

女川原子力発電所 2 号炉

設計基準対象施設について

平成 3 1 年 2 月

東北電力株式会社

目次

- 4 条 地震による損傷の防止
- 5 条 津波による損傷の防止
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（その他外部事象）
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（火山）
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（外部火災）
- 7 条 発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止
- 8 条 火災による損傷の防止
- 9 条 溢水による損傷の防止等
- 10 条 誤操作の防止
- 11 条 安全避難通路等
- 12 条 安全施設
- 14 条 全交流動力電源喪失対策設備
- 16 条 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設
- 17 条 原子炉冷却材圧力バウンダリ
- 23 条 計測制御系統施設（第 16 条に含む）
- 24 条 安全保護回路
- 26 条 原子炉制御室等
- 31 条 監視設備
- 33 条 保安電源設備
- 34 条 緊急時対策所
- 35 条 通信連絡設備

下線は、今回の提出資料を示す。

第4条：地震による損傷の防止

<目 次>

第1部

1. 基本方針
 - 1.1 要求事項の整理
 - 1.2 追加要求事項に対する適合性
 - (1) 位置、構造及び設備
 - (2) 安全設計方針
 - (3) 適合性説明
 - 1.3 気象等
 - 1.4 設備等
 - 1.5 手順等

第2部

1. 耐震設計の基本方針
 - 1.1 基本方針
 - 1.2 適用規格
2. 耐震設計上の重要度分類
 - 2.1 重要度分類の基本方針
 - 2.2 耐震重要度分類
3. 設計用地震力
 - 3.1 地震力の算定法
 - 3.2 設計用地震力
4. 荷重の組合せと許容限界
 - 4.1 基本方針
5. 地震応答解析の方針
 - 5.1 建物・構築物
 - 5.2 機器・配管系
 - 5.3 屋外重要土木構造物
 - 5.4 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備又は津波監視設備が設置された建物・構築物
6. 設計用減衰定数
7. 耐震重要施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響
8. 水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せに関する影響評価方針
9. 構造計画と配置計画

(別 添)

- 別添－ 1 設計用地震力
- 別添－ 2 動的機能維持の評価
- 別添－ 3 弾性設計用地震力 S_d ・静的地震力による評価
- 別添－ 4 上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討について
- 別添－ 5 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方針
- 別添－ 6 屋外重要土木構造物の耐震評価における断面選定の考え方
- 別添－ 7 主要建屋の構造概要及び解析モデルについて
- 別添－ 8 入力地震動について

(別 紙)

- 別紙－ 1 既工認との手法の相違点の整理（設置変更許可申請段階での整理）
- 別紙－ 2 上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討
- 別紙－ 3 水平 2 方向及び鉛直方向の適切な組合せに関する検討について
- 別紙－ 4 サプレッションチェンバ内部水質量の考え方の変更について
- 別紙－ 5 竜巻防護ネットの耐震構造設計について
- 別紙－ 6 原子炉本体の基礎の復元力特性について
- 別紙－ 7 使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数について
- 別紙－ 8 規格適用範囲外の動的機能維持の評価
- 別紙－ 9 海水ポンプ室門型クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用
- 別紙－ 1 0 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持について
- 別紙－ 1 1 東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた建屋耐震設計方法への反映について
- 別紙－ 1 2 埋め込まれた建屋の周辺地盤による影響について
- 別紙－ 1 3 原子炉建屋屋根トラスの解析モデルへの弾塑性解析の適用
- 別紙－ 1 4 応力解析モデルへの弾塑性解析の適用
- 別紙－ 1 5 屋外重要土木構造物の耐震評価における断面選定について
- 別紙－ 1 6 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化について
- 別紙－ 1 7 後施工せん断補強筋による耐震補強について
- 別紙－ 1 8 液状化影響の検討方針について
- 別紙－ 1 9 地下水位低下設備について

下線部：今回提出資料

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

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 要求事項	1
2.2 構造の概要	1
2.3 評価方針	5
2.4 適用規格	6
3. 耐震評価方法	7
3.1 解析方針	7
3.2 設計用床応答スペクトル	7
3.3 解析モデル及び諸元	12
3.4 固有値解析結果	19
3.5 荷重の設定	22
3.6 評価対象部位	24
3.7 評価基準値	26
3.8 各部の評価方法	27
4. 評価結果	36
5. まとめ	37

添 付 資 料

- 添付資料 1 ゴム支承の構造検討について
- 添付資料 2 スペクトルモーダル解析の適用性及び減衰定数の設定について
- 添付資料 3 設計用床応答スペクトル及びモード図について
- 添付資料 4 地震時における異常要因分析
- 添付資料 5 ゴム支承及び可動支承の耐震設計について
- 添付資料 6 地震時の鉛直方向変位について
- 添付資料 7 竜巻防護ネット構造部材の質量詳細について

1. 概要

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（以下「S クラス施設等」という。）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（以下「重要 SA 施設」という。）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については，「上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討」（以下「波及的影響検討」という。）の適合性評価において確認している。

波及的影響検討において抽出された下位クラス施設のうち，女川 2 号炉の竜巻防護ネットについては，基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有することを確認することで S クラス施設等及び重要 SA 施設（以下「上位クラス施設」という。）へ地震時に影響を及ぼさないことを説明する。

本資料では，竜巻防護ネットの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ものである。

2. 基本方針

2.1 要求事項

竜巻防護ネットは飛来物から非常用海水ポンプ等を防護するものであり，地震時にその機能を求められるものではなく，耐震 C クラスに分類されるが，上位クラス施設である非常用海水ポンプ等に対し，地震時において竜巻防護ネットの損傷等により波及的影響を及ぼさないよう，基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有することが求められる。

2.2 構造の概要

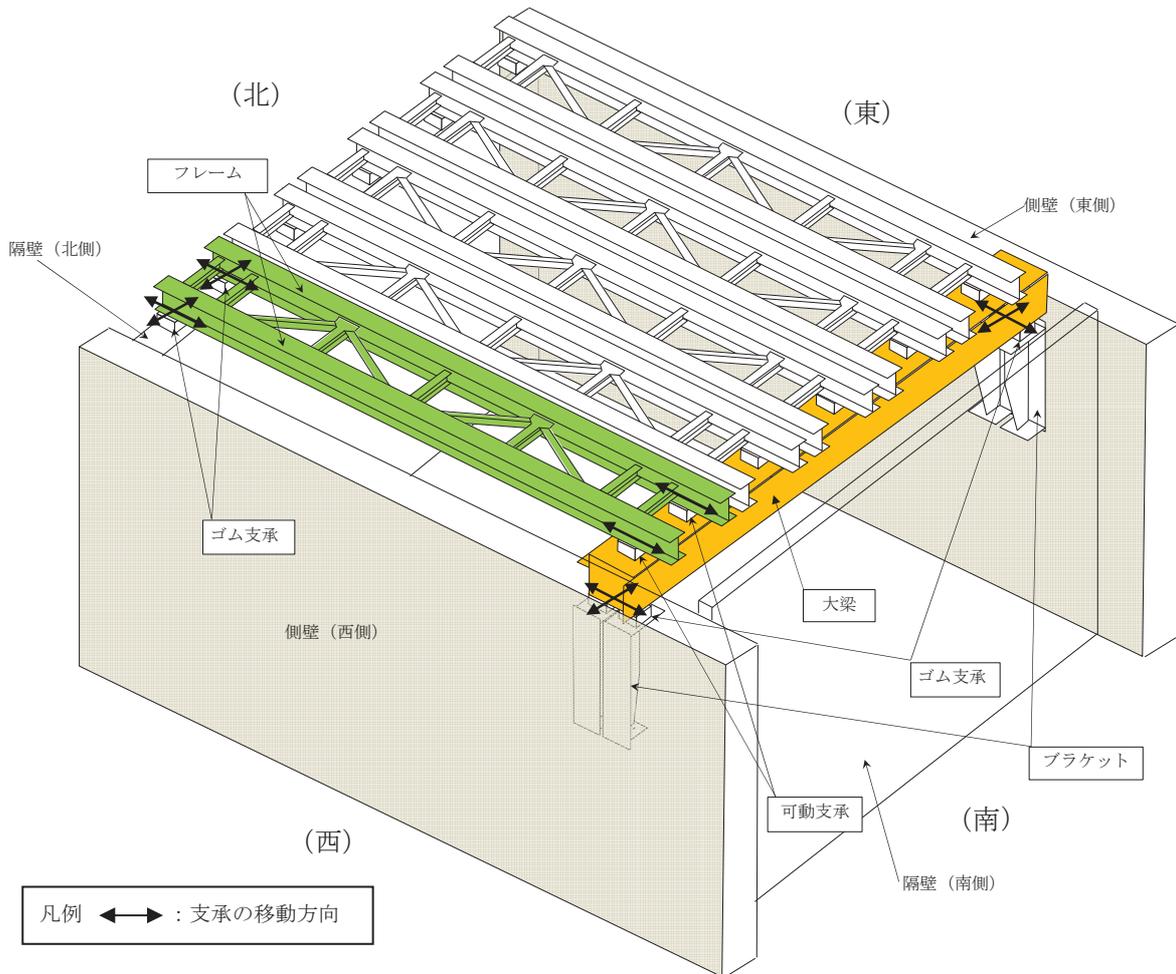
竜巻防護ネットは海水ポンプ室（補機ポンプエリア）にフレームに取り付けたネットを配置することで，非常用海水ポンプ等を防護する構造である。

海水ポンプ室（補機ポンプエリア）の側壁（東側及び西側）の南寄り位置にブラケットを設け，フレーム支持用の大梁を設置する。この大梁と隔壁（北側）天面に支持部を設け，ネット及び防護板を取り付けたフレームを支持する。

また，大梁とフレームと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）とフレームとの支持部にはゴム支承を設置する。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。また，フレームと大梁の接続部に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。

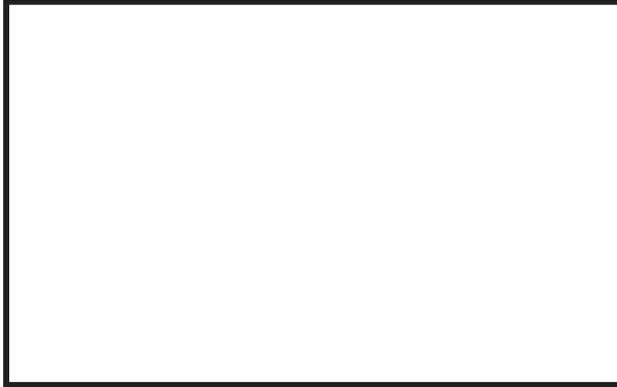
竜巻防護ネットの概要を第2.2-1図及び第2.2-2図に示す。また、竜巻防護ネットの構成部材の仕様を第2.2-1表に、質量の内訳を第2.2-2表に示す。

なお、竜巻防護ネットの構造検討や採用理由について添付資料1に詳細を示す。

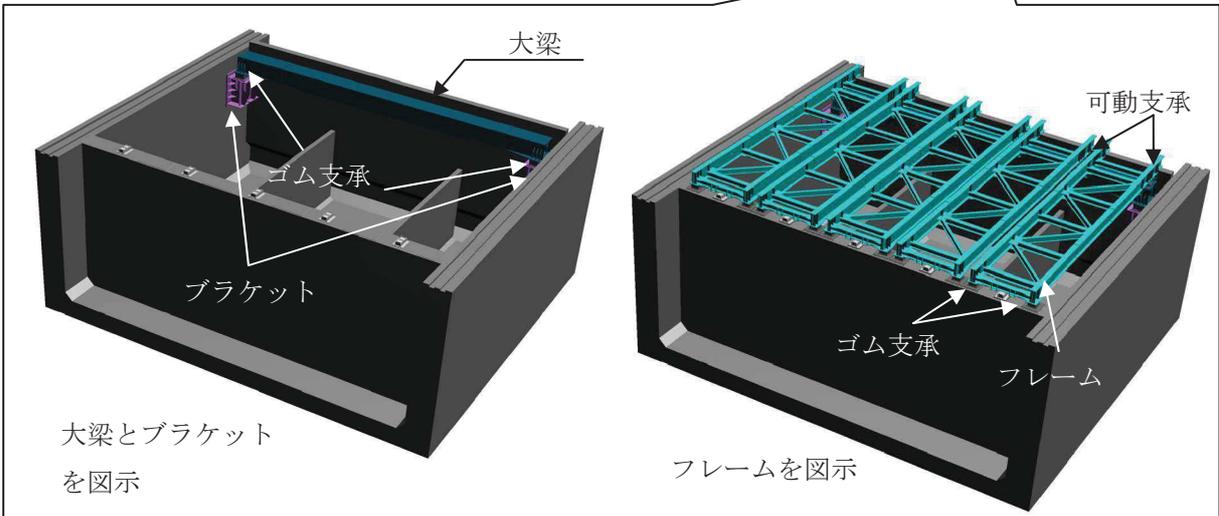
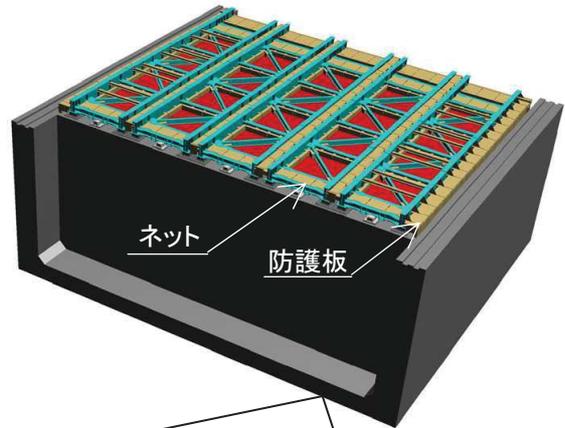


第2.2-1図 竜巻防護ネットの概要図（南西側から見た場合）

海水ポンプ室(補機エリア)



竜巻防護ネット取付状態



第 2.2-2 図 竜巻防護ネットの概要図 (北西側から見た場合)

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。

第 2.2-1 表 竜巻防護ネットの仕様

総質量		約 500ton
全体形状		約 29m（東西方向）×約 24m（南北方向） 高さ 約 1m
ネット（金網部）	構成	主ネット×2 枚＋補助ネット×1 枚
	寸法	線径：φ 4mm 目合い寸法：主ネット 50mm，補助ネット 40mm
	主要材料	硬鋼線材，亜鉛めっき鋼線
フレーム	数量	5 組
	寸法	長さ×幅×高さ：約 23m×4.3m×1m
	主要材料	SM490A，SM400A，SS400
大梁	寸法	長さ×幅×高さ：約 26m×1.5m×1.5m
	主要材料	SM520B，SM490A
ゴム支承	仕様	水平力分散型
	数量	大梁用：4 個（2 組（2 個/組）） 隔壁用：10 個（5 組（2 個/組））
可動支承	数量	隔壁用：10 個（5 組（2 個/組））
防護板	材料	SM400A，SS400
耐震クラス	－	C

第2.2-2表 竜巻防護ネットの質量内訳

部材		数量	質量 (t) *
ネット		20基	20
フレーム		5基	170
大梁		1基	70
ゴム支承	フレーム	10基	10
	大梁	4基	10
可動支承		10基	10
防護板	フレーム (FR1) 付	1式	40
	フレーム (FR2) 付	1式	30
	フレーム (FR3) 付	1式	30
	フレーム (FR4) 付	1式	30
	フレーム (FR5) 付	1式	40
	大梁付	1式	10
ブラケット		4基	30
		総質量	500

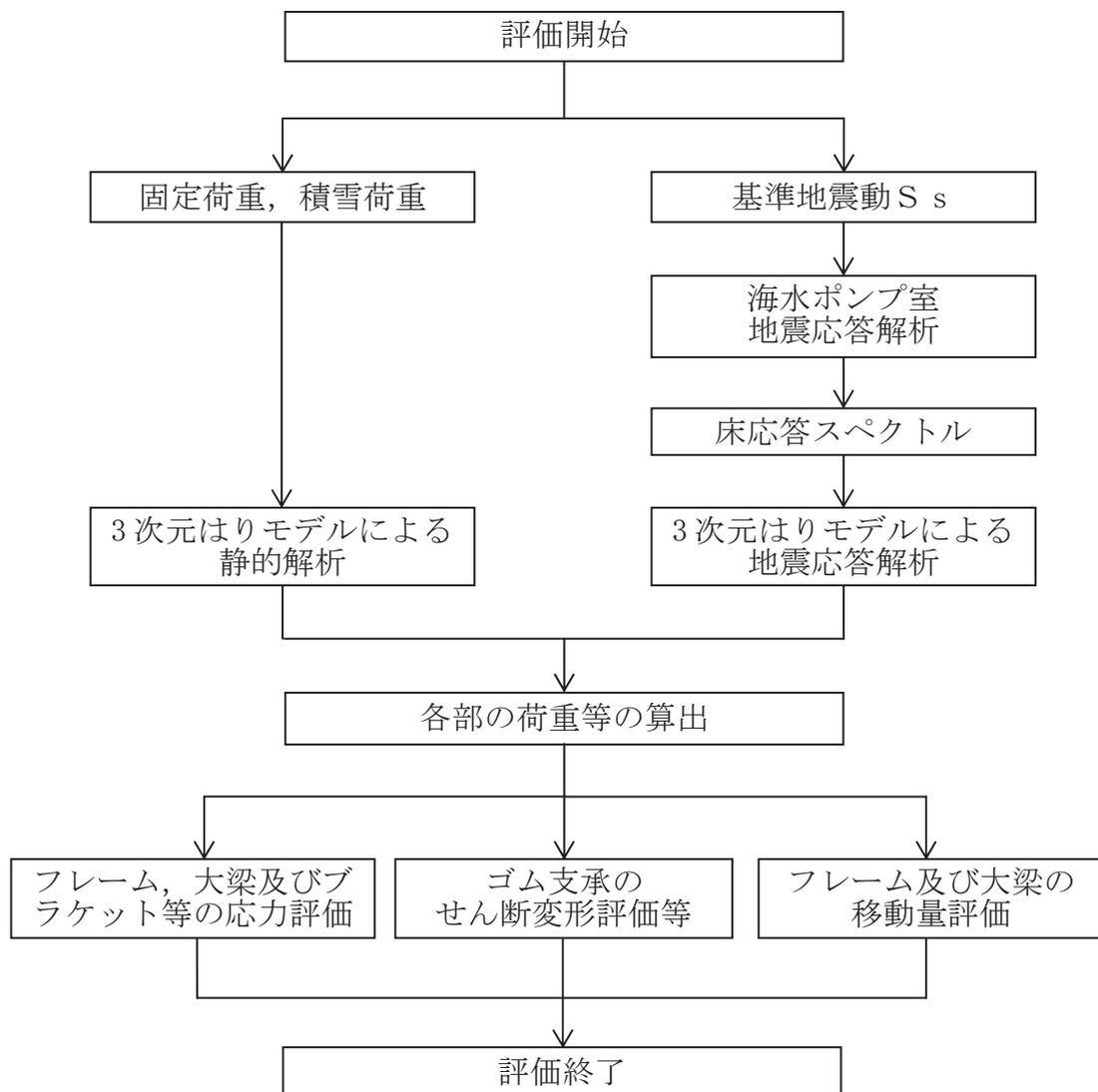
* 10t単位で切上げた概略質量，フレーム及び大梁を例に質量の詳細データを添付資料7に示す。

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海水ポンプ室内の上位クラス施設に波及的な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）等を対象とした3次元はりモデルによる地震応答解析を実施し、基準地震動 S_s 発生時（以下「 S_s 地震時」という。）にフレーム及び大梁の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に収まることを確認する。また、 S_s 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、部材同士の接触が生じないことを確認する。なお、地震荷重の組合せとして積雪荷重を考慮する。

竜巻防護ネットの耐震評価フローを第2.3-1図に示す。



第2.3-1図 竜巻防護ネットの耐震評価フロー

2.4 適用規格

竜巻防護ネットの設計に用いる規格としては、原子力発電所の施設設計に用いる、JSME や JEAG4601 の適用を基本とするが、ゴム支承の設計方法は JSME 等に規定されていないことから、道路橋示方書及び道路橋支承便覧を適用している。なお、道路橋用のゴム支承を適用した理由については添付資料 1 に示している。

- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC 1-2005/2007」(社) 日本機械学会
- ・「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」(社) 日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」(社) 日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」(社) 日本電気協会
- ・「鋼構造設計基準—許容応力度設計法—」((社) 日本建築学会, 2005 改定)
- ・建築基準法・同施行令
- ・「各種合成構造設計指針」((社) 日本建築学会, 2010 改定)
- ・「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」((社) 日本道路協会, 平成 14 年 3 月)
- ・「道路橋支承便覧」((社) 日本道路協会, 平成 16 年 4 月)

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における評価対象部位は、フレーム、大梁及びゴム支承等とし、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及び変位を求める。

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。また、解析で用いる減衰定数は、水平加振時ではゴム支承の変形が主体であるため、ゴム支承の等価減衰定数の試験結果より減衰定数を4.0%とし、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%とする。なお、解析手法の適用性及び減衰定数の設定については添付資料2に詳細を示す。

3.2 設計用床応答スペクトル

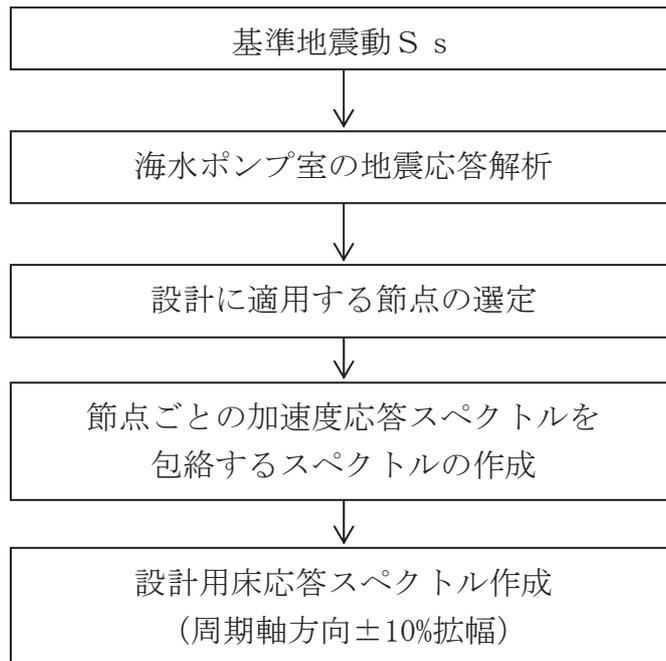
第3.2-1図に設計用床応答スペクトルの作成フローを示す。

基準地震動 S_s の海水ポンプ室の床応答のうち、竜巻防護ネットの設置位置を考慮して適用する節点を選定し、その節点の応答スペクトルを包絡した包絡スペクトルを用いる。なお、包絡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している。

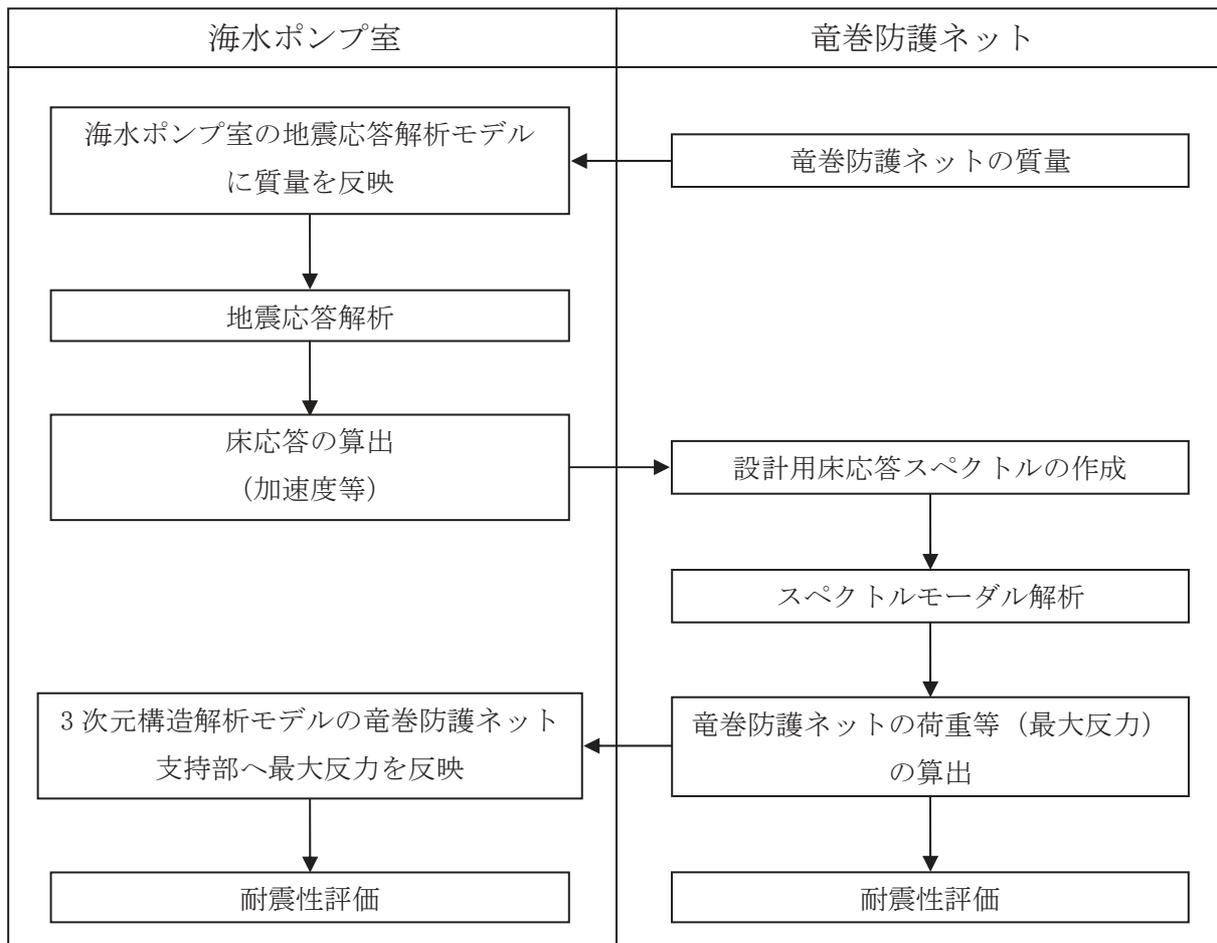
海水ポンプ室の地震応答解析は、海水ポンプ室の補機ポンプエリアを対象とした東西方向の断面（弱軸断面）形状を考慮した地盤—構造物連成の2次元時刻歴非線形解析を用いて算出している。地震応答解析モデルには竜巻防護ネットの質量を反映して地震応答を算定し、竜巻防護ネット設計用の床応答を算定している。竜巻防護ネットの設計により算定される海水ポンプ室への反力を、海水ポンプ室の3次元構造解析モデルの竜巻防護ネット支持部へ作用させ、間接支持機能（海水ポンプ室）を有する設計としている。海水ポンプ室と竜巻防護ネットの相互関係の詳細については第3.2-2図に示す。

なお、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、工認段階で竜巻防護ネットの耐震設計に反映する。

包絡スペクトルに適用する節点番号及び基準地震動 S_s を第3.2-1表に、海水ポンプ室の地震応答解析モデル図を第3.2-3図に示す。また、第3.2-4図に設計用床応答スペクトル図を示す。



第 3. 2-1 図 設計用床応答スペクトルの作成フロー



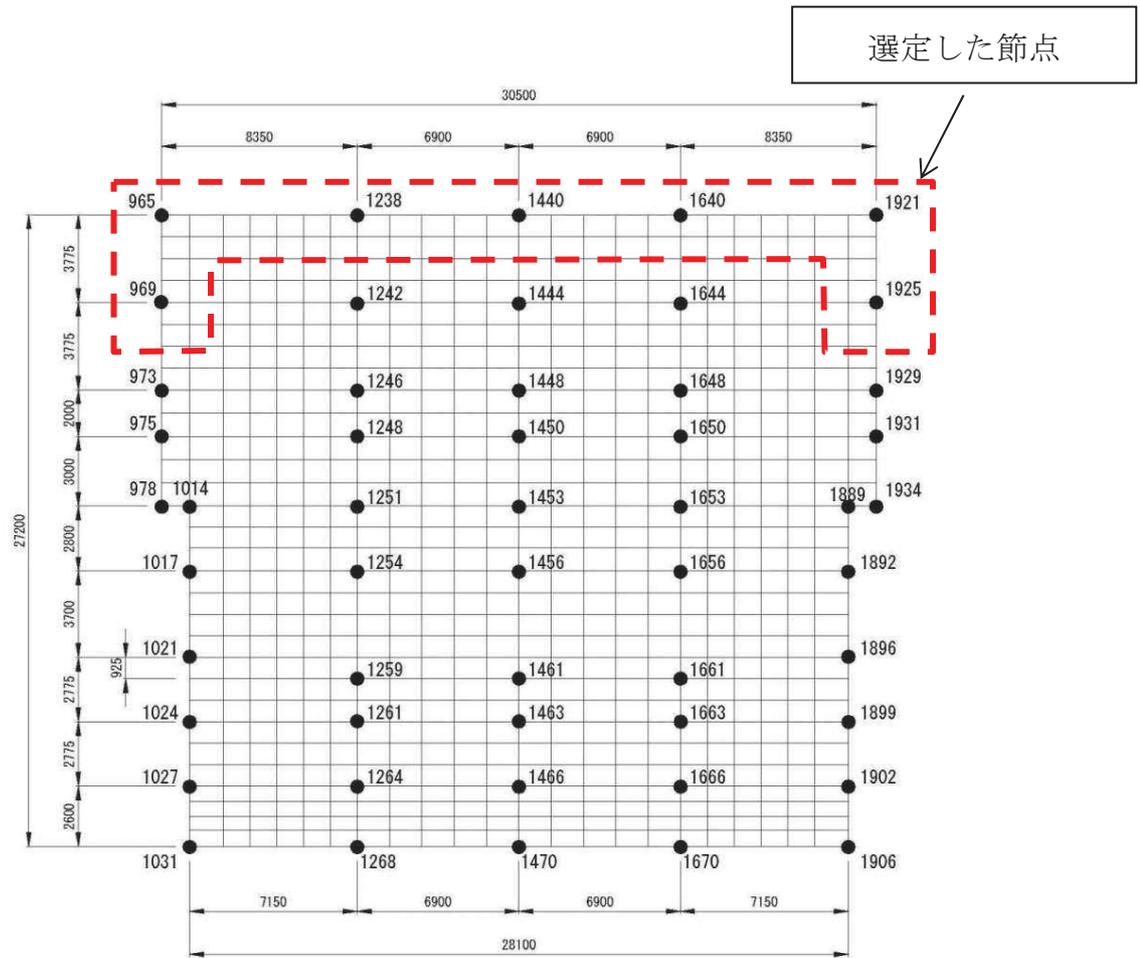
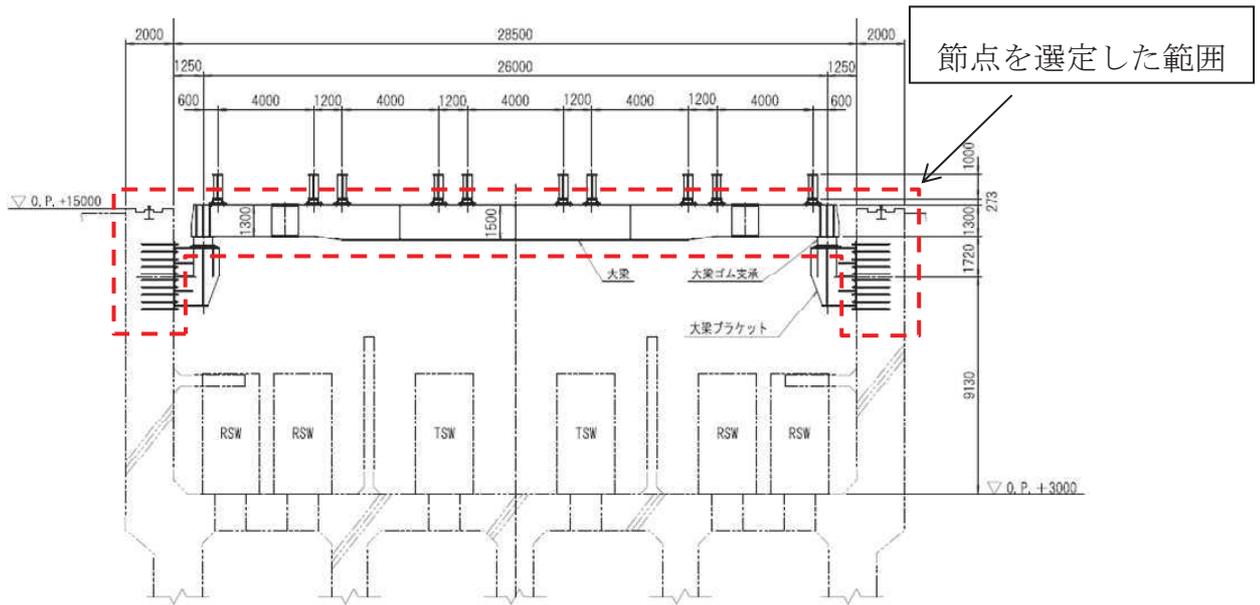
第3. 2-2図 耐震設計における竜巻防護ネットと海水ポンプ室の相互関係

第 3.2-1 表 海水ポンプ室の節点番号及び基準地震動一覧

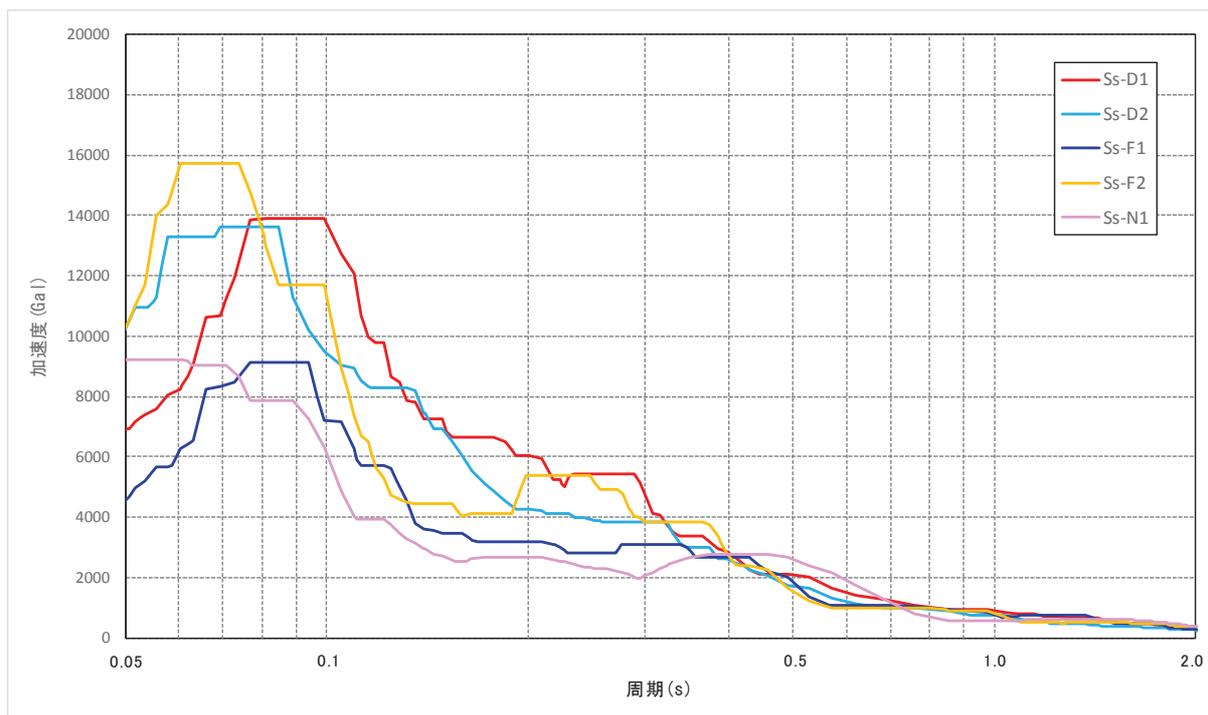
海水ポンプ室の 節点番号	基準地震動 S s *
965, 969, 1238, 1440, 1640, 1921, 1925	Ss-D1, Ss-D2, Ss -D3, Ss-F1, Ss-F2, Ss-F3, Ss-N1

*本資料では竜巻防護ネットへの影響が大きいと考えられる

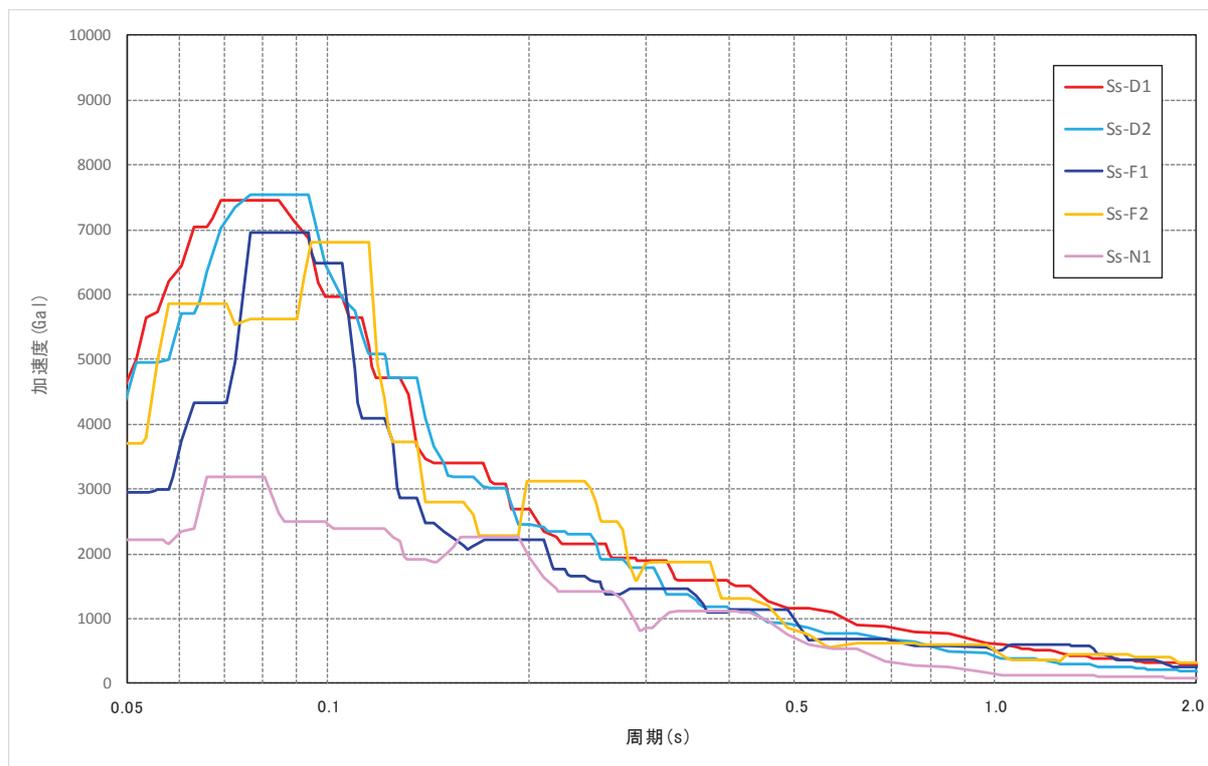
Ss-D1, D2, F1, F2, N1 の 5 波について耐震性を確認した結果を説明する。今後、工事計画認可申請において全ての S s に対して評価を実施する。



第3.2-3図 海水ポンプ室の地震応答解析モデル図



(a) 水平方向 減衰定数 4.0%



(b) 鉛直方向 減衰定数 2.0%

第 3.2-4 図 設計用床応答スペクトル図

3.3 解析モデル及び諸元

(1) 解析モデル

解析モデル図を第3.3-1図に示す。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。

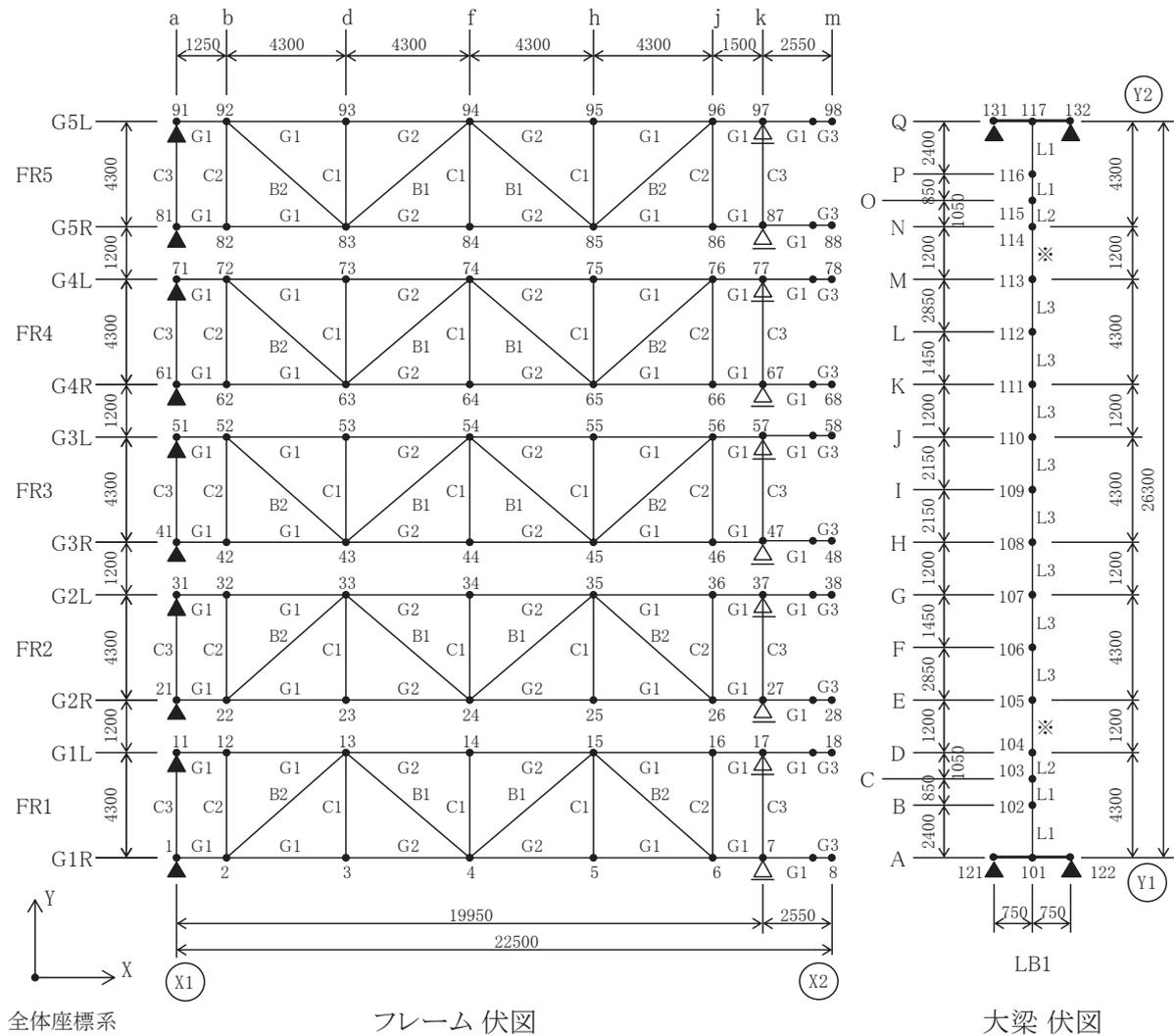
防護板については、架構全体の変形モードの中で防護板の剛性影響が小さいため、モデル化せずに質量のみを設置しているフレームに考慮している。防護板の剛性影響の詳細について以下に示す。

- 竜巻防護ネット全体の水平方向の変形モードはゴム支承の変位が主体であるため、防護板の剛性の影響はほとんどない。
- 防護板を設置しているフレームの鉛直方向の変形は主桁の曲げ変形が主体であることから、主桁の曲げ剛性に対する防護板の曲げ剛性の比率を確認した結果を第3.3-2図に示す。防護板の鉛直方向の曲げ剛性は、フレーム部材の主桁に比べて非常に小さく鉛直方向の変形に対しても、防護板の剛性の影響は無視できる。

以上の検討結果より、防護板のモデル化は不要と判断し、質量のみを考慮したモデルとしている。

また、解析モデルの軸線の高さは、主桁及び大梁の断面中心位置に設定している。フレームと大梁の接続部にあたる可動支承部では、X, Y, Zの3方向のバネを介して荷重を伝達するモデルとしている。可動支承の拘束方向であるY方向とZ方向は剛のバネ、可動方向であるX方向は拘束フリーのバネとしている。

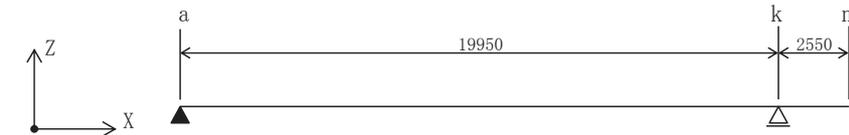
解析コードは「DYNA2E Version 8.0」を用いる。



全体座標系

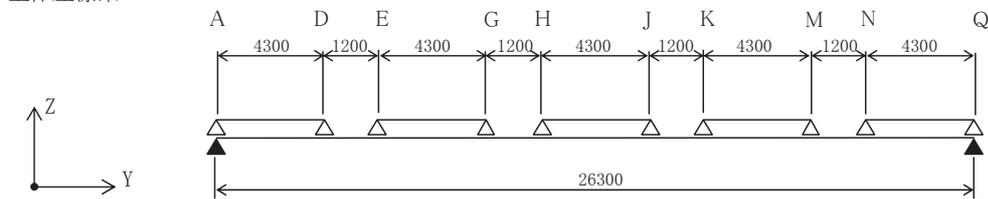
フレーム 伏図

大梁 伏図



全体座標系

A~Q通り 軸組図



全体座標系

k通り 軸組図

注) ▲印はゴム支承を示す。△印は可動支承を示す。

各点数字は節点番号を示す。

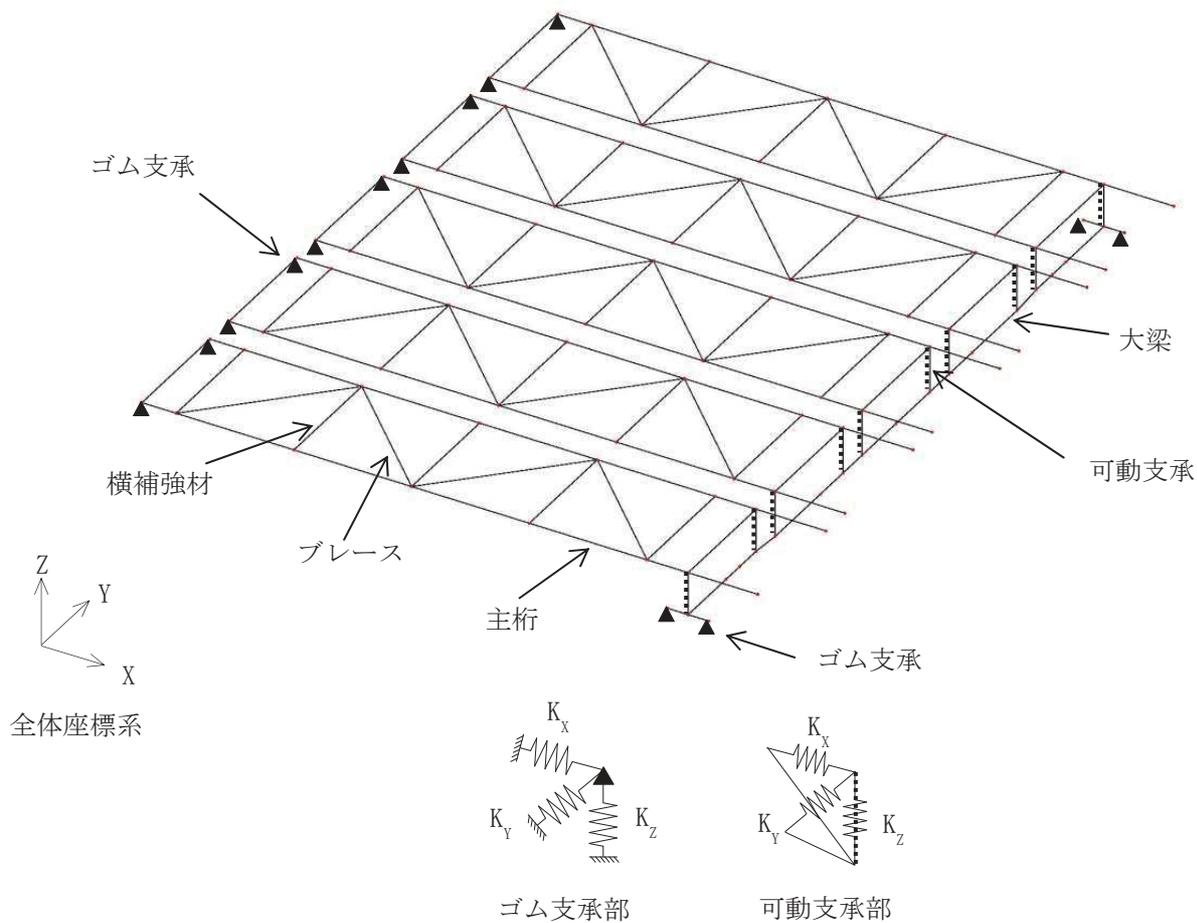
大梁ゴム支承の節点番号：121, 122, 131, 132

フレームゴム支承の節点番号：1, 11, 21, 31, 41, 51, 61, 71, 81, 91

可動支承の節点番号：7, 17, 27, 37, 47, 57, 67, 77, 87, 97

*印の断面性能はL2とL3の平均値とする。

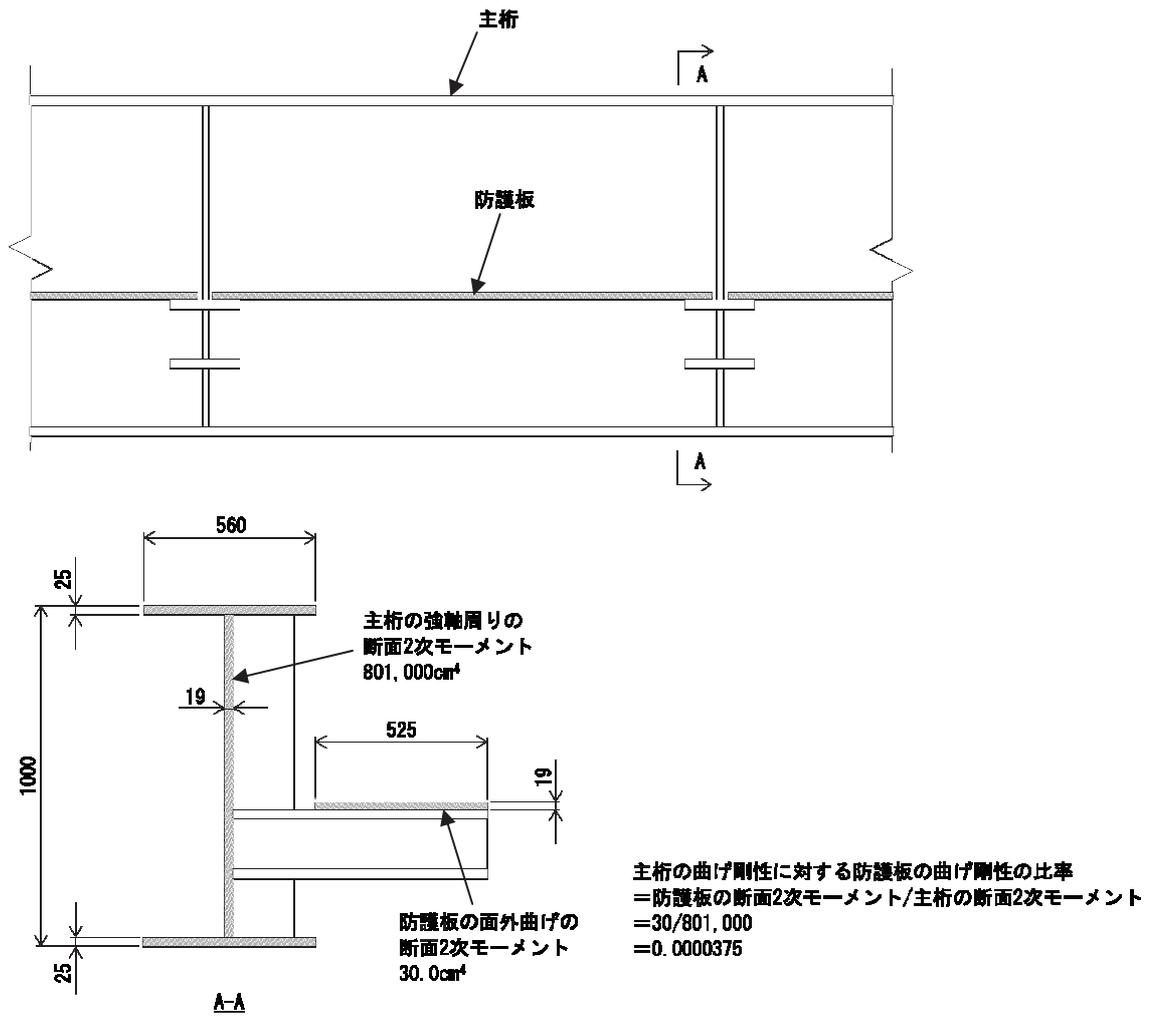
第 3.3-1 図 解析モデル (1/2)



