷重の設定における保守性の確認及び地震時における荷重の組合せ(風荷重の影響)に関する確認

- 地震荷重の設定に関して、設計で適用しているスペクトルモーダル解析(床応答スペクトルに拡幅有)の結果と、前ページまでに実施した各種検討結果を比較して、設計用地震荷重を保守的に設定していることを確認した。

参考表2-3 地震荷重の設定における保守性の確認結果

(単位:MPa)

	(Ⅲ)非線形時刻歴応答解析		(Ⅳ)線形時刻歴応答解析		(Ⅴ)スペクトルモーダル解析 (拡幅無し)		(Ⅵ)スペクトルモーダル解析 (拡幅有り)	
	発生応力	許容限界(裕度)	発生応力	許容限界(裕度)	発生応力	許容限界(裕度)	発生応力	許容限界(裕度)
主桁	173	343(1.98)	171	343(2.00)	178	343(1.92)	232	343(1.47)
大梁	188	343(1.82)	186	343(1.84)	184	343(1.86)	217	343(1.58)
横補強材	130	343(2.63)	142	343(2.41)	151	343(2.27)	180	343(1.90)
ブレース	16	63(3.93)	16	63(3.93)	14	63(4.50)	17	63(3.70)

- 地震時における荷重の組合せに関して、風荷重を考慮した場合の評価結果と、風荷重を考慮しない場合の評価結果を比較し、風荷重の影響は軽微であり、荷重の組合せが妥当であることを確認した。

参考表2-4 風荷重の考慮に係る確認結果

(単位:MPa)

	風荷重考慮		風荷重未考慮	
	発生応力	許容限界(裕度)	発生応力	許容限界(裕度)
主桁	233	343(1.47)	232	343(1.47)
大梁	217	343(1.58)	217	343(1.58)
横補強材	184	343(1.86)	180	343(1.90)
ブレース	17	63(3.70)	17	63(3.70)

耐震評価結果

- 基準地震動Ss7波の地震応答の基本ケースに加え、地盤の不確かさを考慮し、これらを包絡した設計用床応答曲線を用いた地震応答解析を実施した結果、竜巻防護ネットは十分な構造強度を有し、上位クラス施設に対して波及的影響を及ぼさないことを確認した。

参考表2-5 竜巻防護ネットの耐震評価結果

評価対象		評価項目	発生値(MPa)	許容限界(MPa)	
フレーム	主桁	組合せ	234	343	
	横補強材	組合せ*1	0.56	1	
	ブレース	圧縮応力	17	62	
大梁	大梁	組合せ*1	0.68	1	
大梁ゴム支承	ゴム支承 本体	ゴム本体	せん断ひずみ*1	109	250
			圧縮応力	4	23
		引張応力	0.6	2.0	
		内部鋼板	引張応力	43	280
		ゴム支承取付ボルト	引張応力	133	420
		基礎ボルト	引張応力	81	257
フレームゴム支承	ゴム支承 本体	ゴム本体	せん断ひずみ*1	92	250
			圧縮応力	2	23
		引張応力	0.5	2.0	
		内部鋼板	引張応力	22	280
		ゴム支承取付ボルト	引張応力	116	420
		基礎ボルト	引張応力	73	257
可動支承	構造部材	水平荷重*2	313	2900	
		鉛直荷重(圧縮)*2	654	5600	
		鉛直荷重(引張)*2	250	1800	
フレーム/北側隔壁接続部	X方向	移動量*3	125	300	
	Y方向	移動量*3	125	250	
フレーム/南側隔壁接続部	X方向	移動量*3	125	300	
フレーム/側壁接続部	Y方向	移動量*3	204	350	
フレーム/大梁接続部	X方向	移動量*3	167	350	

注記 *1: 発生値, 許容限界は無次元(%)

*2: 発生値, 許容限界の単位(kN)

*3: 発生値, 許容限界の単位(mm)

ゴム支承の剛性のばらつきに対する影響確認結果(耐震)

- 設計用床応答曲線に対して、ゴム支承の剛性のばらつきを考慮した条件での地震応答解析を実施し、いずれの不確かさケースについても各部材の発生応力等が許容限界を下回ることを確認した。