ばね支持条件

記号	ゴム支承		可動支承
	大梁	フレーム	
K_x	弾性	弾性	自由
K_y	弾性	弾性	剛
K_z	剛	剛	剛

第 3.3-1 図 解析モデル (2/2)



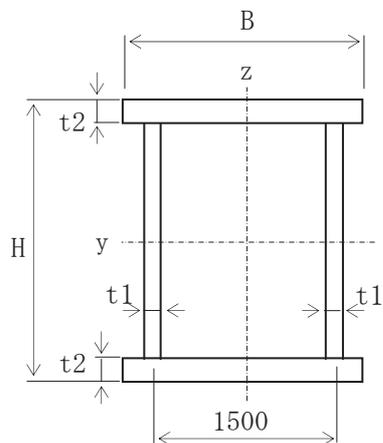
第 3. 3-2 図 主桁と防護板の曲げ剛性の比較

(2) 部材断面寸法

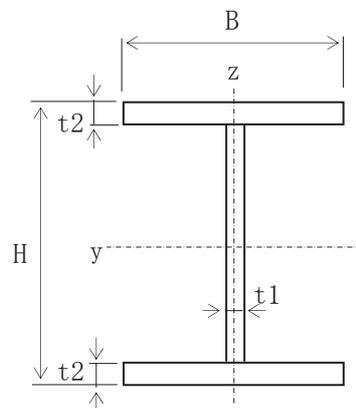
第 3.3-1 表に部材の断面寸法の一覧を示す。また、第 3.3-3 図に断面寸法の記号説明図を示す。

第 3.3-1 表 部材断面寸法

部材	記号	材質	断面寸法 (mm)				
			H	B	t1	t2	
大梁	L1	SM490A	1300	1580	32	40	
	L2	SM520B	1300	1580	40	40	
	L3	SM520B	1500	1580	40	40	
フレーム	主桁	G1	SM490A	1000	450	19	25
		G2	SM490A	1000	560	19	25
		G3	SM490A	900	450	19	25
	横補強材	C1	SM400A	400	400	19	22
		C2	SM490A	400	400	19	22
		C3	SM490A	400	400	19	25
	ブレース	B1	SS400	400	200	8	13
		B2	SM400A	400	200	9	22



(a) 大梁



(b) 主桁, 横補強材, ブレース

第 3.3-3 図 部材断面寸法の記号説明図

(3) 部材剛性

第 3.3-2 表に解析に用いる部材剛性の一覧を示す。

第 3.3-2 表 部材剛性

部材		記号	A (cm ²)	I _z (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	I _x (cm ⁴)	As _y (cm ²)	As _z (cm ²)
大梁		L1	2,045	7,020,000	5,990,000	9,300,000	1,264	780.8
		L2	2,240	8,120,000	6,230,000	10,400,000	1,264	976.0
		L3	2,400	9,020,000	8,650,000	13,000,000	1,264	1,136
フレーム	主桁	G1	405.5	38,000	671,000	686	225.0	180.5
		G2	460.5	73,200	801,000	801	280.0	180.5
		G3	386.5	38,000	528,000	663	225.0	161.5
	横補強材	C1	243.6	23,500	70,100	365	176.0	67.64
		C2	243.6	23,500	70,100	365	176.0	67.64
		C3	266.5	26,700	77,200	497	200.0	66.50
	ブレース	B1	83.37	-	-	-	-	-
		B2	120.0	-	-	-	-	-

A : 断面積

I_z : 部材 z 軸周りの断面 2 次モーメント

I_y : 部材 y 軸周りの断面 2 次モーメント

I_x : ねじり剛性

As_y : 部材 y 軸方向のせん断断面積

As_z : 部材 z 軸方向のせん断断面積

部材軸方向の定義は第 3.3-3 図に示すとおりである。

(4) 材料定数

鋼材の材料定数を第 3.3-3 表に示す。

第 3.3-3 表 鋼材の材料定数

材料	ヤング率 (N/mm ²)	ポアソン比
鋼材	2.03 × 10 ⁵	0.3

(5) ゴム支承及び可動支承

ゴム支承の水平剛性は、線形ばね要素のばね定数として与える。ゴム支承の鉛直方向は十分に剛性が高いことから固定条件としてモデル化する。ゴム支承の設計諸元を第 3.3-4 表に示す。

可動支承の結合条件は、フレームの軸方向を自由、軸直角方向と鉛直方向を固定とする。フレームの軸方向を自由とするのは、温度変化によるフレームの伸縮量を吸収することで、フレームの取付ボルトにせん断力が働かないように設計しているためである。可動支承の仕様を第 3.3-5 表に示す。

また、フレームの可動側の支承部に摩擦による水平力を分担させてフレームのゴム支承側に作用する水平力を減少させるような設計を避けるため、本来、摩擦力が移動方向と逆向きの抵抗力として作用することを利用した摩擦減衰効果があるが、摩擦減衰による地震のエネルギー吸収に期待しない保守的な設計とし、地震応答解析モデルにおける可動支承の結合条件は軸方向を自由とした。

第 3.3-4 表 ゴム支承の設計諸元

項目	大梁／ブラケット 接続部	フレーム／隔壁 接続部
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)
一次形状係数	8.33	9.17
二次形状係数	4.17	4.07
水平剛性 (kN/mm)	3.333	2.689
鉛直剛性 (kN/mm)	972	863

第 3.3-5 表 可動支承の設計仕様

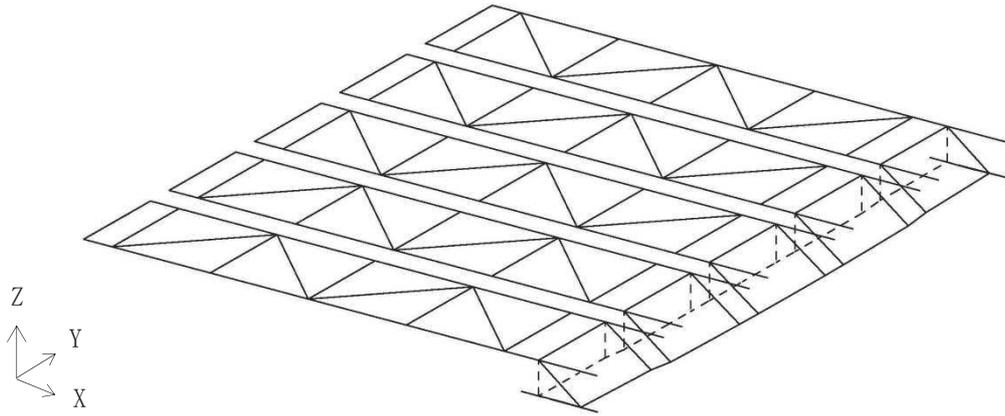
項目	材質	仕様		
		配合	ポリアミド樹脂	90%以上
すべり材	ポリアミド MC703HL		固形潤滑材	10%以下
		物性値	引張強度(N/mm ²)	60~70 ASTMD-638
			伸び(%)	15~25 ASTMD-638
			比重	1.11
			表面粗さ	Rz 25μ以下
	ステンレス SUS304 SUS316	材料規格	JIS G 4304 JIS G 4305	
		表面処理	JIS G 4305 No2B	
圧縮ゴム	クロロプレン 系合成ゴム C08	材料規格	JIS K 6383	
鋼材 (ピストン ベースポッド レール等)	SS400	材料規格	JIS G 3101	
	SM490		JIS G 3106	

3.4 固有値解析結果

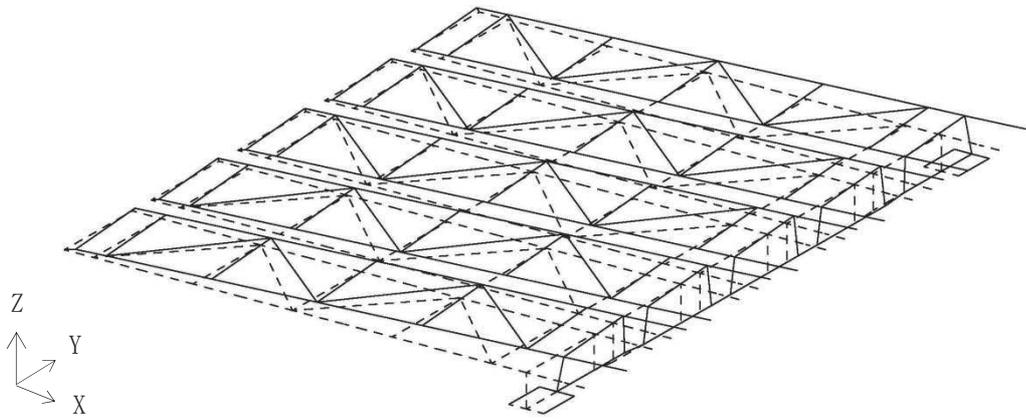
主要モードの固有周期を第3.3-6表、モード図を第3.3-4図に示す。また、スペクトルと固有周期の関係及びモード図の詳細については、添付資料3に示す。

第 3.3-6 表 固有値解析結果

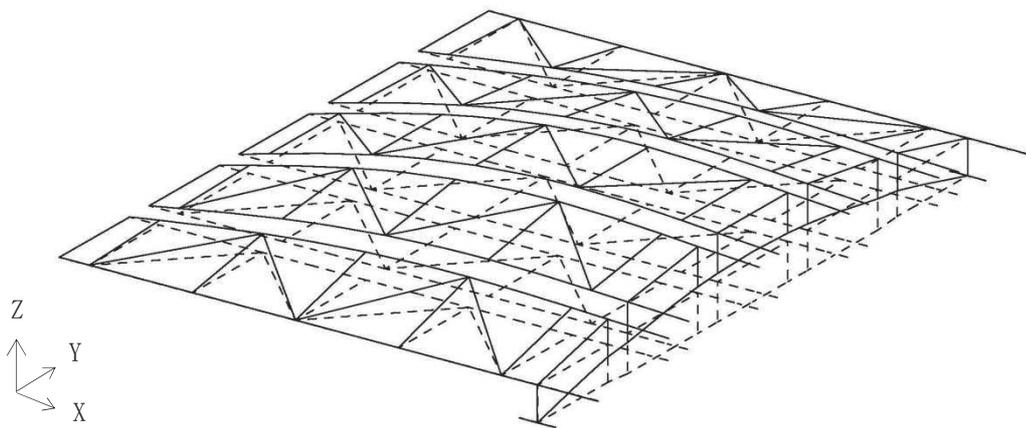
主要モード	固有周期 (秒)
大梁 水平 X 方向 1 次	0.50
大梁 水平 Y 方向 1 次	0.86
大梁 鉛直 Z 方向 1 次	0.34
フレーム 水平 X 方向 1 次	0.77
フレーム 水平 Y 方向 1 次	0.43
フレーム 鉛直 Z 方向 1 次	0.29



(a) 大梁 水平 X 方向 1 次

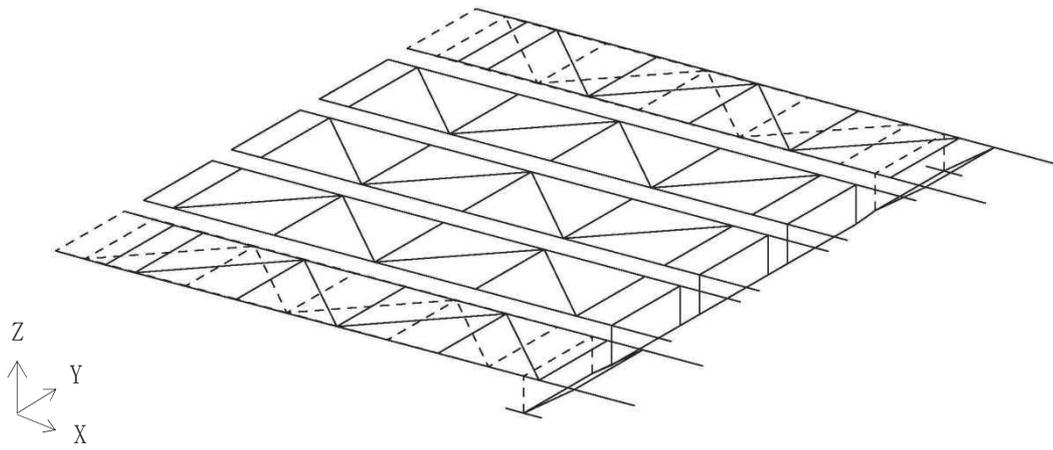


(b) 大梁 水平 Y 方向 1 次

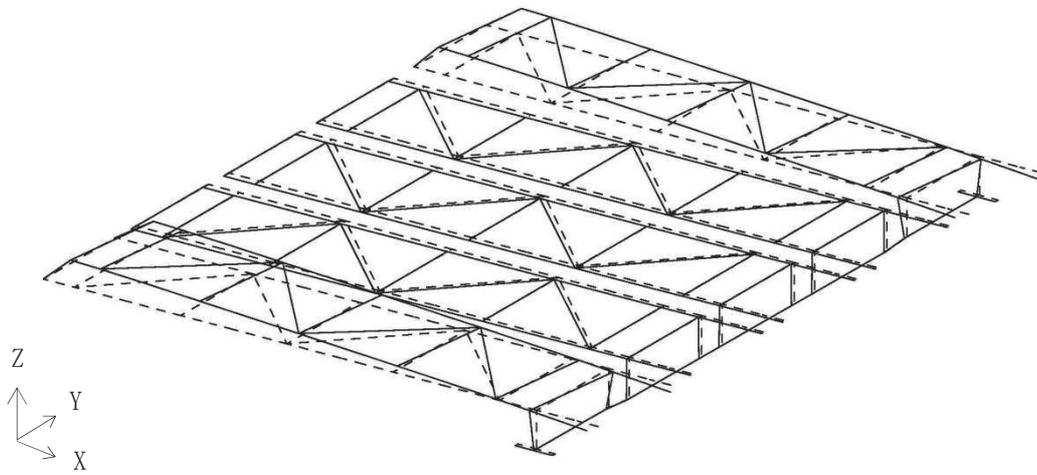


(c) 大梁 鉛直 Z 方向 1 次

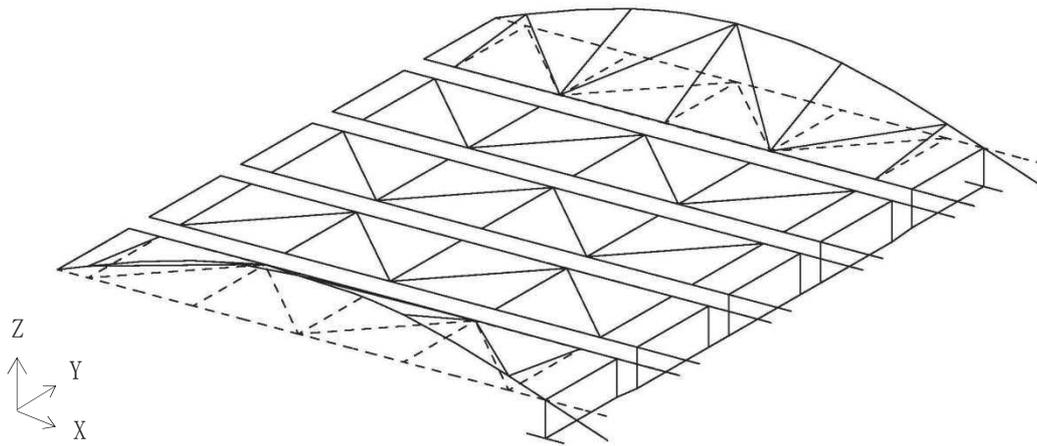
第 3.3-4 図 モード図 (1/2)



(d) フレーム 水平 X 方向 1 次



(e) フレーム 水平 Y 方向 1 次



(f) フレーム 鉛直 Z 方向 1 次

第 3.3-4 図 モード図 (2/2)

3.5 荷重の設定

(1) 荷重の設定

a. 固定荷重

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、防護板及び支承）の自重を固定荷重として考慮する。

b. 積雪荷重

地震荷重との組合せに用いる積雪荷重は以下の式より算出する。

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

ρ : 積雪の単位重量 (N/cm/m²) ($\rho = 20\text{N/cm/m}^2$)

d : 垂直積雪量 (cm) ($d=43\text{cm}$)

A : 水平投影面積 (m²)

c. 地震荷重

地震荷重は、3次元はりモデルによる地震応答解析から算出する。

(2) 荷重の組合せ

S s 地震時の評価は、竜巻防護ネットの3次元はりモデルを用いた解析に基づき、地震力及び地震力以外の荷重を組み合わせる。荷重の組合せを第3.4-1表に示す。地震荷重については、第3.4-1図に示す水平方向（X, Y 方向）及び鉛直方向（Z 方向）それぞれを考慮する。各方向の地震力の組合せはSRSS法による。

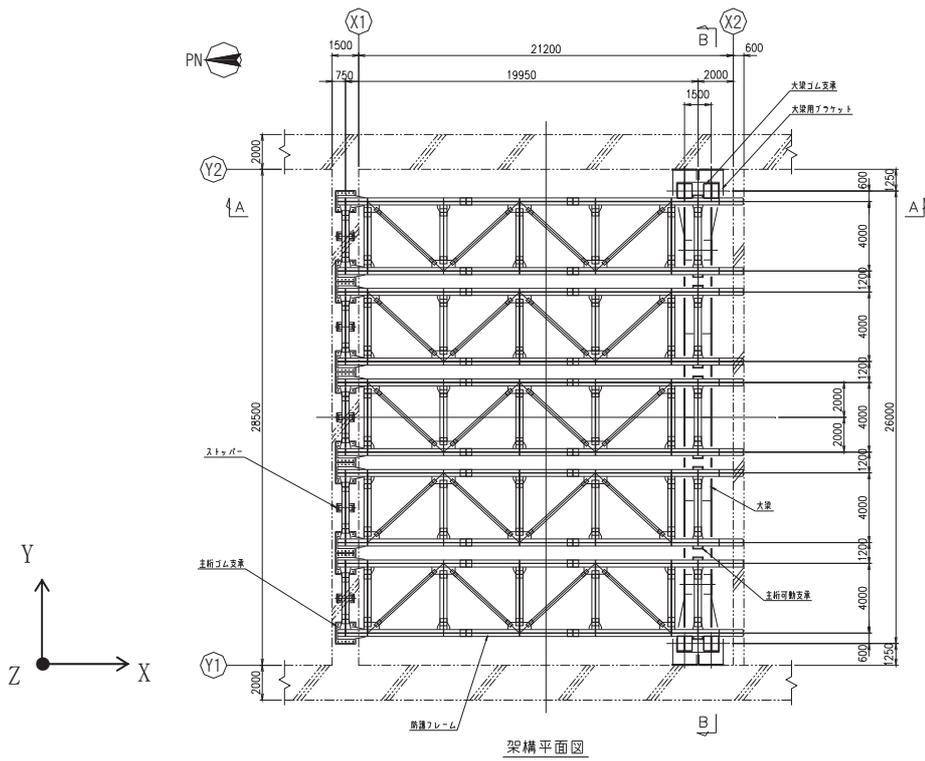
第3.4-1表 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
S s 地震時	G+S+Ks

G : 固定荷重

S : 積雪荷重

Ks : S s 地震荷重



第3.4-1図 地震荷重の作用方向の説明図

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（非常用海水ポンプ等）が損傷することを防止することが目的である。そこで、添付資料4に示す地震時における異常要因分析から波及的影響に関連する項目を検討した結果、抽出された評価対象部位について以下に示す。また、評価対象部位について第3.6-1図に模式図を示す。

(1) フレーム（主桁、横補強材、ブレース）、大梁（大梁フレーム）

フレームについては、フレームを構成する架構として、主桁、横補強材及びブレースの応力評価を実施する。また、大梁については、大梁を構成する部材として大梁フレームの応力評価を実施する。

(2) ブラケット（ブラケット本体、アンカーボルト）

大梁ゴム支承を支持するブラケットについては、ブラケット本体及びアンカーボルトの応力評価を実施する。

(3) ゴム支承（ゴム支承本体、ゴム支承取付ボルト）

フレームを支持するフレームゴム支承については、ゴム支承本体、ゴム支承取付ボルト及びアンカーボルトの応力評価を実施する。また、大梁を支持する大梁ゴム支承については、ゴム支承本体及びゴム支承取付ボルトの応力評価を実施する。なお、ゴム支承本体の評価方法については、添付資料5にその詳細を示す。

(4) 可動支承

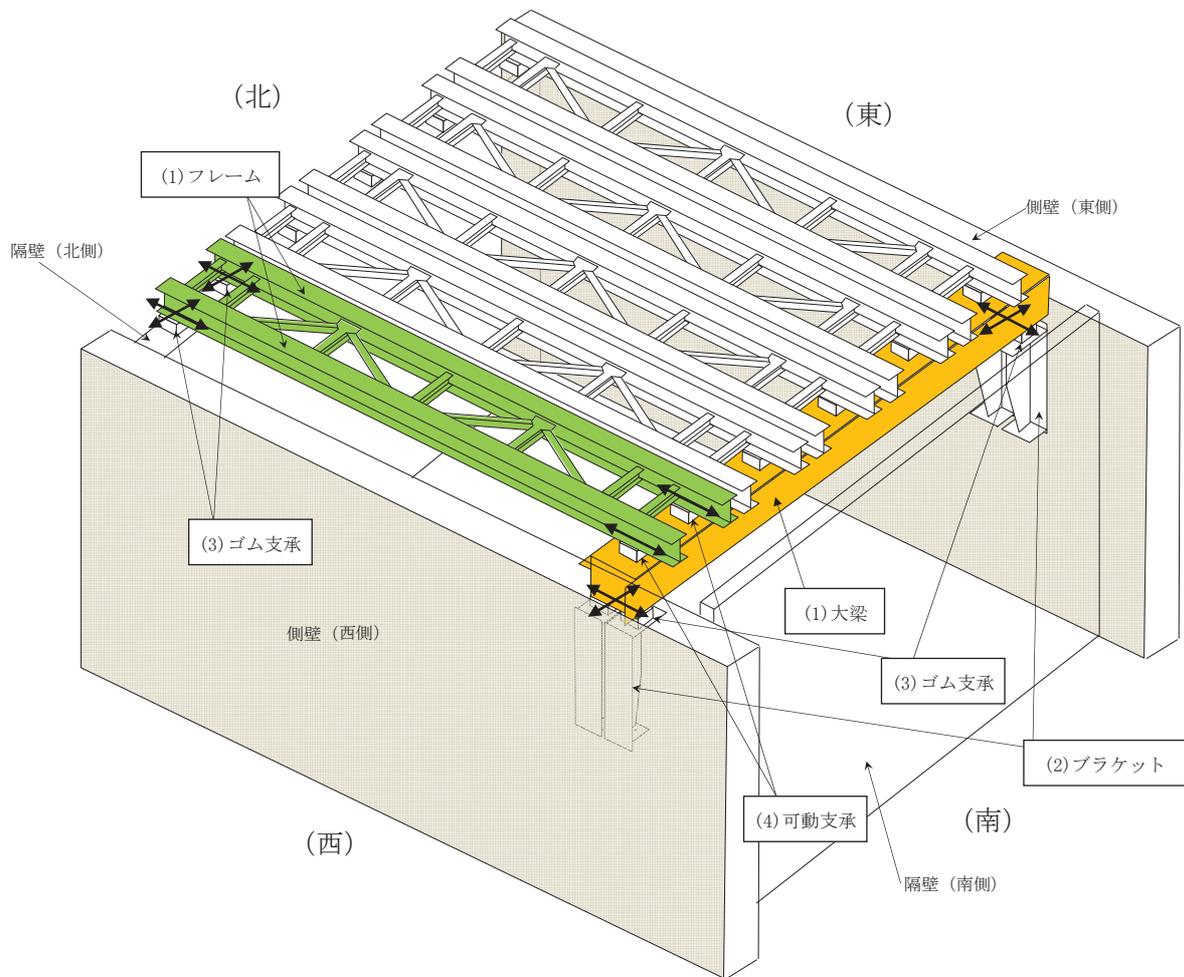
フレームと大梁とを接続する可動支承については、可動支承本体の応力評価を実施する。評価にあたっては各部位の許容応力より求められる支承全体の許容荷重を設定して評価を実施する。

また、本支承については可動方向に制限が設けられていることから、地震時に発生する移動量と制限値との比較を行い、ストッパーへの衝突が発生しないことを確認する。なお、可動支承の評価方法についても添付資料5に詳細を示す。

(5) クリアランス評価

竜巻防護ネットはゴム支承及び可動支承を採用していることから地震時の相対変位が大きくなる傾向にある。そこで、フレームが地震発生時に隣接する部材や海水ポンプ室に接触しないことを確認するため、フレームの地震時相対変位とフレーム間のクリアランス及びフレームと側壁のクリアランスとの比較を実施する。なお、鉛直方向地震力による、ゴム支承及び鋼製部材の変位に

については、変位量に比べてクリアランスが大きいことから、部材同士や部材と海水ポンプ室が衝突することはない。詳細については添付資料6に示す。



第 3.6-1 図 竜巻防護ネットの模式図

3.7 評価基準値

竜巻防護ネットは、S s 地震時において、崩壊又は落下によって海水ポンプ室内の上位クラス施設に波及的影響を及ぼさないことが要求されるため、応力解析評価等における評価基準値は以下のとおりとし、第 3.7-1 表にまとめる。

(1) フレーム，大梁

鋼製部材で構成されるフレーム及び大梁については、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し、波及的な影響を及ぼさないことを確認するため、「原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601・補-1984)」に基づいて、許容応力状態 $IV_A S$ の許容応力を適用する。

(2) ブラケット

鋼製部材で構成されるブラケットについては、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し、波及的な影響を及ぼさないことを確認するため、「原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601・補-1984)」に基づいて、許容応力状態 $IV_A S$ の許容応力を適用する。

(3) ゴム支承 (フレーム，大梁)

フレーム及び大梁を支持するゴム支承については、ゴム支承のアイソレート機能を維持する範囲であり、波及的な影響を及ぼさないことを確認するため、「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (H14.3)」に基づいて、評価基準値 (引張応力，せん断ひずみ，座屈安定性，圧縮応力) を設定する。また，取付ボルトについてはブラケットと同様に鋼製部材であることから許容応力状態 $IV_A S$ の許容応力を適用する。

(4) 可動支承

すべり機能を有する可動支承については、支承の構造健全性及び移動量を評価し波及的影響を及ぼさないことを確認する必要がある。そこで，構造健全性については，メーカーの強度試験より算出した許容応力及び「原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601・補-1984)」に基づく許容応力状態 $IV_A S$ の許容応力から支承全体の許容荷重を設定する。移動量評価については，可動限界としてストッパーまでのクリアランスを許容値として適用する。

(5) クリアランス評価

部材間の衝突や部材－海水ポンプ室側壁との衝突を防止し，波及的影響を及ぼさないことを確認するため，構造から求められるクリアランスを評価基準値として設定する。

第3.7-1表 応力解析評価における評価基準値

評価方針	地震力	部位	評価方法	評価基準値
海水ポンプ室 の上位クラス 施設に波及的 影響を及ぼさ ないこと	基準地 震動 S s	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		

3.8 各部の評価方法

(1) フレーム, 大梁及びブラケットの応力評価

フレーム, 大梁及びブラケットの断面評価は次式によって行う。

鋼材の基準強度及び式中の各許容応力の算出方法を(a)～(e)に示す。

- ・圧縮応力と部材y, z軸 (第3.3-3図参照) 周りの曲げ応力の組合せ評価

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_{by}}{f_{by}} + \frac{\sigma_{bz}}{f_{bz}} \leq 1$$

- ・せん断応力の評価

$$\tau \leq f_s$$

- 垂直応力とせん断応力の組合せ評価

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \leq f_t$$

σ_c : 圧縮応力 $\sigma_c = N/A$

N : 軸力

A : 断面積

σ_{by} : 部材y軸周りの曲げ応力 $\sigma_{by} = M_y/Z_y$

M_y : 部材y軸周りの曲げモーメント

Z_y : 部材y軸周りの断面係数

σ_{bz} : 部材z軸周りの曲げ応力 $\sigma_{bz} = M_z/Z_z$

M_z : 部材z軸周りの曲げモーメント

Z_z : 部材z軸周りの断面係数

τ : せん断応力 $\tau = Q/A$

Q : せん断力

A : せん断断面積

σ_x, σ_y : 互いに直交する垂直応力

τ_{xy} : σ_x, σ_y の作用する面内せん断応力

f_c : 許容圧縮応力

f_{by} : 部材y軸周りの許容曲げ応力

f_{bz} : 部材z軸周りの許容曲げ応力

f_s : 許容せん断応力

f_t : 許容引張応力

(a) 鋼材の基準強度

次の計算式により算出した値とする。第3.8-1表に使用鋼材の設計降伏点 S_y 及び設計引張強さ S_u を示す。

$$F = \text{MIN} (1.2S_y, 0.7S_u)$$

F : 鋼材の基準強度 (MPa)

S_y : 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005/2007)」に規定される鋼材の設計降伏点 (MPa)

S_u : 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005/2007)」に規定される鋼材の設計引張強さ (MPa)

第3.8-1表 使用鋼材の設計降伏点及び設計引張強さ

鋼材の種類	評価用温度 (°C)	板厚 t (mm)	設計降伏点 S _y (MPa)	設計引張強さ S _u (MPa)
SS400, SM400A	40	t ≤ 40	235	400
SM490A	40	t ≤ 40	315	490
SM520B	40	t ≤ 40	355	520

(b) 許容引張応力

次の計算式により算出した値とする。

$$f_t = 1.5 \cdot \frac{F}{1.5}$$

f_t : 許容引張応力 (MPa)

(c) 許容せん断応力

次の計算式により算出した値とする。

$$f_s = 1.5 \cdot \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

f_s : 許容せん断応力 (MPa)

(d) 許容圧縮応力

次の計算式により算出した値とする。

i) 圧縮材の有効細長比が限界細長比以下の場合

$$f_c = 1.5 \cdot \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{v}$$

$$\lambda = \frac{\ell_k}{i}, \quad \Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F}}, \quad v = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

f_s : 許容圧縮応力 (MPa)

λ : 有効細長比

Λ : 限界細長比

v : 安全率

ℓ_k : 座屈長さ (mm)

i : 座屈軸についての断面二次半径 (mm)

E : 縦弾性係数 (ヤング係数) (MPa)

ii) 圧縮材の有効細長比が限界細長比を超える場合

$$f_c = 1.5 \cdot 0.277F \left(\frac{\Lambda}{\lambda} \right)^2$$

(e) 許容曲げ応力

次の計算式により算出した値とする。

- i) 荷重面内に対称軸を有する圧延形鋼及び溶接組立鋼であって強軸周りに曲げを受けるもの（箱形断面のものを除く）。

次の2つの計算式により計算した値のうちいずれか大きい方の値又は f_t のいずれか小さい方の値とする。

$$f_b = 1.5 \cdot \left\{ 1 - 0.4 \frac{\ell_b^2}{C \lambda^2 i^2} \right\} f_t$$

$$f_b = 1.5 \cdot \frac{0.433EA_f}{\ell_b h}$$

ここに、

f_b : 許容曲げ応力 (MPa)

ℓ_b : 圧縮フランジの支点間距離 (mm)

h : はりのせい (mm)

A_f : 圧縮フランジの断面積 (mm^2)

i : 圧縮フランジとはりのせいの6分の1とからなるT型断面のウェブ軸周りの断面二次半径 (mm)

C : 次の計算式により計算した値又は2.3のうちいずれか小さい方の値（ただし、座屈区間中間の強軸まわりの曲げモーメントが M_1 より大きい場合は、1とする）

$$c = 1.75 + 1.05 \left(\frac{M_2}{M_1} \right) + 0.3 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2$$

M_1, M_2 : それぞれ座屈区間端部における強軸周りの曲げモーメント。この場合において、 M_2/M_1 は1より小さいものとし、単曲率の場合を負に、複曲率の場合を正とする。

- ii) 荷重面内に対称軸を有する圧延形鋼及び溶接組立鋼であって弱軸周りに曲げを受けるもの、面内に曲げを受けるガゼットプレート、曲げを受ける鋼管及び箱形断面の場合は f_t とする。

(2) ゴム支承の評価

(a) せん断ひずみ

ゴム支承のせん断ひずみは次式によって評価する。

$$\gamma_{se} = \frac{\Delta l_e}{\Sigma t_e} \leq \gamma_{ea}$$

γ_{se} : 地震時のせん断ひずみ

Δl_e : 地震時の移動量(mm)

Σt_e : 総ゴム厚(mm)

γ_{ea} : 地震時の許容せん断ひずみ

(b) 引張応力

ゴム支承の引張応力は次式によって評価する。

$$\sigma_{te} = \frac{R_u}{A_{te}} \leq \sigma_{ta}$$

σ_{te} : 地震時の引張応力

R_u : 上向きの反力

A_{te} : 地震時の移動量を控除した引張りに有効な面積

$$A_{te} = A_e - B \cdot \Delta l_e$$

(A_e : ゴム支承本体の側面被覆ゴムを除く面積, B : 有効幅)

σ_{ta} : 引張応力の許容値

(c) 圧縮応力 (座屈安定性)

ゴム支承の圧縮応力は次式によって評価する。

$$\sigma_{ce} = \frac{R_L}{A_{ce}} \leq \sigma_{cra}$$

σ_{ce} : 地震時の圧縮応力

R_L : 下向きの反力

A_{ce} : 地震時の移動量を控除した圧縮に有効な面積

$$A_{ce} = A_e - B \cdot \Delta l_e$$

(A_e : ゴム支承本体の側面被覆ゴムを除く面積, B : 有効幅)

σ_{cra} : 圧縮応力の許容値

(3) 可動支承の強度評価

地震時に可動支承部の可動直角方向(拘束方向)に負荷する荷重が、支承の各部位の構造強度より算出された許容荷重以下であることを確認する。詳細は添付資料5に示す。

(4) ボルト材の応力評価

ボルトの呼び径断面に生じる応力は、次の値を超えないこととする。

(a) 許容引張応力

次の計算式により算出した値とする。

$$f_t = 1.5 \cdot \frac{F}{2}$$

f_t : 許容引張応力 (MPa)

F : 3.8(1)(a)に定めるところによる。 S_y , S_u はJIS規格による降伏点, 引張強さとする。ボルトの使用材料と降伏点及び引張強さは第3.8-2表のとおりである。

第3.8-2表 ボルトの使用材料とJIS規格による降伏点及び引張強さ

部位	材料	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)
アンカーボルト	SD390	390	560
ゴム支承取付ボルト	JIS 強度区分 8.8	640	800

(b) 許容せん断応力

次の計算式により算出した値とする。

$$f_s = 1.5 \cdot \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$$

f_s : 許容せん断応力 (MPa)

(c) 引張応力とせん断応力を同時に受けるボルトの許容引張応力

せん断応力と引張応力を同時に受けるボルトの許容引張応力 f_{ts} は、次のいずれか小さい方の値とする。

(i) $f_{ts} = 1.4f_{to} - 1.6\tau$

(ii) $f_{ts} = f_{to}$

f_{ts} : せん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力 (MPa)

f_{to} : (a)で規定するボルトの引張応力 (MPa)

τ : ボルトに作用するせん断応力 (MPa)

(5) 各部のクリアランス

各部のクリアランス評価においては、フレーム及び大梁の移動量が第3.8-2表に示す許容値以下であることを確認するため、地震応答解析により求められるフレーム及び大梁の移動量と部材間のクリアランスを比較する。また、可動支承の移動量(フレームと大梁の相対変位)と可動支承の移動可能量とを比較

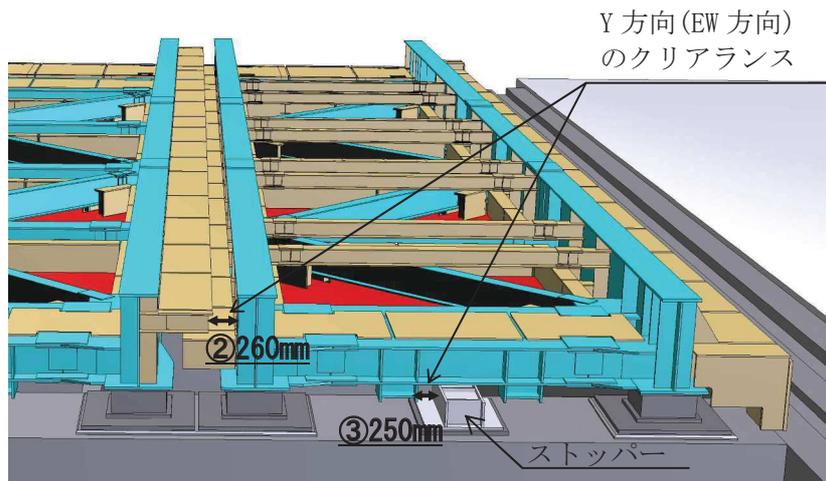
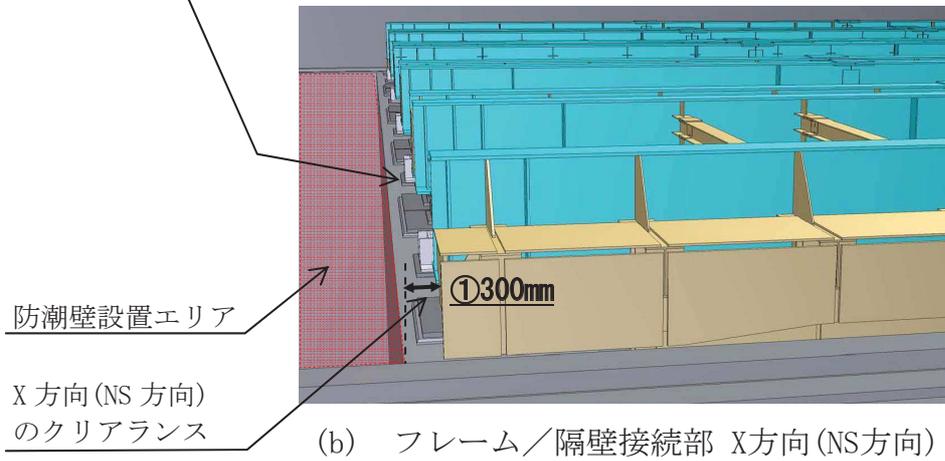
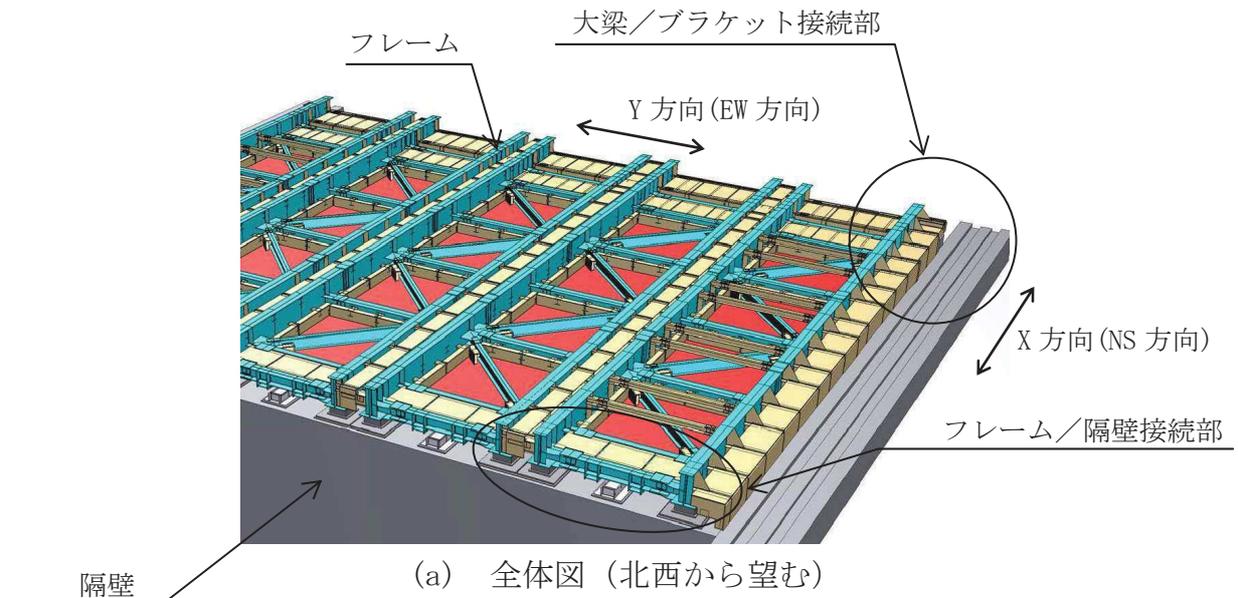
して評価する。評価箇所の模式図を第3.8-1図に示す。設定した許容値以上のクリアランスを確保するように部材配置を設計する。

なお、許容値は各接続部におけるクリアランス値を比較して、最も狭くなっている箇所のクリアランス値を代表として設定する。

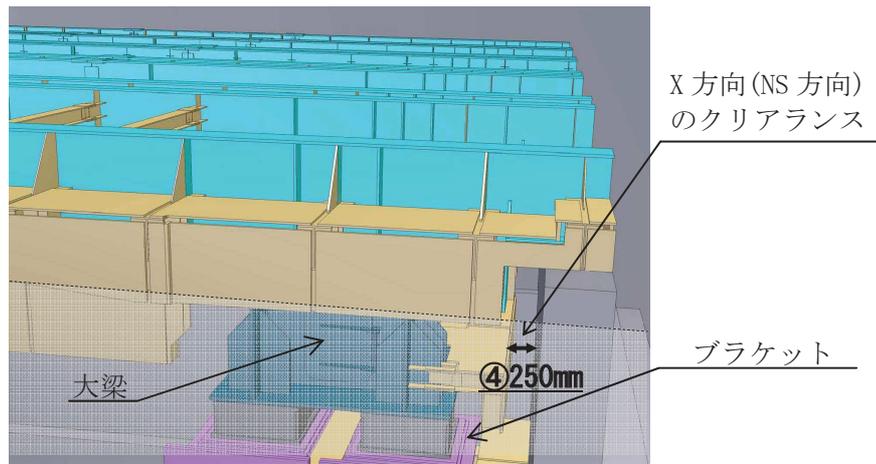
第3.8-2表 フレーム及び大梁の移動量の許容値

位置*	移動量の許容値 (mm)		許容値の根拠
	X方向 (NS方向)	Y方向 (EW方向)	
フレーム／隔壁接続部 ①フレーム－防潮壁 ②フレーム－フレーム ③フレーム－ストッパー	300	250	部材間のクリアランス
大梁／ブラケット接続部 ④フレーム－隔壁 ⑤フレーム－門型クレーン	250	350	
フレーム／大梁接続部 ⑥フレーム－大梁	400	—	可動支承の移動可能量

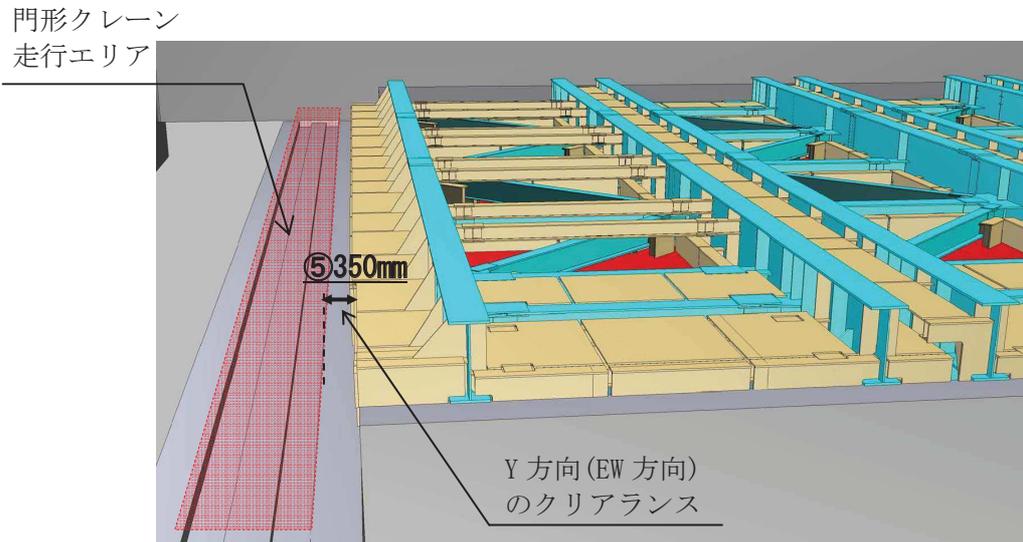
* 表中の番号は第3.8-1図中の番号と対応



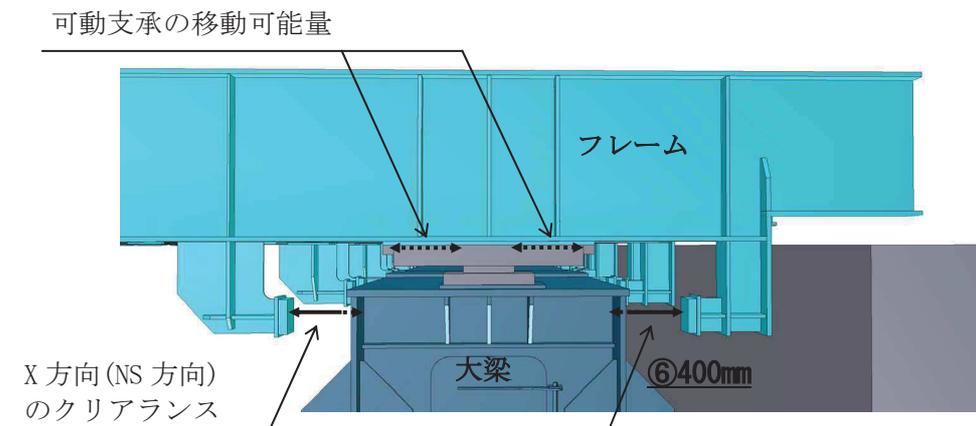
第3.8-1図 移動量の評価箇所(1/2)



(d) 大梁／ブラケット接続部 X方向(NS方向)



(e) 大梁／ブラケット接続部 Y方向(EW方向)



(f) フレーム／大梁接続部 X方向(NS方向), 可動支承の移動可能量

第3.8-1図 移動量の評価箇所 (2/2)

4. 評価結果

竜巻防護ネットの耐震評価結果を第4-1表に示す。各部材の発生応力が評価基準値を下回ること、ゴム支承に発生するせん断ひずみが許容値を下回ること、フレーム及び大梁に発生する移動量がクリアランスの許容値以下に収まることを確認した。

第4-1表 耐震評価結果*¹

評価対象		評価項目	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)	裕度	
フレーム	主桁	組合せ	225	343	1.52	
	横補強材	組合せ	167	343	2.05	
	ブレース	圧縮応力	42	91	2.16	
大梁	大梁フレーム	組合せ	253	364	1.43	
ブラケット	ブラケット本体	組合せ	153	343	2.24	
	アンカーボルト	引張応力	146	275	1.88	
大梁ゴム支承	ゴム支承本体	ゴム本体	せん断ひずみ* ²	126	250	1.98
			圧縮応力	4.0	23.1	5.77
		引張応力	0.9	2.0	2.22	
	内部鋼板	引張応力	43	280	6.51	
	ゴム支承取付ボルト	引張応力	116	420	3.62	
フレームゴム支承	ゴム支承本体	ゴム本体	せん断ひずみ* ²	140	250	1.78
			圧縮応力	2.5	29.8	11.92
		引張応力	0.7	2.0	2.85	
	内部鋼板	引張応力	24	280	11.66	
	ゴム支承取付ボルト	引張応力	122	420	3.44	
	アンカーボルト	引張応力	116	291	2.50	
可動支承	構造部材	水平荷重* ³	363	600	1.65	
		鉛直荷重* ³	276	350	1.26	
大梁／ブラケット 接続部	X方向	移動量* ⁴	150	250	1.66	
	Y方向	移動量* ⁴	210	350	1.66	
フレーム／隔壁 接続部	X方向	移動量* ⁴	169	300	1.77	
	Y方向	移動量* ⁴	119	250	2.10	
フレーム／大梁 接続部	X方向	移動量* ⁴	225	400	1.77	

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

*2 発生値，許容基準値は無次元

*3 発生値，許容基準値の単位（kN）

*4 発生値，許容基準値の単位（mm）

注) 上表の評価結果はゴム支承のせん断剛性が設計値の場合の値である。

また，評価項目については裕度が小さい項目を代表して記載している。

5. まとめ

竜巻防護ネットの波及的影響を防止するため、基準地震動 S_s に対して損傷しない構造が要求されることから、現在検討している耐震設計の方針と、工事計画認可申請で提示する耐震評価の見通しについて検討した。

- ・ 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。
- ・ 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 の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。

以上の検討結果より、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。

今後の工認段階では、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。評価の際には、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。

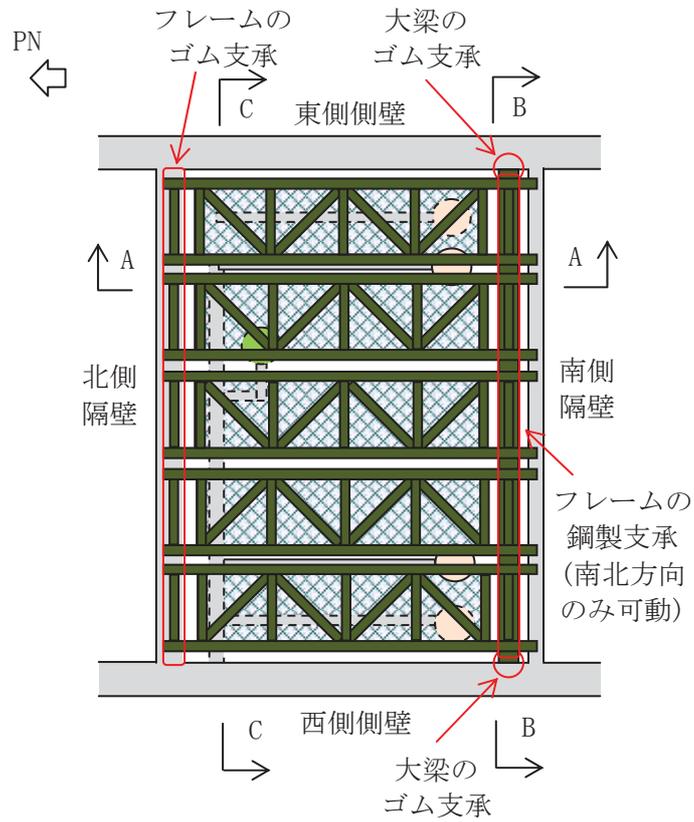
ゴム支承の構造検討について

1. 概要

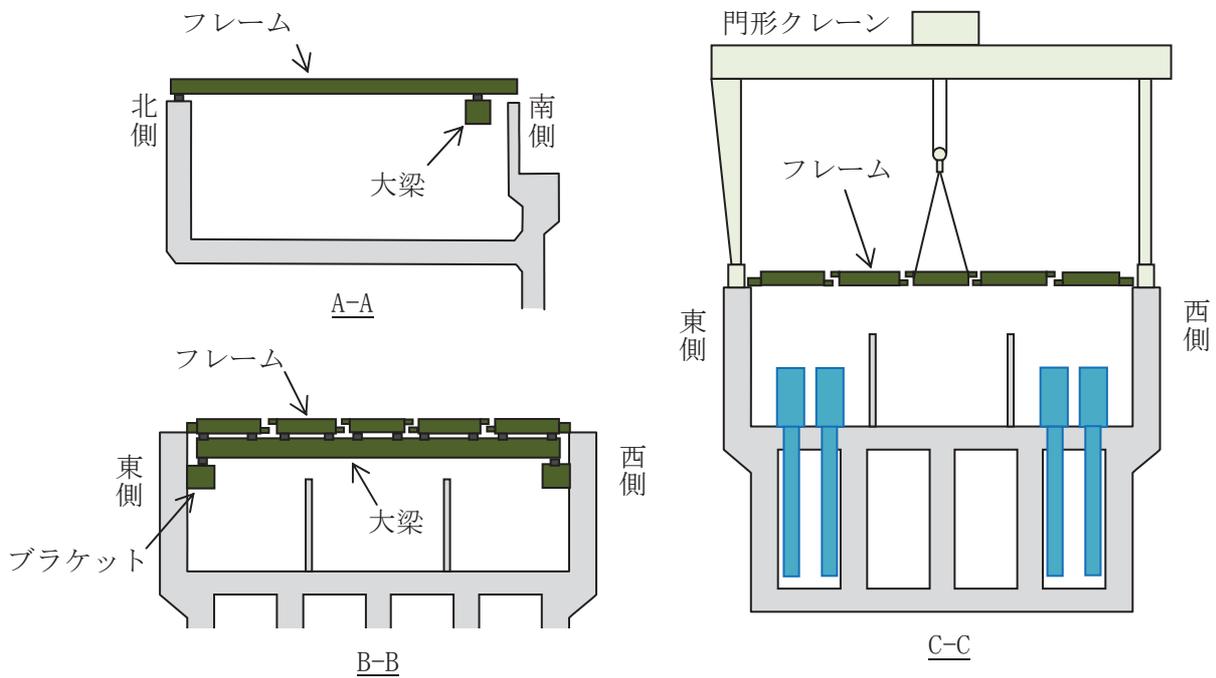
竜巻防護ネットのフレーム及び大梁の支持部に「地震時水平力分散型ゴム支承」を採用している。竜巻防護ネットの構造検討、ゴム支承の採用理由、ゴム支承の設計に係る適用規格について以下に示す。なお、構造のイメージについては添付 1-1 図に示す。