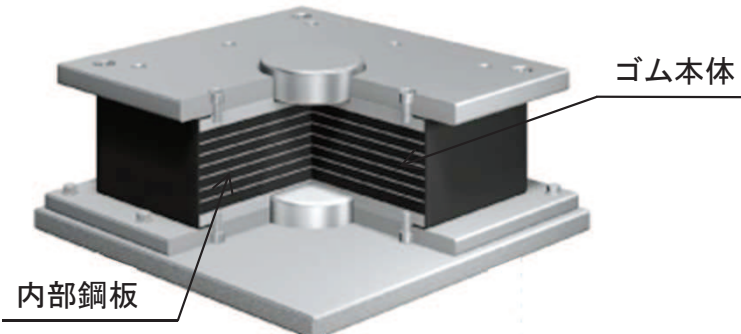
参考表2-6 ゴム支承の剛性のばらつきを考慮した耐震評価結果

評価対象		評価項目	発生値(MPa)		許容限界(MPa)	
			ゴム支承 剛性変化+側	ゴム支承 剛性変化-側		
フレーム	主桁	組合せ	254	208	343	
	横補強材	組合せ*1	0.79	0.47	1	
	ブレース	圧縮応力	24	15	62	
大梁	大梁	組合せ*1	0.69	0.73	1	
大梁ゴム支承	ゴム支承 本体	ゴム本体	せん断ひずみ*1	111	134	250
			圧縮応力	4	4	23
		引張応力	0.6	1.2	2.0	
		内部鋼板	引張応力	43	43	280
		ゴム支承取付ボルト	引張応力	190	80	420
		基礎ボルト	引張応力	114	71	235
フレームゴム支承	ゴム支承 本体	ゴム本体	せん断ひずみ*1	90	107	250
			圧縮応力	2	2	23
		引張応力	0.5	1.2	2.0	
		内部鋼板	引張応力	22	22	280
		ゴム支承取付ボルト	引張応力	161	73	420
		基礎ボルト	引張応力	106	68	257
可動支承	構造部材	水平荷重*2	520	273	2900	
		鉛直荷重(圧縮)*2	662	953	5600	
		鉛直荷重(引張)*2	257	473	1800	
フレーム/北側隔壁接続部	X方向	移動量*3	129	148	300	
	Y方向	移動量*3	116	149	250	
フレーム/南側隔壁接続部	X方向	移動量*3	130	148	300	
フレーム/側壁接続部	Y方向	移動量*3	225	253	350	
フレーム/大梁接続部	X方向	移動量*3	150	192	350	

注記 *1:発生値,許容限界は無次元(%)
 *2:発生値,許容限界の単位(kN)
 *3:発生値,許容限界の単位(mm)

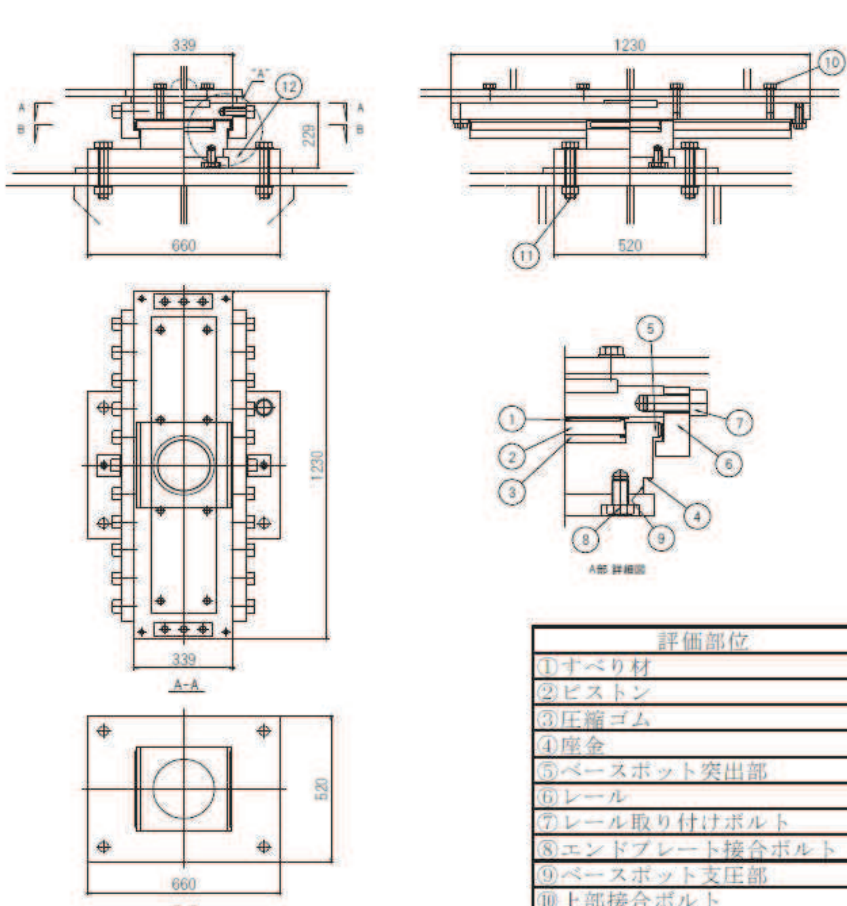
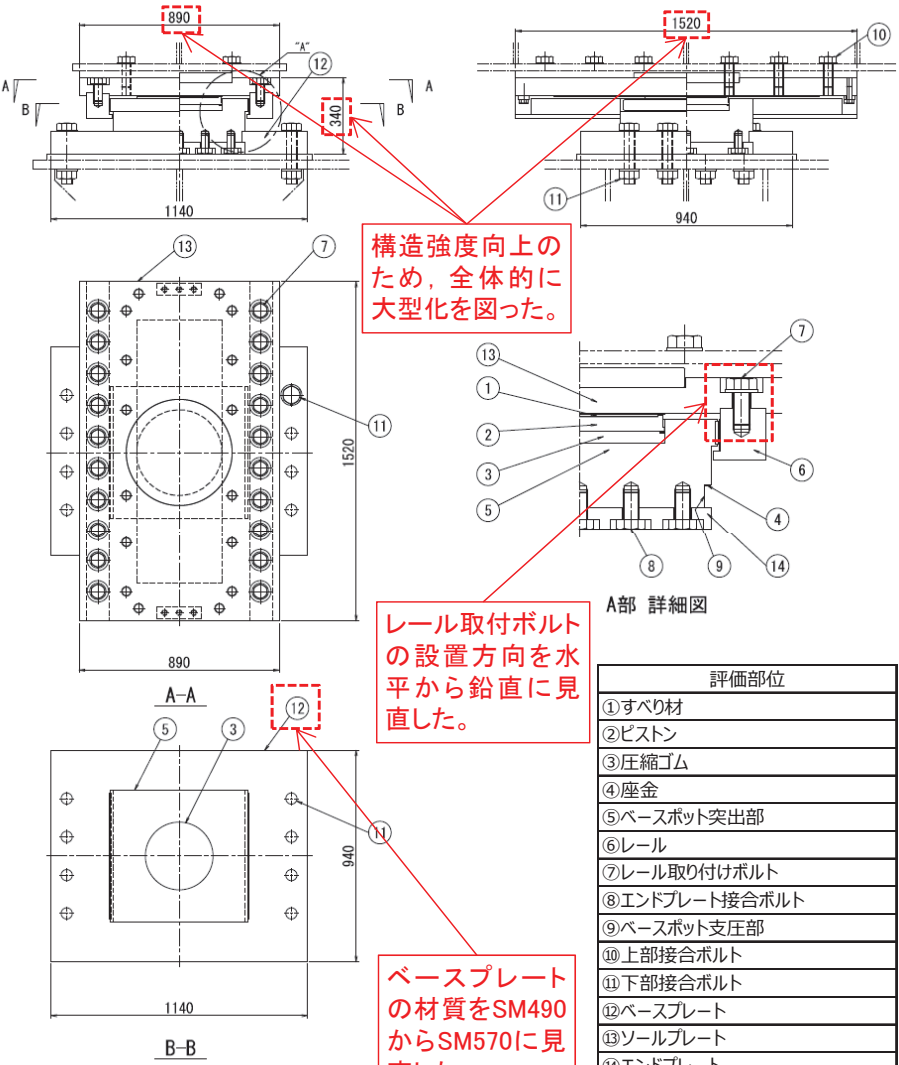
(1) フレームゴム支承の仕様変更