2. 竜巻防護ネットの構造検討

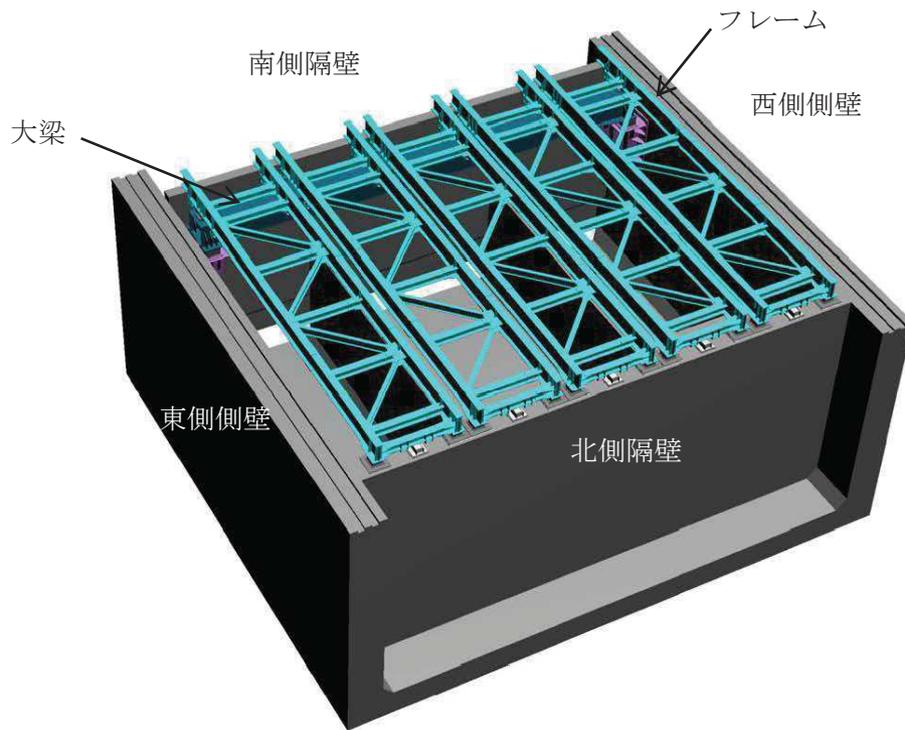
- (1) 海水ポンプ室の東側と西側の側壁上面を走行する門型クレーンによって防護フレームの取外しができること、また、南側の隔壁の壁厚が比較的薄いことを考慮し、東側及び西側の側壁側面と北側の隔壁上面で竜巻防護ネットからの荷重を受ける構造とする。
- (2) 防護フレームは、非常用海水ポンプのメンテナンス及び門型クレーンの吊上の能力を考慮して5分割とし、南側の隔壁付近の東西側壁の側面に取付けたブラケットを介して設置した大梁とその反対側に位置する北側隔壁で支持される構造とする。
- (3) 自重、温度変化による熱膨張等により、フレーム支持点に回転拘束によるモーメントや水平変位拘束による水平力が発生していると、メンテナンス時のフレーム取付ボルトが取り外せなくなるため、回転、水平変位に追従する機能を有する構造とする。
- (4) 大梁の温度伸縮に追従でき、コンクリート壁に過大な水平力が作用させないため、ゴム支承を海水ポンプ室の東側、西側、北側の3面のコンクリート壁に配置し、ゴム支承のせん断変形により地震時の水平力を効果的に分散させる構造とする。



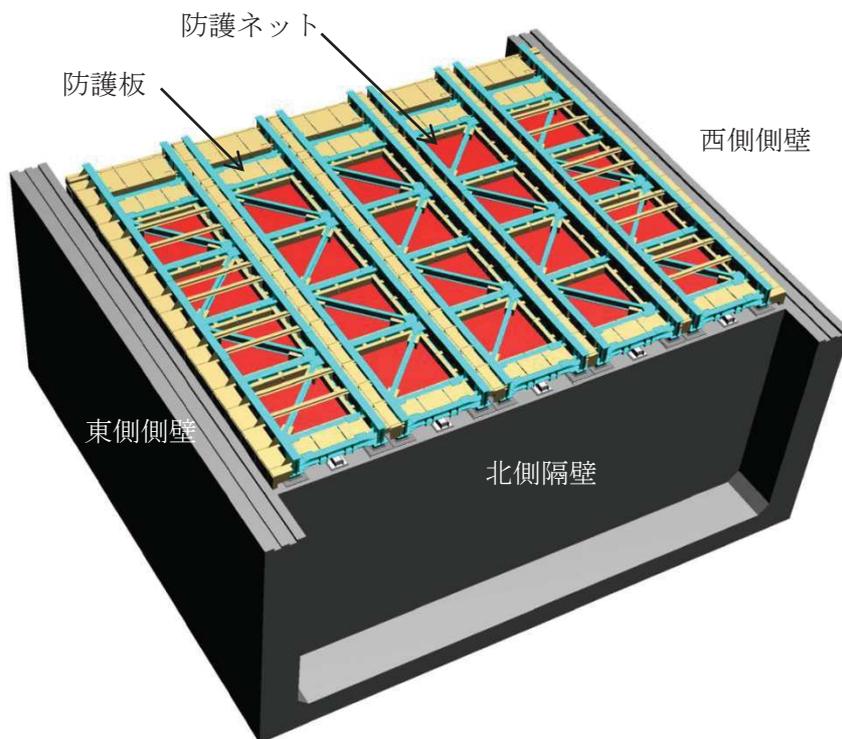
ネットイメージ図(平面図)
【ゴム支承採用案】



添付 1-1 図 竜巻防護ネットのイメージ図 (1/2)



(a) 防護ネット（防護板を除く）



(b) 防護ネット（防護板を含む）

添付 1-1 図 竜巻防護ネットのイメージ図 (2/2)

3. 道路橋用ゴム支承の採用理由

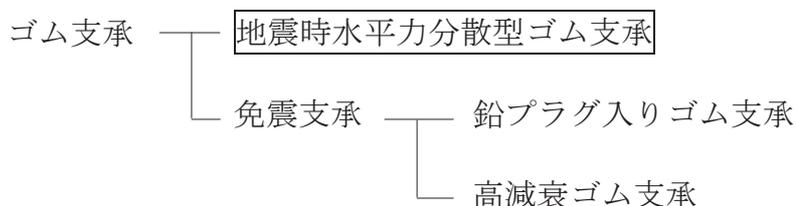
竜巻防護ネットは既設の海水ポンプ室の上部に設置するため、設置スペースや地震時の発生変位に対して制約がある。そのため、一般的な建築用免震支承より水平剛性を高くする必要がある。建築用免震支承のゴム材料のせん断弾性係数は0.4～0.6N/mm²程度である。この材料を適用した場合、地震荷重による移動量が過大となり設計を成立させることが困難となる。したがって、本構造ではせん断弾性係数が0.8～1.2N/mm²程度のゴム材料を使用している道路橋用ゴム支承を採用した。その他、使用環境及び使用条件についても検討し、道路橋用ゴム支承の採用に至っている。

道路橋用ゴム支承は、屋外での使用を前提としていることから、屋内（建物下）の比較的整備された環境内に設置されることを想定している建築用ゴム支承よりも、耐久性の観点から屋外に設置される本設備への使用に適している。また、本設備は橋梁の鋼桁形式で、昼夜の温度変化により鋼桁部材が伸縮しそれに追従してゴム支承が繰り返しの変形を受ける。道路橋用ゴム支承は、このような温度変化による鋼桁部材の伸縮を想定した繰り返し変形を受ける疲労耐久性の検証がなされている。

建築用ゴム支承は、本設備と比較すると非常に重量の大きな建築物を支持することを想定しており、一層あたりのゴム厚を薄くすることで鉛直支持力を高めている。道路橋用ゴム支承は、建築用ゴム支承と比較して想定している鉛直支持力は小さく、1層あたりのゴム厚を厚くし鉛直支持力よりも回転追随性を高めていることが特徴である。本設備は、一般の免震建築物と比べて大幅に重量が小さく、使用面圧は建築用ゴム支承の製品推奨面圧と比べ非常に小さい。よって、本設備に建築用ゴム支承を適用した場合には、設計で期待した水平剛性が得られない可能性がある。道路橋用ゴム支承の場合には、製品検査時の性能試験において使用条件の面圧下で設計想定内の水平剛性が得られることを確認することとされており、過去の実績においても安定した水平剛性が得られている。

4. ゴム支承の種類

耐震性向上を目的に設置される道路橋用ゴム支承には以下の種類がある。¹⁾



地震時水平力分散型ゴム支承はゴム支承のせん断剛性を利用して、上部構造の慣性力を複数の下部構造に分散させるものである。免震支承はゴム支承本体の水平剛性を利用したアイソレート機能とエネルギー吸収性能による減衰機能を併せ持つ

た支承である。代表的な免震支承としては、鉛プラグ入りゴム支承と高減衰ゴム支承がある。地震時水平力分散型ゴム支承は免震支承で期待されるようなエネルギー吸収性能による減衰機能はほとんどない。免震支承の場合には強い非線形履歴特性とひずみ依存性を有するが、地震時水平力分散型ゴム支承の場合には、設計で用いる範囲ではひずみ依存性のない線形部材としてモデル化できる。

本構造では、上部構造の地震時水平力の分散と適度な長周期化を目的としており、免震支承が有する大きい非線形履歴特性によるエネルギー吸収性能には期待しない地震時水平力分散型ゴム支承を採用した設計とする。

5. 適用規格

道路橋用ゴム支承は、「道路橋示方書・同解説 I 共通編, V耐震設計編（平成 14 年 3 月）」に従い、「道路橋支承便覧(平成 16 年 4 月)」に則り、設計・製作される。ゴム支承の特性、評価式及び許容値は同規格・基準に従う。その他の規格・基準類として「道路橋免震用ゴム支承に用いる積層ゴム-試験方法(JIS K 6411-2012)」及び「原子力発電所免震構造設計技術指針(JEAG 4614-2013)」を参考に各種依存性試験及び性能試験を実施し、ゴム支承の特性及び許容値の妥当性を検証する。

参考文献

- 1) 道路橋支承便覧(平成 16 年 4 月 社団法人 日本道路協会)

スペクトルモーダル解析の適用性及び減衰定数の設定について

1. スペクトルモーダル解析の適用性

竜巻防護ネットに適用しているゴム支承は、地震時の水平力に対してほぼ線形的な変形特性を有していることから線形ばね要素でモデル化し、鋼製部材も弾性設計として線形はり要素でモデル化しているため、地震応答解析が線形解析となることから、動的応答の算出方法としてスペクトルモーダル解析を適用している。

なお、海水ポンプ室に設置される他の設備も同様にスペクトルモーダル解析を適用している。また、設計用床応答スペクトルは地盤物性や剛性等の床応答スペクトルに変動を与える因子の影響を考慮し、周期方向に±10%拡幅している。

スペクトルモーダル解析とは、多自由度系モデルを等価な一自由度系モデルの振動モードに分解し、振動モードごとに応答スペクトルより最大応答を求め、個々の振動モードの寄与率を考慮して各モードの最大応答を重ね合わせることで多自由度系モデルの最大応答を求める手法である。各モードの最大応答が同時刻に発生することは考えにくいため、各モードの重ね合わせには SRSS 法を用いている。

スペクトルモーダル法の解析手順は以下のとおりである。

- ①固有値解析により振動モードごとの固有周期を求める。
- ②振動モードの固有周期と応答スペクトルより、その振動モードの最大応答を求める。
- ③個々の振動モードの寄与率を表す刺激係数を考慮し、各次の振動モードの応答を重ね合わせ、全体系の最大応答を求める。

2. 減衰定数の設定について

竜巻防護ネットの減衰定数は水平方向を 4.0%、鉛直方向を 2.0%としている。鉛直方向については、竜巻防護ネットがボルト構造物であることから、原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601) に基づき 2.0%と設定している。一方、水平方向については、固有値解析結果より水平方向の主要モードにおいては 4.0%以上のモード減衰定数が得られることを確認していることから、保守性を考慮して 4.0%の設定としている。

固有値解析では、各構造要素に減衰定数を設定 (鋼製部材 2.0%、ゴム支承 4.5%*) し、振動モードごとの減衰定数をひずみエネルギー比例型減衰法により求める。なお、ひずみエネルギー比例型減衰法は、構造物を構成する各構造要素で異なる減衰定数を設定した場合に、各次の振動モードの減衰定数をひずみエネルギーを重みとしてつけた加重平均として与えるものである。

本条件で実施した固有値解析結果については添付 2-1 表に示すとおり、水平方向

の主要モードでは全て 4.0%以上のモード減衰が得られていることが分かる。

- * ゴム支承の各種依存性を考慮した試験結果においておおむね 5.0%以上の減衰定数が得られていることから（添付 5-8 図参照）、保守的に試験結果の下限值を 0.5%単位に切り下げ、4.5%の減衰定数を設定した。

添付 2-1 表 固有値解析結果

次数	振動数 (Hz)	周期T (s)	刺激係数			有効質量比			減衰定数 h	備考
			β_x	β_y	β_z	X	Y	Z		
1	1.170	0.855	0.000	1.314	0.000	0.0%	81.8%	0.0%	0.0448	大梁 水平Y方向 1次
2	1.297	0.771	1.004	0.000	0.000	36.9%	0.0%	0.0%	0.0449	フレーム(FR1,FR5) 水平X方向 1次 (FR1とFR5が同位相)
3	1.298	0.771	0.000	-0.098	0.000	0.0%	0.4%	0.0%	0.0449	フレーム(FR1,FR5) 水平X方向 1次 (FR1とFR5が逆位相)
4	1.431	0.699	1.001	0.000	0.000	15.2%	0.0%	0.0%	0.0449	フレーム(FR3) 水平X方向 1次
5	1.433	0.698	-1.002	0.000	0.000	30.3%	0.0%	0.0%	0.0449	フレーム(FR2,FR4) 水平X方向 1次 (FR2とFR4が同位相)
6	1.433	0.698	0.000	0.001	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	0.0449	フレーム(FR2,FR4) 水平X方向 1次 (FR2とFR4が逆位相)
7	2.000	0.500	1.061	0.000	0.000	17.6%	0.0%	0.0%	0.0428	大梁 水平X方向 1次
8	2.268	0.441	0.025	0.000	-0.006	0.0%	0.0%	0.0%	0.0437	フレーム(FR1,FR5) 水平Y方向 1次 (FR1とFR5が逆位相)
9	2.305	0.434	0.000	-0.660	0.000	0.0%	4.2%	0.0%	0.0437	フレーム(FR1,FR5) 水平Y方向 1次 (FR1とFR5が同位相)
10	2.502	0.400	0.001	-0.053	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	0.0437	フレーム(FR2,FR3,FR4) 水平Y方向 1次
11	2.505	0.399	-0.001	0.000	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	0.0437	フレーム(FR2,FR4) 水平Y方向 1次
12	2.571	0.389	0.000	0.940	0.000	0.0%	13.6%	0.0%	0.0438	フレーム(全体) 水平Y方向 1次
13	2.959	0.338	0.000	0.000	1.428	0.0%	0.0%	61.7%	0.0200	大梁 鉛直Z方向 1次
14	3.281	0.305	0.000	0.000	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	0.0447	大梁 水平X方向 2次
15	3.425	0.292	0.000	0.000	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	0.0200	主桁(G1R, G5L) 鉛直Z方向 1次 (G1RとG5Lが逆位相)
16	3.425	0.292	0.000	0.000	1.150	0.0%	0.0%	11.9%	0.0200	主桁(G1R, G5L) 鉛直Z方向 1次 (G1RとG5Lが同位相)
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴

* 着色部は水平方向の変形モードを示す。

設計用床応答スペクトル及びモード図について

解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s の応答スペクトルと、海水ポンプ室ピット壁の床応答から作成した設計用床応答スペクトル(周期軸±10%拡幅)を添付 3-1 図に示す。添付 3-1, 2 図には竜巻防護ネットの減衰定数である水平方向 4.0%, 鉛直方向 2.0%の応答スペクトルを示している。また、応答スペクトル図では、フレーム及び大梁の主要な振動モードの固有周期を縦破線で示し各基準地震動 S_s の応答スペクトルを重ね合わせて比較する。

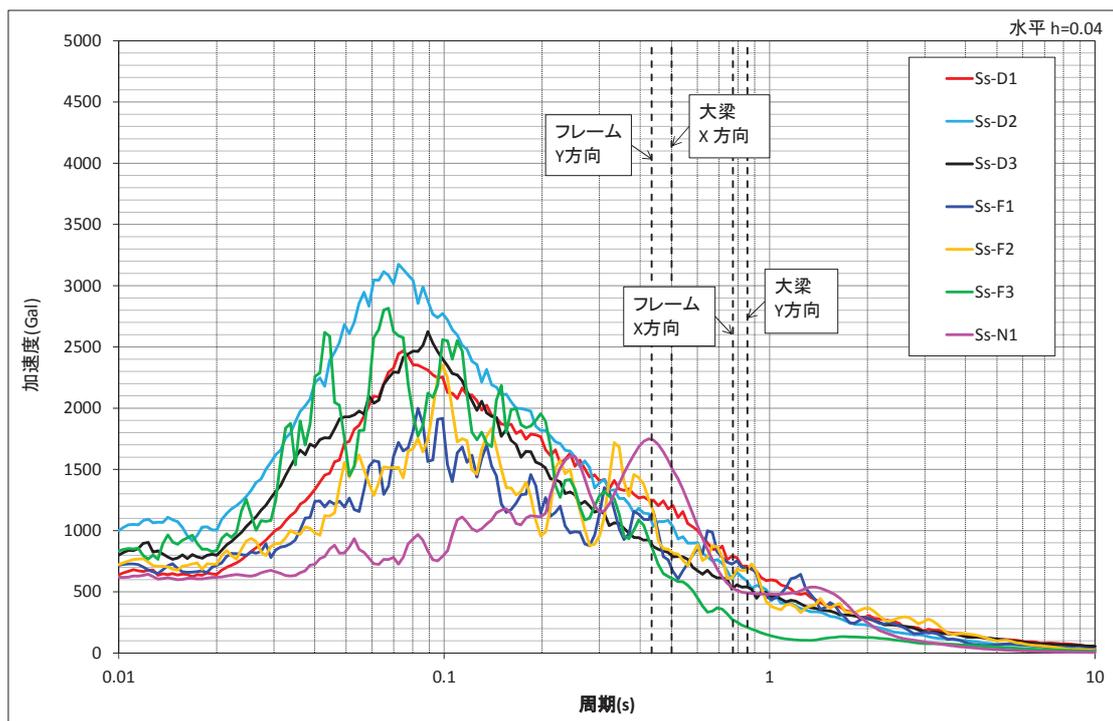
竜巻防護ネットの固有周期は、1次モードで最長 0.86 秒(大梁, 水平 Y 方向)であり、原子力発電所免震構造設計技術指針(JEAG4614-2013)に記載されている免震の一般的な固有周期の範囲である 2~4 秒に比べ、十分に短周期側の構造となることから、原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG4601)に基づき、基準地震動 S_s に対する耐震設計を行う。

本評価で使用する竜巻防護ネットの解析モデルについて、添付 3-1 表に固有値解析結果を、添付 3-3 図にモード図を示す。各モードのうち特徴的な挙動が確認されているモードについて以下に解説する。

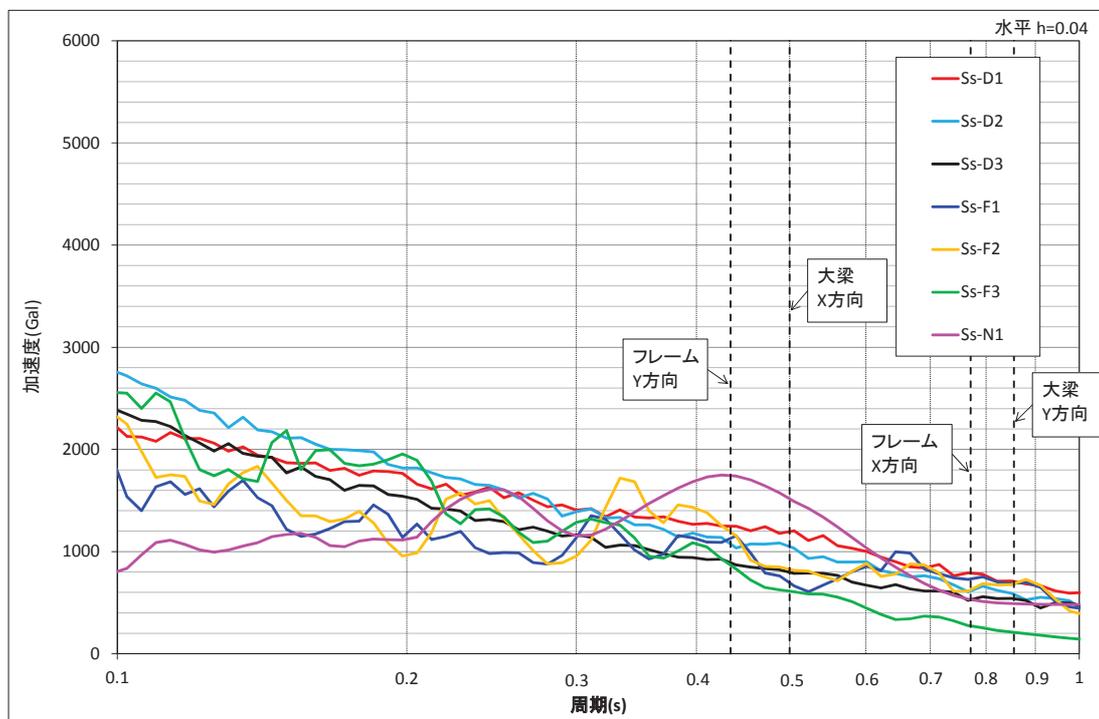
- ▶ 1次モード：大梁のゴム支承が Y 方向に変形するモード
- ▶ 2次モード：両端のフレーム (FR1, 5) が中央 3 枚 (FR2, 3, 4) のフレームよりも質量が大きいため、FR1, 5 のゴム支承のみが X 方向に変形するモード
- ▶ 3次モード：2次モードの逆位相モード
- ▶ 4次モード：中央のフレーム (FR3) と隣接のフレーム (FR2, 4) は防護板設置の関係上形状が異なる。そのため、FR3 が FR2, 4 より質量が若干重いことから、中央のフレームのゴム支承のみが X 方向に変形するモード
- ▶ 5次モード：FR2, 3 のゴム支承が X 方向に変形するモード
- ▶ 6次モード：5次モードの逆位相モード
- ▶ 7次モード：大梁のゴム支承が X 方向に変形するモード
- ▶ 8次モード：FR1, 5 のゴム支承が逆位相で Y 方向に変形するモード
- ▶ 9次モード：FR1, 5 のゴム支承が Y 方向に変形するモード
- ▶ 10次モード：FR2, 3, 4 のゴム支承が Y 方向に変形するモードで FR2, 4 と FR3 が逆位相となるモード
- ▶ 11次モード：FR2, 4 のゴム支承が逆位相で Y 方向に変形するモード
- ▶ 12次モード：全フレームのゴム支承が Y 方向に変形するモード
- ▶ 13次モード：大梁が Z 方向に変形するモード

- ▶ 14 次モード：大梁のゴム支承が逆位相で変形するモード
- ▶ 15 次モード：FR1, 5 が逆位相で Z 方向に変形するモード
- ▶ 16 次モード：15 次モードの同位相モード

(1) 基準地震動 S_s の応答スペクトル

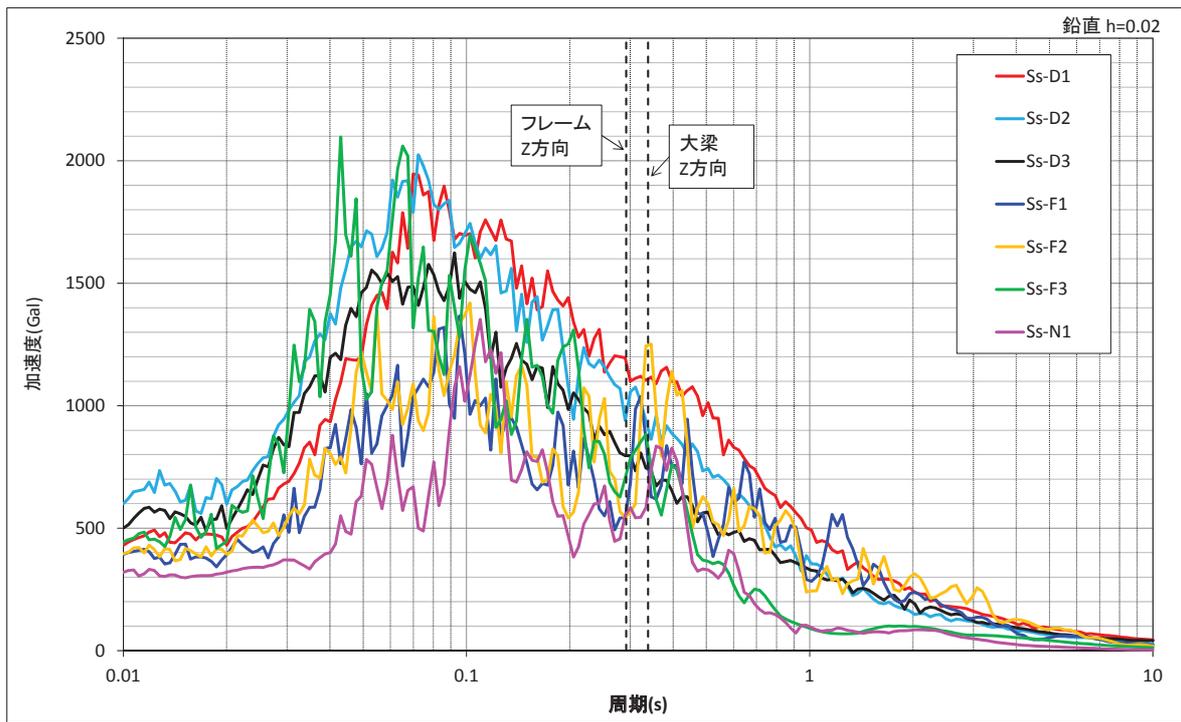


(a) 水平方向 減衰定数 4.0% 全体表示

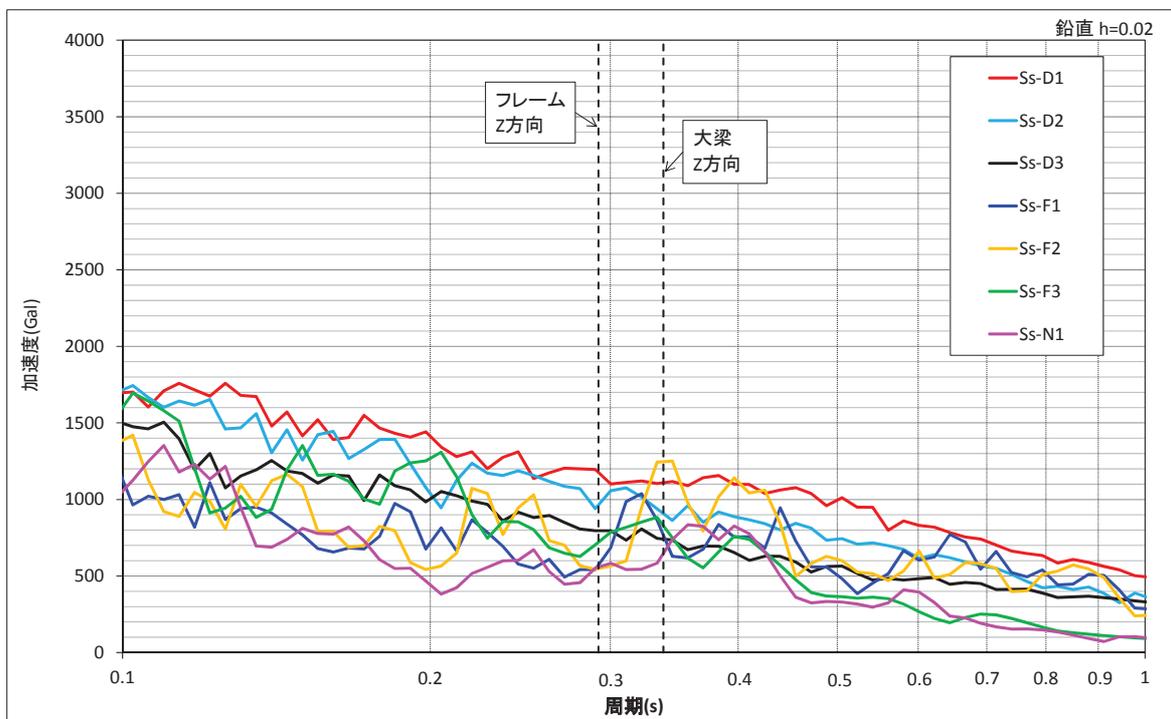


(b) 水平方向 減衰定数 4.0% 拡大表示

添付 3-1 図 基準地震動 S_s の応答スペクトル図 (1/2)

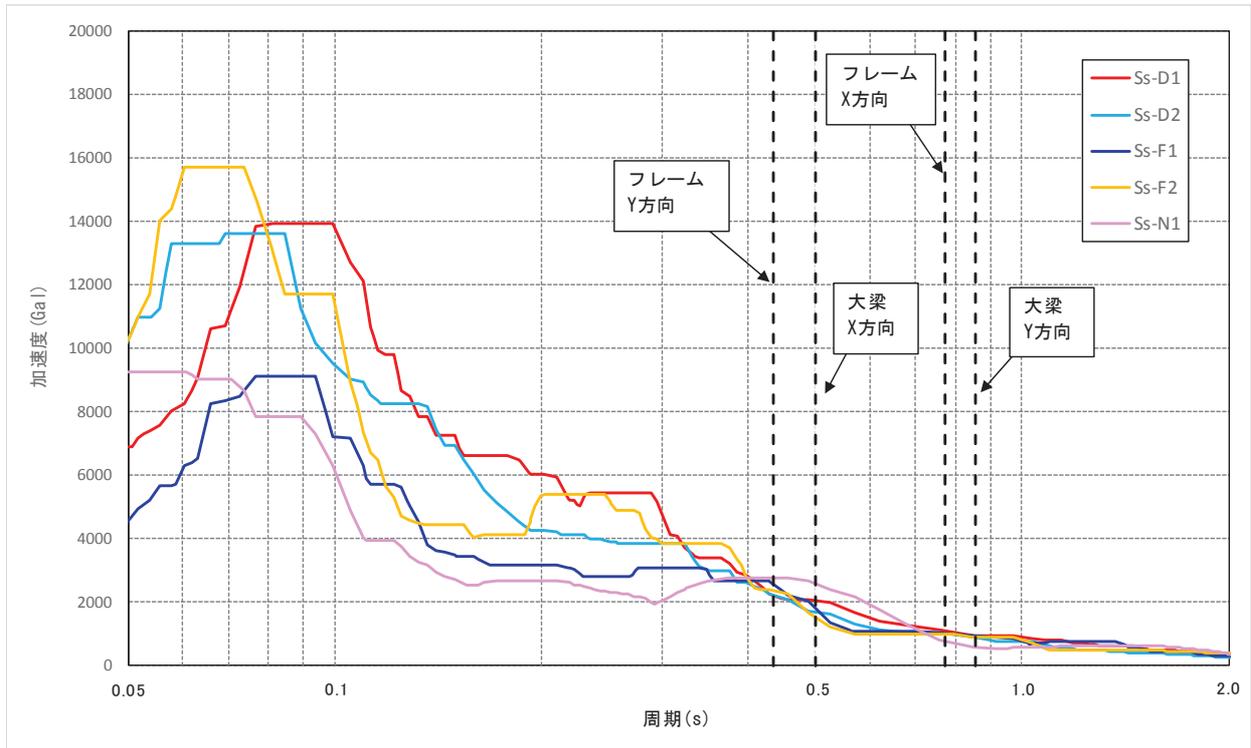


(c) 鉛直方向 減衰定数 2.0% 全体表示

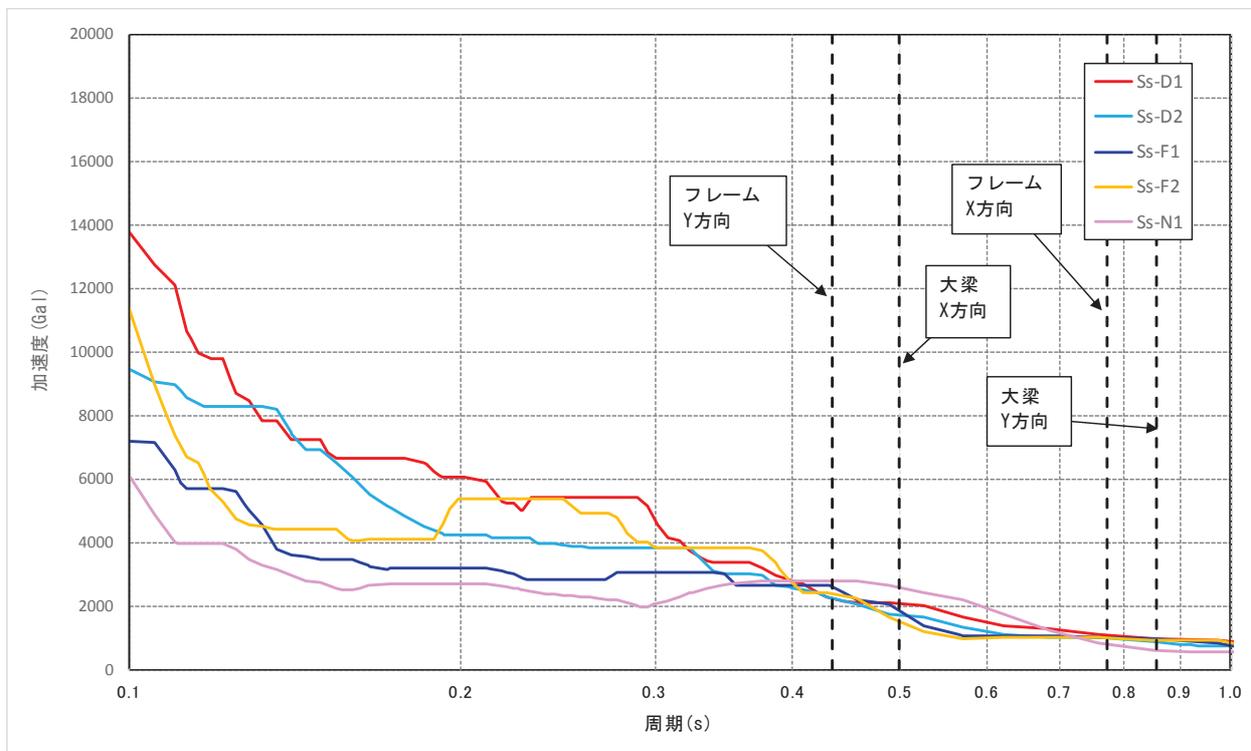


(d) 鉛直方向 減衰定数 2.0% 拡大表示
添付 3-1 図 基準地震動 S_s の応答スペクトル図 (2/2)

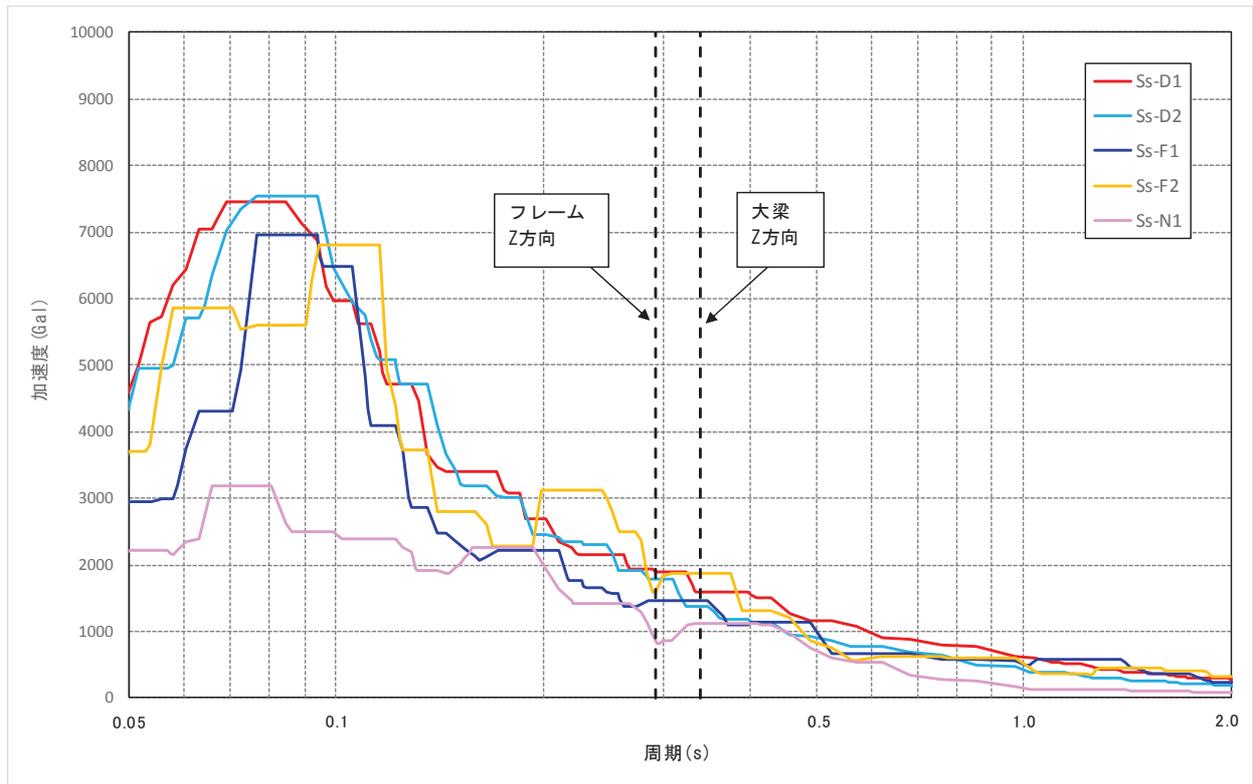
(2) 設計用床応答スペクトル



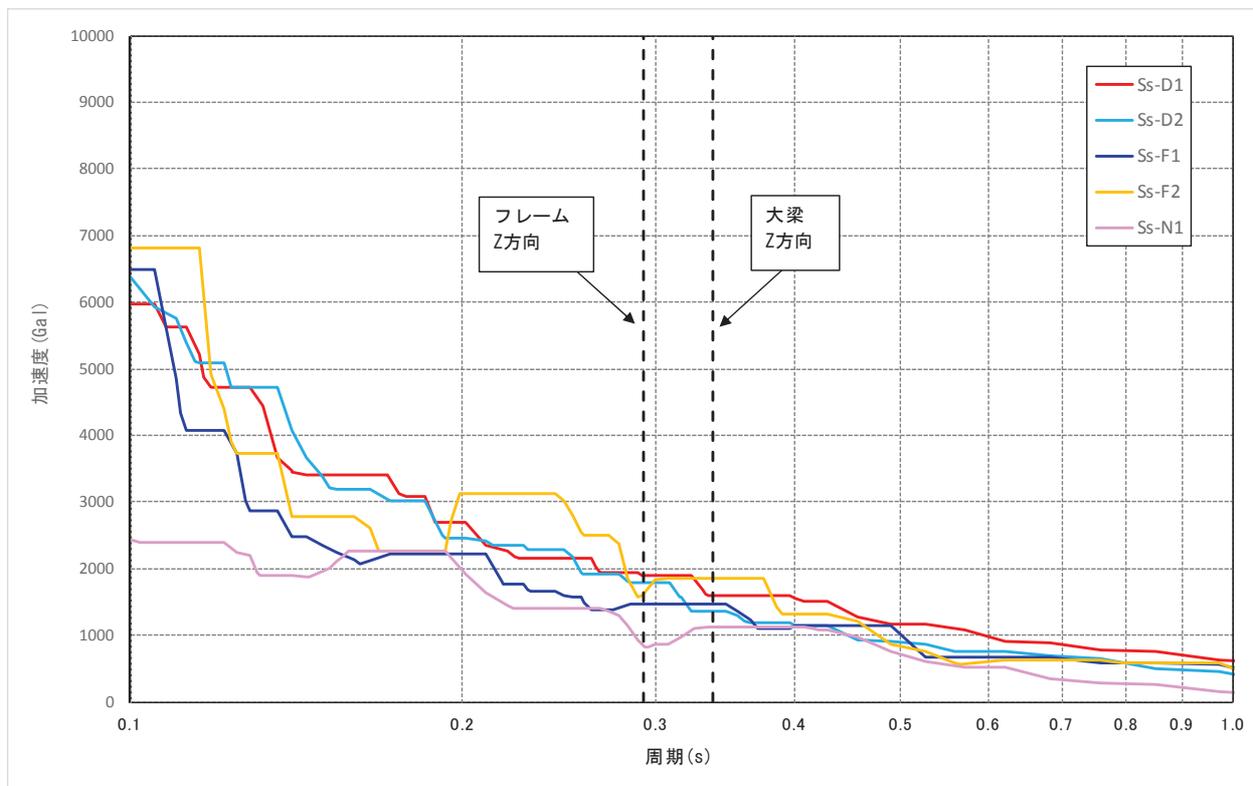
(a) 水平方向 減衰定数 4.0% 全体表示



(b) 水平方向 減衰定数 4.0% 拡大表示
添付 3-2 図 設計用床応答スペクトル図 (1/2)



(c) 鉛直方向 減衰定数 2.0% 全体表示



(d) 鉛直方向 減衰定数 2.0% 拡大表示
添付 3-2 図 設計用床応答スペクトル図 (2/2)

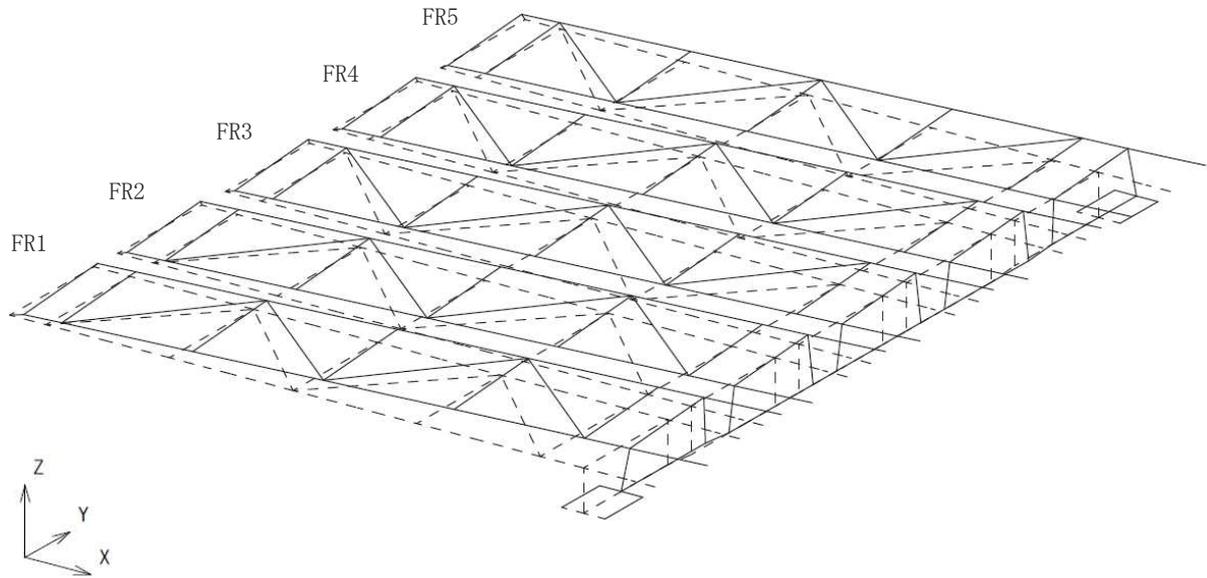
添付 3-1 表 固有値解析結果

次数	振動数 (Hz)	周期T (s)	刺激係数			有効質量比			備考
			β_x	β_y	β_z	X	Y	Z	
1	1.170	0.855	0.000	1.314	0.000	0.0%	81.8%	0.0%	大梁 水平Y方向 1次
2	1.297	0.771	1.004	0.000	0.000	36.9%	0.0%	0.0%	フレーム(FR1, FR5) 水平X方向 1次 (FR1とFR5が同位相)
3	1.298	0.771	0.000	-0.098	0.000	0.0%	0.4%	0.0%	フレーム(FR1, FR5) 水平X方向 1次 (FR1とFR5が逆位相)
4	1.431	0.699	1.001	0.000	0.000	15.2%	0.0%	0.0%	フレーム(FR3) 水平X方向 1次
5	1.433	0.698	-1.002	0.000	0.000	30.3%	0.0%	0.0%	フレーム(FR2, FR4) 水平X方向 1次 (FR2とFR4が同位相)
6	1.433	0.698	0.000	0.001	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	フレーム(FR2, FR4) 水平X方向 1次 (FR2とFR4が逆位相)
7	2.000	0.500	1.061	0.000	0.000	17.6%	0.0%	0.0%	大梁 水平X方向 1次
8	2.268	0.441	0.025	0.000	-0.006	0.0%	0.0%	0.0%	フレーム(FR1, FR5) 水平Y方向 1次 (FR1とFR5が逆位相)
9	2.305	0.434	0.000	-0.660	0.000	0.0%	4.2%	0.0%	フレーム(FR1, FR5) 水平Y方向 1次 (FR1とFR5が同位相)
10	2.502	0.400	0.001	-0.053	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	フレーム(FR2, FR3, FR4) 水平Y方向 1次
11	2.505	0.399	-0.001	0.000	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	フレーム(FR2, FR4) 水平Y方向 1次
12	2.571	0.389	0.000	0.940	0.000	0.0%	13.6%	0.0%	フレーム(全体) 水平Y方向 1次
13	2.959	0.338	0.000	0.000	1.428	0.0%	0.0%	61.7%	大梁 鉛直Z方向 1次
14	3.281	0.305	0.000	0.000	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	大梁 水平X方向 2次
15	3.425	0.292	0.000	0.000	0.000	0.0%	0.0%	0.0%	主桁(G1R, G5L) 鉛直Z方向 1次 (G1RとG5Lが逆位相)
16	3.425	0.292	0.000	0.000	1.150	0.0%	0.0%	11.9%	主桁(G1R, G5L) 鉛直Z方向 1次 (G1RとG5Lが同位相)
...