- ゴム支承の引張に対する構造強度を向上させるため、フレームゴム支承の寸法等の仕様を変更し、大梁ゴム支承と同様のものとした。

項目	設置許可段階		工事計画認可段階
	大梁ゴム支承	フレームゴム支承	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		同左
ゴム本体種類	天然ゴム(NR)		同左
ゴム本体有効平面寸法(mm)	800 × 800	550 × 550	800 × 800
総ゴム厚(mm) (ゴム厚(mm) × 層数)	192 (24 × 8層)	135 (15 × 9層)	192 (24 × 8層)
せん断弾性係数(N/mm ²)	1.0(G10)	1.2(G12)	1.0(G10)
一次形状係数	8.33	9.17	8.33
二次形状係数	4.17	4.07	4.17
せん断(水平)剛性(kN/mm)	3.333	2.689	3.33
鉛直剛性(kN/mm)	972	863	972
構造概要	 <p>ゴム支承の引張に対する強度向上のため、ゴム本体有効平面寸法を大きくした。また、せん断剛性を低減する観点から、せん断弾性係数を変更した。</p>		

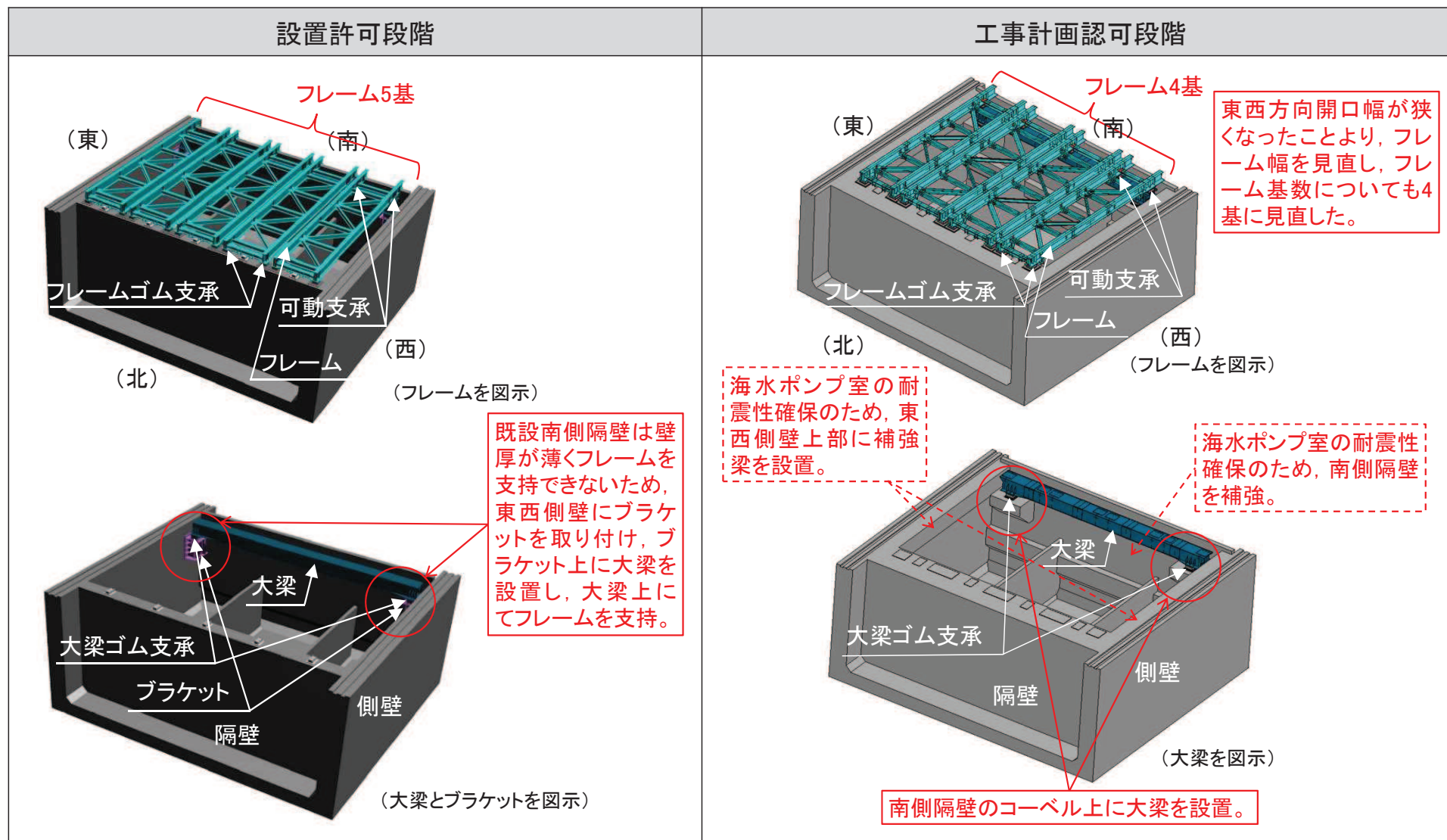
(2) 可動支承の仕様変更

- 構造強度を向上させるため、下記に示すような寸法の変更等の仕様変更を実施した。なお、可動支承の機能(水平1方向へ滑りを生じ変位を吸収する機能)に変更はない。

設置許可段階	工事計画認可段階																												
(単位: mm)	(単位: mm)																												
																													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">評価部位</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>①すべり材</td></tr> <tr><td>②ピストン</td></tr> <tr><td>③圧縮ゴム</td></tr> <tr><td>④座金</td></tr> <tr><td>⑤ベースポット突出部</td></tr> <tr><td>⑥レール</td></tr> <tr><td>⑦レール取り付けボルト</td></tr> <tr><td>⑧エンドプレート接合ボルト</td></tr> <tr><td>⑨ベースポット支圧部</td></tr> <tr><td>⑩上部接合ボルト</td></tr> <tr><td>⑪下部接合ボルト</td></tr> <tr><td>⑫ベースプレート</td></tr> </tbody> </table>	評価部位	①すべり材	②ピストン	③圧縮ゴム	④座金	⑤ベースポット突出部	⑥レール	⑦レール取り付けボルト	⑧エンドプレート接合ボルト	⑨ベースポット支圧部	⑩上部接合ボルト	⑪下部接合ボルト	⑫ベースプレート	<div style="border: 1px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> 構造強度向上のため、全体的に大型化を図った。 </div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> レール取付ボルトの設置方向を水平から鉛直に見直した。 </div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px;"> ベースプレートの材質をSM490からSM570に見直した。 </div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">評価部位</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>①すべり材</td></tr> <tr><td>②ピストン</td></tr> <tr><td>③圧縮ゴム</td></tr> <tr><td>④座金</td></tr> <tr><td>⑤ベースポット突出部</td></tr> <tr><td>⑥レール</td></tr> <tr><td>⑦レール取り付けボルト</td></tr> <tr><td>⑧エンドプレート接合ボルト</td></tr> <tr><td>⑨ベースポット支圧部</td></tr> <tr><td>⑩上部接合ボルト</td></tr> <tr><td>⑪下部接合ボルト</td></tr> <tr><td>⑫ベースプレート</td></tr> <tr><td>⑬ソールプレート</td></tr> <tr><td>⑭エンドプレート</td></tr> </tbody> </table>	評価部位	①すべり材	②ピストン	③圧縮ゴム	④座金	⑤ベースポット突出部	⑥レール	⑦レール取り付けボルト	⑧エンドプレート接合ボルト	⑨ベースポット支圧部	⑩上部接合ボルト	⑪下部接合ボルト	⑫ベースプレート	⑬ソールプレート	⑭エンドプレート
評価部位																													
①すべり材																													
②ピストン																													
③圧縮ゴム																													
④座金																													
⑤ベースポット突出部																													
⑥レール																													
⑦レール取り付けボルト																													
⑧エンドプレート接合ボルト																													
⑨ベースポット支圧部																													
⑩上部接合ボルト																													
⑪下部接合ボルト																													
⑫ベースプレート																													
評価部位																													
①すべり材																													
②ピストン																													
③圧縮ゴム																													
④座金																													
⑤ベースポット突出部																													
⑥レール																													
⑦レール取り付けボルト																													
⑧エンドプレート接合ボルト																													
⑨ベースポット支圧部																													
⑩上部接合ボルト																													
⑪下部接合ボルト																													
⑫ベースプレート																													
⑬ソールプレート																													
⑭エンドプレート																													

(3) フレーム基数及び幅の変更及び(4)大梁の支持方法の変更

- 海水ポンプ室の補強計画を踏まえ、東西方向開口幅が狭くなったことから、フレーム基数及び幅を変更した。
- また、既設東西側壁にブラケットを設置し大梁を支持するとしていた構造から、補強する南側隔壁にて大梁を支持する構造とした。