* 網掛け部は水平方向の変形モードを示す。

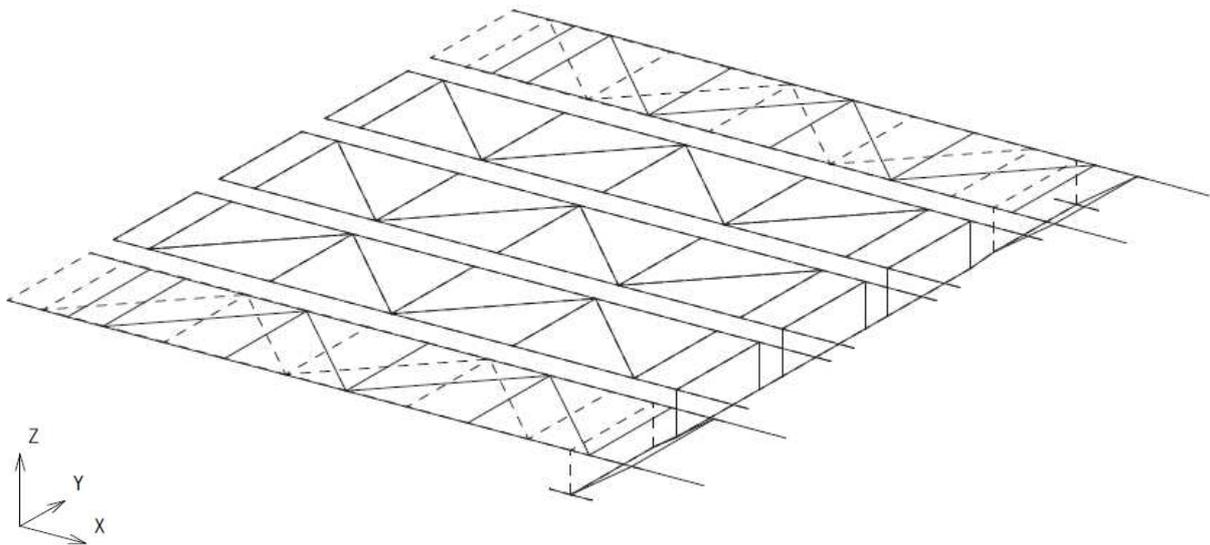
モード 1

振動数 1.170Hz



モード 2

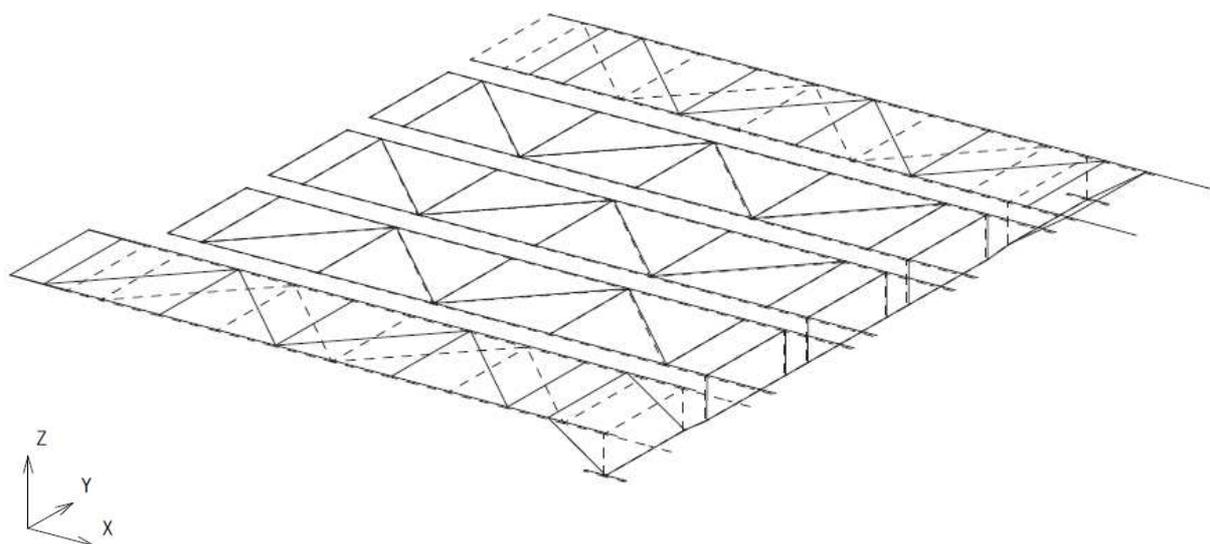
振動数 1.297Hz



添付 3-3 図 モード図(1/8)

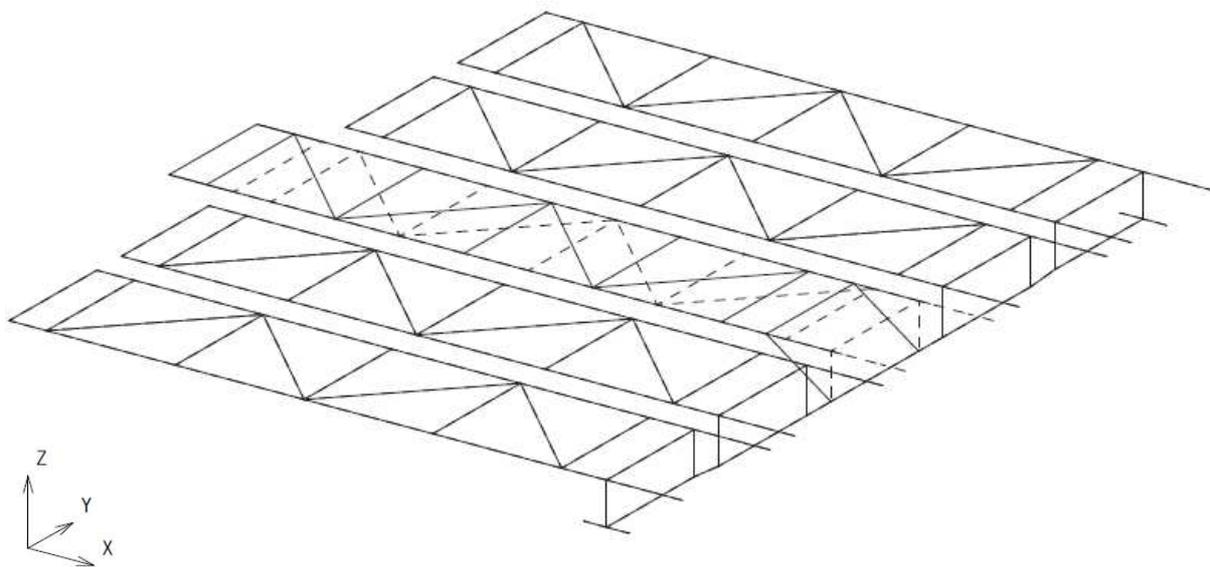
モード 3

振動数 1.298Hz



モード 4

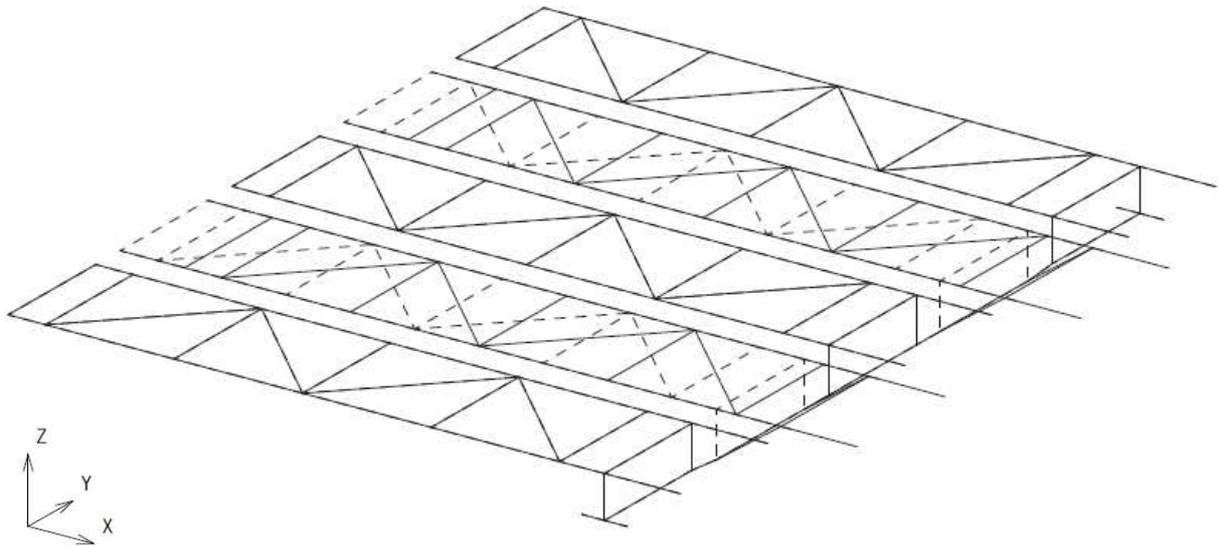
振動数 1.431Hz



添付 3-3 図 モード図 (2/8)

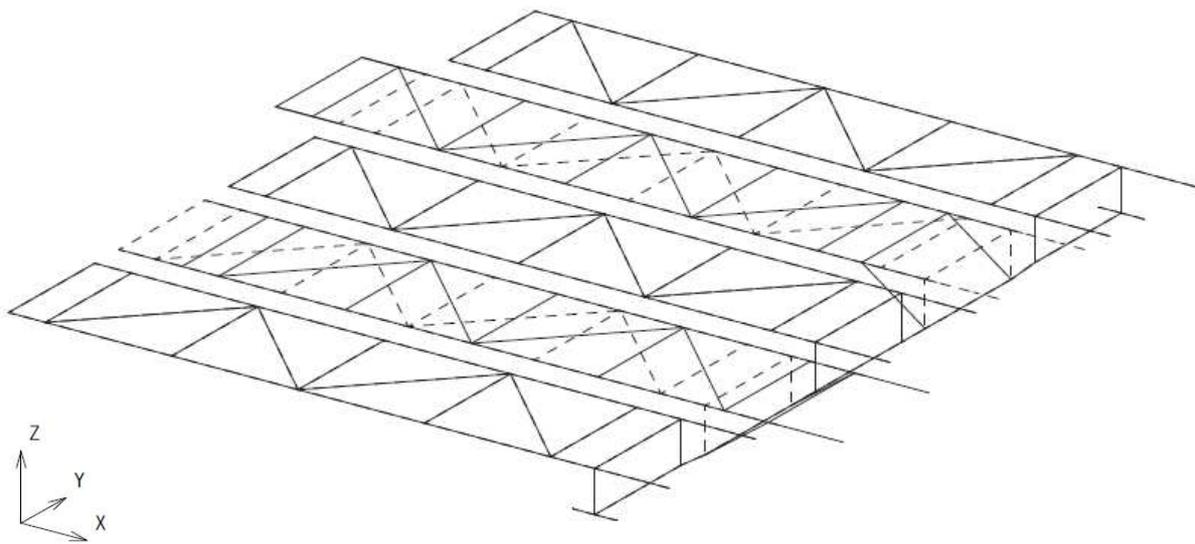
モード 5

振動数 1.433Hz



モード 6

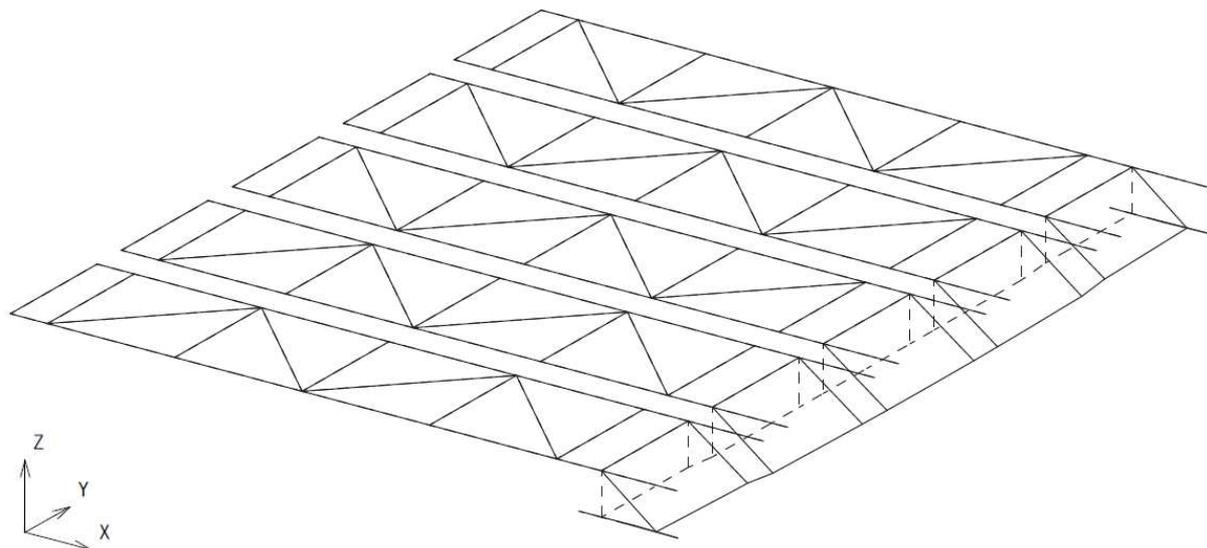
振動数 1.433Hz



添付 3-3 図 モード図(3/8)

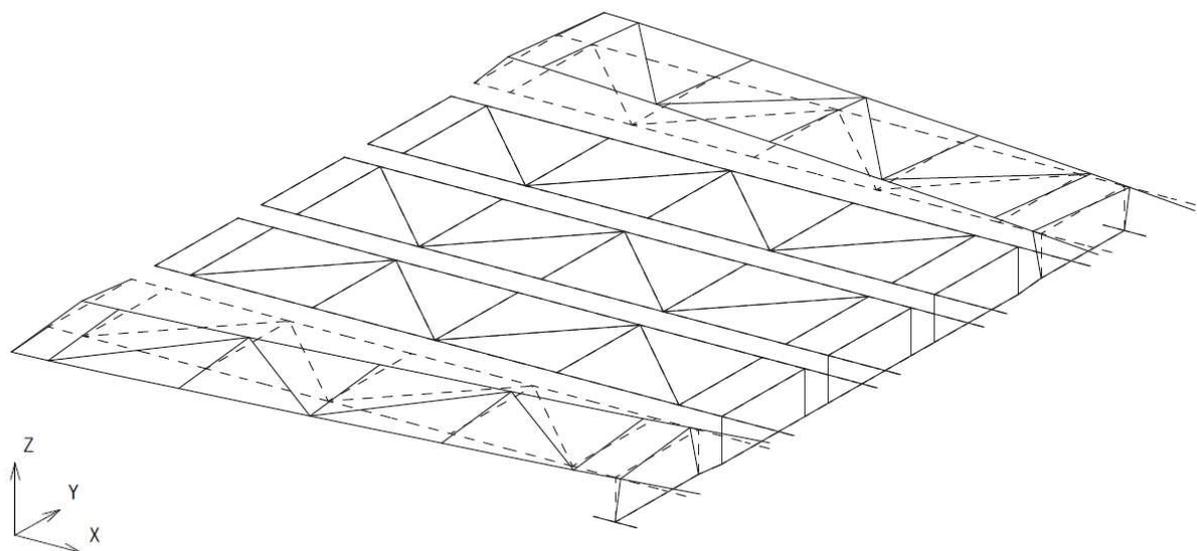
モード 7

振動数 2.000H z



モード 8

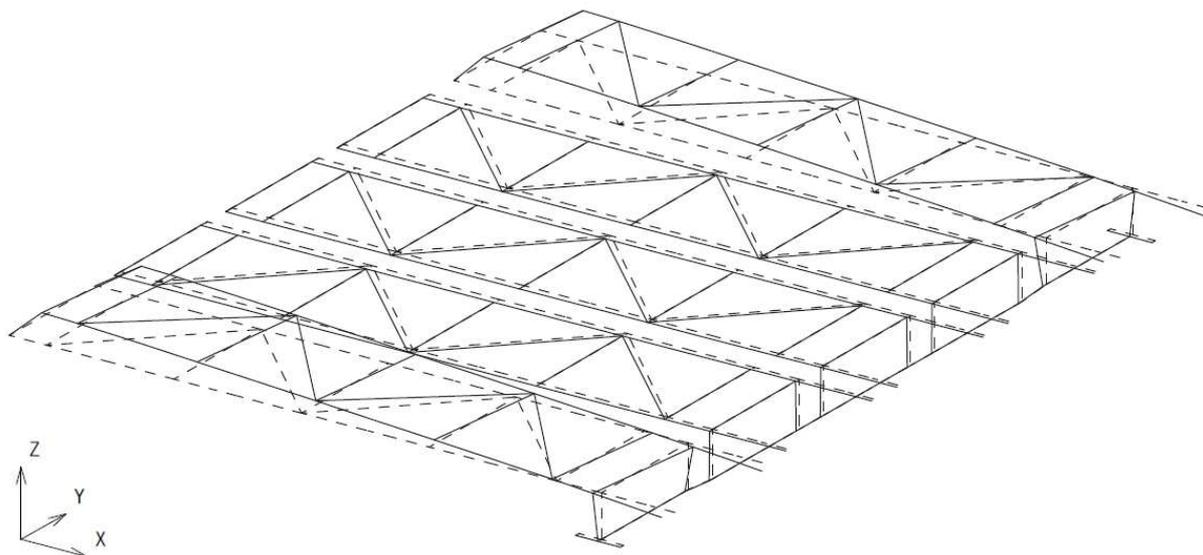
振動数 2.268H z



添付 3-3 図 モード図(4/8)

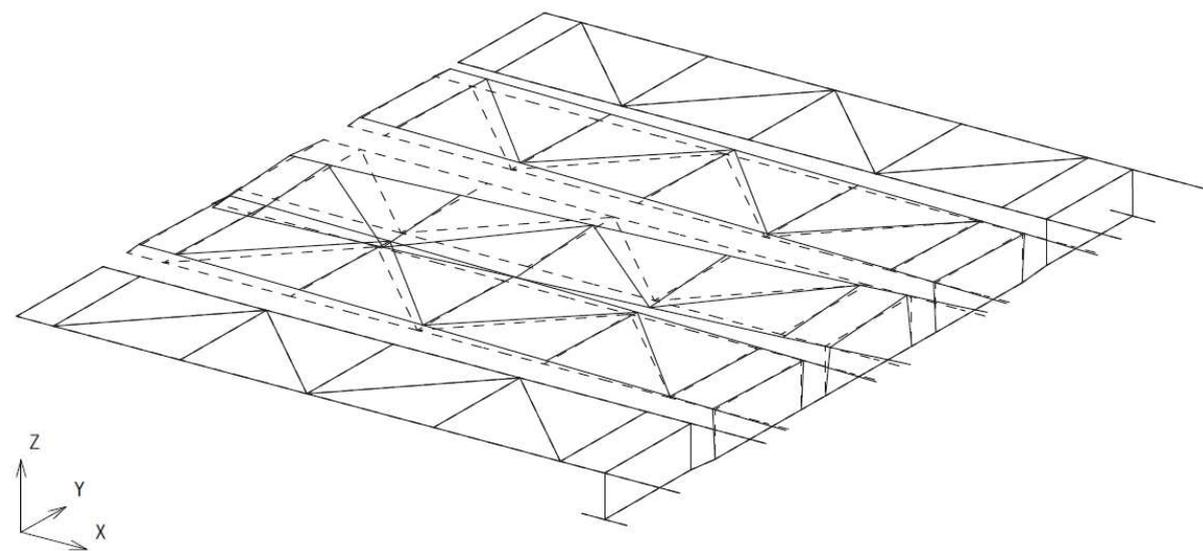
モード 9

振動数 2.305H z



モード 10

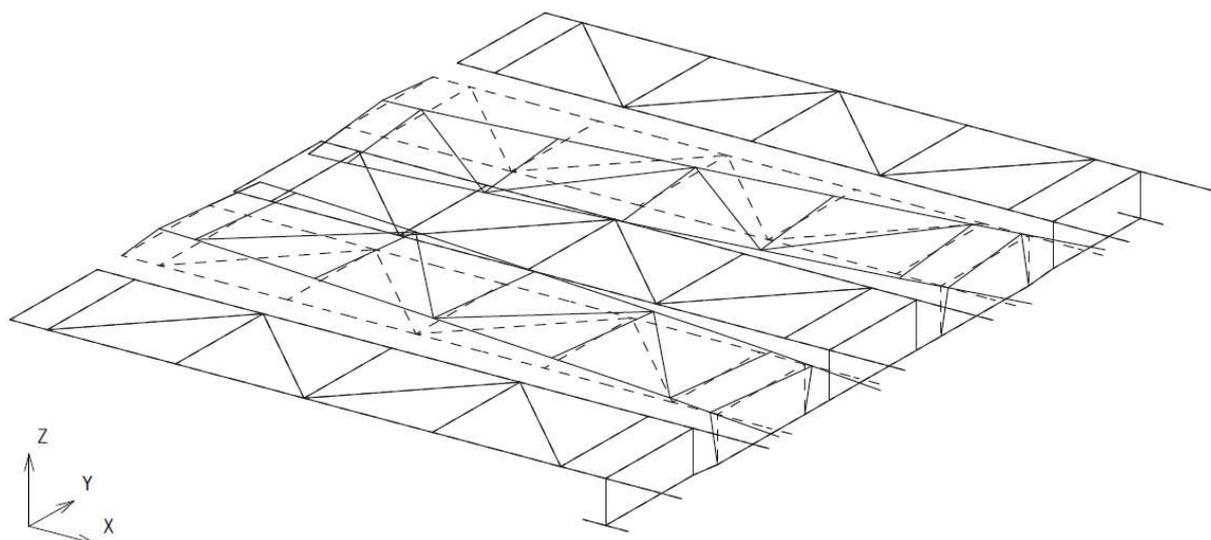
振動数 2.502H z



添付 3-3 図 モード図(5/8)

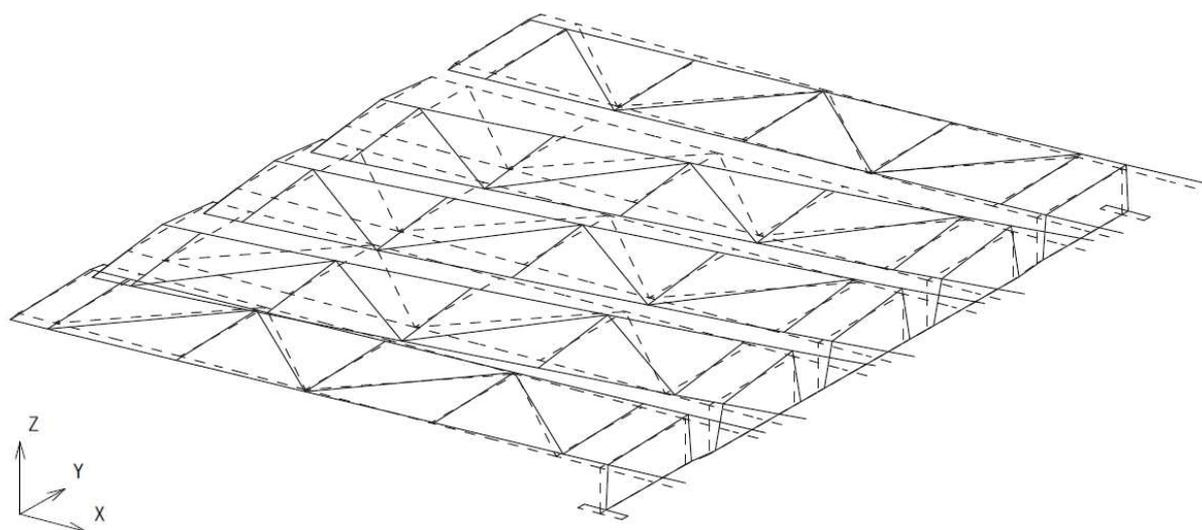
モード 11

振動数 2.505H z



モード 12

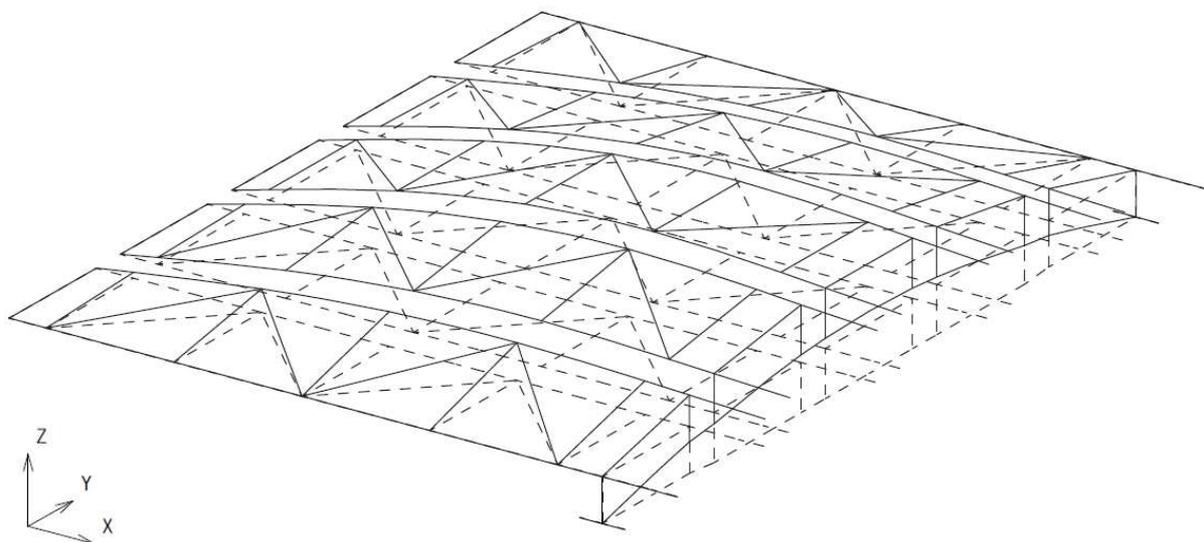
振動数 2.571H z



添付 3-3 図 モード図(6/8)

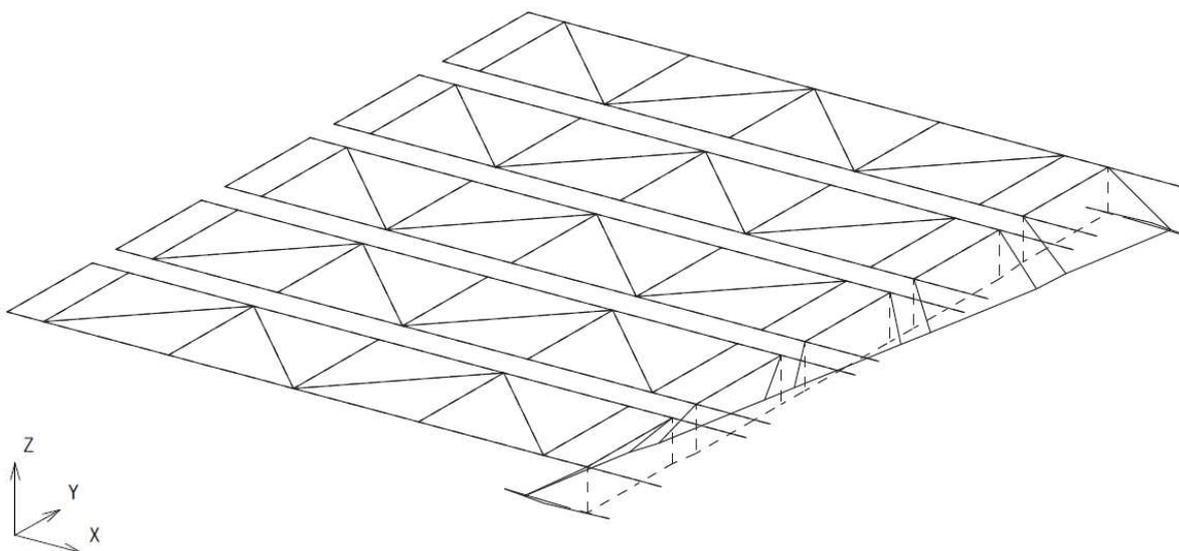
モード 13

振動数 2.959Hz



モード 14

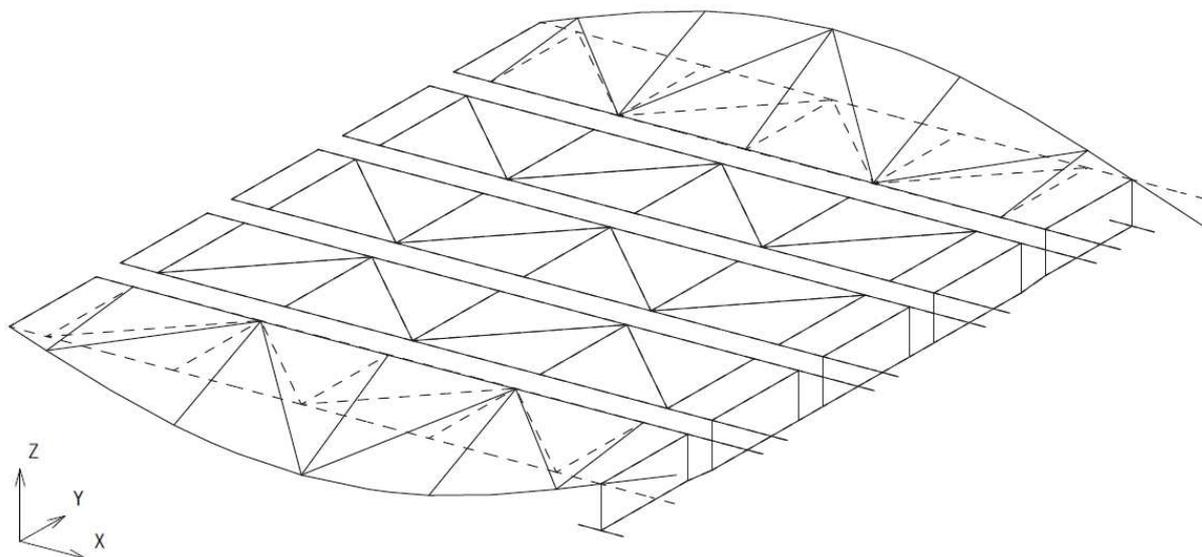
振動数 3.281Hz



添付 3-3 図 モード図(7/8)

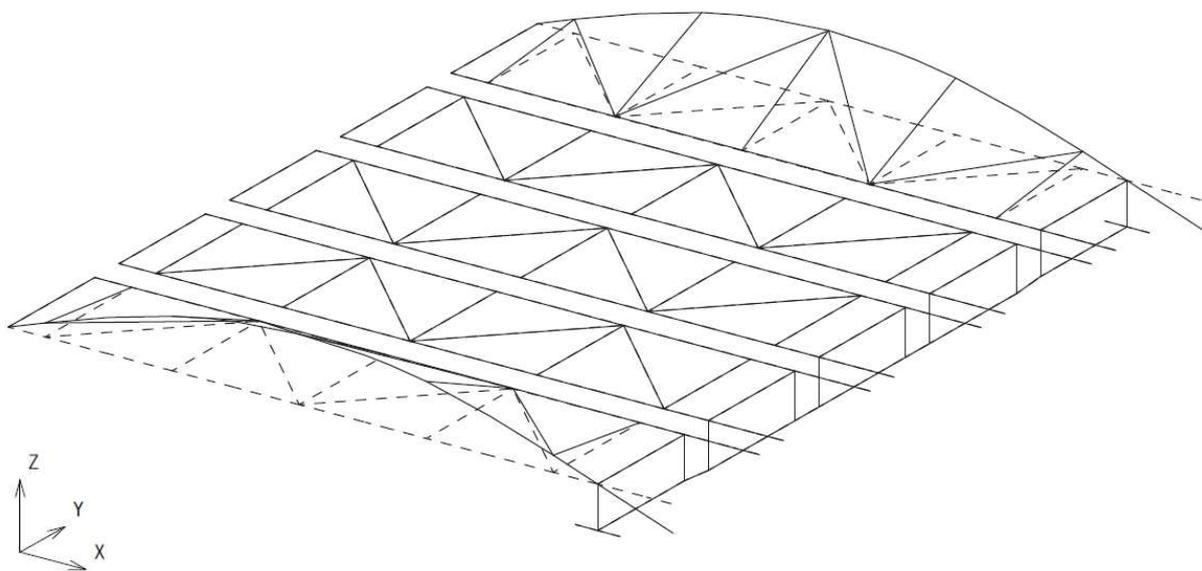
モード 15

振動数 3.425H z



モード 16

振動数 3.425H z



添付 3-3 図 モード図(8/8)

地震時における異常要因分析 (1/5)

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)	水平方向の地震荷重	破断によるネットの落下	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	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
	鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重				
	フレーム				
フレーム	水平方向の地震荷重	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
	鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重				
	防護板取付金具				
	防護板				
	防護板取付ボルト				
大梁	水平方向の地震荷重	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	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
	鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重				
ブラケット	水平方向の地震荷重	破断による大梁の落下	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
	鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重				
	アンカーボルト				

地震時における異常要因分析 (2/5)

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
大梁ゴム支承 ゴム支承本体	水平方向の地震荷重 鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重	ゴム体の破断による大梁の落下	引張応力	道路橋支承便覧(平成16年4月)に基づき2.0N/mm ² と設定(実験より得られた破断応力に安全率2.5を考慮して設定)	3次元はりモデルによる応答解析によって算出した、ゴム支承の荷重と変位に基づき応力評価及び変位評価を実施
			せん断ひずみ	道路橋支承便覧(平成16年4月)及び道路橋指示書・同解説V耐震設計編(平成14年3月)に基づき250%と設定(試験にて適切性を確認)	
ゴム支承取付ボルト		ゴム体の座屈破壊による大梁の落下	圧縮応力 (座屈安定性)	道路橋支承便覧(平成16年4月)に基づき設定(座屈を考慮した許容圧縮応力に対する十分な余裕を確保する)	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
		内部鋼板の破壊による大梁の落下	引張応力 (内部鋼板)	JEAG4601・補-1984の許容応力	
		破断による支承の支持機能喪失	引張応力 せん断応力	JEAG4601・補-1984の許容応力	

地震時における異常要因分析 (3/5)

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
フレームゴム 支承	水平方向の地震荷重 鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重	ゴム体の破断 によるフレームの落下	引張応力	道路橋支承便覧(平成16年4月)に基づき2.0N/mm ² と設定(破断応力に安全率2.5を考慮して設定)	3 次元はりモデルによる応答解析によって算出した、ゴム支承の荷重と変位に基づき応力評価及び変位評価を実施
		せん断ひずみ	せん断ひずみ	道路橋支承便覧(平成16年4月)及び道路橋指図書・同解説V耐震設計編(平成14年3月)に基づき250%と設定(試験にて適切性を確認)	
ゴム支承本体	水平方向の地震荷重 鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重	ゴム体の座屈 破壊によるフレームの落下	圧縮応力 (座屈安定性)	道路橋支承便覧(平成16年4月)に基づき設定(座屈を考慮した許容圧縮応力に対して十分な余裕を確保する)	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
		内部鋼板の破壊による大梁の落下	引張応力 (内部鋼板)	JEAG4601・補-1984の許容応力	
ゴム支承取付ボルト アンカーボルト		破断による支承の支持機能喪失	引張応力 せん断応力	JEAG4601・補-1984の許容応力	

地震時における異常要因分析 (4/5)

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
可動支承	水平方向の地震荷重 鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重	圧縮破壊による機能喪失	支圧応力	メーカーの強度試験に基づき算出した許容応力	各部位の評価基準値より可動支承全体の許容荷重を設定。 3 次元はよりモデルによる応答解析によって算出した可動支承に負荷する荷重と上記許容荷重を比較し評価を実施
		圧縮破壊による機能喪失	支圧応力		
		破断による機能喪失	曲げ応力	JEAG4601・補-1984 の許容応力	
		圧縮破壊による機能喪失	支圧応力		
		破断によるフレームの落下	せん断応力 曲げ応力 支圧応力		
		圧縮破壊による機能喪失	支圧応力		
		破断によるフレームの落下	曲げ応力 引張応力 せん断応力		
		破断によるフレームの落下	引張応力		
		破断によるフレームの落下	せん断応力		
		破断によるフレームの落下	引張応力		
		破断によるフレームの落下	せん断応力		
		破断によるフレームの落下	引張応力		
		破断によるフレームの落下	せん断応力		
		破断によるフレームの落下	せん断応力		
破断によるフレームの落下	曲げ応力				
揺動部		移動量			構造設計から求められるクリアランスから設定する許容値 (衝突防止)

地震時における異常要因分析 (5/5)

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
フレーム間のクリアランス	水平方向の地震荷重 鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重	部材同士の衝突を起因としたフレームの落下	相対変位	構造設計から求められるクリアランスから設定する許容値。(衝突防止)	3 次元はりモデルによる応答解析によって算出した各部位の相対変位を用いて、評価基準値との比較評価を実施
<ul style="list-style-type: none"> ・ フレーム-隣接構造物 (門型クレーン, 防潮壁) ・ フレーム-側壁 ・ フレーム-隔壁 それぞれのクリアランス	水平方向の地震荷重 鉛直方向の地震荷重 自重 積雪荷重	側壁等への衝突を起因としたフレームの落下	相対変位	構造設計から求められるクリアランスから設定する許容値。(衝突防止)	3 次元はりモデルによる応答解析によって算出した各部位の相対変位を用いて、評価基準値との比較評価を実施

ゴム支承及び可動支承の耐震設計について

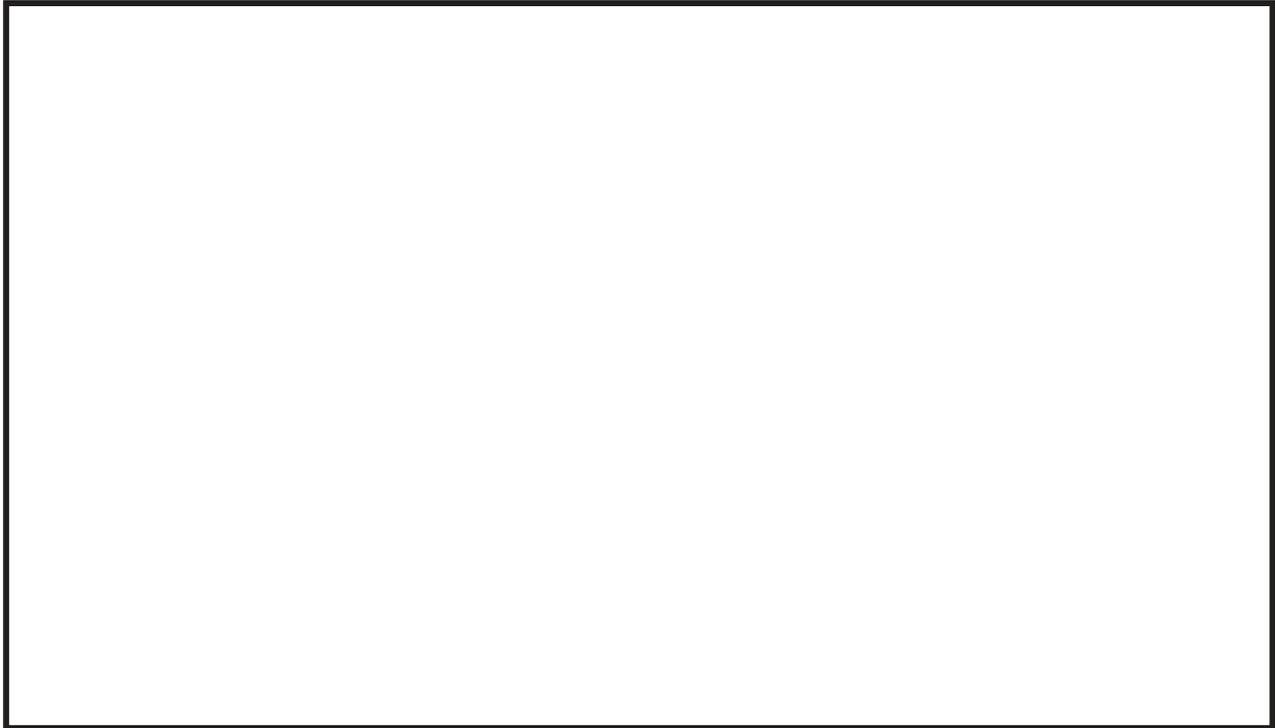
1. ゴム支承

1.1 構造概要

竜巻防護ネットに使用するゴム支承の構造諸元を添付 5-1 表に、構造図を添付 5-1 図に示す。また、ゴム支承に使用するゴム材料の規格は道路橋支承便覧¹⁾に定められており、シート加硫したゴム試験片を用いて添付 5-2 表に示す破断伸び以上であることを検証する。

添付 5-1 表 ゴム支承の構造諸元

項目	大梁／フレーム 接続部 (大梁ゴム支承)	フレーム／隔壁 接続部 (主桁ゴム支承)
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	800mm×800mm	550mm×550mm
総ゴム厚 (ゴム厚×層数)	192mm (24mm×8層)	135mm (15mm×9層)
せん断弾性係数	1.0N/mm ² (G10)	1.2N/mm ² (G12)
一次形状係数	8.33	9.17
二次形状係数	4.17	4.07
水平剛性	3.333kN/mm	2.689kN/mm
鉛直剛性	972kN/mm	863kN/mm



添付5-1図 ゴム支承の構造図

添付 5-2 表 ゴム材料の基本特性の試験方法と規格値

項目	材料の種類	弾性係数の呼び	破断伸び (%)	引張強さ (N/mm ²)	試験方法
基本特性	天然ゴム (NR)	G10	550 以上	15 以上	引張試験 JIS K 6251
		G12	500 以上		

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。

1.2 モデル化

地震時水平力分散型ゴム支承は天然ゴム系積層ゴム支承である。天然ゴム系積層ゴム支承は、地震時の水平力に対してほぼ線形的な変形特性を有する。したがって、地震応答解析において、ゴム支承を線形ばね要素でモデル化し、ゴム支承の水平荷重－水平変位の関係であるせん断剛性をばね要素のせん断ばね定数として設定する。また、ゴム支承の減衰特性は試験結果に基づき等価減衰定数として評価する。

1.3 せん断剛性

1.3.1 せん断剛性の設定方針

地震時水平力分散型ゴム支承は、道路橋支承便覧¹⁾に定められる算出式によりせん断剛性の設計値が求められる。道路橋支承便覧に基づき設計されたゴム支承は道路橋において数多くの納入実績を有し、納入前の製品検査においてせん断特性試験が行われ、せん断剛性の算出式の検証がなされている。本設備においても、製品検査時にせん断特性試験を実施し、せん断剛性の製品初期ばらつきが設計値の±10%以内であることを確認し設計値の妥当性を確認する。この製品初期ばらつき±10%については設計条件の1つとして耐震評価条件に考慮する。

また、ゴム支承は製品初期ばらつきとは別に、使用環境の温度変化等の諸条件によってもせん断剛性に变化が生じるため、今回、温度変化等の各種依存性試験を実施しせん断剛性の变化率を確認し、せん断剛性のばらつきに対する影響確認を実施する。

1.3.2 せん断剛性の算出式

ゴム支承のせん断剛性は次式で算出する値を設計値とする。

$$K_s = G_e \cdot A_e / \Sigma t_e$$

ここに

- K_s : ゴム支承のせん断剛性
- G_e : せん断弾性係数
- A_e : ゴム支承本体の側面被覆ゴムを除く面積
- Σt_e : 総ゴム厚

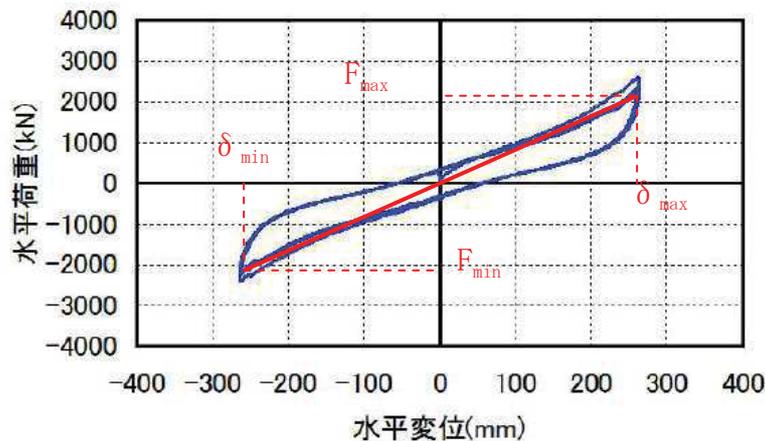
1.3.3 せん断剛性の製品確認試験

製品検査時のせん断特性試験において、固定荷重に相当する鉛直荷重を載荷した状態で総ゴム厚の175%の水平変位を正負繰返し与え、そのときのせん断剛性が設計値に対して±10%以内であることを確認する。地震時水平力分散型ゴム支承は繰返し回数3回目の値をせん断剛性とする。せん断剛性は次式により算出する。また、せん断剛性の算出方法のイメージを添付5-2図に示す。

$$K_{se} = (F_{max} - F_{min}) / (\delta_{max} - \delta_{min})$$

ここに

- K_{se} : ゴム支承のせん断剛性(試験結果)
- F_{max} : 最大荷重
- δ_{max} : せん断ひずみ (+175%変位)
- F_{min} : 最小荷重
- δ_{min} : せん断ひずみ (-175%変位)



添付 5-2 図 せん断剛性の算出方法

1.3.4 せん断剛性の各種確認試験

ゴム支承は使用温度や経年変化等の影響によりせん断剛性が変化する。これらの因子による特性変化を確認するため各種試験を実施する。試験の実施項目は JIS K 6411²⁾に従い、添付 5-3 表のとおりとする。

1.3.4.1 試験方法

各種依存性試験及び熱老化特性試験について、試験方法を以下に示す。

試験は「JIS K 6411:2012」の試験方法を参考に設計における適用条件を踏まえ試験条件を設定する。試験体は、「JIS K 6411:2012」に従い各試験項目に対応した標準試験体を用いる。ゴム材料の種別は、実機に適用する G10 と G12 の 2 種類を実施する。各試験における鉛直荷重は実機における固定荷重相当を基準とする。試験項目、測定項目及び試験体を添付 5-4 表に示す。

添付 5-3 表 せん断特性試験項目

試験	項目	内容
各種依存性試験	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せん断特性の依存性を求める。
	圧縮応力依存性	鉛直荷重の変化に対するせん断特性の依存性を求める。
	振動数依存性	水平振動数の変化に対するせん断特性の依存性を求める。
	繰返し数依存性	地震時の繰返し荷重に対するせん断特性の依存性を求める。
	温度依存性	使用環境の温度変化に対するせん断特性の依存性を求める。
熱老化特性試験	経年変化	熱老化試験により熱老化前後のせん断特性の経年変化を求める。

添付 5-4 表 せん断特性試験の試験項目と試験体

試験	測定項目	試験体		
		適用規格	形状	せん断 弾性係数
各種依存性試験 ・せん断ひずみ ・圧縮応力 ・振動数 ・繰返し数 ・温度	せん断特性 ・せん断剛性 ・等価減衰定数	JIS K6411:2012 標準試験体 No. 3*	有効平面寸法 400mm×400mm 総ゴム厚 54mm (9mm×6層)	G10 大梁用 1.0N/mm ² G12 フレー ム用 1.2N/mm ²
熱老化特性試験 ・経年変化	せん断特性 ・せん断剛性 ・等価減衰定数 せん断変形性能 ・破断せん断ひ ずみ	JIS K6411:2012 標準試験体 No. 2*	有効平面寸法 240mm×240mm 総ゴム厚 30mm (5mm×6層)	G10 大梁用 1.0N/mm ² G12 フレー ム用 1.2N/mm ²

* JIS K6411 で寸法等が規定されている試験体

(1) せん断ひずみ依存性試験

試験体に複数のせん断ひずみを与えたときのせん断特性の依存性を求める。固定荷重に相当する圧縮応力 1.0N/mm² の鉛直荷重*を載荷した状態で、各せん断ひずみにおける正負繰返し加振を 3 回行い、3 回目の水平荷重－水平変位データよりせん断剛性と等価減衰定数を算出する。試験結果は、(3) 振動数依存性試験と(5) 温度依存性試験より求めた振動数補正式と温度補正式によって、基準振動数(0.5Hz)と基準温度(23℃)相当に補正したものを測定値とする。せん断剛性は、せん断ひずみ 175%の測定値を基準として各せん断ひずみとの変化率を求める。

(2) 圧縮応力依存性試験

試験体に複数の圧縮応力を与えたときのせん断特性の依存性を求める。複数の鉛直荷重を載荷した状態で、せん断ひずみ 175%による正負繰返し加振を 3 回行い、3 回目の水平荷重－水平変位データよりせん断剛性と等価減衰定数を算出する。試験結果は、(5) 温度依存性試験より求めた温度補正式によって、基準温度(23℃)相当に補正したものを測定値とする。せん断剛性は、固定荷重相当の圧縮応力 1.0N/mm² 時の測定値を基準として各圧縮応力との変化率を求める。

(3) 振動数依存性試験

試験体に複数の振動数を与えたときのせん断特性の依存性を求める。固定荷重に相当する圧縮応力 1.0N/mm² の鉛直荷重を載荷した状態で、各種振動数

にてせん断ひずみ 175%による正負繰返し加振を 3 回行い、3 回目の水平荷重-水平変位データよりせん断剛性と等価減衰定数を算出する。試験温度は 23℃（基準温度）とする。恒温槽で温度保持した試験体を取り出し試験を行う。せん断剛性は、基準振動数 0.5Hz 時の測定値を基準として各振動数との変化率を求める。

(4) 繰返し数依存性試験

試験体に繰返し水平加振 50 回を与えたときのせん断特性の変化を求める。まず、固定荷重に相当する圧縮応力 1.0N/mm^2 の鉛直荷重を載荷した状態で、せん断ひずみ 175%による正負繰返し加振を 3 回行い、3 回目の水平荷重-水平変位データよりせん断剛性と等価減衰定数を算出する。その後、せん断ひずみ 175%による正負繰返し加振を連続 50 回行い、初期の載荷前温度まで冷却し、50 回繰返し加振前と同様のせん断特性試験を行い、せん断剛性と等価減衰定数を算出する。試験結果は、(5) 温度依存性試験より求めた温度補正式によって、基準温度 (23℃) 相当に補正したものを測定値とする。せん断剛性は、50 回繰返し加振前の測定値を基準として 50 回繰返し加振後との変化率を求める。

(5) 温度依存性試験

試験体に複数の温度条件を与えたときのせん断特性の依存性を求める。固定荷重に相当する圧縮応力 1.0N/mm^2 の鉛直荷重を載荷した状態で、各種温度にてせん断ひずみ 175%による正負繰返し加振を 3 回行い、3 回目の水平荷重-水平変位データよりせん断剛性と等価減衰定数を算出する。恒温槽で各試験温度に保持した試験体を取り出し試験を行う。せん断剛性は、基準温度 (23℃) 時の測定値を基準として各温度条件との変化率を求める。試験結果は、(3) 振動数依存性試験より求めた振動数補正式によって、基準振動数 (0.5Hz) 相当に補正したものを測定値とする。

(6) 熱老化特性試験

熱老化前後におけるせん断特性（せん断剛性、等価減衰定数）の変化と、熱老化させた試験体のせん断変形性能（破断せん断ひずみ）を確認する。熱老化は基準温度 23℃で 60 年に相当する試験条件とする。まず、固定荷重に相当する圧縮応力 1.0N/mm^2 の鉛直荷重を載荷した状態で、せん断ひずみ 175%による正負繰返し加振を 3 回行い、3 回目の水平荷重-水平変位データよりせん断剛性と等価減衰定数を算出する。その後、恒温槽で試験条件の熱老化をさせ、熱老化前と同様のせん断特性試験を行い、せん断剛性と等価減衰定数を算出する。試験結果は、(3) 振動数依存性試験と (5) 温度依存性試験より求めた振動数補正式と温度補正式によって、基準振動数 (0.5Hz) と基準温度 (23℃) 相当に補正したものを測定値とする。せん断剛性は、熱老化前の測定値を基準として熱老化後との変化率を求める。熱老化後の試験体で、1.4 項と同様のせん断変形性能試験を行い、せん断ひずみ 250%時及び 300%時の繰返し挙動の安定性並びに破断せん断ひずみを確認する。

* 試験においてゴム支承へ負荷する圧縮応力は固定荷重に相当する 1.0N/mm^2 を適用している。この数値は以下に示す，固定荷重による圧縮応力の計算結果より検討した数値である。

固定荷重によるゴム支承の圧縮応力

	節点番号	支点反力 (kN)	有効平面寸法 (mm)	有効面積 (mm^2)	圧縮応力度 (N/mm^2)
フレームゴム支承	1	185	550×550	302500	0.61
	11	133	550×550	302500	0.44
	21	129	550×550	302500	0.43
	31	129	550×550	302500	0.43
	41	129	550×550	302500	0.43
	51	129	550×550	302500	0.43
	61	129	550×550	302500	0.43
	71	129	550×550	302500	0.43
	81	133	550×550	302500	0.44
	91	185	550×550	302500	0.61
大梁ゴム支承	121	667	800×800	640000	1.04
	122	667	800×800	640000	1.04
	131	667	800×800	640000	1.04
	132	667	800×800	640000	1.04

1.3.4.2 試験結果

各種依存性試験及び熱老化特性試験より得られたせん断特性結果を添付 5-3 図に示す。以下にその結果を記載する。

(1) せん断ひずみ依存性試験

添付 5-3 図の(a)に示すせん断ひずみ依存性試験の結果より，ひずみの増減によらず，せん断剛性はほぼ一定の傾向を示すことが分かった。

(2) 圧縮応力依存性試験

添付 5-3 図の(b)に示す圧縮応力依存性試験の結果より，圧縮応力の増減によらず，せん断剛性はほぼ一定の傾向を示すことが分かった。これは，既往の研究⁴⁾における実験結果と同様の傾向を示している。

(3) 振動数依存性試験

添付 5-3 図の(c)に示す振動数依存性試験の結果より，振動数の変化によらず，せん断剛性はほぼ一定の傾向を示すことが分かった。これは，既往の研究⁴⁾における実験結果と同様の傾向を示している。

(4) 繰返し数依存性試験

添付 5-3 図の(d)に示す繰返し数依存性試験の結果より，せん断ひずみ 175% による 50 回の正負繰返し加振でのせん断剛性の変化率は最大で-9%程度となることが分かった。

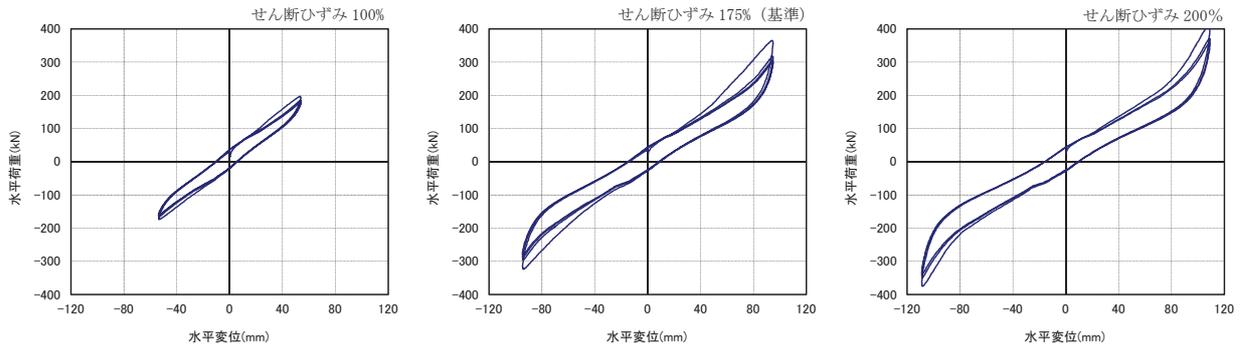
(5) 温度依存性試験

ゴム支承は低温下でのせん断剛性が大きくなり温度変化の影響を受けやすいことが一般的に知られている。添付 5-3 図の(e)に示す温度依存性試験結果より、温度依存性試験では低温になるほどせん断剛性が大きくなること分かる。基準温度 23℃に対するせん断剛性の変化率は、女川 2 号炉の環境条件を踏まえ-15℃から+40℃までの範囲を確認しており、-15℃では+35%程度、+40℃では-5%程度であった。

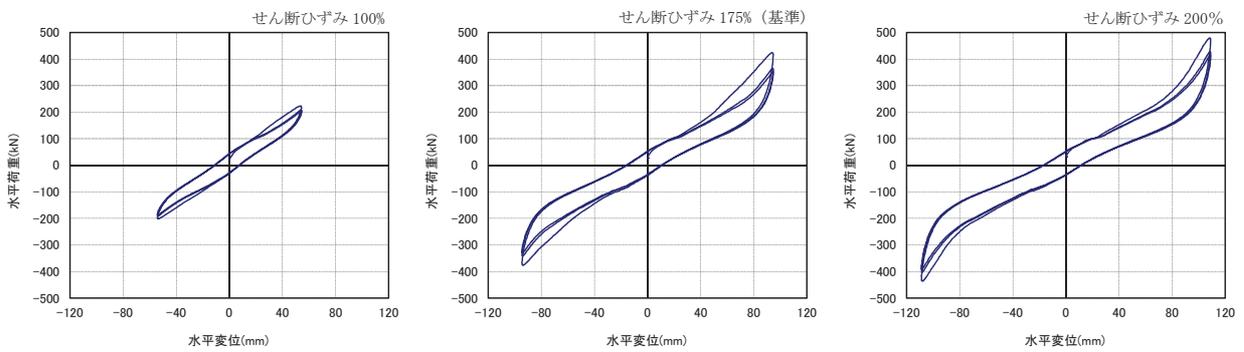
一方で、低温時には荷重-変位曲線が膨らんでいることから等価減衰定数の値が大きくなっていると推測される。等価減衰定数の分析結果については 1.5 項に示す。

(6) 熱老化特性試験

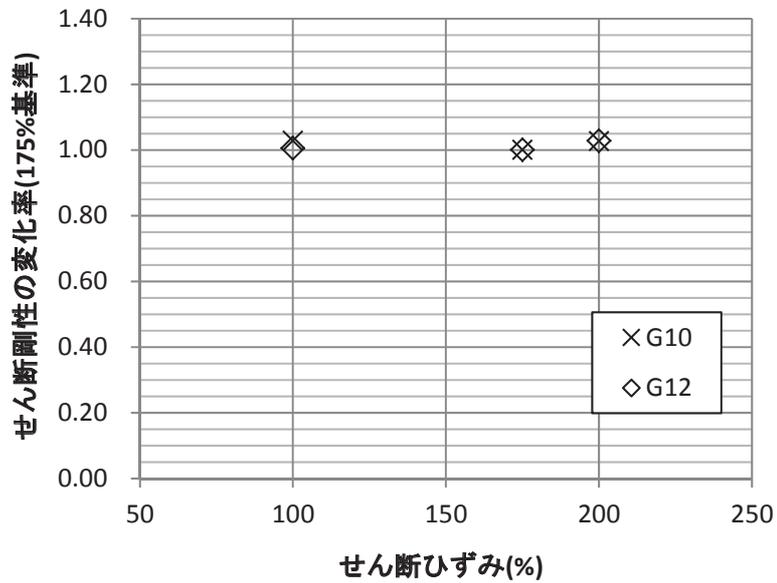
添付 5-3 図の(f)に示す熱老化特性試験の結果より、熱老化によってせん断剛性が増加する傾向が確認された。使用期間 60 年相当の熱老化に対するせん断剛性の変化率は最大+9%程度となることが分かった。



荷重－変位曲線 (G10)

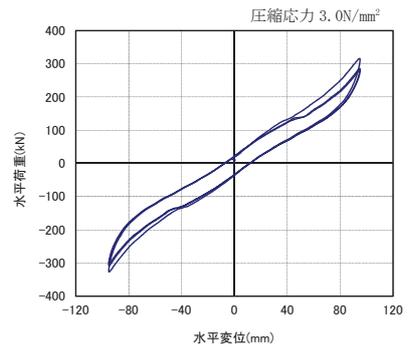
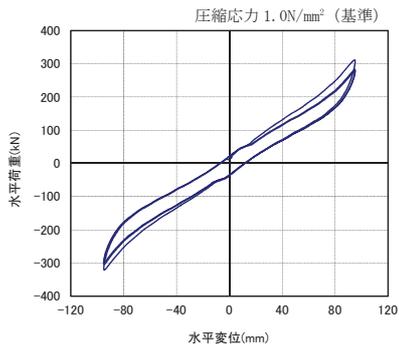
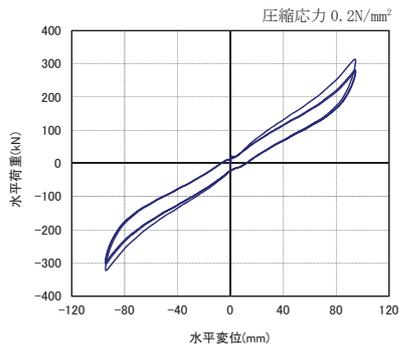


荷重－変位曲線 (G12)

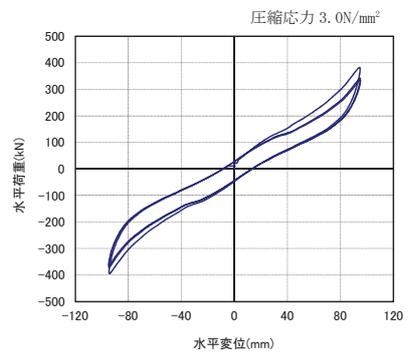
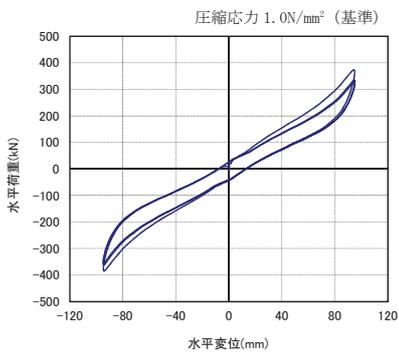
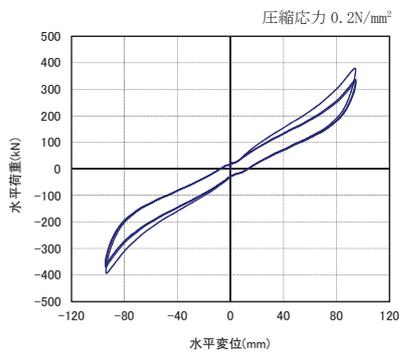


(a) せん断ひずみ依存性試験

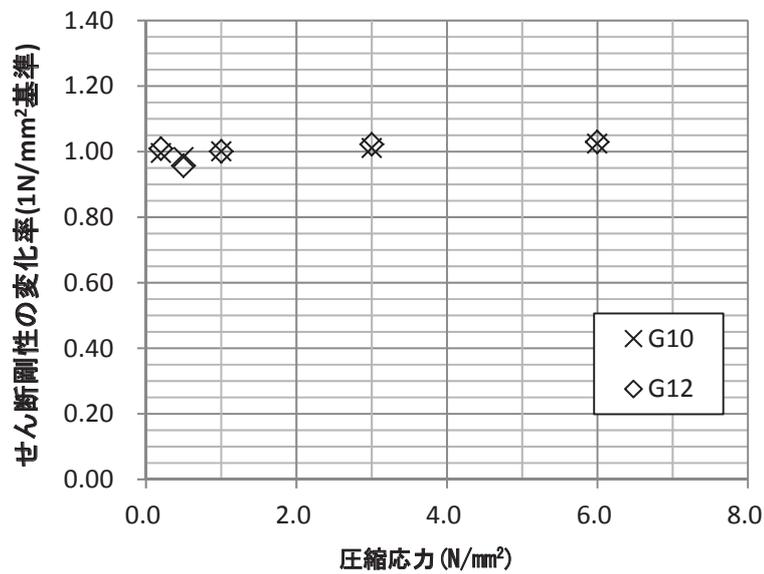
添付 5-3 図 せん断特性試験結果 (1/6)



荷重—変位曲線 (G10)

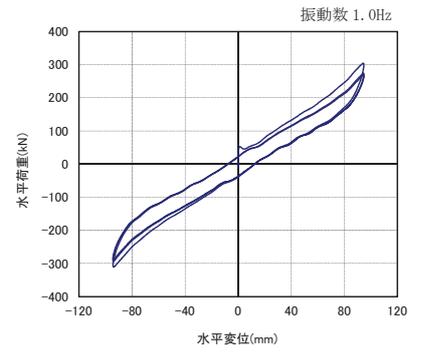
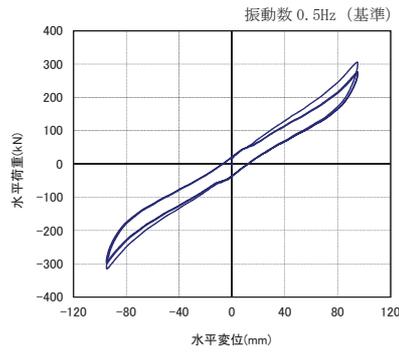
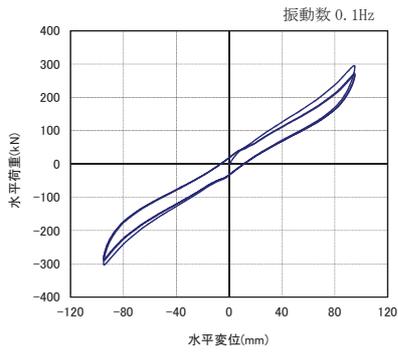


荷重—変位曲線 (G12)

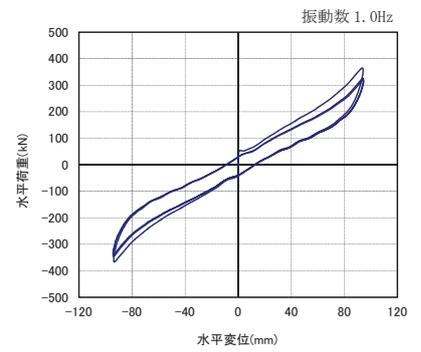
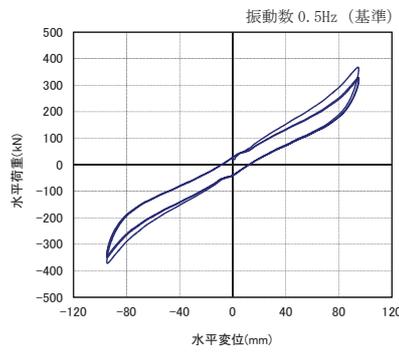
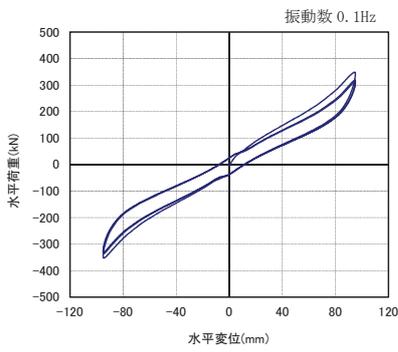


(b) 圧縮応力依存性試験

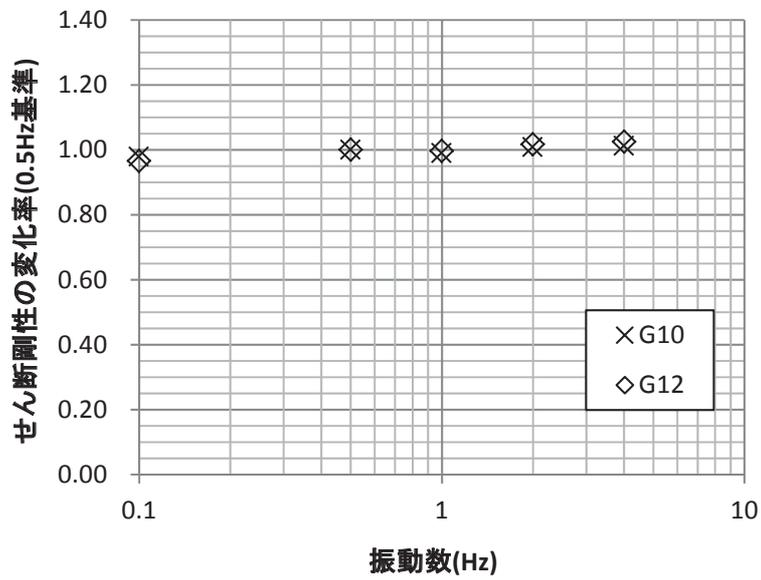
添付 5-3 図 せん断特性試験結果 (2/6)



荷重－変位曲線 (G10)



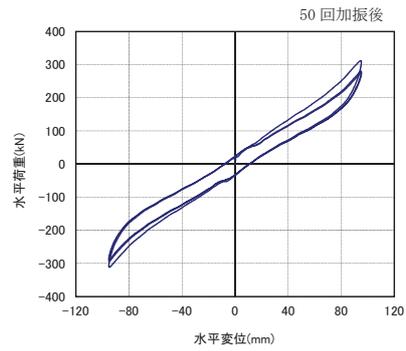
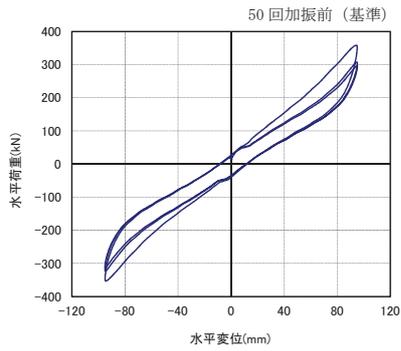
荷重－変位曲線 (G12)



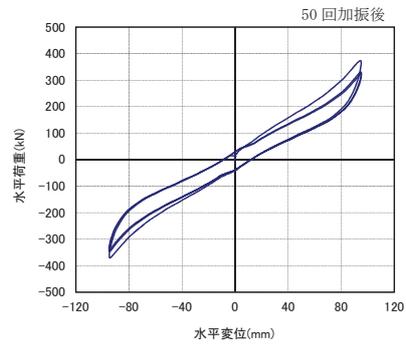
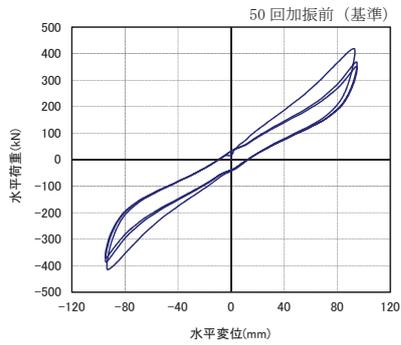
(c) 振動数依存性試験

*2Hz, 4Hz の結果は補正式より算出

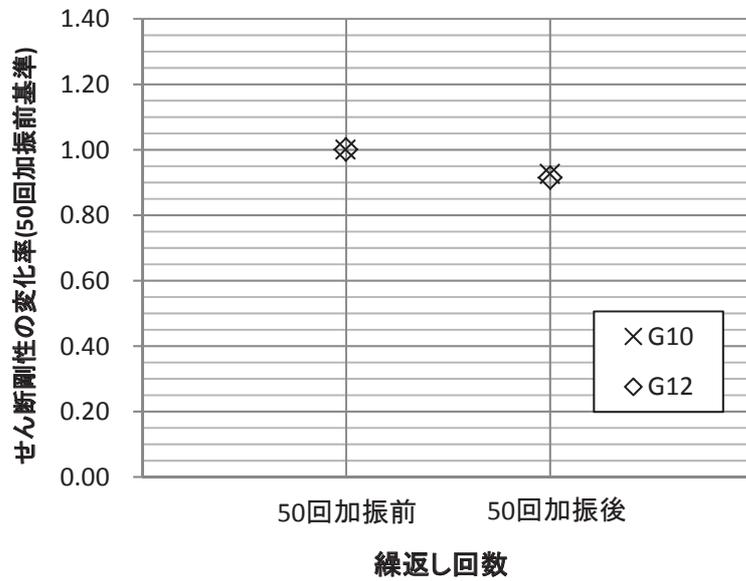
添付 5-3 図 せん断特性試験結果 (3/6)



荷重-変位曲線 (G10)

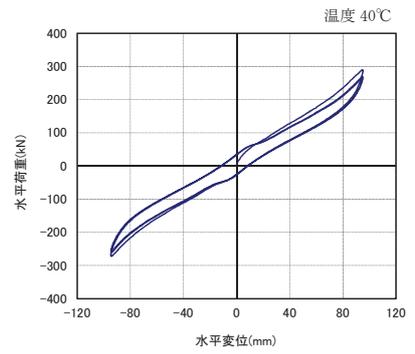
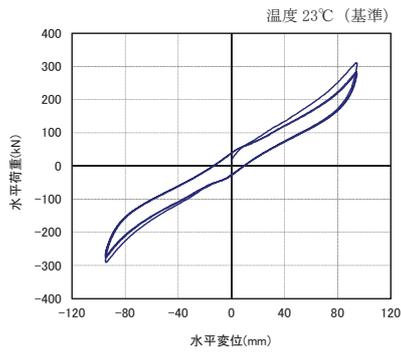
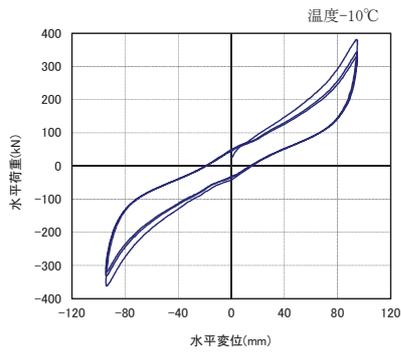


荷重-変位曲線 (G12)

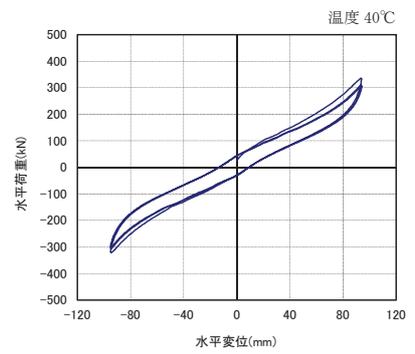
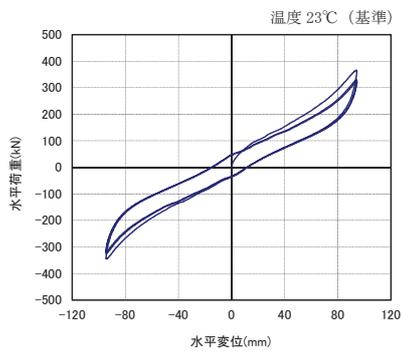
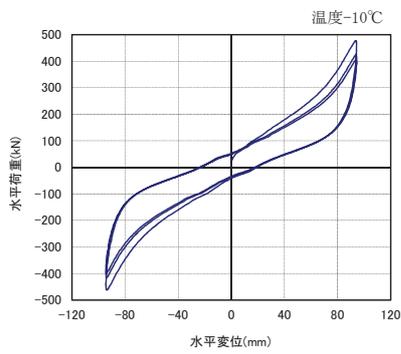


(d) 繰返し数依存性試験

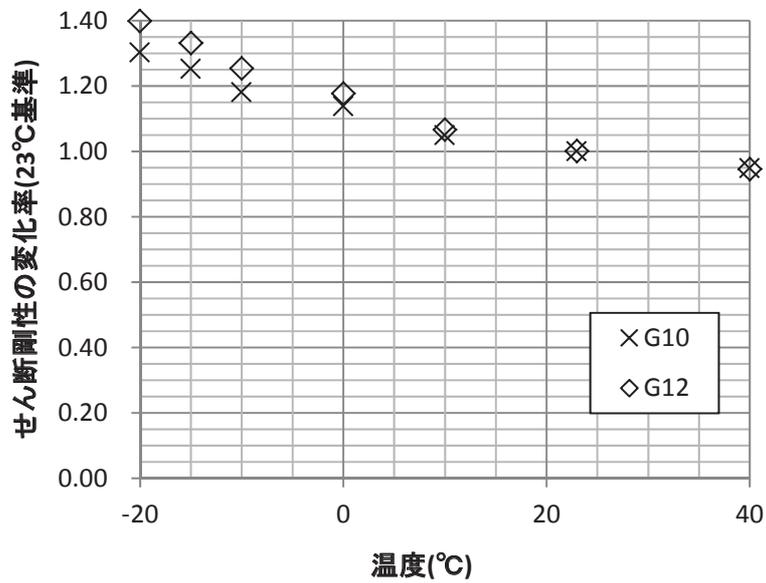
添付 5-3 図 せん断特性試験結果 (4/6)



荷重-変位曲線 (G10)



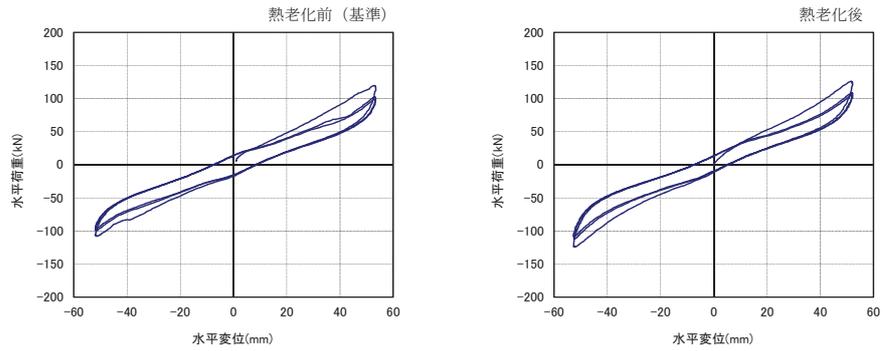
荷重-変位曲線 (G12)



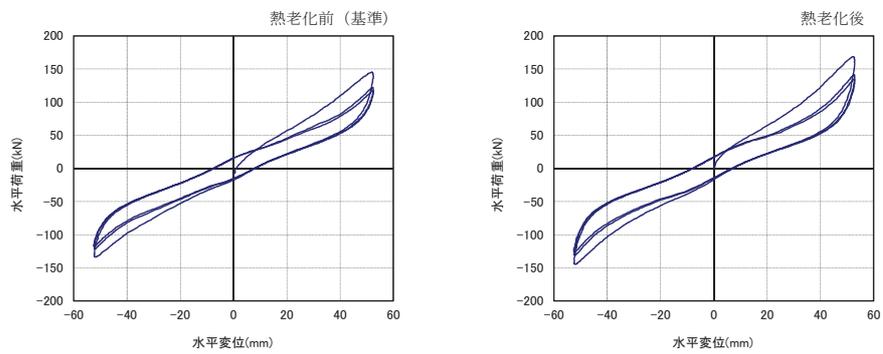
(e) 温度依存性試験

* -15°Cの結果は補正式より算出

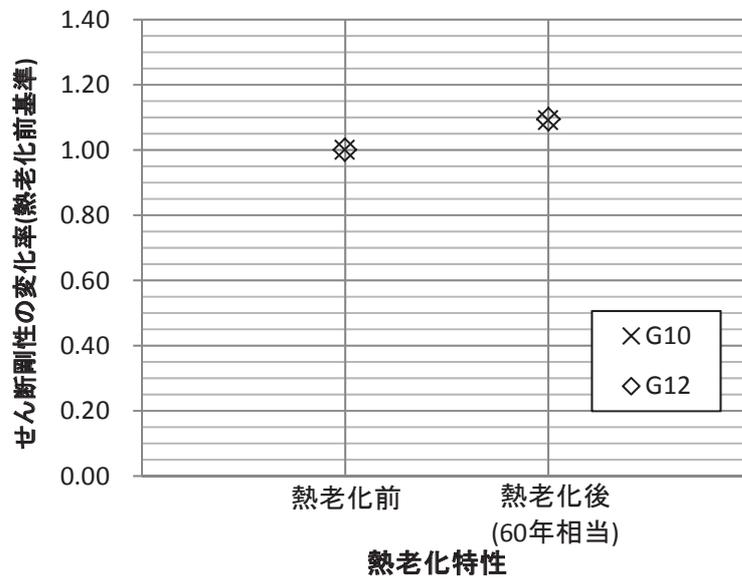
添付 5-3 図 せん断特性試験結果 (5/6)



荷重－変位曲線 (G10)



荷重－変位曲線 (G12)



(f) 熱老化特性試験

添付 5-3 図 せん断特性試験結果 (6/6)

1.3.5 せん断剛性のばらつきが及ぼす耐震設計への影響確認

各種依存性試験及び熱老化特性試験より得られたせん断剛性のばらつきについて、設計時の評価ケースとして地震応答解析に反映し、剛性のばらつきを考慮したケースにおいても竜巻防護ネットの耐震性が損なわれないことを確認する。適用するばらつきの設定方針を以下に示す。

1.3.4 項の試験結果より、せん断剛性のばらつきに与える影響の大きい項目としては、せん断ひずみの繰返し数、温度変化及び熱老化が挙げられる。試験結果より得られたせん断剛性の変化率を考慮して、設定するばらつきの範囲を添付5-5表に示す。

地震による繰返しせん断ひずみを受けた後の剛性の変化率として、繰返し数依存性試験の結果から-10%の変化率を考慮する。

環境条件（温度）によるせん断剛性の変化率は、女川の屋外環境条件が-15℃～36℃であることを考慮し、温度依存性試験の結果から+35%及び-5%の変化率を考慮する。

経年変化によるせん断剛性の変化率として、熱老化特性試験結果から+10%の変化率を考慮する。

1.3.1 項に示すとおり、ゴム支承は製品初期ばらつきとして±10%を設計上考慮し、この範囲内であることを製品試験で確認することとしているため、ばらつきの影響確認においても±10%を考慮する。

以上の各項目のばらつき設定を積算し、保守的に繰り上げた値として+60%から-30%をばらつきの設定として考慮する。

添付 5-5 表 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）
繰返し数	—	-10%
温度	+35%	-5%
熱老化	+10%	—
初期ばらつき	+10%	-10%
積算値	+55%	-25%
影響確認用	+60%	-30%

1.4 せん断変形性能

ゴム支承のせん断ひずみに対する評価基準値として、水平荷重-水平変位の関係がほぼ安定した特性を示す範囲であり、かつ、せん断破壊に対する余裕を確保した許容せん断ひずみ 250%を設定している。本設定の妥当性を確認するため、せん断変形性能試験を実施する。

試験は、1.3.4 項の各種依存性試験と同様に、「JIS K 6411:2012」の試験方法を参考に設計における適用条件を踏まえ試験条件を設定した。試験体についても「JIS K 6411:2012」に対応した標準試験体とし、ゴム材料の種別は G10, G12 を適用する。試験項目、測定項目及び試験体を添付 5-6 表に示す。

添付 5-6 表 せん断変形性能試験の試験項目と試験体

試験	測定項目	試験体		
		適用規格	形状	せん断弾性係数
せん断変形性能試験 ・限界性能	せん断変形性能 ・破断せん断ひずみ	JIS K6411:2012 標準試験体 No. 3*	有効平面寸法 400mm×400mm 総ゴム厚 54mm (9mm×6層)	G10 大梁用 1.0N/mm ² G12 フレーム用 1.2N/mm ²
熱老化特性試験 ・限界性能	せん断変形性能 ・破断せん断ひずみ (熱老化なし, あり)	JIS K6411:2012 標準試験体 No. 2*	有効平面寸法 240mm×240mm 総ゴム厚 30mm (5mm×6層)	G10 大梁用 1.0N/mm ² G12 フレーム用 1.2N/mm ²

* JIS K6411 で寸法等が規定されている試験体

1.4.1 試験方法

(1) せん断変形性能試験

せん断ひずみ 250%時及び 300%時の繰返し挙動の安定性並びに破断せん断ひずみを確認する。まず、固定荷重に相当する圧縮応力 1.0N/mm²の鉛直荷重を載荷した状態で、せん断ひずみ 175%による正負繰返し加振を 3 回行い、せん断特性を確認する。その後、許容せん断ひずみに相当する±250%の繰返しを 6 回、300%の繰返しを 3 回行った後、単調載荷を行い、破断せん断ひずみを確認する。

(2) 熱老化特性試験

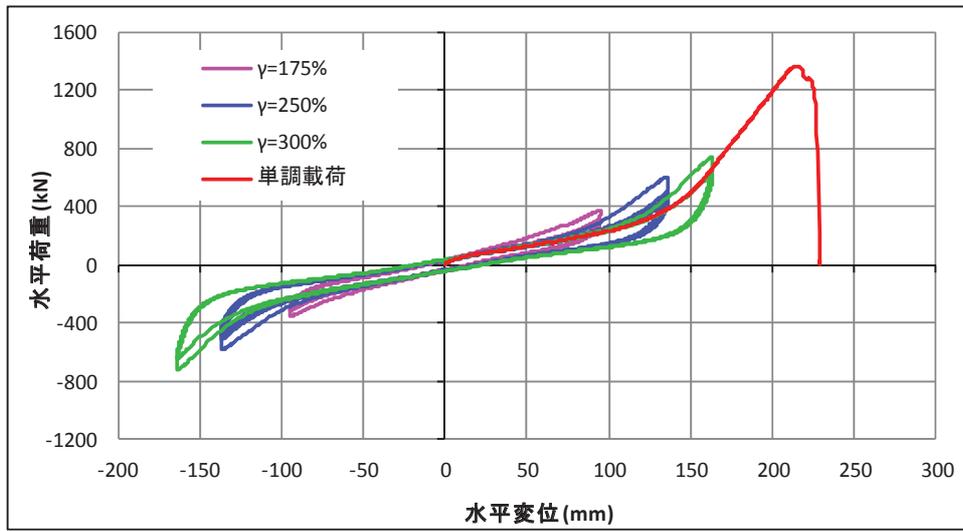
熱老化をさせていない試験体及び熱老化をさせた試験体それぞれに対して、(6)と同様のせん断変形性能試験を行い、せん断ひずみ 250%時及び 300%時の繰返し挙動の安定性並びに破断せん断ひずみを確認する。

1.4.2 試験結果

熱老化させていない試験体のせん断変形性能試験の荷重－変位曲線を添付 5-4 図及び添付 5-5 図に示す。使用期間 60 年相当の熱老化させた試験体のせん断変形性能試験の荷重－変位曲線を添付 5-6 図に示す。

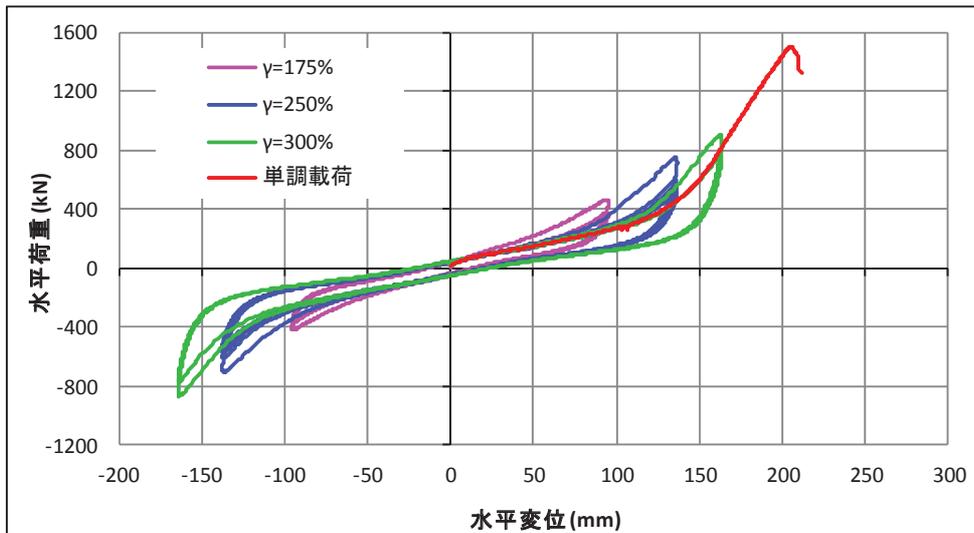
試験結果より、熱老化によらず破断ひずみは許容ひずみ 250%に対して十分な余裕を有していることが確認された。また、熱老化の有無によって破断ひずみに大きな相違がないことも確認している。

破断ひずみ: 399%



(a) 荷重-変位曲線 (G10)

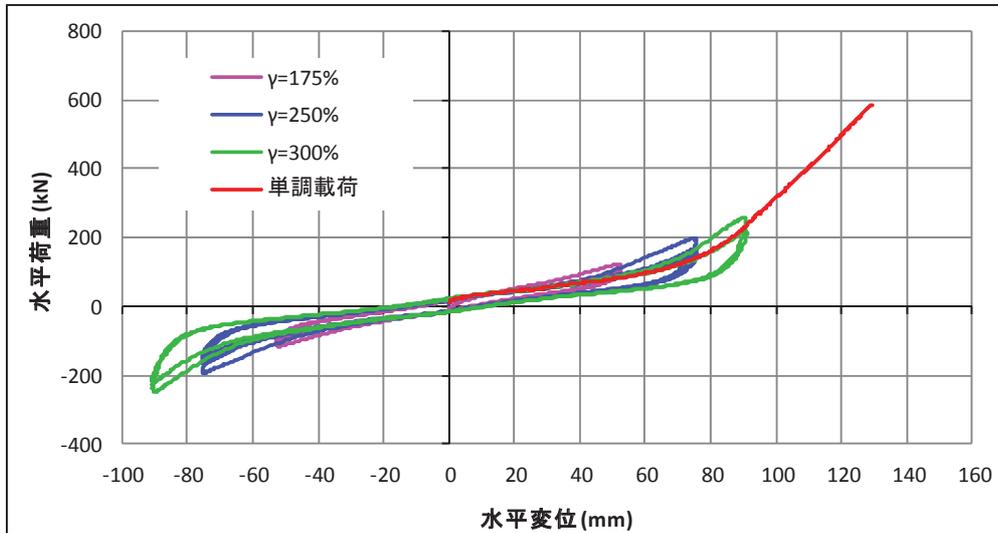
破断ひずみ: 380%



(b) 荷重-変位曲線 (G12)

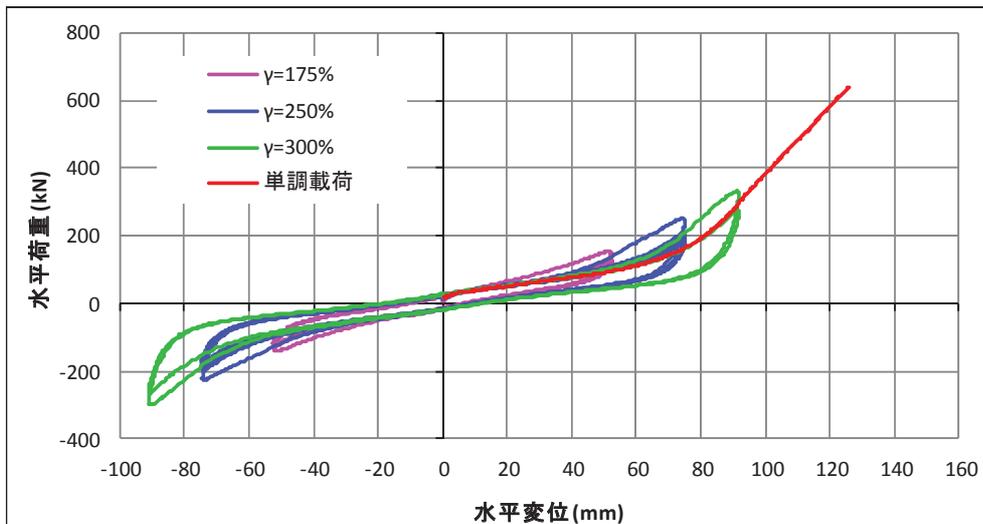
添付 5-4 図 せん断変形性能試験結果 (標準試験体 No. 3, 熱老化無し)

最大ひずみ(破断せず): 431%



(a) 荷重-変位曲線 (G10)

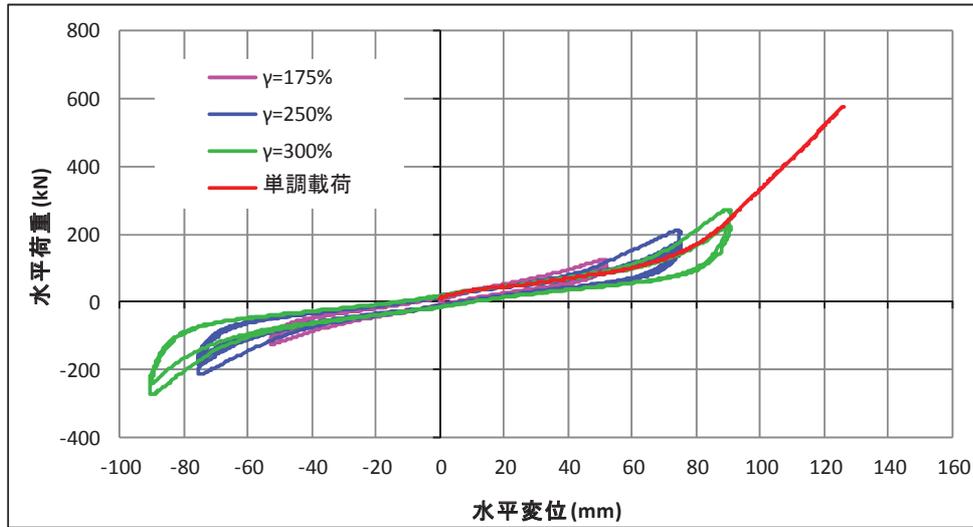
最大ひずみ(破断せず): 420%



(b) 荷重-変位曲線 (G12)

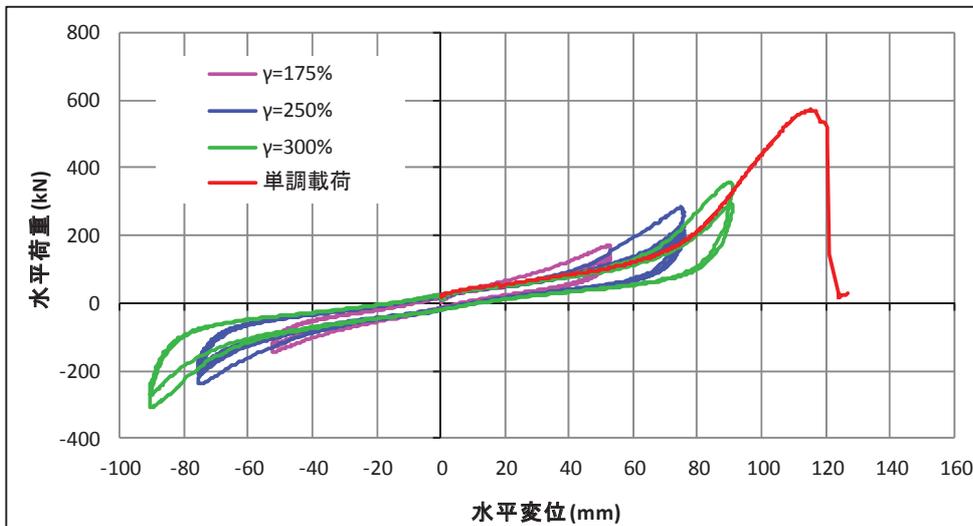
添付 5-5 図 せん断変形性能試験結果 (標準試験体 No. 2, 熱老化無し)

最大ひずみ(破断せず): 420%



(a) 荷重-変位曲線 (G10)

破断ひずみ: 384%



(b) 荷重-変位曲線 (G12)

添付 5-6 図 せん断変形性能試験結果 (標準試験体 No. 2, 熱老化有り)

1.5 等価減衰定数

等価減衰定数は測定した試験結果から次式によって求められる。

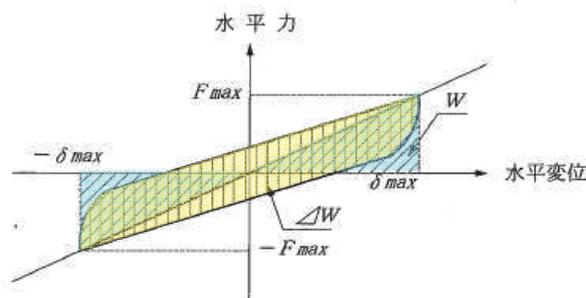
$$h_{eq} = \Delta W / 2\pi W$$

ここに

h_{eq} : 等価減衰定数

W : 弾性エネルギー (添付 5-7 図に示す三角形面積)

ΔW : 吸収エネルギー (添付 5-7 図に示す履歴曲線で囲まれる面積)



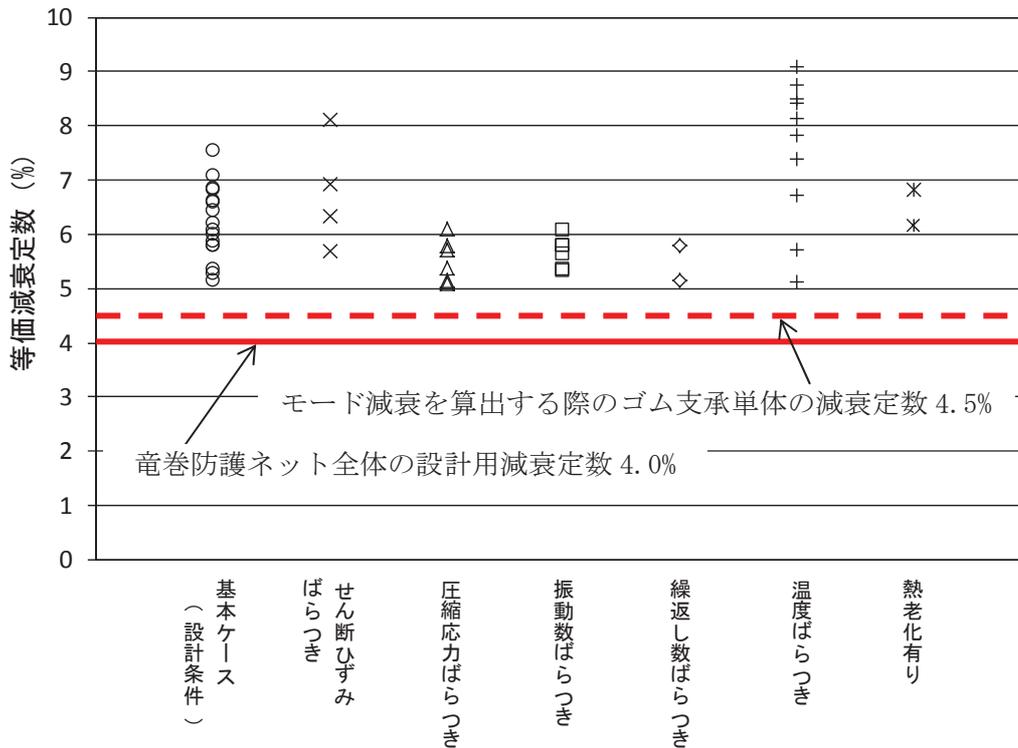
添付 5-7 図 等価減衰定数の算出方法²⁾

道路橋示方書 V 耐震設計編³⁾では、最近の実験研究成果によれば 0.04 程度以上の等価減衰定数が得られており、使用するゴム支承の減衰特性を十分に把握した上で適切な等価減衰定数を設定するのがよいとされている。今回、各種依存性試験及び熱老化特性試験において実施したせん断特性試験の結果に基づき、設計で用いる等価減衰定数を設定する。

せん断特性試験の結果を添付 5-8 図に示す。今回の試験結果から、設計条件並びにばらつきを考慮した条件のいずれにおいても 5.0%以上の等価減衰定数が得られていることが分かる。竜巻防護ネットの水平方向変形モードはゴム支承の変形が主体的であること及び本試験結果より安定して 5.0%以上の等価減衰定数が得られていることを踏まえ、耐震設計における竜巻防護ネット全体の水平方向減衰としては 4.0%を適用する。詳細は添付資料 2 に示しているが、ゴム支承単体の減衰を 4.5%、その他の鋼製部材の減衰を 2.0%と設定してモード減衰を算出した結果、4.0%より大きな減衰が得られていたことから、耐震性評価としては保守的に 4.0%と一律設定しているものである。

減衰については、実機へ使用するゴム支承の製品検査においてせん断特性試験を行うことで、その妥当性を確認する。

なお、添付 5-8 図に示すとおり温度依存性試験より得られた結果の中には 8~9%程度の大きな減衰が得られている結果があるが、これは 0℃以下の設定時のものであることから、ゴム支承は低温環境下で高減衰の特性を示すことが分かる。



添付 5-8 図 各種試験より得られた等価減衰定数の測定値

1.6 評価方法

1.6.1 評価項目

ゴム支承の評価項目は道路橋支承便覧に従い添付 5-7 表に示すとおりとする。せん断ひずみについては地震動のケース別に評価を実施する。それ以外の評価項目についてはケースごとの評価は省略し、全ての地震動ケースの中から鉛直力と水平移動量（水平力）の最大を抽出し最大値同士を組合せて評価する。

添付 5-7 表 ゴム支承の評価項目

評価項目		評価方法	
地震時	荷重伝達機能	水平力支持	せん断ひずみの評価
		鉛直力支持	引張応力の評価 座屈安定性の評価 内部鋼板の引張応力の評価
常時	荷重伝達機能	鉛直力支持	最大圧縮応力の評価
	疲労耐久性	温度伸縮による移動	局部せん断ひずみの評価

1.6.2 せん断ひずみの評価

(1) せん断ひずみの評価式

水平力支持機能は，発生するせん断ひずみが許容せん断ひずみを超えないことを確認する。次式によって，水平変位量を総ゴム厚で除して求めたゴムのせん断ひずみを評価する。^{1),3)}

$$\gamma_e = \Delta l_e / \Sigma t_e \leq \gamma_{ea}$$

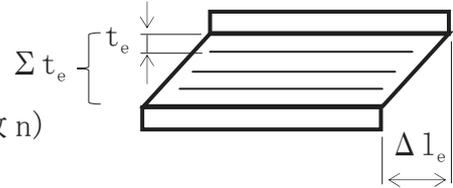
ここに，

γ_e : 地震時のせん断ひずみ

Δl_e : 地震時の水平変位量

Σt_e : 総ゴム厚 (=ゴム1層厚 t_e × 層数 n)

γ_{ea} : 地震時のせん断ひずみの許容値



(2) せん断ひずみの許容値

ゴム支承のせん断破壊に対して必要な安全性が確保されるようにゴム支承の破断試験など十分な検証に基づき許容せん断ひずみを設定する。今回，道路橋示方書V³⁾に基づき，水平荷重－水平変位の関係が安定した特性を示す範囲にあり，せん断破壊に対して必要な安全性が確保されるように設定されたせん断ひずみ250%を許容せん断ひずみとする。許容せん断ひずみを設定するにあたって採用するゴム支承と同種の試験体を製作し，せん断変形性能試験より破断ひずみを確認している。試験結果より破断ひずみはいずれも350%を超えるひずみとなっており許容値とした250%は十分に余裕のある設定となっている。また，過去の試験結果¹⁾によって得られた破断ひずみについても300%～450%に分布しており，250%との設定は破断ひずみに対して余裕が確保されていることが分かる。

1.6.3 引張応力の評価

(1) 引張応力の評価式

地震時の上向きの力によって生じる引張応力を次式によって評価する。¹⁾

$$\sigma_{te} = R_U / A_{te} \leq \sigma_{ta}$$

ここに，

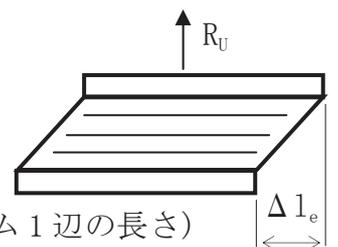
σ_{te} : 地震時の引張応力

R_U : 上向きの反力

A_{te} : 地震時の移動量を控除した引張に有効な面積

$A_{te} = A_e - B \cdot \Delta l_e$ (B:有効幅，ゴム支承の積層ゴム1辺の長さ)

σ_{ta} : 引張応力の許容値



(2) 引張応力の許容値

引張応力の許容値は，道路橋支承便覧に基づき，せん断弾性係数の材料物性ごとに規定されている許容値から以下のとおり設定する。

G10以上： $\sigma_{ta} = 2.0 \text{ N/mm}^2$

引張応力の許容値は，実験結果により求めた引張破断応力に対して余裕を確保して定められている。既往の引張破断試験結果¹⁾では，一定の水平力を与え

せん断変形しているゴム支承に引張力を作用させ試験体を破断させ、破断実応力（せん断変形を控除した有効面積の応力）の下限值は $5\text{N}/\text{mm}^2$ 程度である。許容引張応力は、破断実応力に対して 2.5 倍の安全余裕を考慮して設定されている。その他既往の研究⁵⁾では、G8, G10, G12 の天然ゴム系積層ゴム支承に対してせん断変形を与えた引張試験を実施し、引張降伏応力が道路橋支承便覧で定める許容引張応力以上であること、許容引張応力付近では安定した線形特性を示す領域にあること、引張限界は許容引張応力に比べ十分余裕があることが確認されている。

1.6.4 座屈安定性の評価

(1) 座屈安定性の評価式

圧縮力が作用したときゴム支承本体の座屈に対して安全でなければならない。座屈安定性は地震時のせん断変形時における圧縮に有効な面積より算出した圧縮応力により評価する。次式により座屈に対する安全性を確認する。

$$\sigma_{ce} = R_L / A_{ce} \leq \sigma_{cra}$$

ここに、

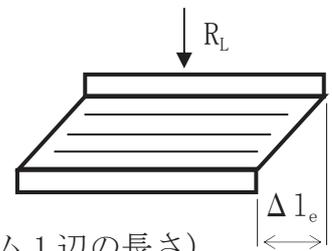
σ_{ce} : 地震時の圧縮応力

R_L : 下向きの反力

A_{ce} : 地震時の移動量を控除した圧縮に有効な面積

$A_{ce} = A_e - B \cdot \Delta l_e$ (B: 有効幅, ゴム支承の積層ゴム 1 辺の長さ)

σ_{cra} : 道路橋支承便覧に定める座屈を考慮した圧縮応力の許容値



(2) 圧縮応力の許容値

座屈を考慮した圧縮応力の許容値は次式より求める。

$$\sigma_{cra} = G_e \cdot S_1 \cdot S_2 / f_{cr}$$

ここに、

S_1 : ゴム支承の一次形状係数

$$S_1 = A_e / (4 \cdot B \cdot t_e)$$

S_2 : ゴム支承の二次形状係数

$$S_2 = B / \sum t_e$$

f_{cr} : 荷重の大きさ及び発生頻度を考慮した係数(地震時: 1.5)

1.6.5 内部鋼板の引張応力の評価

(1) 内部鋼板の評価式

ゴム支承に補強材として使用する内部鋼板には、下図のように鉛直荷重によって水平方向への引張力 N が発生する。圧縮力が作用したときゴム支承の内部鋼板に生じる引張応力を次式により評価する。

$$\sigma_s = f_c \sigma_{ce} t_e / t_s \leq f_t$$

ここに

σ_s : 内部鋼板の引張応力

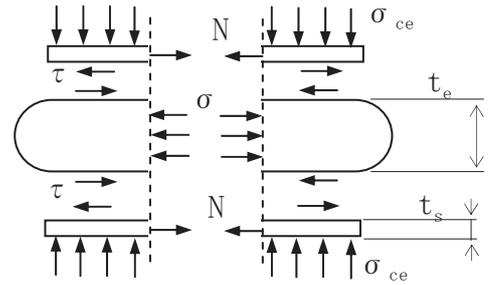
σ_{ce} : 地震時の圧縮応力

t_e : ゴム一層の厚さ

t_s : 内部鋼板の厚さ

f_c : 圧縮応力の分布を考慮した引張応力の係数 (=2.0)

f_t : 鋼材の許容引張応力



内部鋼板の引張応力の算出にあたっては、圧縮応力を静的荷重として内部鋼板の引張応力を求めている。ゴム支承平面内の圧縮応力分布を考慮して、実験より最大応力と平均応力の比を確認して係数 f_c が設定されている。¹⁾

(2) 内部鋼板の許容値

内部鋼板の引張応力の許容値は、「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005/2007)」に基づき算出する。

1.6.6 最大圧縮応力の評価

(1) 最大圧縮応力の評価式

常時の鉛直力支持として、常時の最大反力によって生じる最大圧縮応力を次式により評価する。

$$\sigma_{max} = R_{max} / A_{cn} \leq \sigma_{maxa}$$

ここに、

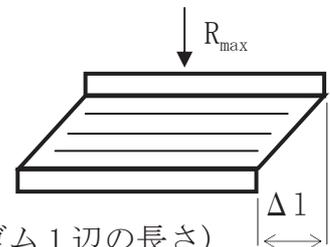
σ_{max} : 最大圧縮応力

R_{max} : 常時の最大反力

A_{cn} : 常時の移動量を控除した圧縮に有効な面積

$$A_{cn} = A_e - B \cdot \Delta l \quad (B: \text{有効幅, ゴム支承の積層ゴム1辺の長さ})$$

σ_{maxa} : 道路橋支承便覧に定める最大圧縮応力の許容値



(2) 最大圧縮応力の許容値

最大圧縮応力の許容値はゴム支承の一次形状係数 S_1 の値によって次式より求める。

a) $S_1 < 8$ のとき

$$\sigma_{maxa} = 8.0 \text{ N/mm}^2$$

b) $8 \leq S_1 < 12$ のとき

$$\sigma_{maxa} = S_1 \text{ N/mm}^2$$

c) $12 \leq S_1$ のとき

$$\sigma_{maxa} = 12.0 \text{ N/mm}^2$$

1.6.7 局部せん断ひずみの評価

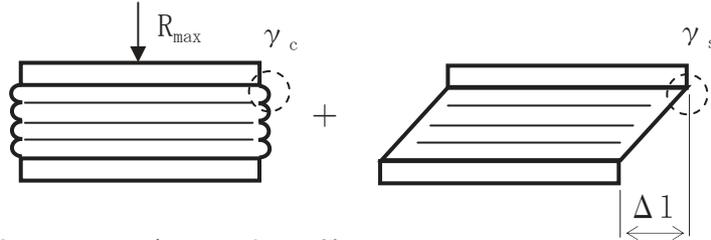
(1) 局部せん断ひずみの評価式

常時の疲労耐久性について、圧縮力、温度伸縮による移動量によって生じる局部せん断ひずみの和を次式により評価する。

$$\gamma_t = \gamma_c + \gamma_s \leq \gamma_{ta}$$

ここに、

γ_t : 局部せん断ひずみ (ゴム支承が圧縮力や水平変位等を受けて変形した際にゴムの端部の鋼板との境に生じる局部的なせん断ひずみ)



γ_c : 鉛直力による局部せん断ひずみ

$$\gamma_c = 8.5 \cdot S_1 \cdot R_{max} / E \cdot A_{cn}$$

ここに、

S_1 : 一次形状係数

R_{max} : 常時の最大反力

E : ゴム支承の縦弾性係数

A_{cn} : 常時の移動量を控除した圧縮に有効な面積

$$A_{cn} = A_e - B \cdot \Delta l_e \quad (B: \text{有効幅, ゴム支承の積層ゴム 1 辺の長さ})$$

γ_s : 常時のせん断ひずみ

$$\gamma_s = \Delta l / \Sigma t_e$$

ここに

Δl : 常時の移動量 (温度変化による伸縮)

Σt_e : ゴム層の総厚

γ_{ta} : 道路橋支承便覧に定める局部せん断ひずみの許容値

(2) 局部せん断ひずみの許容値

局部せん断ひずみの許容値は次式により評価する。

$$\gamma_{ta} = \gamma_u / f_a$$

ここに、

γ_u : ゴムの破断伸び (添付 5-2 表に示す値)

f_a : 安全率 (=1.5)

2. 可動支承

2.1 構造概要

竜巻防護ネットに使用する可動支承の構成部品図を添付 5-9 図に示す。可動支承の使用材料を添付 5-8 表に示す。可動支承は、ベースポット、レール、すべり板等の鋼部材やゴム、樹脂等の部品を組み合わせで構成される。すべり特性は、支承製造メーカーによる試験結果に基づき、竜巻防護ネットで使用するポリアミドとステンレスの組合せの場合、摩擦係数の基準値は 0.04 となる。

2.2 モデル化

可動支承のモデル化及び設計上の配慮について以下の方針とする。

地震時移動によって可動支承には摩擦力が働くが、主桁の可動側の支承部に摩擦による水平力を分担させて主桁のゴム支承側に作用する水平力を減少させる設計を避けるため、地震応答解析モデルでは可動支承の軸方向の結合条件を自由とした。また、本来、摩擦力が移動方向と逆向きの抵抗力として作用することを利用した摩擦減衰効果があるが、ここでは摩擦減衰による地震のエネルギー吸収に期待しない設計としている。