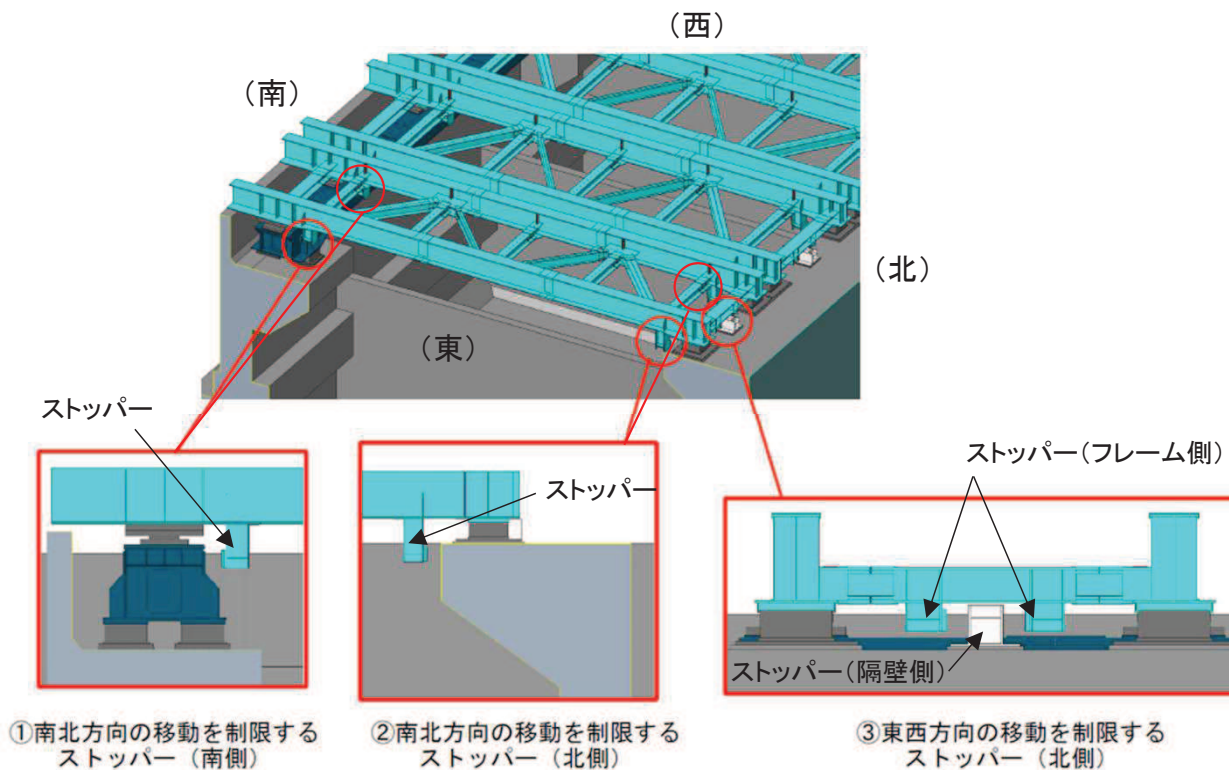


(5) 機能維持に関する方針の変更

- 支承部の仕様変更を踏まえ、衝突解析に関する竜巻防護ネットの支持部材の機能維持方針を以下のとおり変更した。

設置許可段階	工事計画認可段階
<ul style="list-style-type: none"> ○フレームゴム支承は、2つのうち1つ以上の支承が構造強度上の評価方針を満足することを確認することとしていた。 ○ストッパーに支持機能を期待する場合があるとしていた。 	<ul style="list-style-type: none"> ○いずれの支承部も構造強度上の評価方針を満足することを確認することとした。 ○工事計画認可段階においては、耐震・強度評価ともに支承部の機能を維持することとし、ストッパーに評価上期待しない方針(ストッパーは機能維持のための必要部材ではない)とした。

- ストッパーは竜巻防護ネットの機能維持のために必要な部材ではないが、ポンプ点検等に伴うフレームの取り付け及び取り外し作業によってゴム支承が損傷しフレームが落下する事象を想定し、「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」の落橋防止構造の考え方を参考に、ストッパーに発生する応力は、JEAG4601の許容応力状態 $IV_A S$ に基づく許容限界を満足する設計とすることとした。



参考図3-1 ストッパーの設置位置及び構造概要