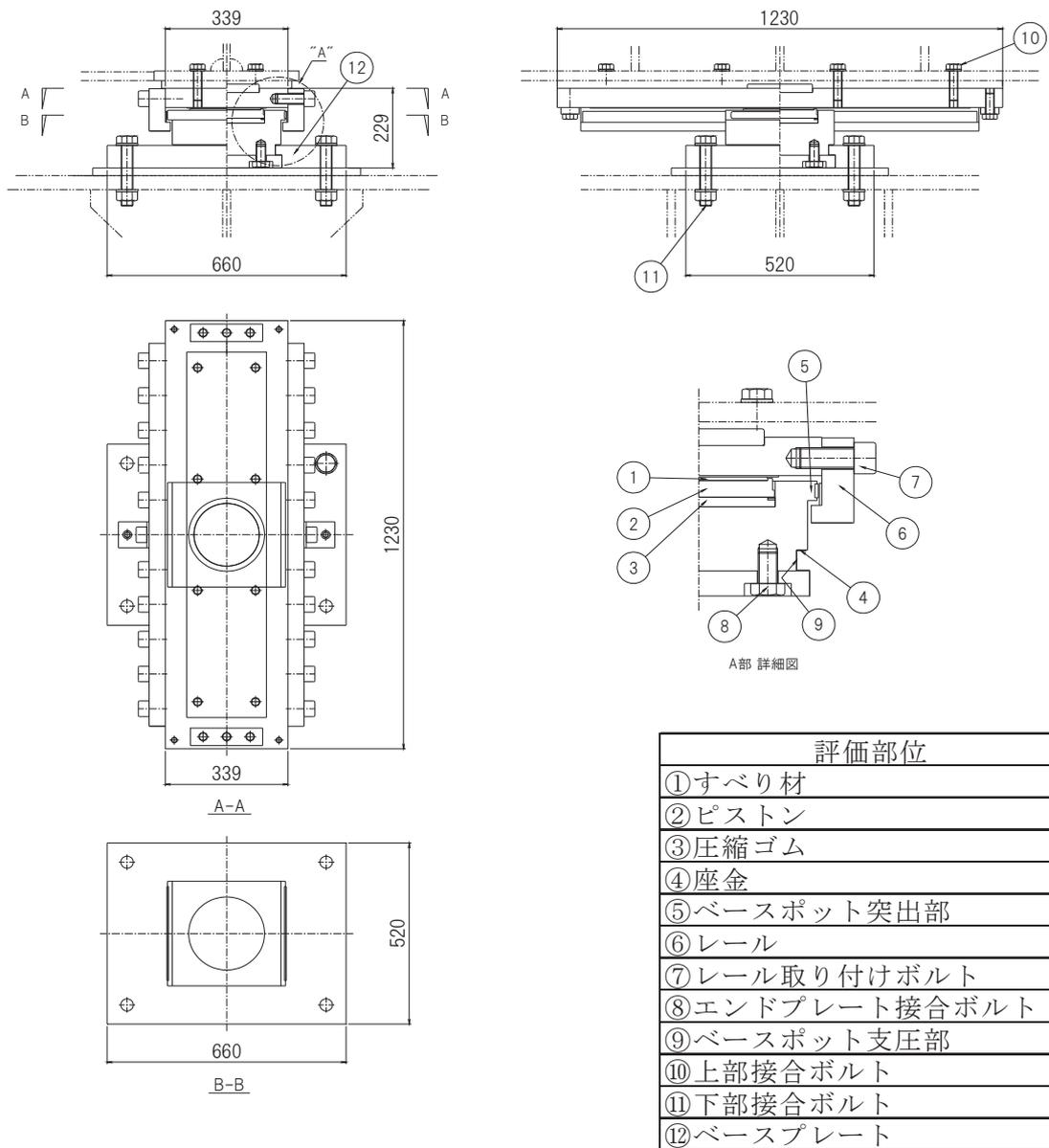
なお、摩擦係数について、温度の依存性を確認した結果を添付 5-10 図に示す。本データは、竜巻防護ネットに設置する可動支承と同じすべり材の材質の組合せ（ポリアミドと SUS）の試験体による試験結果となっている。摩擦係数は温度上昇に伴い漸減する傾向となり、20℃における摩擦係数 0.04 に対して、-15℃で 0.05 程度、40℃で 0.035 程度となる。本結果より摩擦係数の温度依存性は小さく、耐震評価に影響を及ぼす程度ではないと判断している。

また、可動支承のすべり部について経年劣化や異物混入によるすべり状態の劣化が考えられるが、経年劣化に対しては、可動支承の保全方法及び保全サイクルを保全計画へ反映し点検、管理を行う。（保守管理の方針については、「女川原子力発電所 2 号炉設計基準対象施設について」P6 条(竜巻)-別添 1-添付 4.1-34 に示す。）すべり部への異物混入に対しては、竜巻防護ネットの可動支承の設置状況を踏まえると、異物が支承下部から回り込んで混入することは考え難いことから、異物混入の可能性は低いと判断している。

2.3 評価方法

竜巻防護ネットの設計における可動支承の評価・検証項目を添付 5-9 表及び添付 5-11 図に示す。添付 5-11 図に示す各部位の構造強度評価を行い、構造強度評価上最も弱い部位を選定する。選定された部位が許容基準値に達する応力を算出し、その応力が発生するときの負荷荷重を算定し、この荷重を可動支承の許容荷重として設定している。なお、今回の評価において、構造強度評価上、最も弱い部位と選定されたのは「⑥レール」である。

移動可能量の許容値は部品寸法と組立寸法により決まるため製品の寸法検査により検証する。



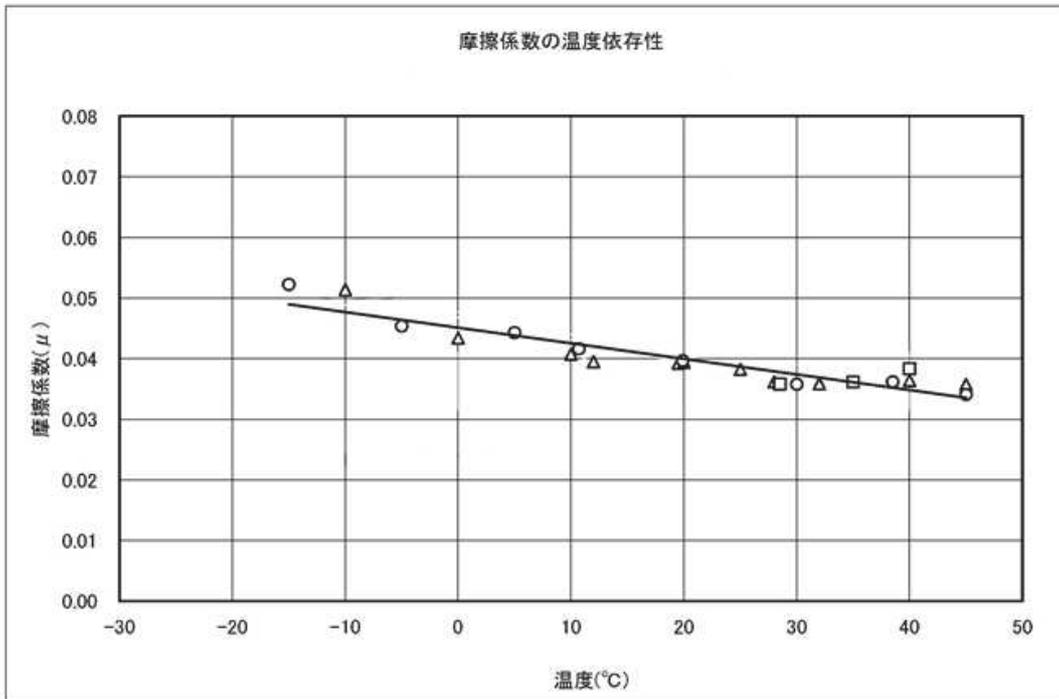
添付 5-9 図 可動支承の構成部品図

添付 5-8 表 可動支承の設計仕様

項目	材質	仕様		
		配合	ポリアミド樹脂	90%以上
すべり材	ポリアミド MC703HL		固形潤滑材	10%以下
		物性値	引張強度(N/mm ²)	60~70 ASTMD-638
			伸び(%)	15~25 ASTMD-638
			比重	1.11
			表面粗さ	Rz 25 μ 以下
		ステンレス SUS304 SUS316	材料規格	JIS G 4304 JIS G 4305
	表面処理		JIS G 4305 No2B	
	圧縮ゴム	クロロプレン 系合成ゴム C08	材料規格	JIS K 6383
鋼材 (ピストン ベースポッド レール等)	SS400 SM490	材料規格	JIS G 3101 JIS G 3106	

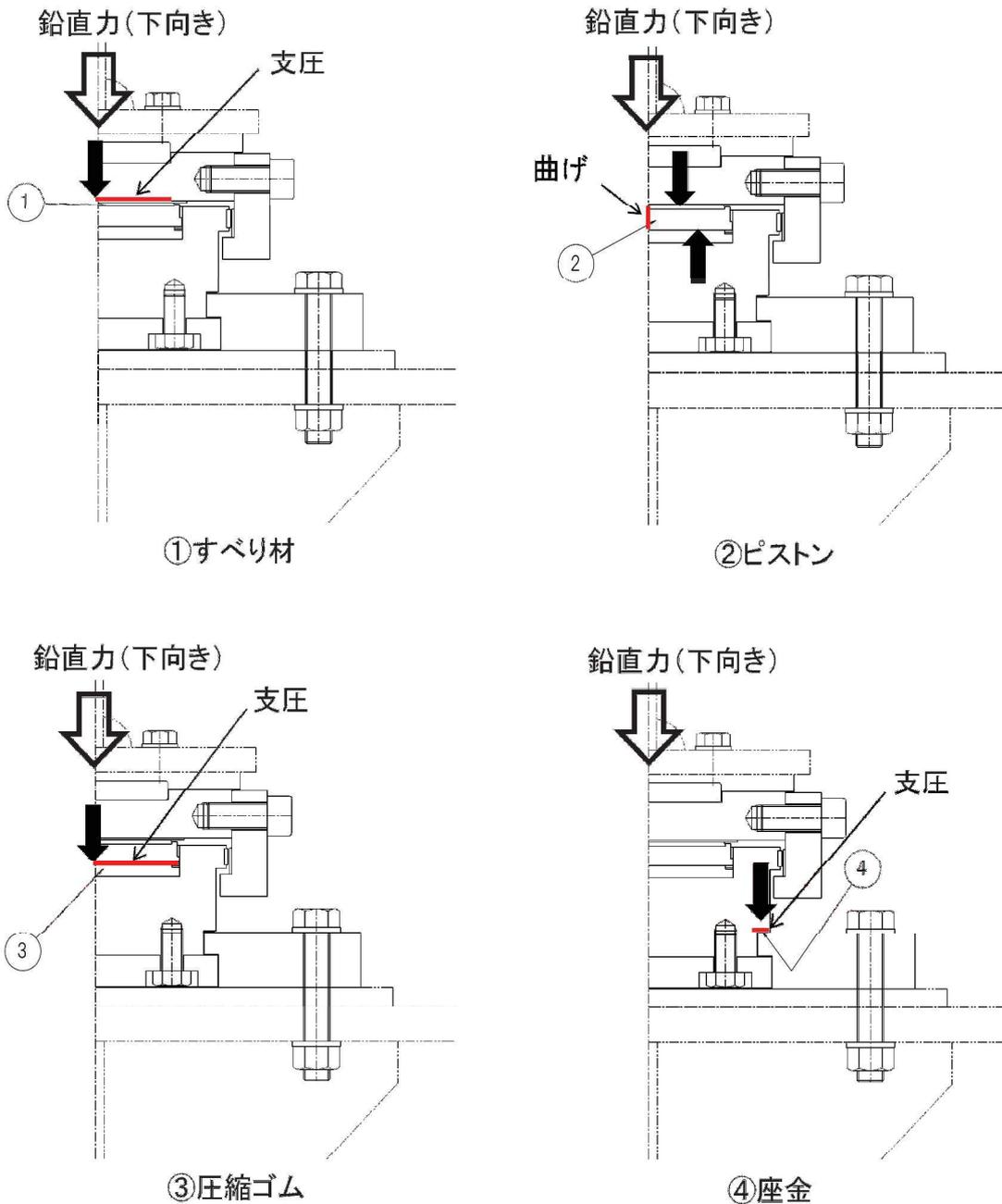
添付 5-9 表 可動支承の評価・検証項目

評価・検証項目	評価・検証方法	
	荷重伝達機能	応力評価
変位追従機能	移動量の評価	応答変位と移動可能量の比較



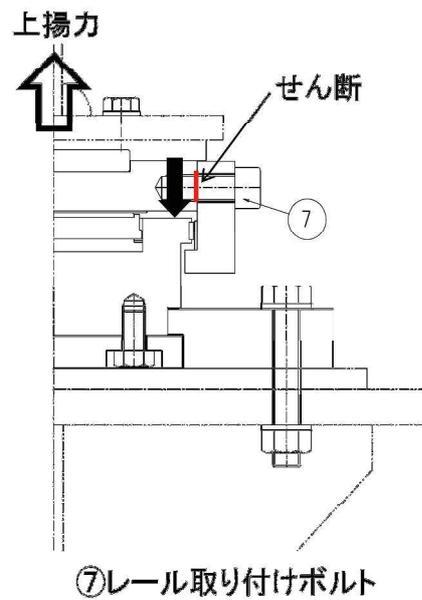
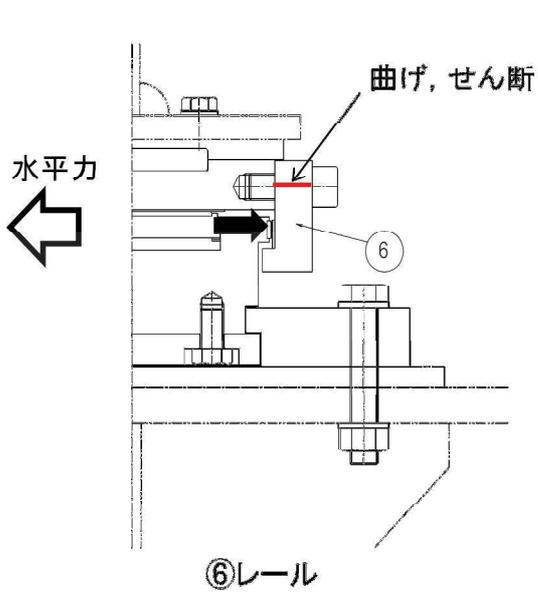
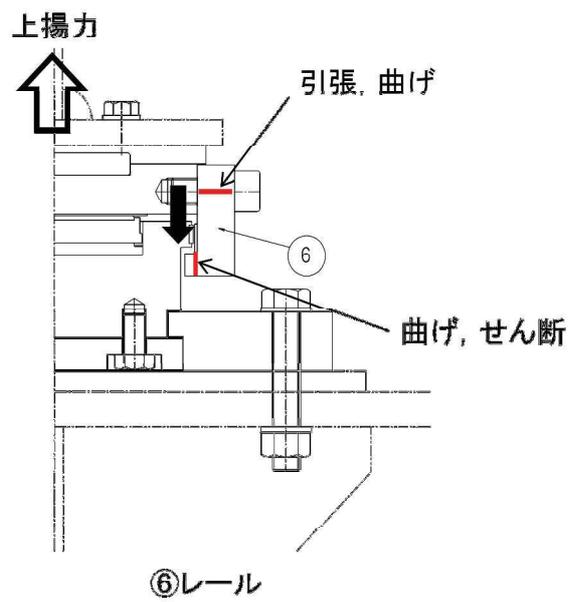
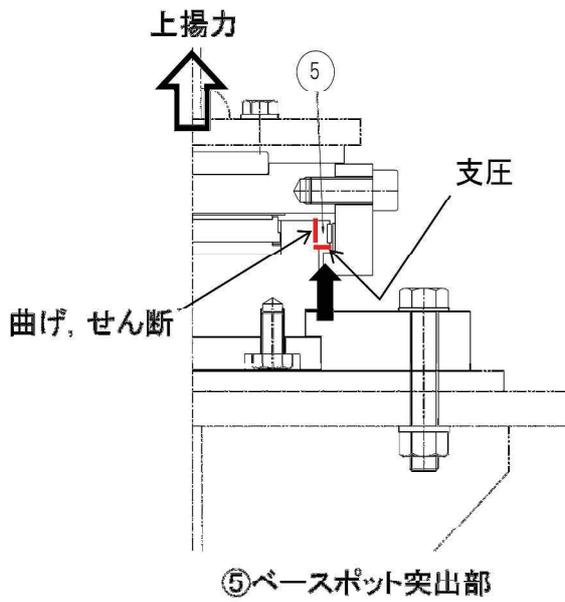
添付 5-10 図 すべり支承の摩擦係数に係る温度依存性試験結果

評価部位	作用力	評価項目
①すべり材	鉛直力（下向き）	支圧
②ピストン	鉛直力（下向き）	曲げ
③圧縮ゴム	鉛直力（下向き）	支圧
④座金	鉛直力（下向き）	支圧
⑤ベースポット突出部	上揚力	曲げ，せん断，支圧
⑥レール	上揚力，水平力	曲げ，引張，せん断
⑦レール取り付けボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑧エンドプレート接合ボルト	上揚力，水平力	引張
⑨ベースポット支圧部	水平力	支圧
⑩上部接合ボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑪下部接合ボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑫ベースプレート	上揚力，水平力	曲げ，せん断



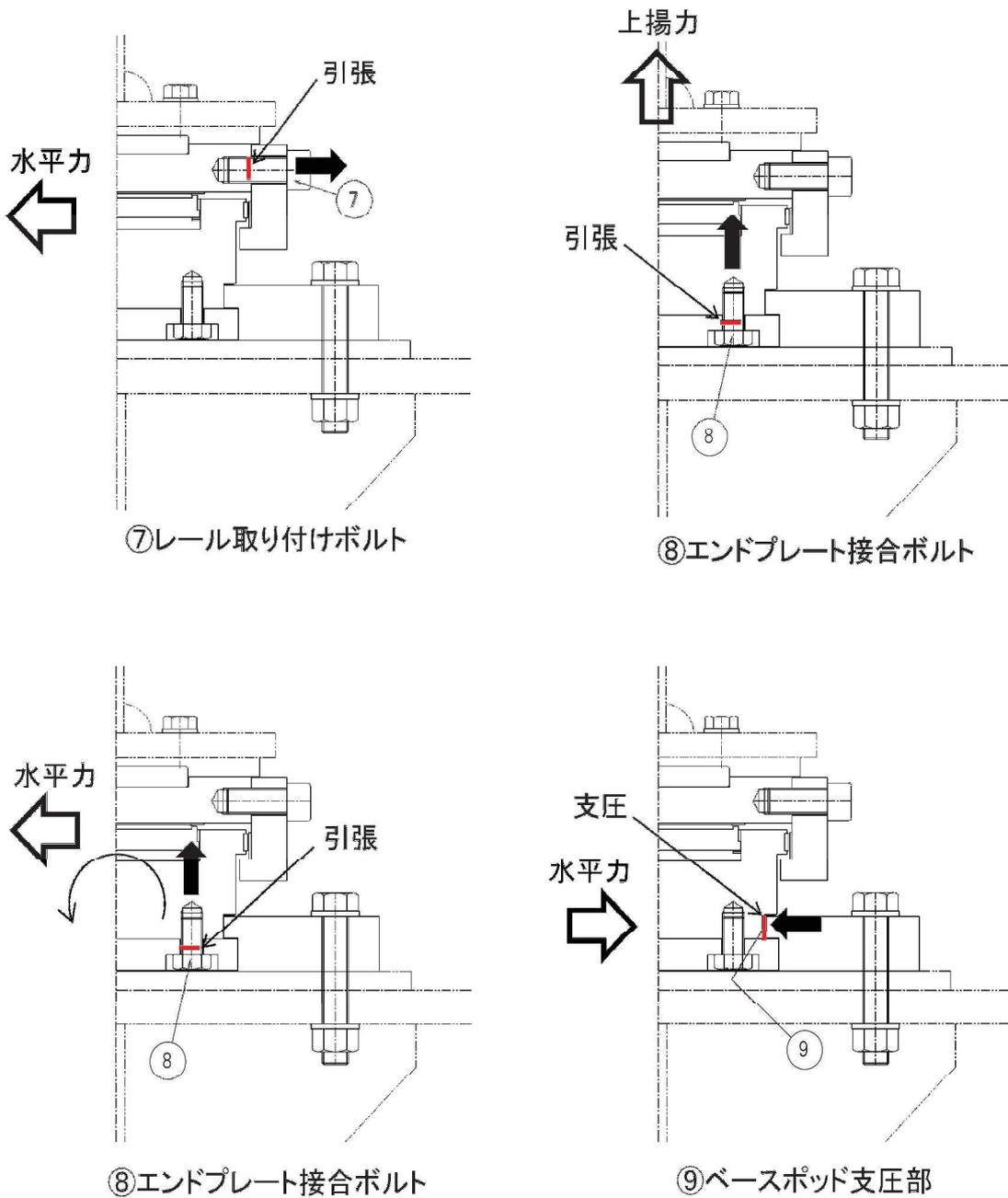
添付 5-11 図 可動支承の評価項目模式図 (1/5)

評価部位	作用力	評価項目
①すべり材	鉛直力（下向き）	支圧
②ピストン	鉛直力（下向き）	曲げ
③圧縮ゴム	鉛直力（下向き）	支圧
④座金	鉛直力（下向き）	支圧
⑤ベースポット突出部	上揚力	曲げ，せん断，支圧
⑥レール	上揚力，水平力	曲げ，引張，せん断
⑦レール取り付けボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑧エンドプレート接合ボルト	上揚力，水平力	引張
⑨ベースポット支圧部	水平力	支圧
⑩上部接合ボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑪下部接合ボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑫ベースプレート	上揚力，水平力	曲げ，せん断



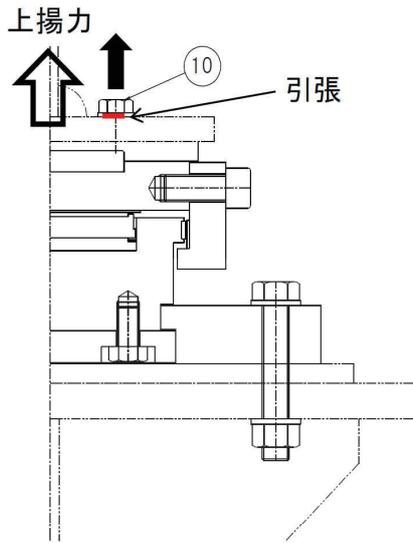
添付 5-11 図 可動支承の評価項目模式図 (2/5)

評価部位	作用力	評価項目
①すべり材	鉛直力（下向き）	支圧
②ピストン	鉛直力（下向き）	曲げ
③圧縮ゴム	鉛直力（下向き）	支圧
④座金	鉛直力（下向き）	支圧
⑤ベースポット突出部	上揚力	曲げ，せん断，支圧
⑥レール	上揚力，水平力	曲げ，引張，せん断
⑦レール取り付けボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑧エンドプレート接合ボルト	上揚力，水平力	引張
⑨ベースポット支圧部	水平力	支圧
⑩上部接合ボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑪下部接合ボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑫ベースプレート	上揚力，水平力	曲げ，せん断

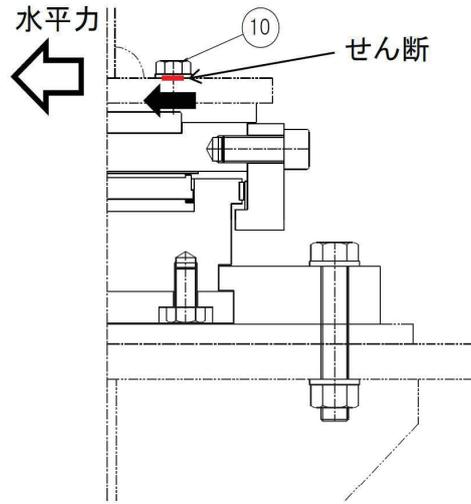


添付 5-11 図 可動支承の評価項目模式図 (3/5)

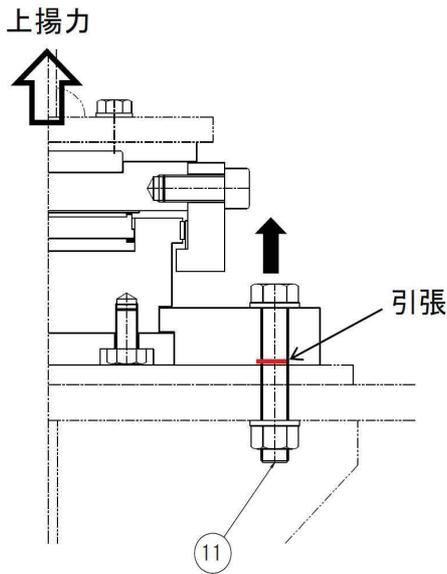
評価部位	作用力	評価項目
①すべり材	鉛直力（下向き）	支圧
②ピストン	鉛直力（下向き）	曲げ
③圧縮ゴム	鉛直力（下向き）	支圧
④座金	鉛直力（下向き）	支圧
⑤ベースポット突出部	上揚力	曲げ，せん断，支圧
⑥レール	上揚力，水平力	曲げ，引張，せん断
⑦レール取り付けボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑧エンドプレート接合ボルト	上揚力，水平力	引張
⑨ベースポット支圧部	水平力	支圧
⑩上部接合ボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑪下部接合ボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑫ベースプレート	上揚力，水平力	曲げ，せん断



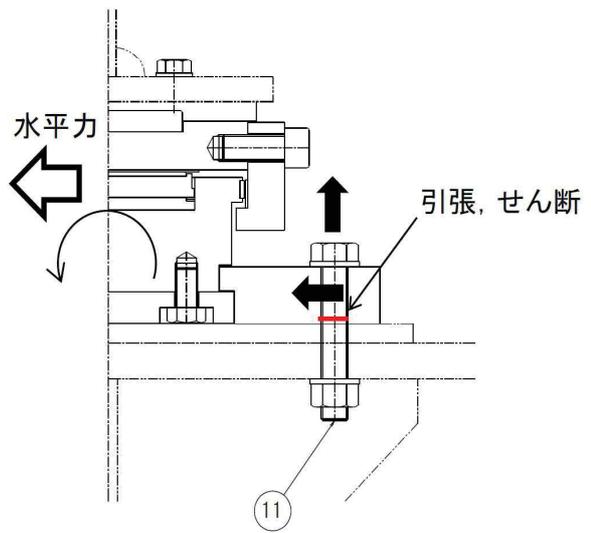
⑩上部接合ボルト



⑩上部接合ボルト



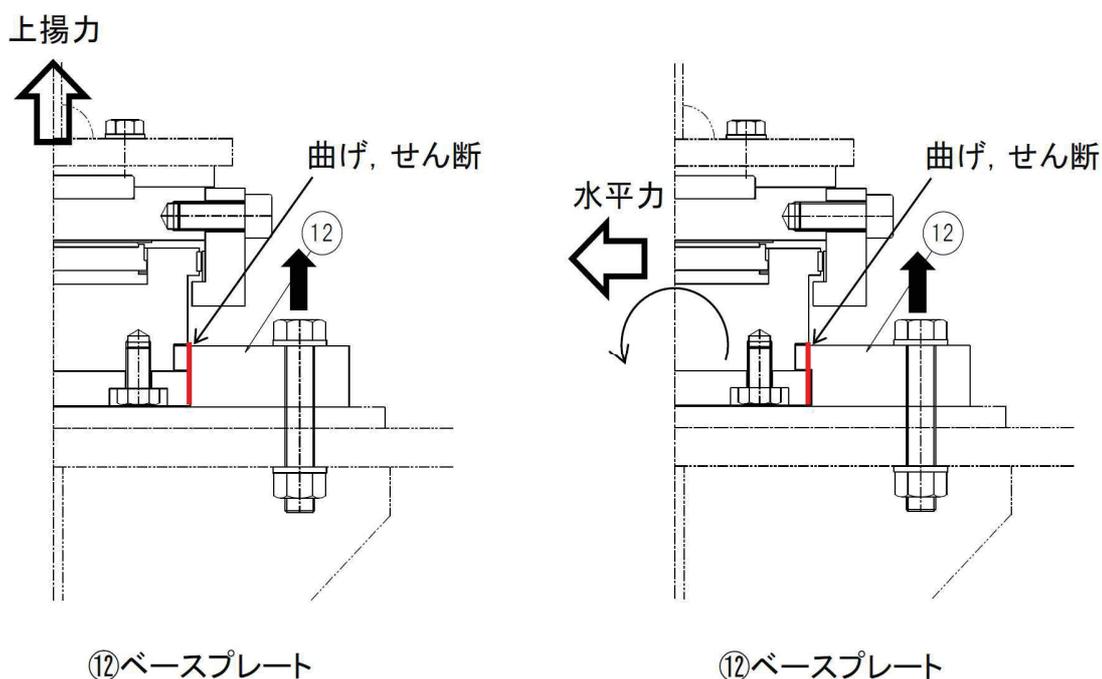
⑪下部接合ボルト



⑪下部接合ボルト

添付 5-11 図 可動支承の評価項目模式図 (4/5)

評価部位	作用力	評価項目
①すべり材	鉛直力（下向き）	支圧
②ピストン	鉛直力（下向き）	曲げ
③圧縮ゴム	鉛直力（下向き）	支圧
④座金	鉛直力（下向き）	支圧
⑤ベースポット突出部	上揚力	曲げ，せん断，支圧
⑥レール	上揚力，水平力	曲げ，引張，せん断
⑦レール取り付けボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑧エンドプレート接合ボルト	上揚力，水平力	引張
⑨ベースポット支圧部	水平力	支圧
⑩上部接合ボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑪下部接合ボルト	上揚力，水平力	引張，せん断
⑫ベースプレート	上揚力，水平力	曲げ，せん断



添付 5-11 図 可動支承の評価項目模式図 (5/5)

参考文献

- 1) 道路橋支承便覧（平成 16 年 4 月 社団法人 日本道路協会）
- 2) JIS 規格 道路橋免震用ゴム支承に用いる積層ゴム-試験方法(JIS K 6411-2012)
- 3) 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編（平成 14 年 3 月 社団法人 日本道路協会）
- 4) 青山和嵩，青木徹彦，鈴木森晶：積層ゴム支承の耐震性能実験，愛知工業大学研究報告第 41 号 B 平成 18 年
- 5) 炭村透，鶴殿禎史，金井宏司：各種ゴム支承の引張限界性能に関する研究，土木学会地震工学論文集，2003. 10

地震時の鉛直方向変位について

地震時に竜巻防護ネットを構成するゴム支承や鋼製部材に変位が生じ、部材同士の衝突や海水ポンプ室への衝突が発生する可能性について検討する。

1. ゴム支承の変位量

衝突防止の観点から、鉛直方向の地震力によって発生するゴム支承の圧縮側最大変位について確認した結果を添付 6-1 表に示す。ゴム支承は鉛直方向の剛性が大きいことから変位量が非常に小さいことが分かる。

添付 6-1 表 ゴム支承の鉛直方向の変位量

	大梁ゴム支承	主桁ゴム支承
最大鉛直反力(kN) *	1772	490
鉛直剛性(kN/mm)	972	863
変位量(mm)	1.9	0.6

* Ss-D1, D2, F1, F2, N1 の 5 波の解析結果から最大となった反力値

2. 鋼製部材の変位量

1 項と同じく、衝突防止の観点から、鉛直方向の地震力によって発生する鋼製部材の鉛直下向きの最大変位について確認した結果を添付 6-2 表に示す。フレームの中央部におけるたわみが最大となるが、クリアランスには十分に余裕があることが分かる。

添付 6-2 表 フレームの鉛直方向の変位量

	スパン中央部 (位置 : f ^{*1})	張出先端部 (位置 : m ^{*1})
変位量(mm)	52 ^{*2}	23 ^{*2}
クリアランス(mm)	150	173

*1 位置の記号は第 3. 3-1 図の解析モデル図中の記号

*2 上表の変位量にはフレーム支点におけるゴム支承の変位量も含む

以上の検討結果より、鉛直方向の変位については、クリアランスに十分余裕があることが分かっているため、今回の評価においては水平方向変位を代表として評価している。

竜巻防護ネット構造部材の質量詳細について

竜巻防護ネットを構成する部材のうち、フレーム及び大梁を対象に質量算出の内訳を示す。

1. フレーム

添付 7-1 表にフレーム質量の内訳を示す。主要部材である主桁、横補強材及びブレースの他に継手やストッパー等で構成されており、これらの部材も含めて合計 164t となるため、第 2. 2-2 表では切り上げて 170t と表示している。内訳に記載の部材の概略構造について添付 7-1 図に示す。

添付 7-1 表 フレーム質量内訳

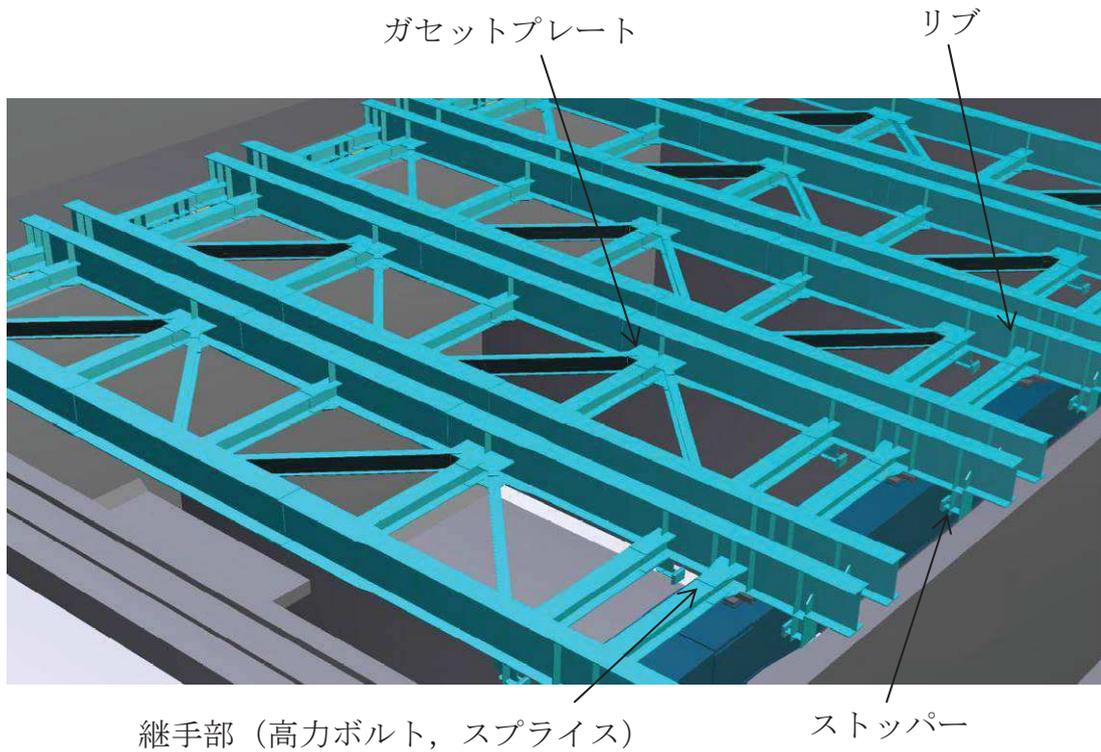
項目	重量 (t)
主桁断面 (フランジ, ウェブ)	79
横補強材断面 (フランジ, ウェブ)	31
ブレース断面 (フランジ, ウェブ)	10
継手部 (高力ボルト, スプライス)	23
ストッパー	4
ガセットプレート, リブ	10
その他 (支承部高さ調整プレート, 点検用手摺, 吊金具)	7
合計	164
第 2. 2-2 表に記載の値	170

2. 大梁

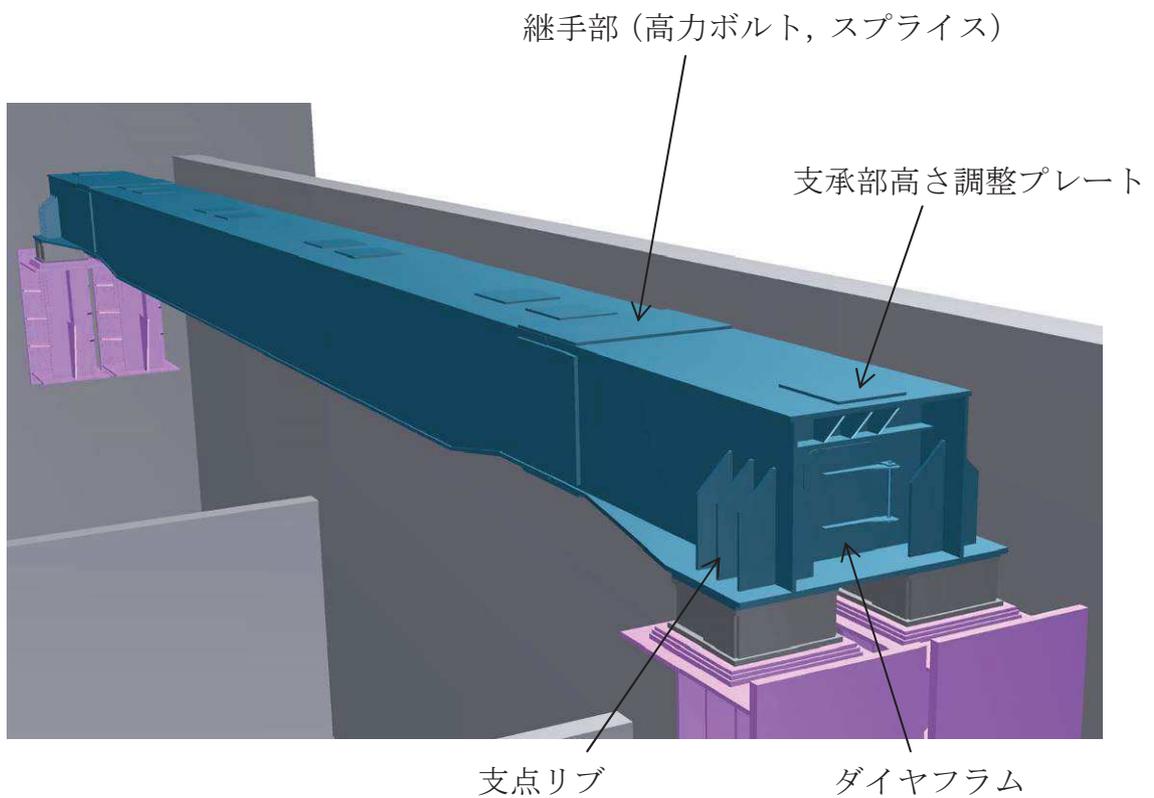
添付 7-2 表に大梁質量の内訳を示す。主要部材である大梁の他に継手や支点リブ等で構成されており、これらの部材も含めて合計 66t となるため、第 2. 2-2 表では切り上げて 70t と表示している。内訳に記載の部材の概略構造について添付 7-2 図に示す。

添付 7-1 表 フレーム質量内訳

項目	重量 (t)
大梁断面 (フランジ, ウェブ)	51
継手部 (高力ボルト, スプライス)	8
ダイヤフラム, 支点リブ	5
その他 (支承部高さ調整プレート, マンホール, 吊金具)	2
合計	66
第 2. 2-2 表に記載の値	70



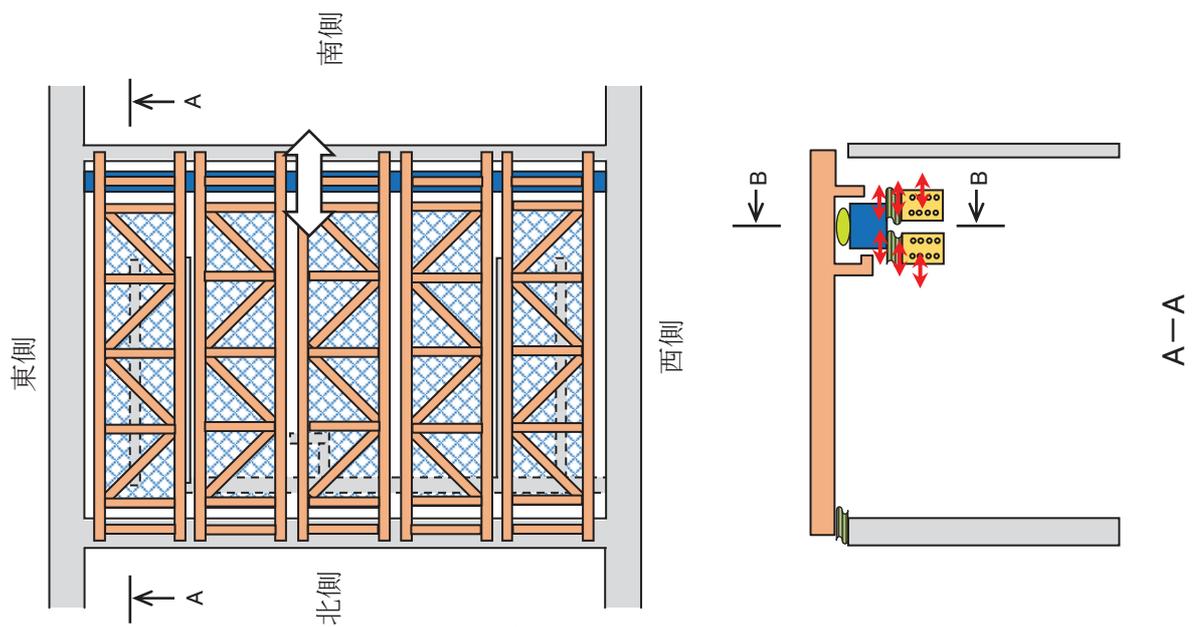
添付 7-1 図 フレームの概略図



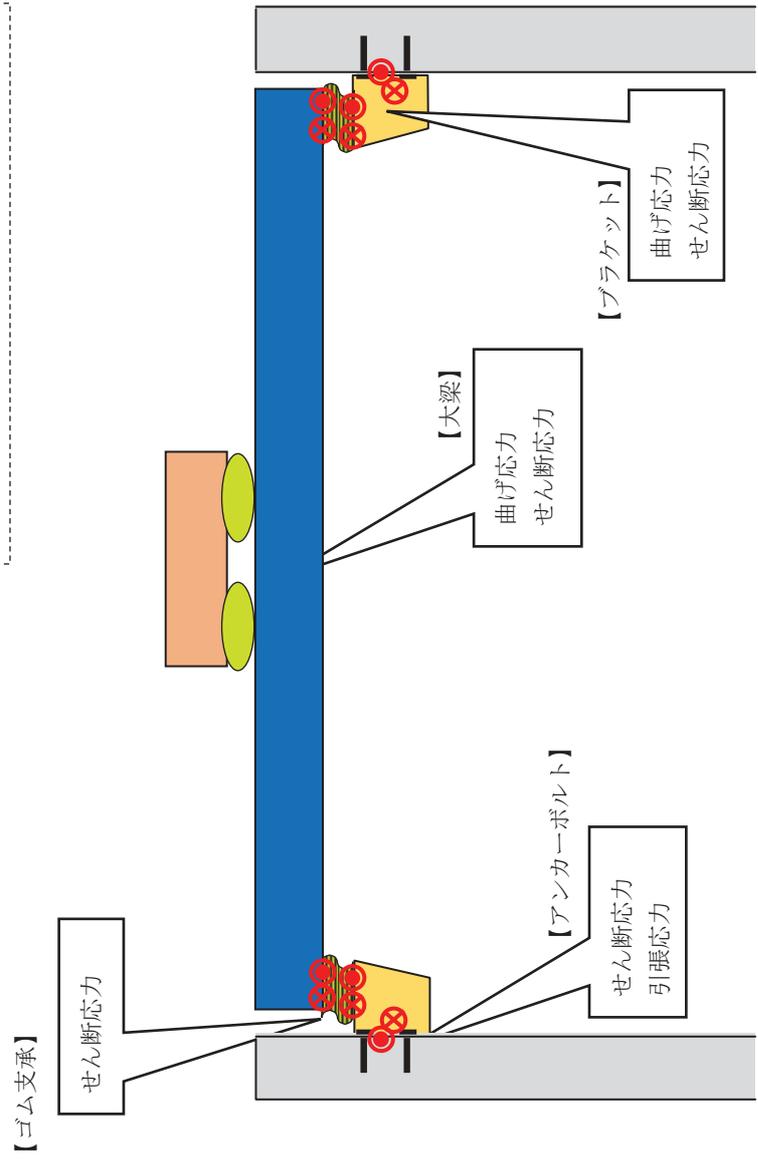
添付 7-2 図 大梁の概略図

(参考)

荷重伝達イメージ図 (大梁 X方向一次モード)



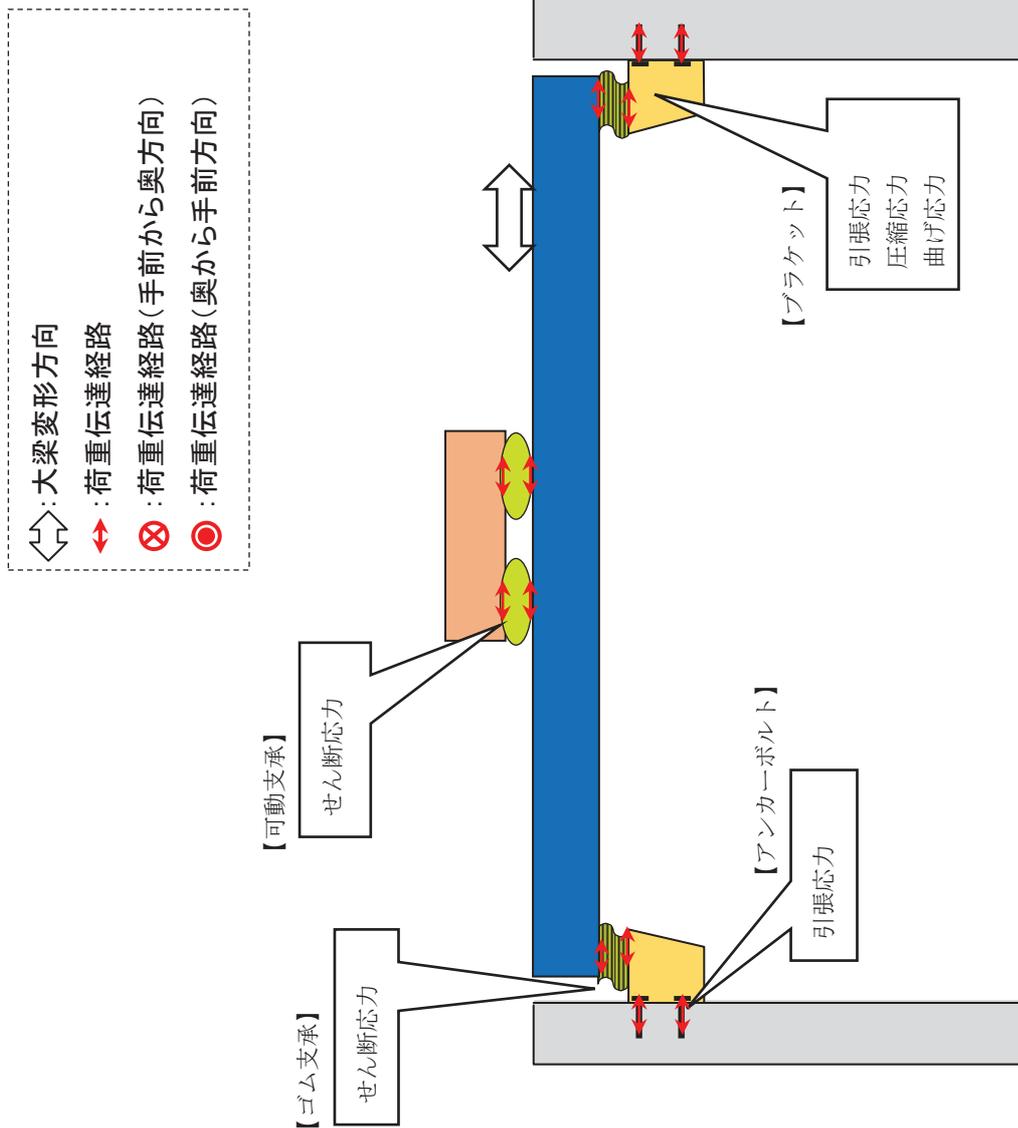
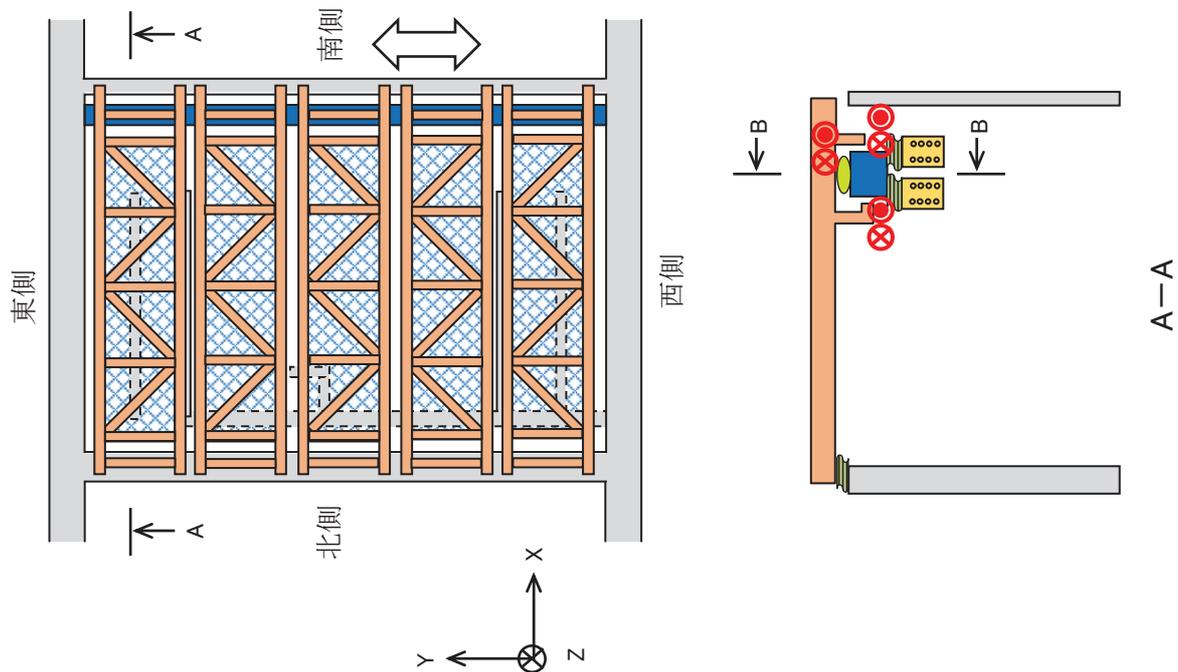
- 大梁変形方向
- 荷重伝達経路
- 荷重伝達経路(手前から奥方向)
- 荷重伝達経路(奥から手前方向)



B-B

A-A

荷重伝達イメージ図 (大梁 Y 方向一次モード)

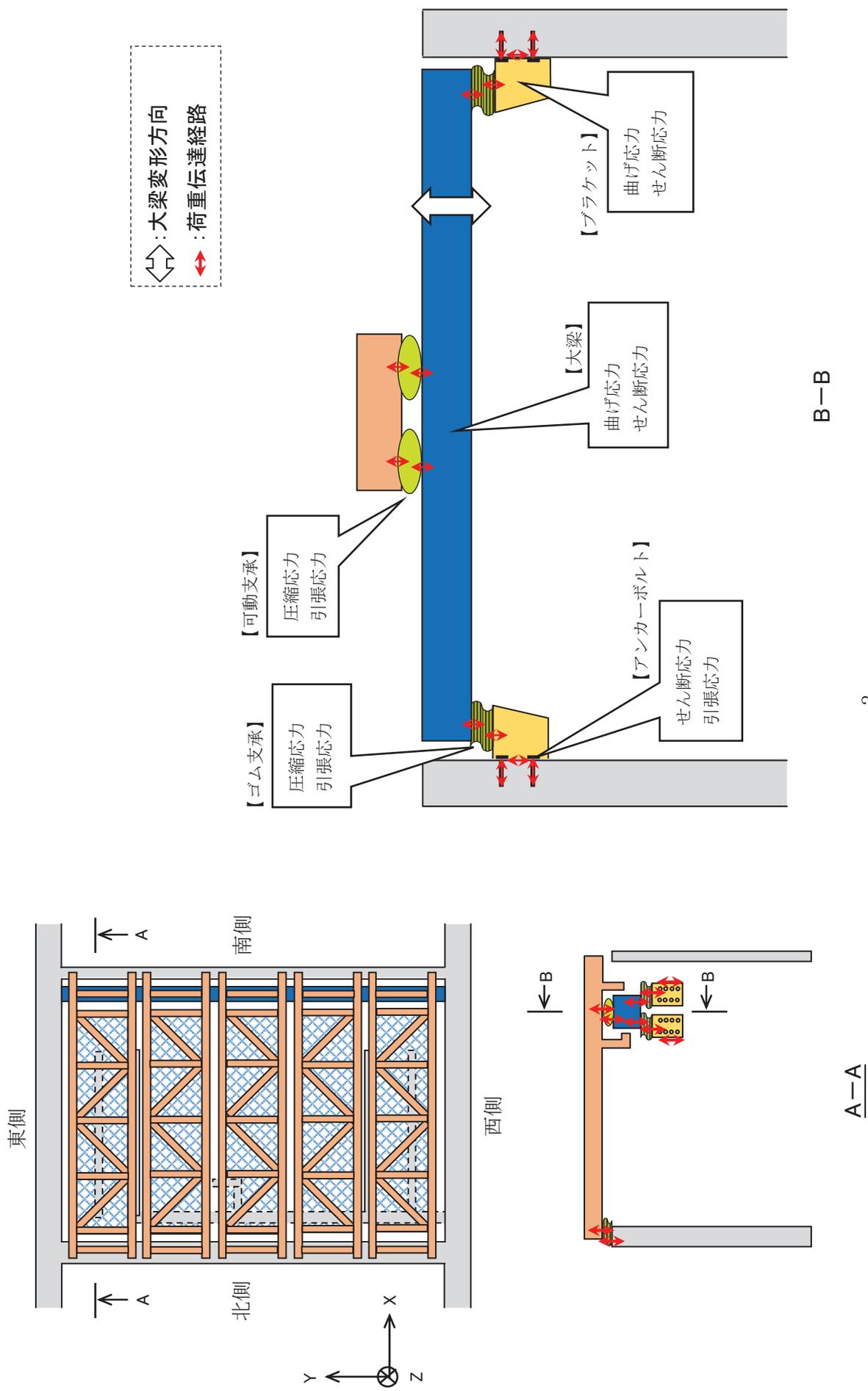


- ⇔: 大梁変形方向
- ↔: 荷重伝達経路
- ⊗: 荷重伝達経路 (手前から奥方向)
- ⊙: 荷重伝達経路 (奥から手前方向)

B-B

A-A

荷重伝達イメージ図（大梁 Z 方向一次モード）



女川原子力発電所 2号炉

外部からの衝撃による損傷の防止

(竜巻)

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

第 6 条：外部からの衝撃による損傷の防止
(竜巻)

<目 次>

1. 基本方針
 - 1.1 要求事項の整理
 - 1.2 追加要求事項に対する適合性
 - (1) 位置，構造及び設備
 - (2) 安全設計方針
 - (3) 適合性説明
 - 1.3 気象等

2. 外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）
 - 別添資料 1 竜巻影響評価について
 - 別添資料 2 竜巻影響評価におけるフジタモデルの適用について
 - 別添資料 3 運用，手順説明資料

女川原子力発電所 2 号炉

竜巻影響評価について

目 次

別添資料-1

1. 竜巻に対する防護
 - 1.1 概要
 - 1.2 評価の基本方針
 - 1.3 評価の基本的な考え方
2. 基準竜巻・設計竜巻の設定
 - 2.1 概要
 - 2.2 竜巻検討地域の設定
 - 2.3 基準竜巻の最大風速(V_B)の設定
 - 2.4 設計竜巻の最大風速(V_D)の設定
 - 2.5 設計竜巻の特性値
3. 竜巻影響評価
 - 3.1 評価概要
 - 3.2 評価対象施設等
 - 3.3 設計荷重の設定
 - 3.4 評価対象施設等の設計方針
 - 3.5 竜巻随件事象に対する評価

添付資料

- 1.1 重大事故等対処施設に対する考慮について
- 1.2 評価対象施設の抽出について
- 1.3 外部事象防護対象施設等に波及的影響を及ぼし得る施設の抽出について
- 2.1 気候区分について
- 2.2 数値気象解析にもとづく竜巻検討地域の設定について
- 2.3 竜巻検討地域及び全国で発生した竜巻
- 2.4 竜巻最大風速のハザード曲線の求め方
- 2.5 地形効果による竜巻風速への影響について
- 2.6 設計竜巻の特性値の設定
- 2.7 米国及び関東平野の竜巻の類似性
- 3.1 竜巻影響評価の概要及び保守性について
- 3.2 竜巻影響評価及び竜巻対策の概要
- 3.3 設計飛来物の選定について
- 3.4 竜巻随件事象の抽出について
- 3.5 飛来物化する可能性がある物品等の管理について
- 3.6 設計竜巻荷重と積雪荷重との組み合わせについて
- 4.1 竜巻防護ネットの構造設計に係る論点について

下線は、今回の提出資料を示す。

設計竜巻荷重と積雪荷重の考慮について

設置許可基準規則第6条のうち「外部事象の考慮」において、竜巻と積雪は荷重による荷重により安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象として抽出しており、組合せの要否の検討を実施している。

また、積雪事象は気象情報によって予測可能であることも踏まえて、積雪が確認された場合には除雪等に必要な資機材を確保するとともに手順等を整備することによって、雪を長期間堆積状態にしない方針としている。

一方、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」では設計竜巻荷重と組み合わせる荷重として、竜巻以外の自然現象による荷重を挙げており、竜巻との同時発生が想定され得る雪等の発生頻度を参照し、設計対象施設に常時作用する荷重、運転時荷重等と組み合わせることの適切性や設定する荷重の大きさ等を判断するとしている。

これらの方針を踏まえて、設計竜巻荷重と積雪荷重の組合せの考え方について以下のとおり整理する。

1. 設計竜巻荷重と設計積雪荷重の組合せの考え方

建築物への荷重影響の観点で考えた場合に建築物荷重指針・同解説（2015）で示すように組合せ荷重として、主たる作用（主事象）の最大値と、従たる作用（副事象）の任意時点の値（平均値）の和として作用の組合せを考慮する、Turkstra の法則^{*1}の考え方を適用することができる。この考え方は、建築基準法や土木学会「性能設計における土木構造物に対する作用の指針」、国土交通省「土木・建築にかかる設計の基本」、ANSI（米国国家規格協会）等でも採用されている。

竜巻は発生頻度が低い偶発荷重であるが、発生すると荷重が大きく、安全機能への影響が大きいと考えられることから、設計上の主荷重として扱う。一方、積雪は発生頻度が主荷重と比べて相対的に高いが、荷重は主荷重に比べて小さく、安全機能への影響も主荷重に比べて小さいため、従荷重として扱う。

竜巻と積雪の発生頻度、影響の程度を表1に示す。また、主荷重と従荷重の組合せを表2に示す。（表1、表2は別添1-1「女川原子力発電所2号炉 外部事象の考慮について」より抜粋）

表1 竜巻および積雪荷重の性質

荷重の種類		荷重の大きさ	最大荷重の継続時間	発生頻度 (/年)
主荷重	竜巻	大	短 (数十秒)	1.9×10^{-6}
従荷重	積雪	小	長 (約2週間) *1	1.0×10^{-2} *2

*1 積雪は冬季の限定した期間のみ発生する。除雪を行うことで、継続期間は短縮することが可能

*2 100年再現期待値

表2 竜巻 (主荷重) と積雪 (従荷重) の組合せ

		竜巻 (主荷重)	
積雪 (従荷重)	建築基準法	記載なし	
	継続時間	短 (竜巻) × 長 (積雪)	
	荷重の大きさ	大 (竜巻) + 小 (積雪)	

上記のとおり、竜巻の作用時間は極めて短時間であること、積雪の荷重は冬季の限定された期間に発生し、積雪荷重の大きさや継続時間は除雪を行うことで低減できることから、発生頻度が極めて小さい設計竜巻の風荷重と積雪による荷重が同時に発生し、設備に影響を与えることは考えにくいため、組合せを考慮しない。また、雪が堆積した状態における竜巻の影響については、除雪により雪を長期間堆積状態にしない方針であることから、組合せを考慮しない。

2. 竜巻との同時発生が想定される雪との組合せの考え方

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」で設計竜巻荷重に組み合わせる荷重として考慮することが要求される竜巻と同時発生が想定される雪は、冬期に竜巻が襲来する場合に考慮すべき事象である。

竜巻通過前後の気象条件において降雪を伴う可能性はあるが、上昇流の竜巻本体周辺では、竜巻通過時に雪は降らない。また、下降流の竜巻通過時は、竜巻通過前に積もった雪の大部分は竜巻の風により吹き飛ばされ、雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。よって、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」で考慮することが要求される竜巻と同時発生が想定される雪は荷重として影響を及ぼさないことから、組合せを考慮しない。

[参考文献]

※1：建築物荷重指針・同解説（2015）（付5.5 許容応力度設計に用いる組合せ荷重のための荷重係数）

竜巻防護ネットの構造設計に係る論点について

1. はじめに

設置許可基準規則第六条において、外部からの衝撃による損傷の防止として、安全施設は想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならないとしており、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、竜巻の影響を挙げている。

外部事象防護対象施設である原子炉補機冷却海水ポンプ（電動機、配管等を含む）及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ（電動機、配管等を含む）（以下、「非常用海水ポンプ等」という。）は、想定される自然現象のうち、設計飛来物の衝突により安全機能を損なう恐れがあることから、竜巻防護ネットによる防護対策を講じることで損傷を防止し、安全機能が損なわれない設計とする。

また、竜巻防護ネットは、想定される自然現象（竜巻以外の自然現象、地震及び津波含む）によって崩壊及び落下せず、非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさない設計とする。

以下に、竜巻防護ネットの構造設計における設置変更許可申請段階での論点について整理する。

2. 竜巻防護ネットに対する要求事項

2.1 竜巻防護に対する要求事項

- ・ 竜巻の風荷重や設計飛来物が衝突した際の衝撃力等に耐え、設計飛来物が非常用海水ポンプ等に到達しないこと。
- ・ 設計飛来物が衝突した際に構造体が崩壊及び落下せず、非常用海水ポンプ等を損傷させないこと。

2.2 竜巻以外の自然現象（地震、津波含む）に対する要求事項

- ・ 竜巻以外の自然現象によって構造体が崩壊及び落下せず、非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさないこと。

2.3 竜巻随件事象に対する要求事項

- ・ 竜巻随件事象として想定される事象である、火災、溢水及び外部電源喪失に対し、非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさないこと
- ・ 竜巻防護ネット自体が、火災、溢水及び外部電源喪失の原因とならないこと。

3. 構造概要

竜巻防護ネットは海水ポンプ室補機ポンプエリア開口部に対し、フレームに取り付けたネット（金網）を配置することで、設計飛来物の侵入を阻止し、非常用海水ポンプ等を防護する構造である。

海水ポンプ室補機ポンプエリアの南側にはフレーム支持用の大梁を設置し、この大梁と隔壁（北側）天面にてネット及び防護板を取り付けたフレームを支持する。

また、大梁とフレームと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。

ゴム支承は、地震により生ずる応力及び反力を低減・分散させることを目的としており、水平方向の固有周期を長周期側に移動させ応答を下げるとともに、壁面へ伝達させる荷重を分散させる効果を期待する。

可動支承は、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ため、水平変位に追従する機能を有する。

また、フレームにはストッパーを取り付けており、フレームの支持構造（ゴム支承、可動支承）が損傷した場合でも、竜巻防護ネットが落下せず、非常用海水ポンプ等に波及的影響を与えない設計とする。北側隔壁とフレームとの間にストッパーを設置することで、フレームの東西方向の移動を拘束し、大梁とフレームとの間にストッパーを設置することで、フレームの南北方向の移動を拘束する。

フレームは海水ポンプ室補機ポンプエリアの北側隔壁（厚さ 1.5m）に対して約 1.2m 重なる構造とし、南側隔壁（厚さ 0.6m）に対しても約 0.55m 重なる構造とし、海水ポンプ室補機ポンプエリア落下しない構造とする。竜巻防護ネットの構造概要を図 1、2 及び図 3 に示す。

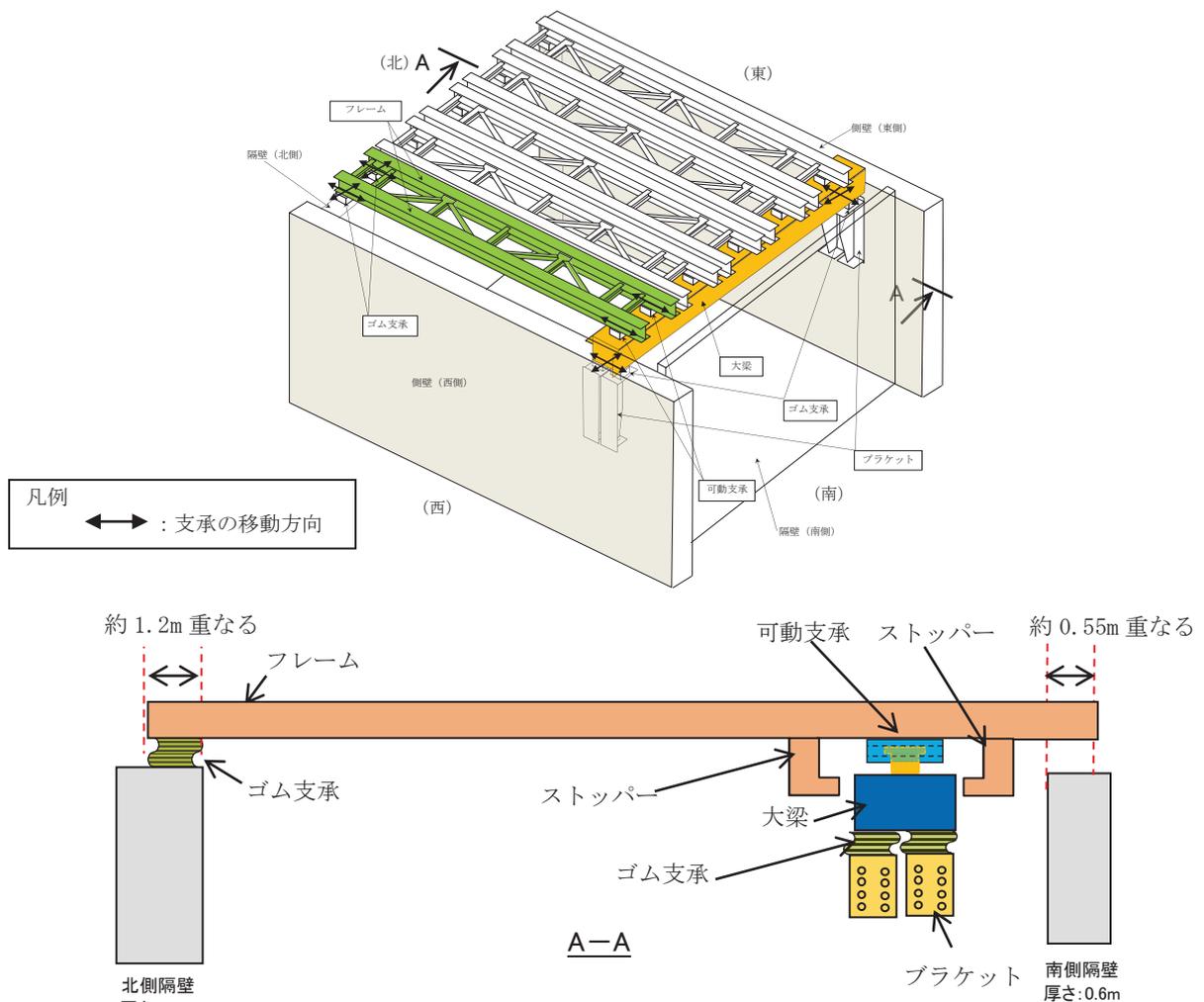


図 1 竜巻防護ネットの概要図

6 条(竜巻)－別添 1－添付 4.1-2

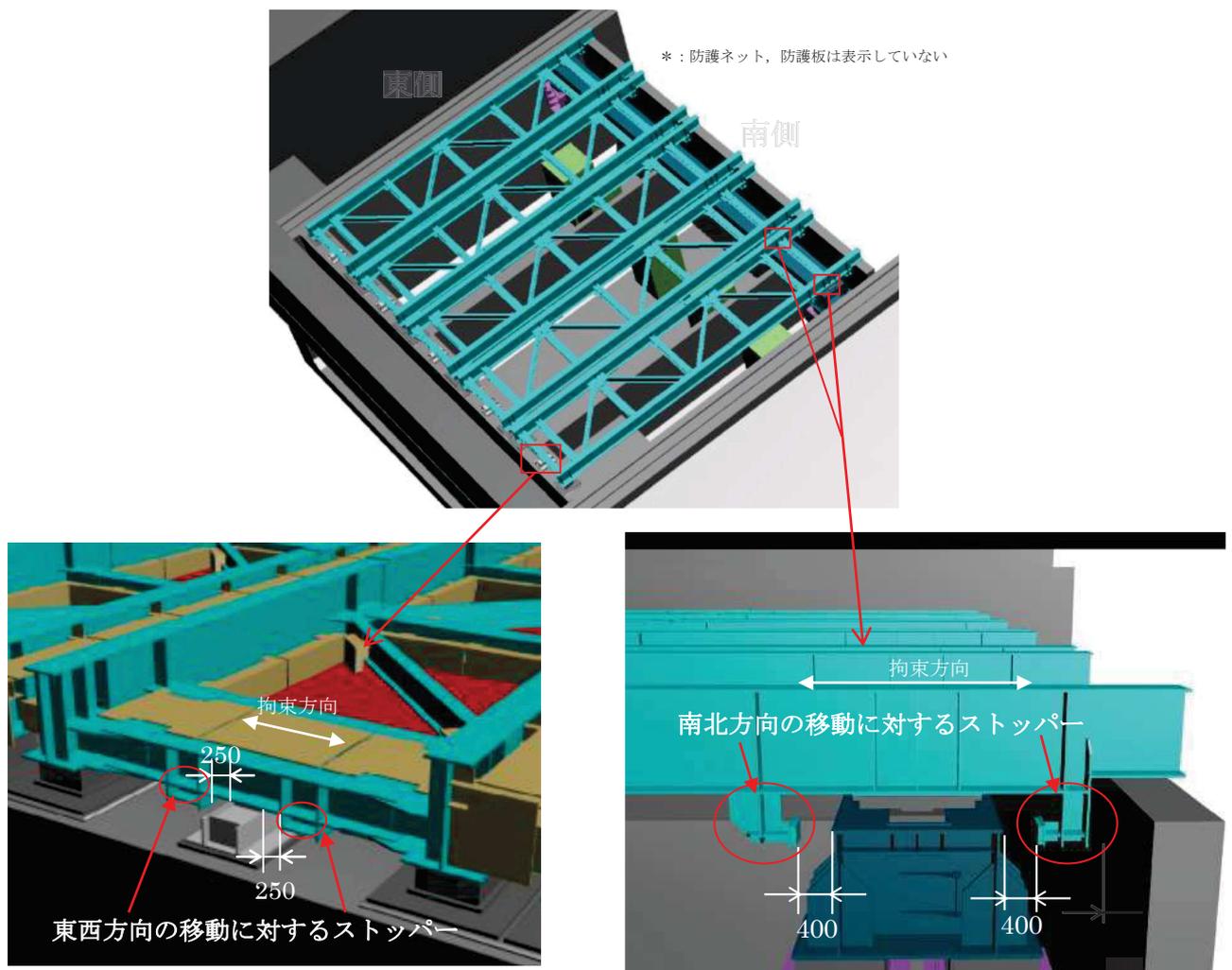


図2 ストッパーイメージ図

海水ポンプ室補機ポンプエリア



竜巻防護ネット取付状態

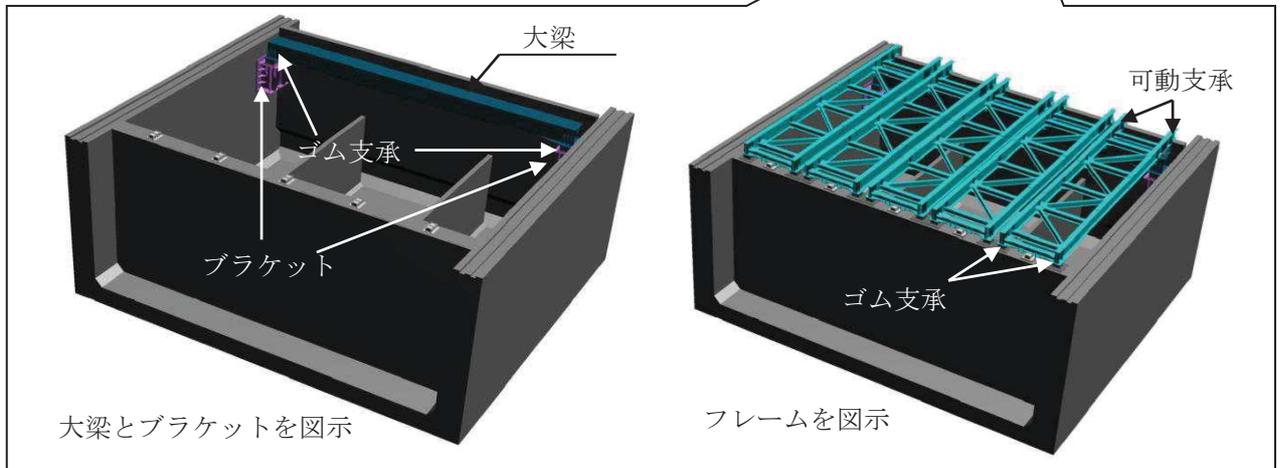
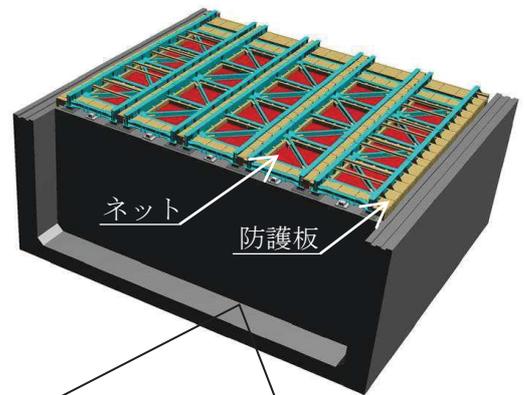


図3 竜巻防護ネットの概要図（北西側から見た場合）

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

4. 竜巻防護ネットの設計方針

4.1 竜巻防護に対する構造設計の方針

ネット（金網）は，設計竜巻の風荷重，設計飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し，設計飛来物が非常用海水ポンプ等へ衝突することを防止するために，主要な構造部材が破断せず，たわみを生じても，非常用海水ポンプ等との隔離を確保し飛来物を捕捉できる設計とする。

防護板は，設計竜巻の風圧力による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し，設計飛来物が非常用海水ポンプ等と衝突することを防止するため，設計飛来物が防護板を貫通せず，非常用海水ポンプ等に設計飛来物が到達しない設計とする。

ネット（金網）及び防護板の支持構造物であるフレームおよびフレームの支持構造物である大梁，ブラケットは，設計竜巻の風荷重，設計飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し，設計飛来物が非常用海水ポンプ等へ衝突することを防止するために，設計飛来物が主要な構造部材を貫通せず，また構成部材の損傷により崩壊及び落下せず，非常用海水ポンプ等に波及的影響を与えない設計とする。

ゴム支承，可動支承は，ネット（金網部）や防護板，フレーム等で受けた設計飛来物による衝撃荷重が伝達されるが，伝達された荷重によって損傷する場合であっても，フレームに取付けたストッパーにより衝撃荷重を支持することで，竜巻防護ネットは落下せず，非常用海水ポンプに波及的影響を与えない設計とする。

ここで，設計竜巻風速は 100m/s であり，設計飛来物の衝撃荷重については，表 1 に示す設計飛来物の速度条件とする。構造設計においては，設計飛来物の衝突位置の影響を考慮した設計とする。

表 1 設計飛来物の条件

設計飛来物	仕様		最大水平速度 (m/s)	最大鉛直速度 (m/s)
	サイズ (m)	質量 (kg)		
鋼製材	縦×横×高さ 4.2×0.3×0.2	135	46.6	16.7
砂利	縦×横×高さ 0.04×0.04×0.04	0.2	59.3	22.6

4.2 竜巻以外の自然現象（地震、津波含む）に対する構造設計の方針

竜巻以外の自然事象の影響は表 2 に示すとおり、考慮すべき影響因子は荷重である。よって、これらの荷重により非常用海水ポンプ等への波及的影響を及ぼさない設計とする。

竜巻防護ネットを設置する海水ポンプ室（コンクリート壁含む）および竜巻防護ネットの耐震評価方針については、設置許可基準規則第 4 条に対する適合状況説明資料『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）』で説明する。

表 2 竜巻防護ネットに対する竜巻以外の自然現象（地震、津波含む）の影響

自然現象	確認結果	考慮する影響因子
風（台風）	・ 風（台風）の荷重を考慮する	○（荷重）
凍結	・ 設備構造上、凍結の影響を受けない	—
降水	・ 構内排水施設により排水することで設備が浸水することはない	—
積雪	・ 積雪荷重を考慮する	○（荷重）
落雷	・ 電気設備を持たないことから電气的影響を受けない	—
火山の影響	・ 降下火砕物の荷重を考慮する ・ 腐食に対しては金属材料を用い、亜鉛メッキや外装塗装を実施していることから短期的な影響は小さい ・ 設備構造上、降下火砕物による閉塞・摩耗の影響を受けない	○（荷重）
生物学的事象	・ 設備構造上、生物学的事象の影響を受けない	—
森林火災	・ 防火帯により、森林から約 300m の離隔を確保している ・ 設備構造上、ばい煙による影響を受けない	—
地震	・ 地震の荷重を考慮する (第 4 条 地震による損傷の防止)	○（荷重）
津波	・ 基準津波は津波防護施設及び浸水防止設備により敷地内に到達することはないため、荷重・浸水の影響を受けない (第 5 条 津波による損傷の防止)	—

5. 竜巻防護ネットの設計手法

5.1 竜巻防護に対する設計手法

竜巻に対して評価が必要となる竜巻防護ネット評価部位の設計手法を表3に示す。

いずれも、電力中央研究所の設計手法、衝突解析及びBRL式による設計手法を用いており、既工認又は他プラントで適用の実績がある。

表3 竜巻防護ネットの設計手法

評価部位	設計			先行プラントの実績
	評価項目	設計手法	許容限界	
ネット (金網部)	<ul style="list-style-type: none"> ・吸収エネルギー評価 ・破断評価 ・たわみ量評価 	電中研報告 ^{※1} にて検証を行っている評価	電中研報告 ^{※1} にて検証を行っている許容限界に基づく	あり
フレーム (ストッパー含む) 大梁	<ul style="list-style-type: none"> ・貫通評価 ・支持機能評価 	衝突解析 (LS-DYNA) による評価 ^{※2}	・破断ひずみ ^{※3} の範囲内であること	あり
ブラケット	<ul style="list-style-type: none"> ・支持機能評価 	衝突解析 (LS-DYNA) の結果を用いた応力評価 ^{※2}	・解析により算出した荷重が各部材の許容応力内であること	あり
防護板	<ul style="list-style-type: none"> ・貫通評価 	タービンミサイル評価で用いられているBRL式 ^{※4} による評価	BRL式 ^{※4} による許容限界厚さに基づく	あり

※1: 竜巻設計飛来物に対する防護ネットの評価手法と対策工法の提案 (電力中央研究所報告 N13014, 平成 26 年 3 月), 電力中央研究所報告書 O01 「高強度金網を用いた竜巻設計飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法」

※2: 衝突解析では、保守的にゴム支承による荷重の低減・分散効果を期待しない評価を実施するため、ゴム支承による評価上の影響はない

※3: 「NEI07-13:Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」

※4: 「タービンミサイル評価について(昭和 52 年 7 月 20 日 原子炉安全専門審査会)」

5.2 竜巻以外の自然現象に対する設計手法

(1) 風 (台風)

風 (台風) による荷重は、建設省告示第 1454 号に定められた女川町の基準風速 30m/s による荷重であり、設計竜巻風速による設計手法と同等である。また、既工認及び新規制審査での実績がある。

(2) 積雪

竜巻防護ネットへの上載荷重であり、静的荷重として考慮する自重の設計手

法と同等である。また、既工認及び新規制審査での実績がある。

(3) 火山影響評価

降下火砕物による竜巻防護ネットへの上載荷重であり、静的荷重として考慮する自重の設計手法と同等である。また、既工認及び新規制審査での実績がある。

(4) 地震

竜巻防護ネットには、支承（ゴム支承，可動支承）を用いており，支承（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は，他プラントを含む既工認及び新規制審査での適用実績がない

そのため，耐震設計の審査において既工認との手法の相違点を整理し，論点としている。（参考資料-1 参照）

5.3 竜巻随伴事象に対する設計方針

(1) 火災

竜巻随伴事象として，建屋外については，発電所敷地内の屋外にある危険物貯蔵施設等の火災がある。火災源と竜巻防護ネットの位置関係を踏まえて火災の影響を評価（「6 条（外部火災）」により評価）した上で，竜巻防護ネットが非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさない設計とする。

また，竜巻防護ネットは発火性，引火性のある物質を使用しないため，火災の原因とはならない。

(2) 溢水

建屋外については，設計竜巻による飛来物の衝突による屋外タンク等の破損に伴う溢水を想定されるが，竜巻防護ネットは構造上，溢水により機能を損なわないため，溢水により非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼすことはない。

また，竜巻防護ネットは液体を内包する構造でないため，溢水の原因とはならない。

(3) 外部電源喪失

設計竜巻又は設計竜巻と同時に発生する雷又はダウンバースト等の影響により外部電源喪失が想定されるが，竜巻防護ネットは，電源を用いておらず，外部電源喪失の影響を受けないため非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼすことはない。

また，竜巻防護ネットは飛来物化せず，送電網に関する施設等を損傷させることはないから，外部電源喪失の原因とならない。

6. まとめ

竜巻防護ネットについて、各事象に対する評価方法を確認したところ、支承（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は，他プラントを含む既工認及び新規制審査での適用実績がないことを踏まえて，設置変更許可申請段階での論点として整理した。

7. 別紙

竜巻防護ネットの構造設計について

8. 参考資料

参考資料-1 設置許可基準規則第4条に対する適合状況説明資料『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）別紙-1 既工認との手法の相違点の整理（設置変更許可申請段階での整理）』

竜巻防護ネットの構造設計について

1. 概要

設置許可基準規則第六条において、外部からの衝撃による損傷の防止として、安全施設は想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならないとしており、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、竜巻の影響を挙げている。

外部事象防護対象施設である原子炉補機冷却海水ポンプ（電動機、配管等を含む）及び高圧炉心スプレイ補機冷却海水ポンプ（電動機、配管等を含む）（以下、「非常用海水ポンプ等」という。）は、想定される自然現象のうち、設計飛来物の衝突により安全機能を損なうおそれがあることから、竜巻防護ネットによる防護対策を講じることで損傷を防止し、安全機能が損なわれない設計とする。

また、竜巻防護ネットは、想定される自然現象（竜巻以外の自然現象、地震及び津波含む）によって崩壊及び落下せず、非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさない設計とする。

2. 竜巻防護ネットに対する要求事項

2.1 竜巻防護に対する要求事項

- ・竜巻の風荷重や設計飛来物が衝突した際の衝撃力等に耐え、設計飛来物が非常用海水ポンプ等に到達しないこと。
- ・設計飛来物が衝突した際に構造体が崩壊及び落下せず、非常用海水ポンプ等を損傷させないこと。

2.2 竜巻以外の自然現象（地震、津波含む）に対する要求事項

- ・竜巻以外の自然現象によって構造体が崩壊及び落下せず、非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさないこと。

2.3 竜巻随件事象に対する要求事項

- ・竜巻随件事象として想定される事象である、火災、溢水及び外部電源喪失に対し、非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさないこと
- ・竜巻防護ネット自体が、火災、溢水及び外部電源喪失の原因とならないこと。

3. 適合方針

3.1 竜巻防護ネットの概要

3.1.1 設置位置等

竜巻防護ネットは、海水ポンプ室補機ポンプエリアに設置する。防護対象である非常用海水ポンプ等は、図1に示すように、ピット構造である海水ポンプ室補機ポンプエリア内の全域に及ぶことから、ピット開口部の上面に設置する。

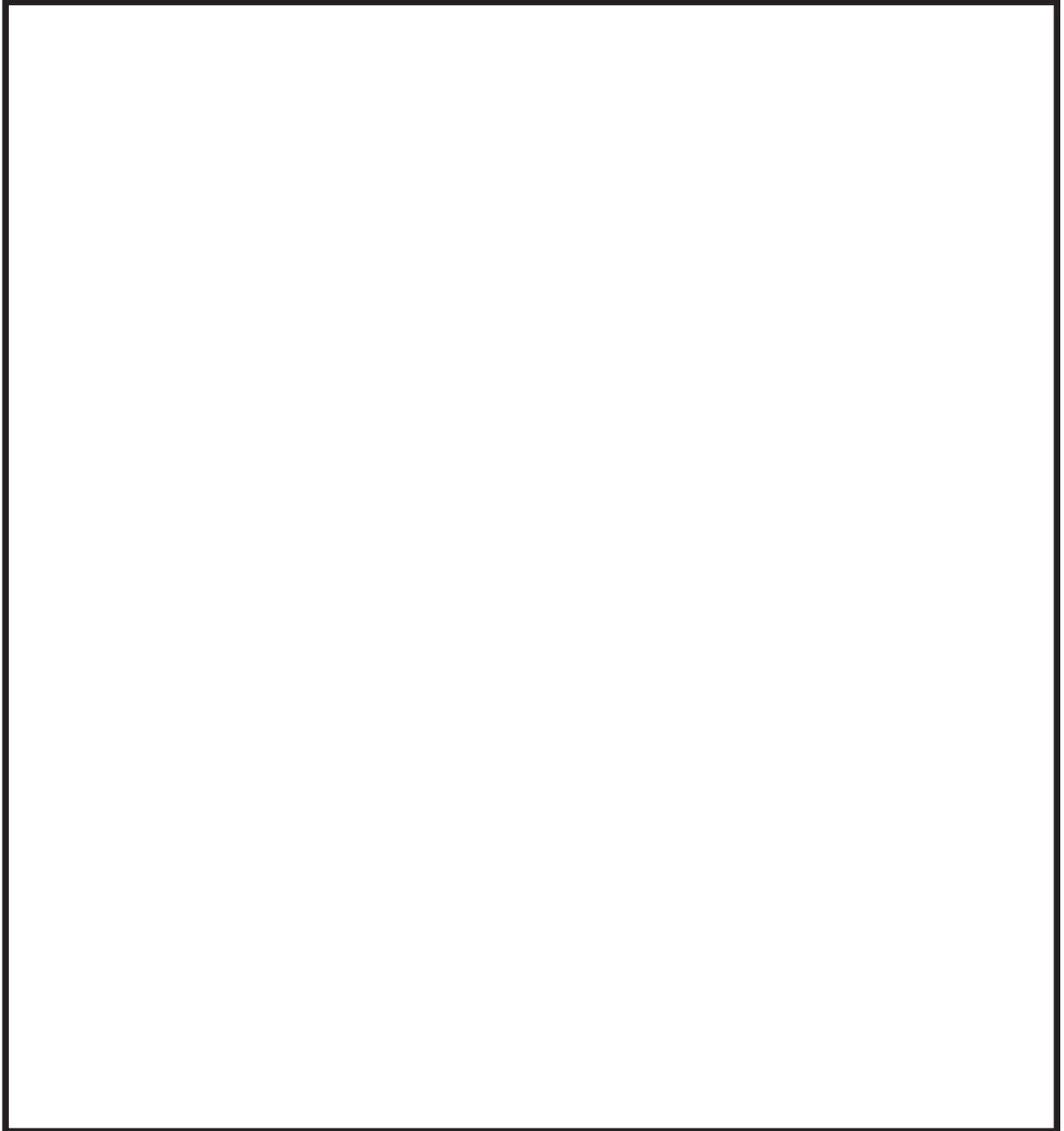


図1 海水ポンプ室補機ポンプエリアの外形図

3.1.2 構造概要

竜巻防護ネットは海水ポンプ室補機ポンプエリア開口部に対し、フレームに取り付けたネット（金網）を配置することで、設計飛来物の侵入を阻止し、非常用海水ポンプ等を防護する構造である。

海水ポンプ室補機ポンプエリアの南側にはフレーム支持用の大梁を設置し、この大梁と隔壁（北側）天面にてネット及び防護板を取り付けたフレームを支持する。

また、大梁とフレームと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。

ゴム支承は、地震により生ずる応力及び反力を低減・分散させることを目的としており、水平方向の固有周期を長周期側に移動させ応答を下げるとともに、壁面へ伝達させる荷重を分散させる効果を期待する。

可動支承は、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ため、水平変位に追従する機能を有する。

また、フレームにはストッパーを取り付けており、フレームの支持構造（ゴム支承、可動支承）が損傷した場合でも、竜巻防護ネットが落下せず、非常用海水ポンプ等に波及的影響を与えない設計とする。北側隔壁とフレームとの間にストッパーを設置することで、フレームの東西方向の移動を拘束し、大梁とフレームとの間にストッパーを設置することで、フレームの南北方向の移動を拘束する。

フレームは海水ポンプ室補機ポンプエリアの北側隔壁（厚さ 1.5m）に対して約 1.2m 重なる構造とし、南側隔壁（厚さ 0.6m）に対しても約 0.55m 重なる構造とし、海水ポンプ室補機ポンプエリア落下しない構造とする。

竜巻防護ネットの構造概要を図 1、2 及び図 3 に示す。また、竜巻防護ネットの仕様を表 1 に示す。

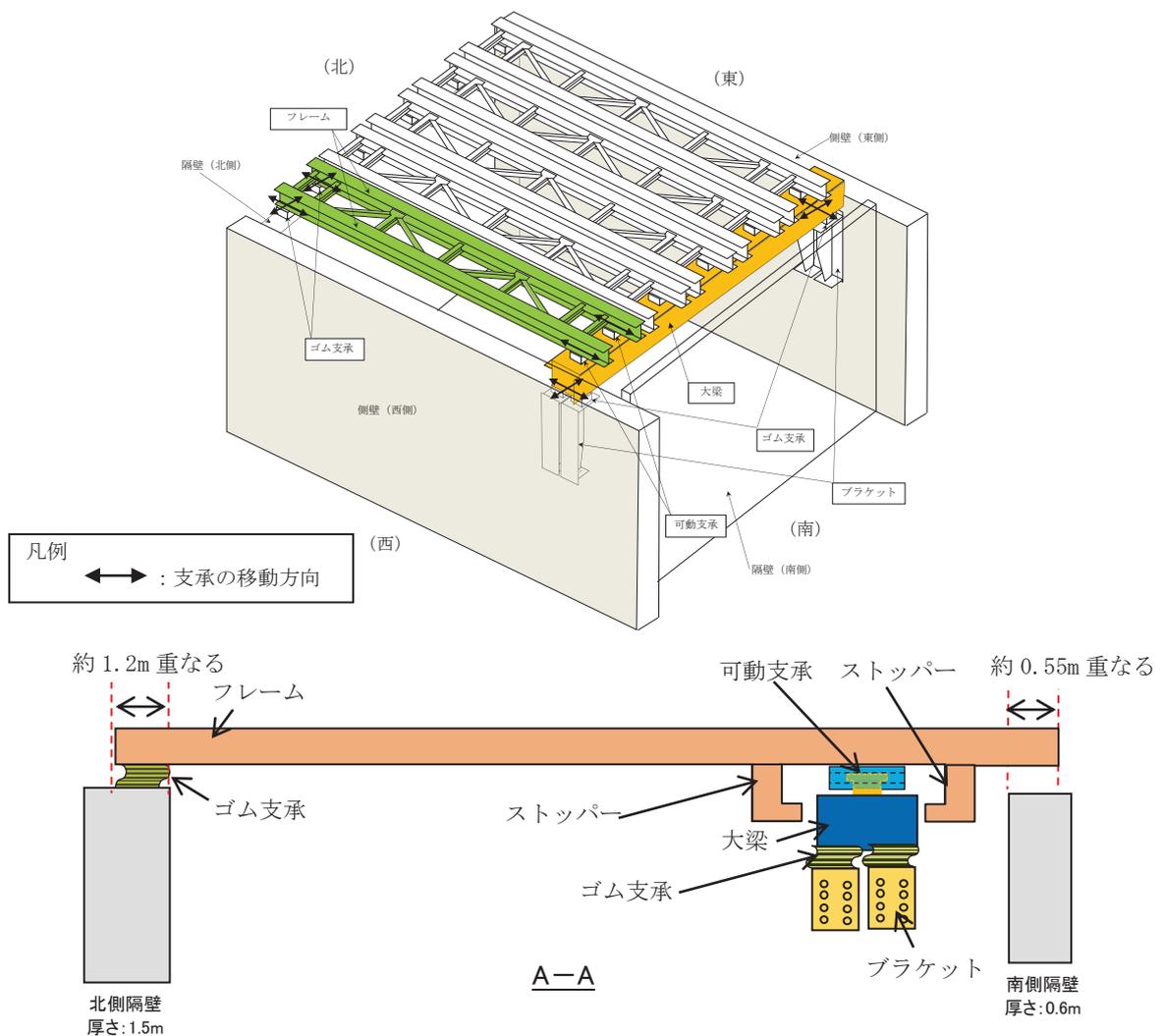


図 1 竜巻防護ネットの概要図

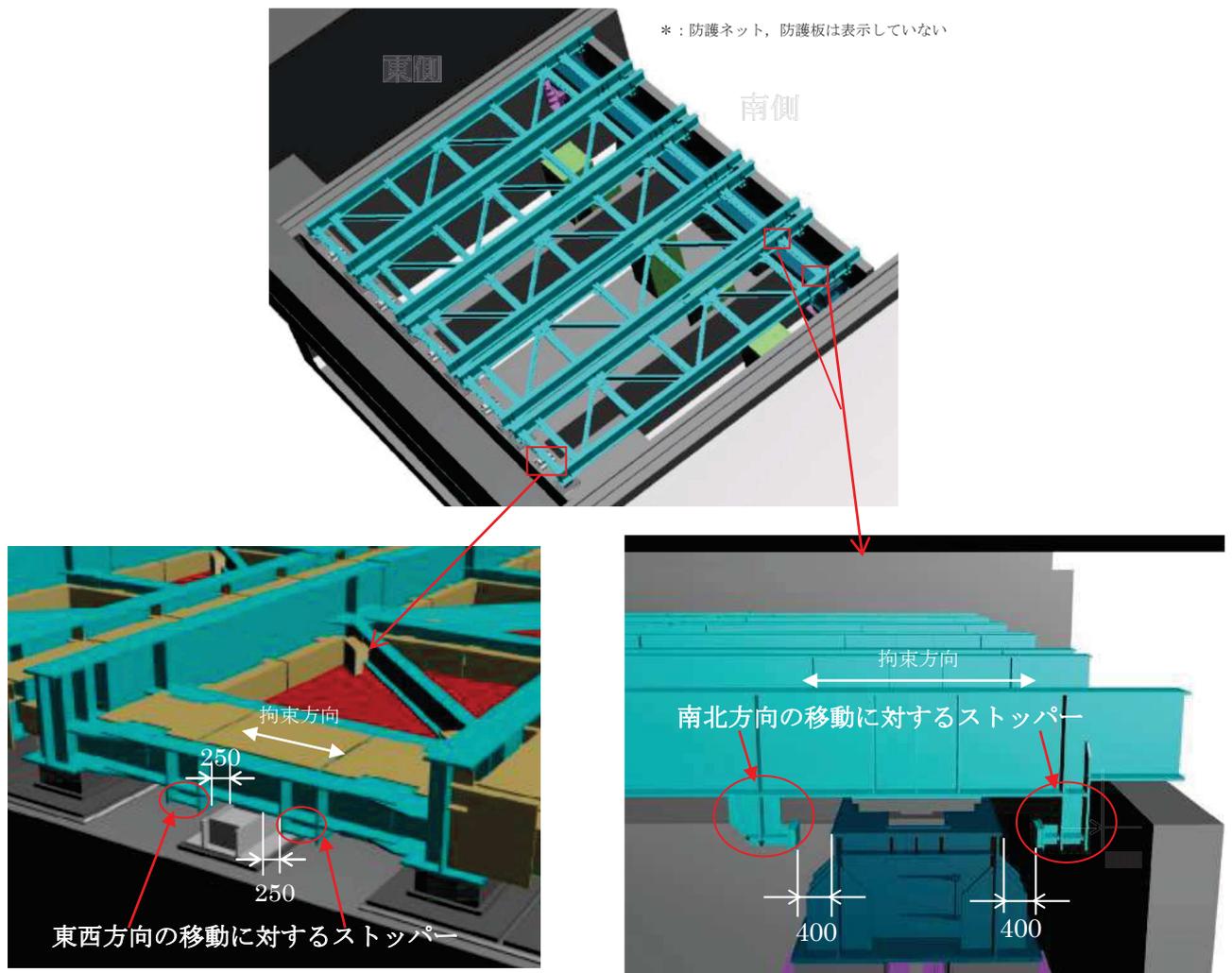
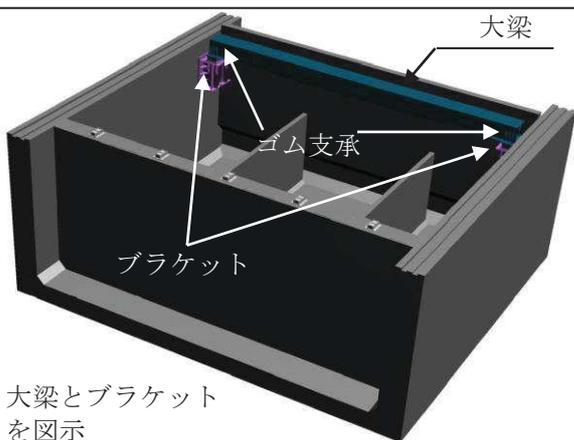
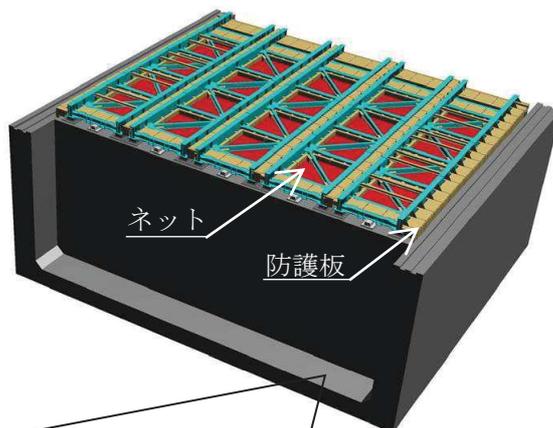


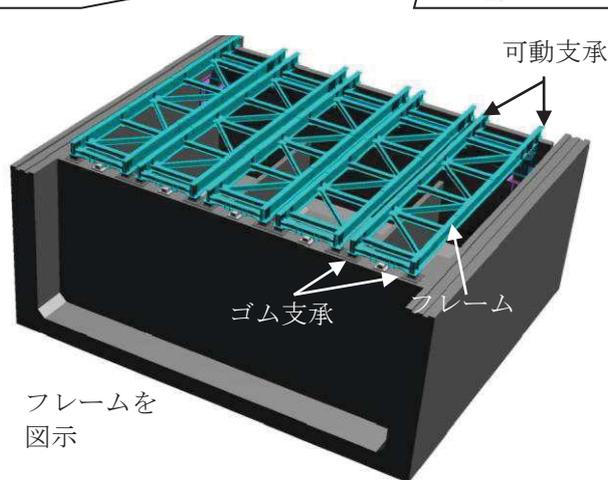
図2 ストッパーイメージ図

海水ポンプ室補機ポンプエリア

竜巻防護ネット取付状態



大梁とブラケット
を図示



フレームを
図示

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

図3 竜巻防護ネットの概要図（北西側から見た場合）

表1 竜巻防護ネットの仕様

総質量	約 500ton	
全体形状	約 29m（東西方向）×約 24m（南北方向） 高さ 約 1m	
ネット（金網部）	構成	主ネット×2枚+補助ネット×1枚
	寸法	線径：φ4mm 目合い寸法：主ネット 50mm, 補助ネット 40mm
	主要材料	硬鋼線材, 亜鉛めっき鋼線
フレーム	数量	5組
	寸法	長さ×幅×高さ：約 23m×4.3m×1m
	主要材料	SM490A, SM400A, SS400
大梁	寸法	長さ×幅×高さ：約 26m×1.5m×1.5m
	主要材料	SM520B, SM490A
ゴム支承	仕様	水平力分散型
	数量	大梁用：4個（2組（2個/組）） 隔壁用：10個（5組（2個/組））
可動支承	数量	隔壁用：10個（5組（2個/組））
ブラケット	材料	SM490A
防護板	材料	SM400A, SS400
耐震クラス	—	C

3.2 設計条件

3.2.1 荷重条件

竜巻防護ネットは、設計竜巻による荷重とその他の荷重の組合せを適切に考慮して、構造強度評価を実施し、許容限界内にあることを確認する。構造強度評価の条件として、考慮する荷重の種類及び組合せを以下に示す。

(1) 荷重の種類

a. 常時作用する荷重

常時作用する荷重としては、竜巻防護ネットの自重を考慮する。

b. 運転時の状態で作用する荷重

竜巻防護ネットは動的機能を持たない構造であり、通常運転時及び設計基準事故時に作用する荷重はない。

c. 竜巻荷重

設計竜巻により作用する荷重は「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」に示すとおり、「風圧力による荷重 (W_W)」、「気圧差による荷重 (W_P)」及び「設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)」を組合せた複合荷重として考慮する。複合荷重 W_{T1} 及び W_{T2} は、以下のとおり設定する。

$$\begin{aligned}W_{T1} &= W_P \\ W_{T2} &= W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M\end{aligned}$$

ここで、設計飛来物による衝撃荷重としては、設計飛来物が衝突する場合の荷重を設定する。なお、気圧差による荷重 (W_P) は、竜巻防護ネットの構造及び配置上考慮しない。

(a) 風圧力による荷重 (W_W)

設計竜巻風速 100m/s の風圧力による荷重を考慮する。

(b) 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

設計飛来物である鋼製材の速度条件を適用する。竜巻防護ネットの構造上、水平部材の衝突面積は鉛直部材の面積に比べ十分小さいことから、水平部材に設計飛来物が衝突する可能性は低いが、水平部材への衝突についても評価することとする。

飛来物の衝突速度は、水平部材については最大水平速度を、鉛直部材については最大鉛直速度を用いることとする。砂利は、防護ネットをすり抜ける設計飛来物として設定しており、衝撃荷重は鋼製材に包絡される。

一般に、垂直衝突による影響は斜め衝突による影響よりも大きく、日本原子力研究開発機構における鋼製飛翔体の斜め衝突による実験⁽¹⁾においても、衝突角度が大きくなると表面破壊深さは低減することが確認されている。また、ネットに対して鋼製材が斜めに衝突する場合、鋼製材の先端がネットに衝突後、鋼製材の重心位置に働く慣性力により衝突位置を支点として回転し、ネットに対し鋼製材が水平姿勢になって、鋼製材とネットの接触面積が大きくなる。鋼製材とネットの接触面積が少ないほど、ネットに与える影響は大

きいことから、ネットに対する設計飛来物の衝突は、接触面積が少ない垂直衝突による評価とする。

以上より、設計飛来物は被衝突物に対して垂直に衝突するものとして評価する。表2に設計飛来物の諸元を示す。

表2 設計飛来物の諸元

設計飛来物	仕様		最大水平速度 (m/s)	最大鉛直速度 (m/s)
	サイズ (m)	質量 (kg)		
鋼製材	縦×横×高さ 4.2×0.3×0.2	135	46.6	16.7
砂利	縦×横×高さ 0.04×0.04×0.04	0.2	59.3	22.6

(2) 荷重の組合せ

「別添資料1 3.3.2 設計竜巻荷重と組合せる荷重の設定」を踏まえ、荷重の組合せを表3に示す。

表3 竜巻防護ネットにおいて組合せを考慮する荷重

考慮する荷重				
常時作用する荷重	運転時の状態で作用する荷重	竜巻荷重		
自重		風圧力	気圧差	設計飛来物による衝撃荷重
○	—	○	—	○

○：考慮する，—：考慮不要

(1) 斜め衝突による表面破壊深さ評価に係る一考察（構造工学論文集 Vol.63A（2017年3月）
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

3.3 ネット（金網部）の構造設計方針

3.3.1 基本設計

設計飛来物が衝突した際に局部的に生じる衝撃荷重に耐え、変形することにより設計飛来物の持つ運動エネルギーを吸収し、非常用海水ポンプ等への衝突を防止する。

竜巻防護ネットの基本仕様は、電力中央研究所にて評価、試験を行い、検証されたものを適用し、防護性能の評価は以下のとおり実施する。

設計飛来物の衝突位置の影響として、中央位置からずれたオフセット位置に衝突する場合の影響を考慮する。

- ・ネットの吸収エネルギー評価
- ・ネットの破断評価
- ・ネットのたわみ量評価
- ・その他ネットの取付部材の強度評価

電中研報告^{※1}によるネットの吸収エネルギーは表4のとおりであり、当社の設計飛来物の速度条件を包絡する。

表4 竜巻防護ネット（金網部）の吸収エネルギーと設計飛来物の衝突エネルギー

限界吸収エネルギー ^{※2}	170 (kJ)
設計飛来物の衝突エネルギー (鋼製材：135kg, 速度 16.7m/s)	19 (kJ)

※1：竜巻設計飛来物に対する防護ネットの評価手法と対策工法の提案（電力中央研究所報告書 N13014, 平成26年3月）

※2：電力中央研究所報告書O01「高強度金網を用いた竜巻設計飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法」

3.3.2 構造設計

ネット（金網部）は、ひし形金網の高強度金網を使用しており、50mm目合いの主ネット2枚と40mm目合いの補助ネット1枚を重ねて取り付ける。

ネット（金網部）は、金網部の端部にワイヤーロープを通すことによって支持し、ワイヤーロープの端部はフレームに取り付けた接続用の治具を介して、ワイヤーロープ固定部に接続する。

ネットに作用する自重や設計飛来物による衝撃荷重等の荷重は、ワイヤーロープを通じてフレームに伝達する。

ネットを取り付けるフレームは、主桁、横補強材、ブレースで構成され、主桁と横補強材で区切られるセル毎にネットを支持する。1台のフレームに対して、セルは4つとし、5台のフレームで海水ポンプ室のほぼ全域を覆う構造とする。ネット（金網部）のフレーム取付け概要を図4に示す。

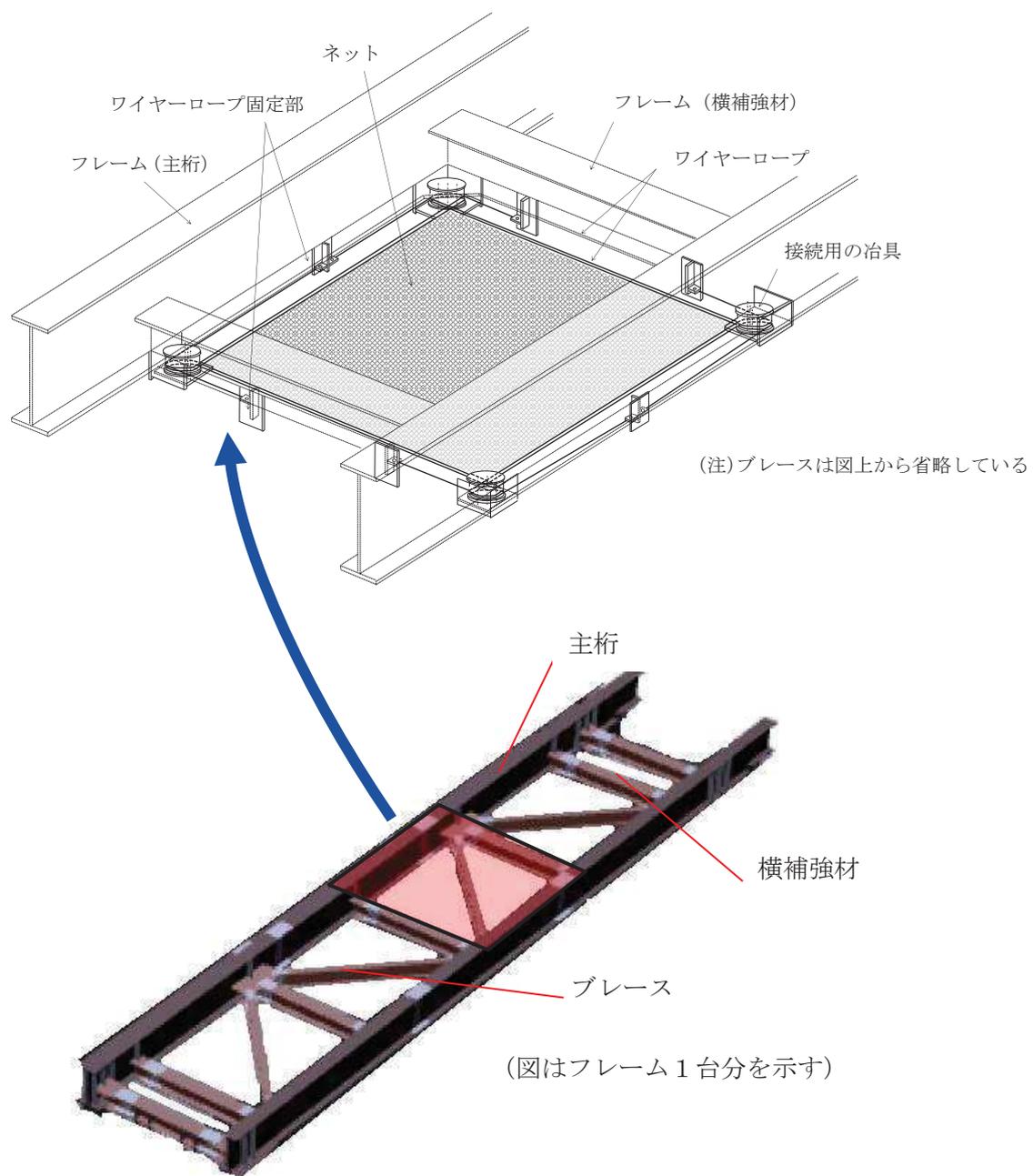


図4 ネット（金網部）のフレーム取付け概要図

3.4 フレーム，大梁の構造設計方針

3.4.1 基本設計

竜巻防護ネットのフレーム，大梁は，設計飛来物の衝突において貫通が発生しない設計とする。

また，ネット（金網部）や防護板で受けた設計飛来物による衝撃荷重等が伝達されることから，荷重条件に対して上載するネット，防護板を支持可能な構造設計とする。設計飛来物の衝突位置により各部材に加わる荷重が異なることから，設計飛来物衝突位置の影響を考慮した設計とする。

地震に対しては，耐震Cクラスの静的地震力に耐えるとともに，基準地震動 S_s による地震力によって崩壊及び落下せず，非常用海水ポンプ等への波及的影響を与えることのない設計とするとともに，海水ポンプ室補機ポンプエリアの壁部材等に対して，海水ポンプ室補機ポンプエリアの強度を踏まえた荷重支持位置を考慮することにより，耐震安全性を確保する。

3.4.2 構造設計

ネット（金網部）及びフレームで発生した荷重は，海水ポンプ室補機ポンプエリアの壁面に伝達する構造とする。

海水ポンプ室の壁面のうち，隔壁（南側）は厚さ 0.6m であり，荷重に対して十分な強度を確保できない可能性があるため，十分な厚み（厚さ 2m）がある側壁（東側）及び側壁（西側）にブラケットを取付け，大梁を設置することで，フレームを支持する。もう一方の支持は厚さ 1.5m の隔壁（北側）にて実施する。

以上により，十分な厚みがあり強度が確保できる隔壁（北側）と側壁（東側，西側）で荷重を受ける構造とする。

フレーム，大梁の設置状況を図 5 に示す。

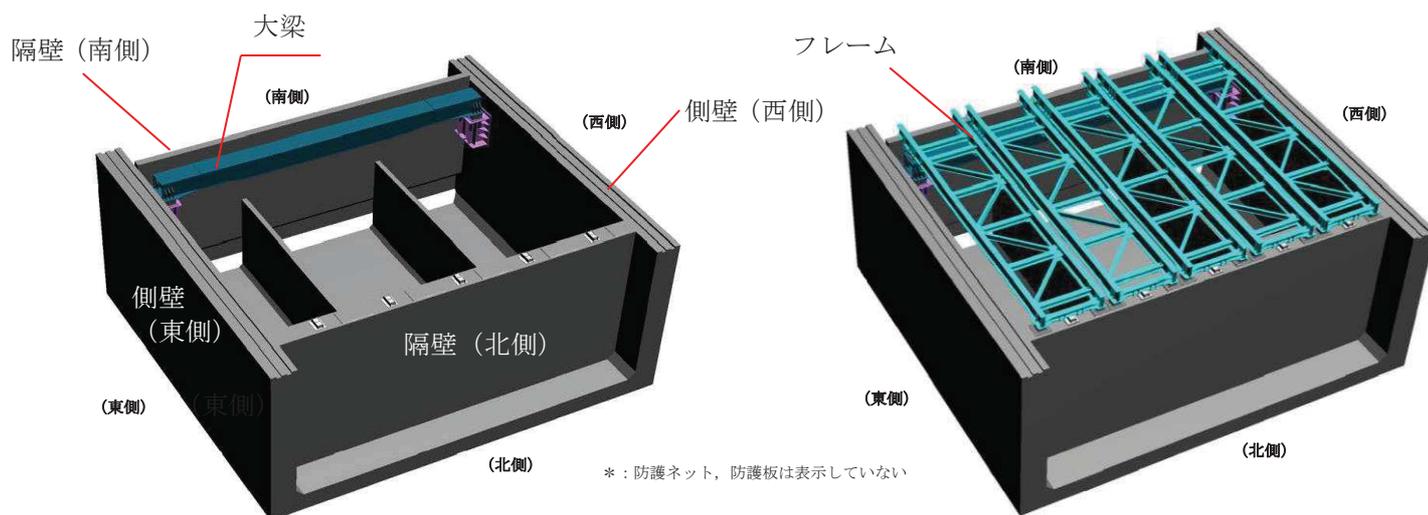


図 5 フレーム，大梁の設置状況

3.5 ゴム支承，可動支承の構造設計方針

3.5.1 基本設計

地震によるフレーム，大梁の発生応力及び海水ポンプ室補機ポンプエリア壁面への支点反力を低減・分散させることを目的として，支持部にはゴム支承を採用する。また，フレームと大梁の接続部には，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ため，水平変位に追従する可動支承を設置する。

ゴム支承を用いることの効果としては，以下のとおり。

- ・ 竜巻防護ネットの水平方向の固有周期を長周期側に移動させることで，応答を下げるができる。
- ・ 大梁の両端で水平力を支持し，海水ポンプ室壁面への荷重を分散することができる。

ゴム支承の採用により地震時等には水平方向に大きな変位が生じることから，他の設備との干渉を回避するためにクリアランスを適切に確保する設計とする。

ゴム支承，可動支承は，ネット（金網部）や防護板，フレーム等で受けた設計飛来物による衝撃荷重が伝達されるが，伝達された荷重によって損傷する場合であっても，フレームに取付けたストッパーにより衝撃荷重を支持することで，竜巻防護ネットは落下せず，非常用海水ポンプに波及的影響を与えない設計とする。

3.5.2 構造設計

ゴム支承はフレームと隔壁（北側）の接続部及び大梁とブラケットの接続部に設置する。

フレームと隔壁（北側）の接続部は，フレーム1基に対して，隔壁（北側）の天面に設置した2個のゴム支承を取り付ける構造とする。（隔壁（北側）には計10個のゴム支承を設置）

大梁の支持は，片側1箇所あたり2基のブラケットを設置し，各ブラケットの上に1個のゴム支承を設置する。（大梁には計4個のゴム支承を設置）

大梁とフレームの接続部は可動支承を用いる。可動支承はフレーム1基に対して，2個の可動支承で支持する。（大梁には計10個の可動支承を設置）可動方向は南北方向のみである。支持構造模式図を図6，ゴム支承及び可動支承概略図を図7に示す。

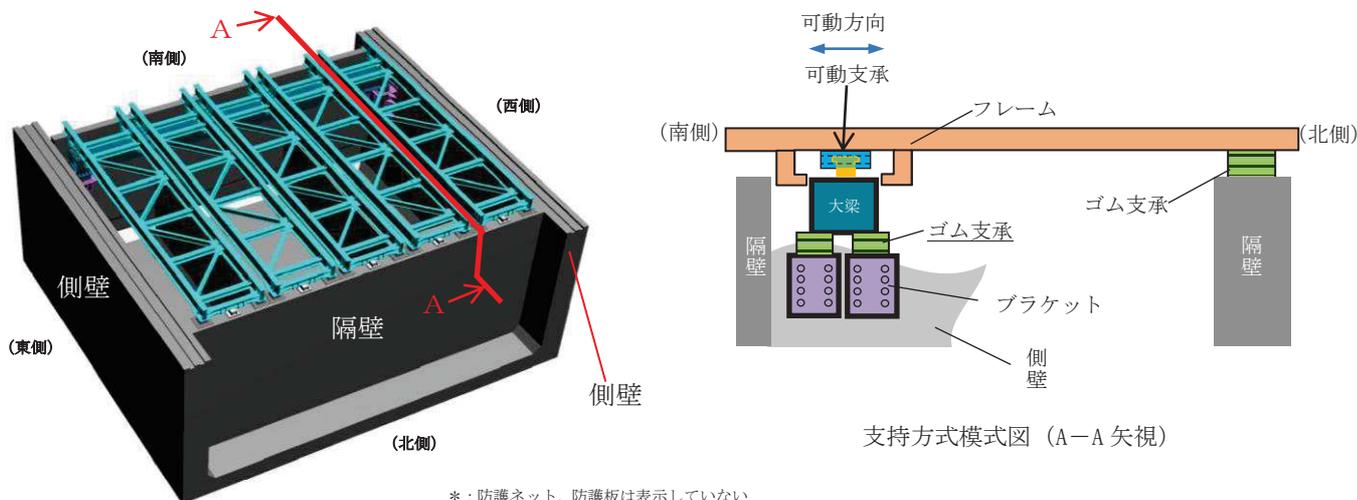
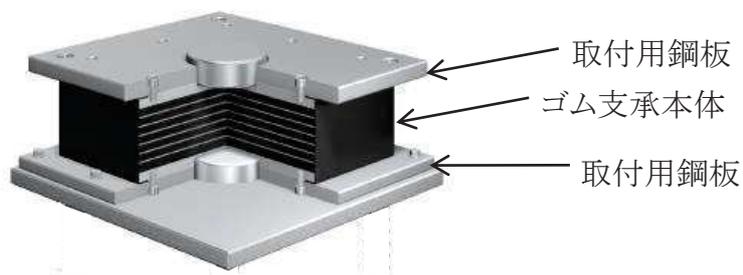
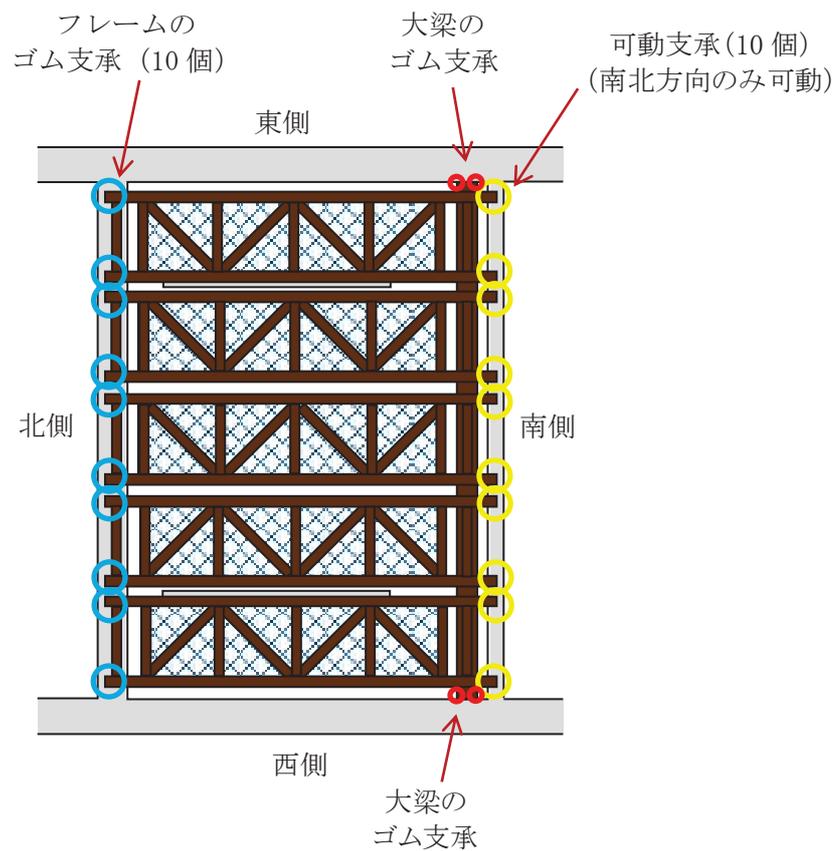
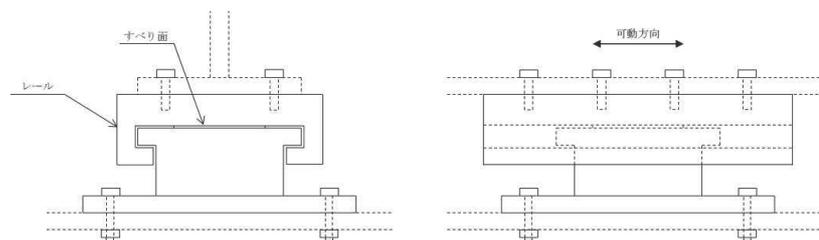


図6 支持構造模式図



ゴム支承概略図 (イメージ)



可動支承概略図 (イメージ)

図7 ゴム支承及び可動支承概略図

3.6 防護板の構造設計方針

3.6.1 基本設計

竜巻防護ネットのうち、ゴム支承に支持されているフレーム、大梁は、地震力によって水平方向の変位が生じることから、他の設備との干渉を回避する必要がある。このため、フレーム間及びフレームと海水ポンプ室補機ポンプエリア壁面との間に隙間を設けており、隙間からの設計飛来物の侵入を防ぐために、防護板を設置する。

防護板は、設計飛来物の衝突に対して、BRL 式^{※3}を用いて算出される貫通限界厚さ以上の板厚を確保することで、貫通せず変形に留まる設計とする。また、防護板は地震時にフレームが移動しても干渉しない構造であるとともに、設計飛来物である鋼製材が海水ポンプ室補機ポンプエリアに侵入しない構造とする。

3.6.2 構造設計

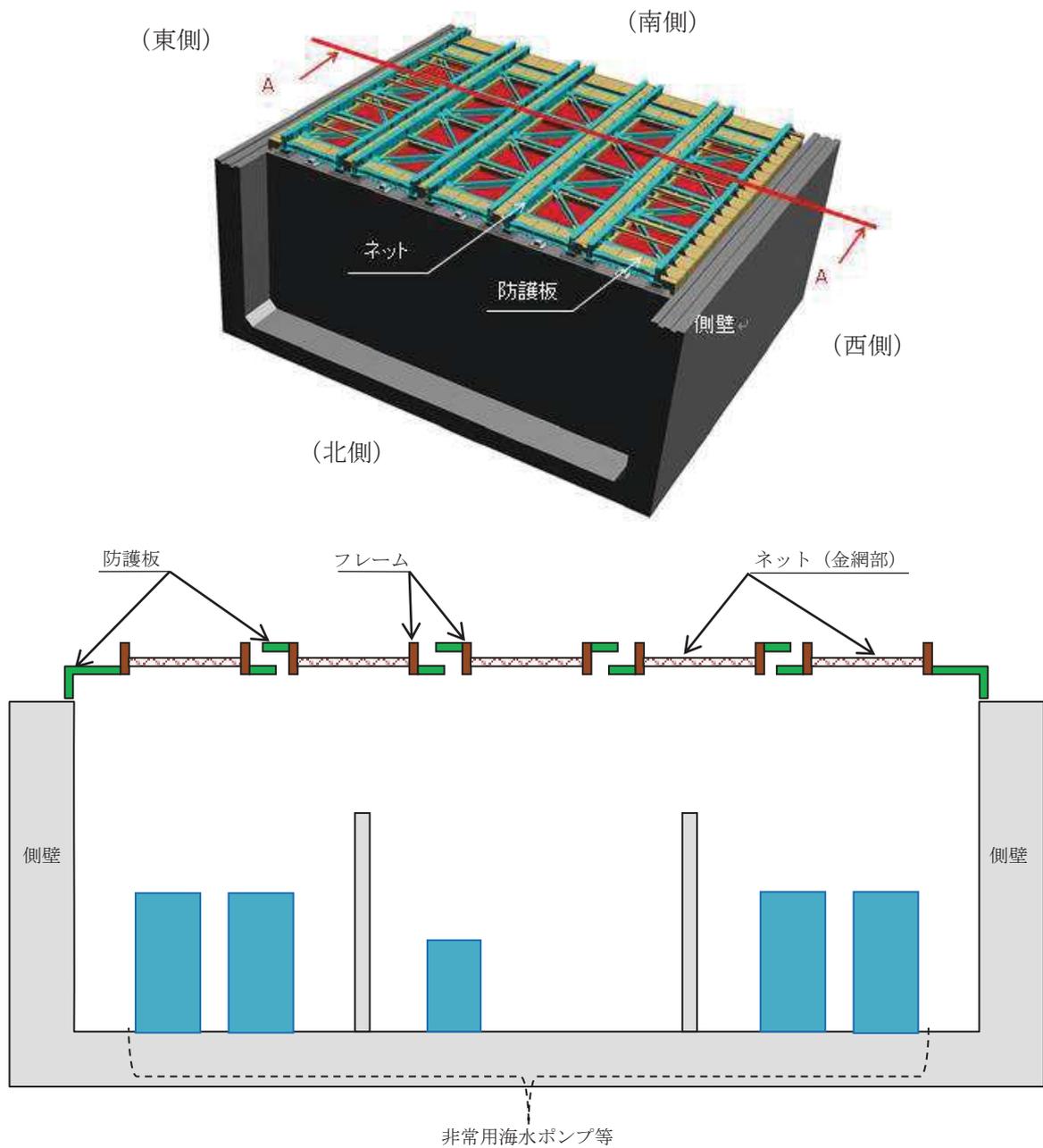
竜巻防護ネットの5台のフレームは、地震時に発生する変位を踏まえて隙間を確保している。また、同様に海水ポンプ室補機ポンプエリアの側壁との間にも隙間を設けている。防護板はフレームの変位を考慮した上で、ラビリンス構造とすることで、設計飛来物である鋼製材（縦 4.2m×横 0.3m×高さ 0.2m）が通過しない構造とする。

また、BRL 式^{※3}による貫通厚さは表 5 に示すとおりであり、防護板に対する垂直方向の衝突を考慮する。図 8 にフレーム、防護板等の配置イメージを示す。

表 5 BRL 式^{※3}による貫通厚さ

設計飛来物	仕様		貫通限界厚さ (mm)	
	サイズ (m)	質量 (kg)	水平方向の衝突	鉛直方向の衝突
鋼製材	縦×横×高さ 4.2×0.3×0.2	135	27.6	7.1
(参考) 砂利	縦×横×高さ 0.04×0.04×0.04	0.2	0.9	0.2

※3:「タービンミサイル評価について(昭和 52 年 7 月 20 日 原子炉安全専門審査会)」で用いられている BRL 式



海水ポンプ室補機ポンプエリア断面から見た防護板の配置 (A-A 矢視)

図8 フレーム，防護板等配置イメージ

4. 竜巻防護に対する評価方針

4.1 強度評価

4.1.1 ネット（金網部）

ネット（金網部）の強度評価は「3.2.1 荷重条件」で設定した荷重及び荷重の組合せを踏まえて、評価対象部位に作用する応力等について確認するものである。

(1) 評価項目

設計荷重に対してネットは、設計飛来物を捕捉し非常用海水ポンプ等へ衝突させないために、破断が生じない強度を有すること及びたわみが生じても、設計飛来物が非常用海水ポンプ等と衝突しないよう非常用海水ポンプ等との離隔が確保できることを確認する。

破断が生じないことの確認として、ネットが設計飛来物のエネルギーを吸収できること及び設計飛来物の衝突箇所において、ネットの破断が生じない強度を有することを評価する。また、防護ネットが設計飛来物を捕捉可能であることを確認するために、設計荷重に対してネットを支持するワイヤーロープ、ターンバックル、シャックル及び接続用の治具に破断が生じない強度を有することを評価する。

設計飛来物の衝突位置の影響として、中央位置からずれたオフセット位置に衝突する場合の影響を考慮する。

(2) 評価対象部位

ネット（金網部）の強度評価においては、その構造を踏まえて、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

① ネット

ネットには設計竜巻荷重が直接作用するため、評価対象部位とする。

② ワイヤーロープ、ターンバックル及びシャックル

ネットに作用した荷重は、ワイヤーロープを介してターンバックル及びシャックルに作用するため、ワイヤーロープ、ターンバックル及びシャックルを評価対象部位とする。

③ 接続用の治具

接続用の治具およびワイヤーロープ固定部には、ワイヤーロープを介して伝達された荷重が作用するため、接続用の治具である隅角部固定ボルト、ワイヤーロープ固定部を評価対象部位とする。

図9にネット（金網部）の評価対象部位、図10に設計飛来物衝突時の荷重伝達を示す。

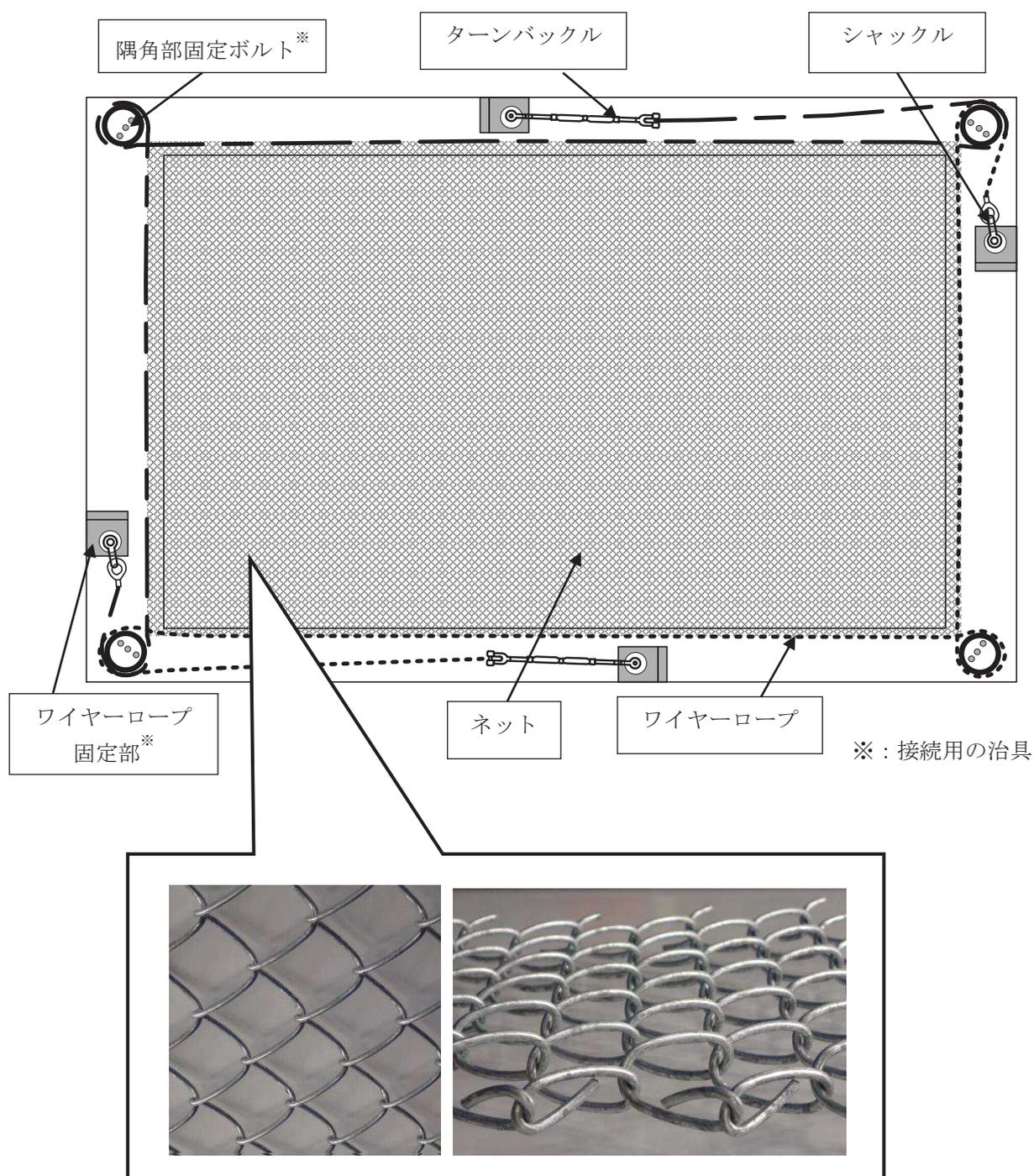
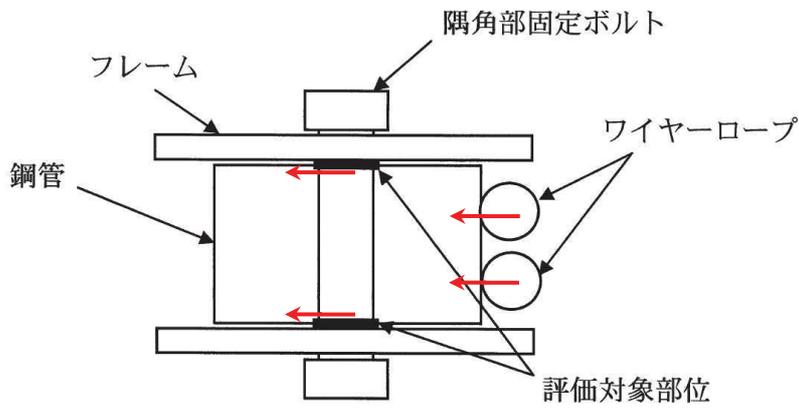
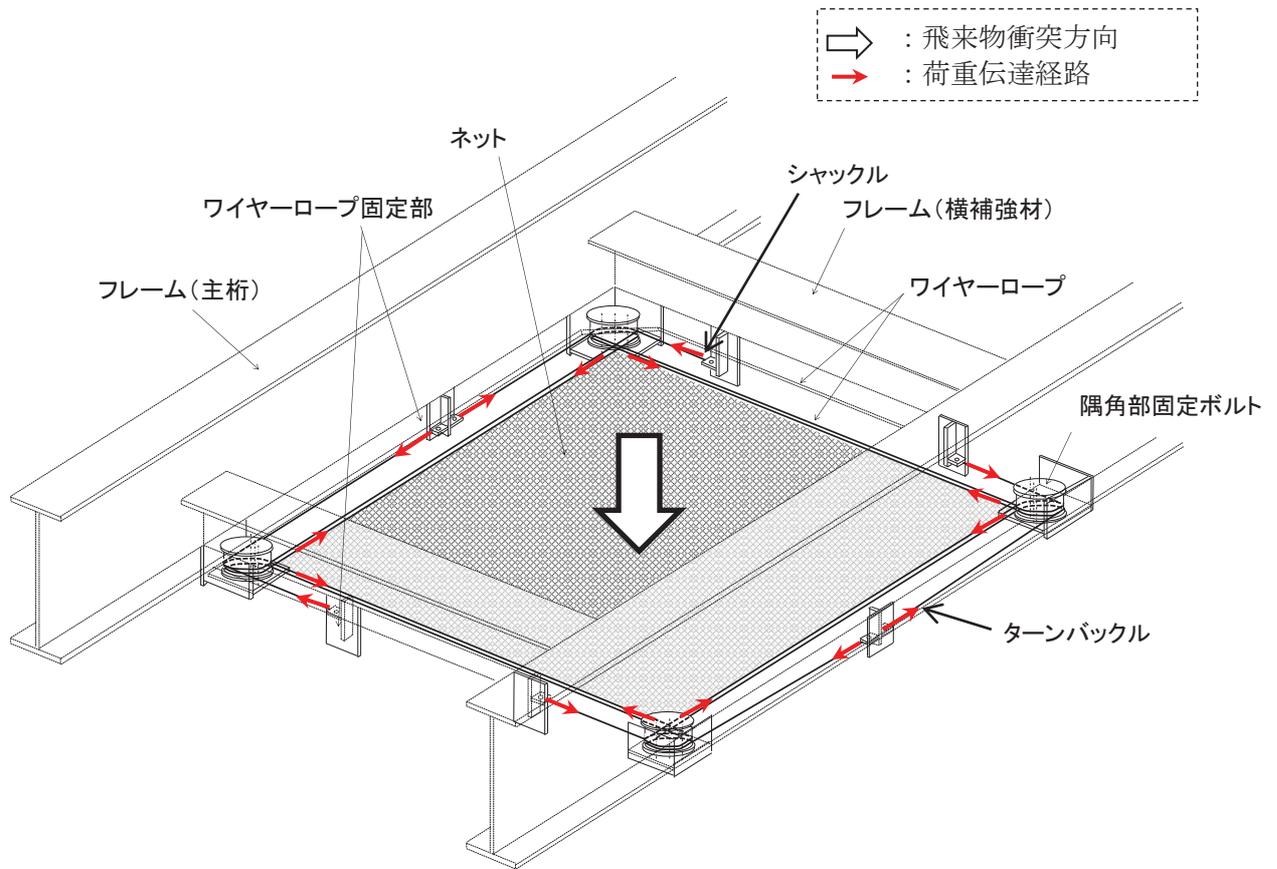


図9 ネット（金網部）の評価対象部位



隅角固定ボルトの荷重状態

図 10 設計飛来物衝突時の荷重伝達図 (ネット (金網部))

(3) 許容限界

①吸収エネルギー評価

吸収エネルギー評価においては、計算により算出するネットの限界吸収エネルギーがネットに作用するエネルギー以上であることにより、ネットが破断しないことを確認する。

②破断評価

ネット（金網部）の破断評価においては、計算により算出するネットに作用する荷重がネットの素材の持つ破断強度以下であることにより、ネットに破断が生じない強度を有することを確認する。

ワイヤーロープは、ネットと一体となって設計飛来物を捕捉するため、ネットと同様に塑性変形を許容することから、破断荷重を許容限界とする。

ターンバックル及びシャックルは、破断しなければネットを設置位置に保持することができ、設計飛来物を捕捉可能である。したがって、ワイヤーロープの張力に対し、破断しないことを確認する。

接続用の治具の破断評価は、計算により算出する応力により接続用の治具を破断しない強度を許容限界とする。

③たわみ評価

竜巻防護ネット本体は、自重、設計竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重に対し、計算により算出する竜巻防護ネット本体の最大たわみ量がネットと非常用海水ポンプ等の離隔距離未満であることを確認するため、ネットと非常用海水ポンプ等の最小離隔距離を許容限界として設定する。

4.1.2 フレーム、大梁、ブラケットおよびアンカーボルト

フレーム、大梁、ブラケットおよびアンカーボルトの強度評価は、「3.2.1荷重条件」にて設定した荷重及び荷重の組合せを踏まえて、評価対象部位に作用する応力等の評価方針について確認するものである。

(1) 評価項目

設計荷重に対してフレーム、大梁は、設計飛来物が貫通せず非常用海水ポンプ等への到達を阻止できること（貫通評価）、また、非常用海水ポンプ等へ波及的影響を与えないよう崩壊や落下が生じないこと（支持機能評価）を衝突解析により確認する。

ブラケットおよびアンカーボルトは、フレーム、大梁で受けた荷重が伝達されるため、衝突解析によって算出した荷重によって崩壊や落下が生じないこと（支持機能評価）を確認する。

評価においては、飛来物の衝突位置により各部材に発生する応力が変わることから、各部材に対し最も条件の厳しい衝突箇所を考慮し評価を実施する。

また、衝突解析においては、保守的にゴム支承による荷重の低減・分散効果を期待しない評価を実施する。

(2) 評価対象部位

フレーム、大梁は、設計飛来物が直接衝突する可能性があるため、評価対象部位とする。また、フレーム、大梁から荷重が伝達される部材（ストッパー、ブラケットおよびアンカーボルト）についても評価対象とする。図11に設計飛来物衝突時の荷重伝達を示す。

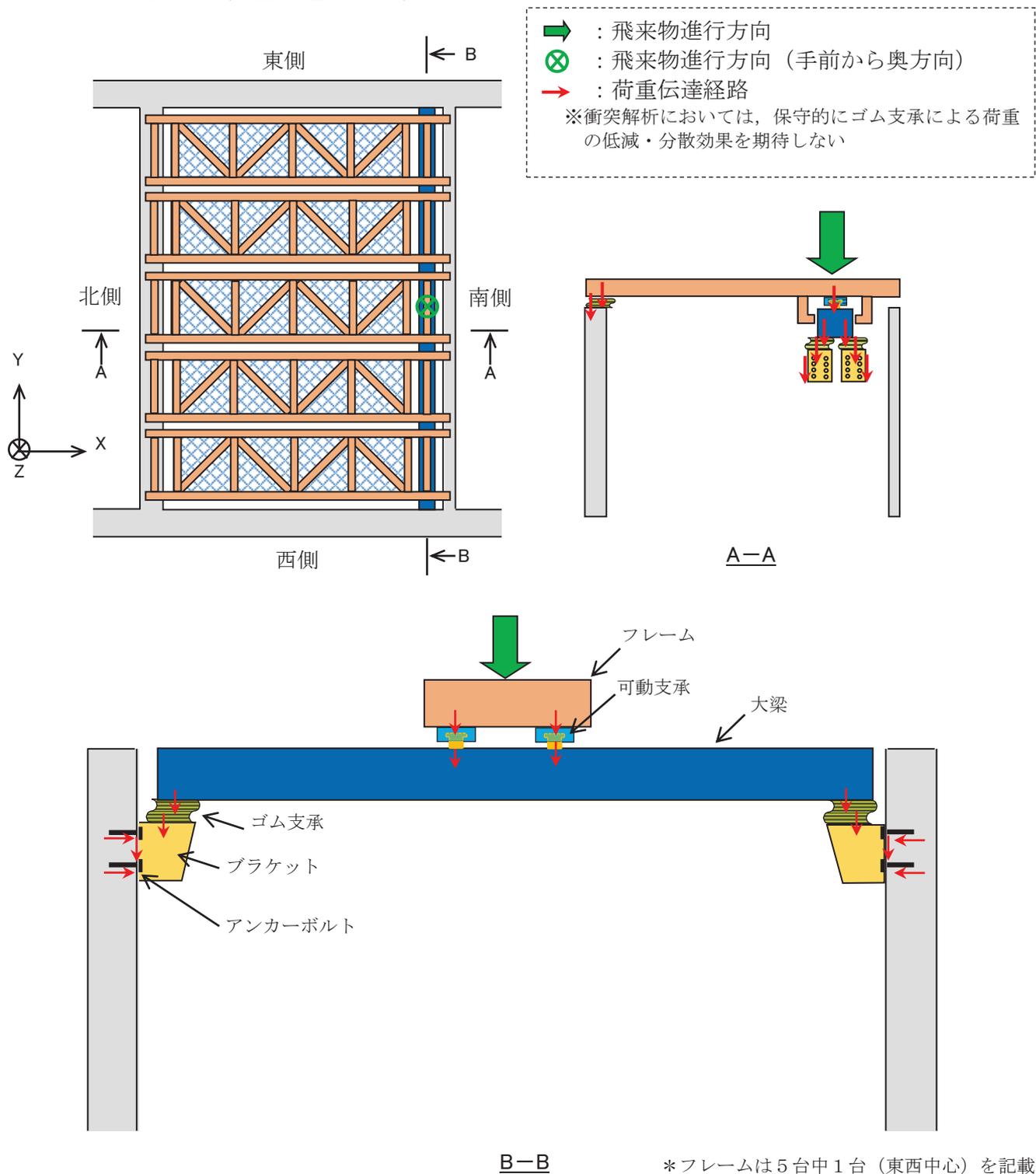


図 11 設計飛来物衝突時の荷重伝達図（鉛直方向から衝突した場合）

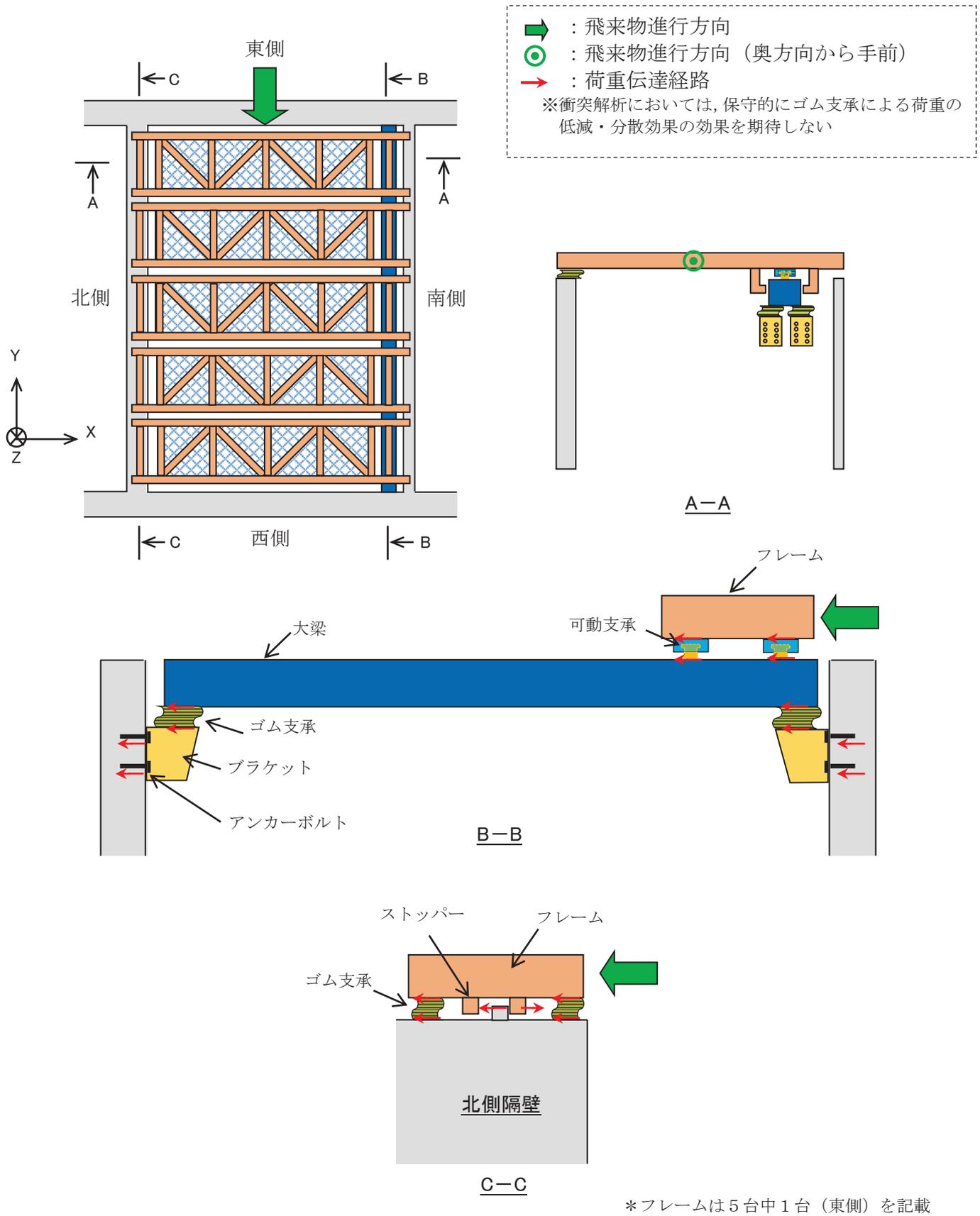


図 12 設計飛来物衝突時の荷重伝達図 (水平方向 (東から西) から衝突した場合)

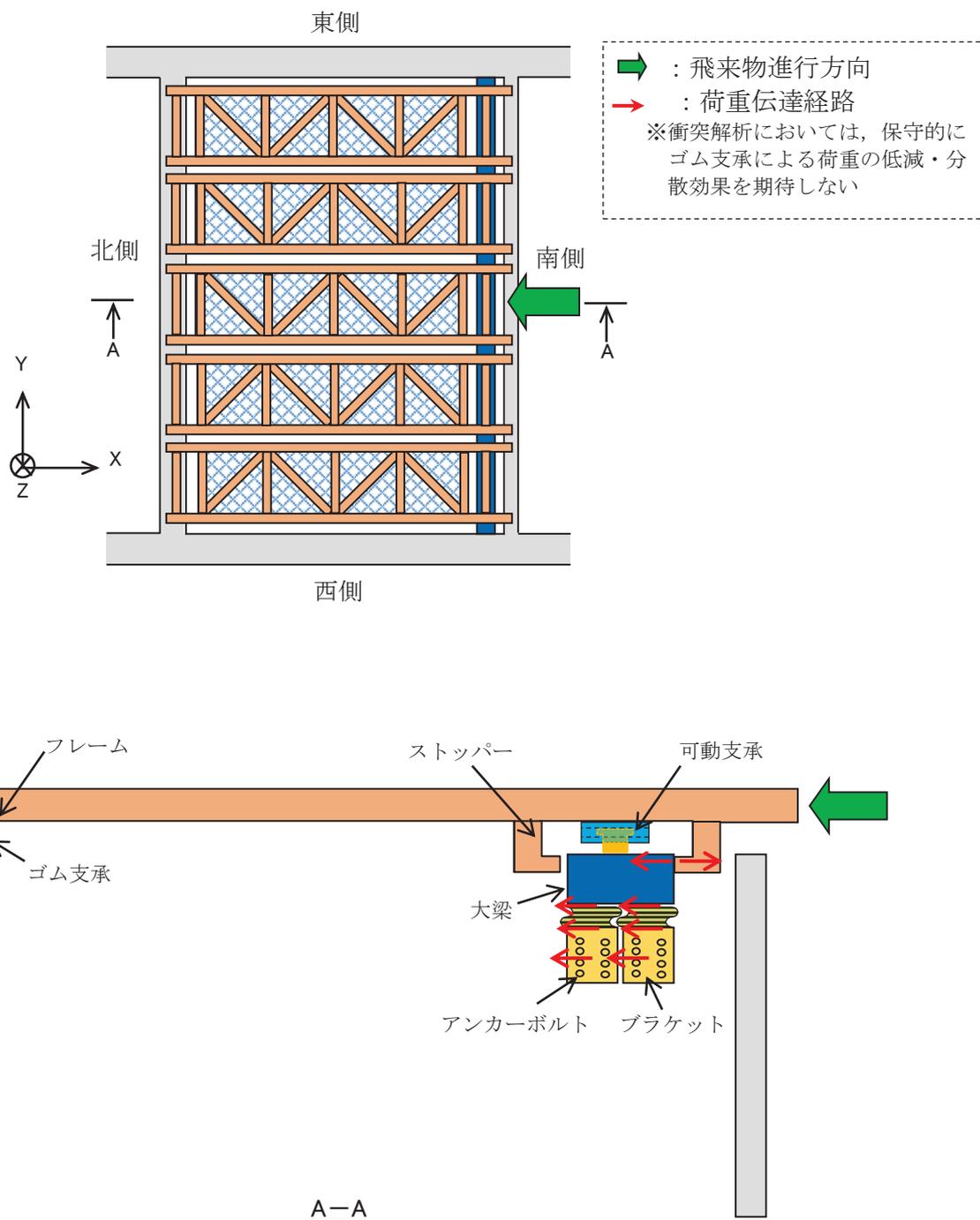


図 13 設計飛来物衝突時の荷重伝達図（水平方向（南から北）から衝突した場合）

(3) 許容限界

フレーム（ストッパー含む）、大梁は、評価対象部位に発生する最大ひずみが「NEI07-13」に基づく破断ひずみの範囲内であることを確認する。最大ひずみが破断ひずみを超える場合には、破断箇所を確認し、全断面に発生しないことにより、貫通および落下が生じないことを確認する。

ブラケット、アンカーボルトにおいては、「原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601・補-1984）」に基づいて、許容応力状態IV_ASの許容応力を許容限界として設定する。

4.1.3 防護板

防護板の強度評価は、「3.2.1荷重条件」にて設定した荷重及び荷重の組合せを踏まえて、評価対象部位に作用する応力等の評価方針について確認するものである。

(1) 評価項目

非常用海水ポンプ等が安全機能を損なうことのないことの確認として、設計飛来物が防護板に衝突した場合の貫通に対する評価（以下「貫通評価」という）を実施し、非常用海水ポンプ等に到達しないことを確認する。

(2) 評価対象部位

防護板は設計飛来物の衝突に対し、非常用海水ポンプ等を防護するための設備であることから評価対象部位とする。

(3) 許容限界

防護板の貫通評価における許容限界は、防護板の板厚が貫通限界厚さを上回る値とする。貫通限界厚さは「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会）」で用いられているBRL式を用いて算出する。

5. 竜巻以外の自然現象（地震、津波含む）に対する評価方針

5.1 竜巻以外の自然現象に対する評価

(1) 竜巻以外の自然現象の影響抽出

竜巻防護ネットは、竜巻以外の自然現象によって非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさないことを確認する。

竜巻防護ネットに対する竜巻以外の自然現象（地震、津波含む）の影響は、表6に示すとおり、荷重を考慮する必要がある。

竜巻防護ネットを設置する海水ポンプ室（コンクリート壁含む）および竜巻防護ネットの耐震評価方針については、設置許可基準規則第4条に対する適合状況説明資料『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）』で説明する。

表6 竜巻防護ネットに対する竜巻以外の自然現象（地震、津波含む）の影響

事象	確認結果	考慮の 要否
風（台風）	・風（台風）の荷重を考慮する	○ （荷重）
凍結	・設備構造上、凍結の影響を受けない	—
降水	・構内排水施設により排水することで設備が浸水することはない	—
積雪	・積雪荷重を考慮する	○ （荷重）
落雷	・電気設備を持たないことから電氣的影響を受けない	—
火山の影響	・降下火砕物の荷重を考慮する ・腐食に対しては金属材料を用い、亜鉛メッキや外装塗装を実施していることから短期的な影響は小さい ・設備構造上、降下火砕物による閉塞・摩耗・電氣的影響を受けない	○ （荷重）
生物学的事象	・設備構造上、生物学的事象の影響を受けない	—
森林火災	・防火帯からにより、森林から約300mの離隔がある ・設備構造上、ばい煙による影響を受けない	—
地震	・地震の荷重を考慮する （第4条 地震による損傷の防止）参照	○ （荷重）
津波	・基準津波は津波防護施設及び浸水防止設備により敷地内に到達することはないため、荷重・浸水の影響を受けない （第5条 津波による損傷の防止）	—

(2) 設計条件

波及的影響の評価の条件として、竜巻以外の自然現象による荷重の種類及び組合せを以下に示す。

a. 荷重条件

(a) 風（台風）による荷重

風（台風）による荷重は、建設省告示第1454号に定められた女川町の基準風速30m/sによる荷重とする。

(b) 積雪荷重

積雪荷重として以下の条件を考慮する。

積雪量 : 43cm（積雪深さの月最大値）*1

単位荷重 : 20N/m² *2

*1：建築基準法施行細則（宮城県）に定められる女川町の垂直積雪量は40cmであるが、保守的に既往最大である垂直積雪量43cmを用いる。

*2：建築基準法施行令に基づく積雪の単位荷重（積雪1cm当たり20N/m²）

(c) 火山の影響による荷重

火山事象における降下火砕物による静的荷重として以下の条件を考慮する。

堆積量 : 15cm

密度 : 1.5g/cm³（湿潤状態）

(d)地震荷重

波及的影響の評価は基準地震動 S_s による地震力に対して実施する。

b. 荷重の組合せ

荷重の組合せは「女川原子力発電所2号炉 外部事象の考慮について」に示す自然現象の組合せの方針に従い、以下のとおりとする。

(a)地震荷重+風荷重

地震と風については、ともに最大荷重の継続時間が短く、同時に発生する確率は低い。また、竜巻防護ネットは風荷重の影響が大きいと考えられるような構造や形状の施設でないため、地震荷重と風荷重との組合せは考慮しない。

(b)地震荷重+積雪荷重

女川原子力発電所は多雪地域ではないため、建築基準法による「積雪荷重と他の荷重の組合せ」を考慮する必要はないが、原子力発電所の重要性を鑑み、多雪区域の基準を準用して、建築基準法施行令の積雪荷重に地震や暴風と組合せる際に用いる平均的な積雪荷重を与えるための係数 0.35 の係数を考慮して地震評価における静的荷重として組み合わせる。

(c) 降下火砕物荷重+風荷重+積雪荷重

降下火砕物荷重と風荷重及び積雪荷重の組合せは、3つの荷重が同時に発生することを考慮し、施設の形状、配置により適切に組み合わせることとしている。

ただし、竜巻防護ネットは風荷重の影響が大きいと考えられるような構造や形状の施設でないため、上記3つの荷重のうち降下火砕物荷重と積雪荷重の組合せを考慮する。

組合せる荷重は、降下火砕物荷重と積雪荷重は相関性が低い事象の組合せであるが、個別の事象が重畳した場合には堆積荷重が増加すると考えられるため、Turkstra の法則を適用して設定することとし、降下火砕物による荷重を主荷重（湿潤状態の降下火砕物の荷重（層厚 15cm））、積雪による荷重（石巻における年最大積雪深さの平均値 17cm）を従荷重として組み合わせる。

6. 竜巻随伴事象に対する評価

(1)火災

竜巻随伴事象として、建屋外については、発電所敷地内の屋外にある危険物貯蔵施設等の火災がある。火災源と竜巻防護ネットの位置関係を踏まえて火災の影響を評価（「6条（外部火災）」により評価）した上で、竜巻防護ネットが非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼさない設計とする。

また、竜巻防護ネットは発火性、引火性のある物質を使用しないため、火災の原因とはならない。

(2) 溢水

建屋外については、設計竜巻による飛来物の衝突による屋外タンク等の破損に伴う溢水を想定されるが、竜巻防護ネットは構造上、溢水により機能を損なわないため、溢水により非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼすことはない。

また、竜巻防護ネットは液体を内包する構造でないため、溢水の原因とはならない。

(3) 外部電源喪失

設計竜巻又は設計竜巻と同時に発生する雷又はダウンバースト等の影響により外部電源喪失が想定されるが、竜巻防護ネットは、電源を用いておらず、外部電源喪失の影響を受けないため非常用海水ポンプ等に波及的影響を及ぼすことはない。また、竜巻防護ネットは飛来物化せず、送電網に関する施設等を損傷させることはないから、外部電源喪失の原因とならない。

7. 竜巻防護ネットの維持管理について

竜巻防護ネットは、非常用海水ポンプ等を竜巻による飛来物から防護する機能及び、非常用海水ポンプ等に波及的影響を与えないための設備であることから、設置環境や、部材の劣化、故障モード等を踏まえた管理基準を定め、保全計画を策定し、点検を実施することにより、適切に設備の維持管理を実施する。

非常用海水ポンプ等の点検時には、竜巻防護ネットのフレームの取外し、取付けを実施することから、接続部（可動支承等）の健全性を確認して据付を実施する。

また、予備品の確保等により、部材が損傷した場合であっても、速やかに補修が行えるようにする。