

本資料のうち、枠囲みの内容は商業
機密の観点又は防護上の観点から
公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	O2-他-F-17-0009_改0
提出年月日	2021年5月21日

女川原子力発電所第2号機 竜巻防護ネットの構造評価について

東北電力株式会社

目次

1. はじめに
2. 工事計画認可段階における論点及び報告事項の整理
3. 竜巻防護ネットの構造概要
4. 設置変更許可からの設計進捗の反映事項
 4. 1 構造に関する変更事項
 4. 2 評価に関する変更事項
5. 申送り事項に対する対応
6. まとめ

1. はじめに

- 竜巻防護ネットについて、設置変更許可段階からの詳細設計進捗を反映した事項及び第927回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合(令和2年12月8日)において示した竜巻防護ネットに係る詳細設計申送り事項を踏まえた、竜巻防護ネットの構造評価について説明する。

2020年7月14日 第876回審査会合(資料1)より再掲…一部加筆・修正(赤字+下線で示す)				
【参考①】 詳細設計申送り事項の分類(2/3)				7
➤ 詳細設計申送り事項については、関連する工認図書等にて詳細に説明する。				
表-2 詳細設計申送り事項(分類A, B)				
No.	項目	概要	分類	工認図書提出状況
2-1	地下水位の設定, 耐震評価における断面選定	女川特有の地下水位低下設備の設備構成, 設計用地下水位の設定結果, 設計用地下水位を踏まえた各施設の解析手法及び地震応答解析断面の選定結果について説明する。また, 地下水位低下設備の耐震性やアクセスルート評価についても説明する。	A	2020年5月(地下水設定・解析手法・断面選定) 2020年9月・11月(耐震性) 2020年11月(アクセスルート評価)
2-2	竜巻防護ネットの構造評価	設置許可段階において, ゴム支承の採用等を踏まえた構造成立性及び詳細設計段階における設計方針について説明しており, 試験や解析の結果を踏まえて詳細を説明する。	A	2020年11月(強度計算の方針) 2021年3月(耐震・強度計算書提出予定)
2-3	サブプレッションチェンバの耐震評価	サブプレッションチェンバの耐震評価における地震応答解析モデルに3次元はりモデルを適用すること等について詳細を説明する。	A	2020年11月
2-4	3.11地震等の影響を踏まえた建屋の耐震評価	建屋の地震応答解析モデルの策定においては, 初期剛性の低下を観測記録などから適切に反映することとしており, 策定した地震応答解析モデル及び解析結果について説明する。また, 入力地震動の算定の詳細について説明する。	A	2020年5月(原子炉建屋, 制御建屋) 2020年11月(その他建屋)
2-5	津波漂流物の衝突荷重	詳細設計段階で設定することとしていた津波漂流物の衝突荷重について, 女川のサイト特性を考慮した漂流物の衝突形態及び既往研究論文における漂流物衝突荷重算定式の整理を踏まえた算定結果を説明する。	A	2020年5月

2. 工事計画認可段階における論点及び報告事項の整理

- 詳細設計進捗を反映した事項…海水ポンプ室の補強計画等を踏まえた竜巻防護ネットの詳細設計により構造等を一部変更したものの。
- 詳細設計申送り事項…竜巻防護ネットの特徴(ゴム支承の採用等)を踏まえ、設置変更許可段階の審査において、工事計画認可段階で詳細を説明するとしていた事項。
- 上記について、工事計画認可段階における論点及び報告事項として下記に整理した。

分類	項目	対応概要	備考	
設置変更許可からの設計進捗を反映した事項	(1)フレーム基数及び幅の変更	海水ポンプ室の補強計画を踏まえた設計変更を実施した。	4. 1節 参照	
	(2)大梁の支持方法の変更			
	(3)フレームゴム支承の仕様変更	構造強度を向上させるため設計変更を実施した。		
	(4)可動支承の仕様変更			
	(評価関係)	(1)機能維持に関する方針の変更		いずれの支承部も許容限界を満足する方針とした。
詳細設計申送り事項	(主に耐震関係)	(1)SRSS法の適用性	異なる解析手法との比較を行うなどして、その妥当性を確認した。	5章 参照
	(2)スペクトルモーダル解析の適用性			
	(3)設計手法の保守性			
	(4)風荷重の考慮有無			
	(主に強度関係)	(5-1)ゴム支承の衝撃荷重に対する試験の実施	ゴム支承の鉛直剛性に係る特性試験を実施した。	
	(5-2)試験を踏まえたゴム支承の剛性の設定	せん断及び鉛直剛性の各種依存性試験結果を踏まえ、評価に用いる剛性値を設定した。		
	(5-3)ゴム支承の剛性のばらつきに対する影響の考慮	上記に対して、地震応答解析及び衝突解析を実施し、構造健全性を確認した。		
(6)飛来物衝突方向に対する影響の考慮	飛来物の長辺衝突による衝突解析を実施し、構造健全性を確認した。			
(7)飛来物衝突時の上向反力に対して、フレームが浮き上がらないことの考慮	各衝突解析結果を確認し、フレームゴム支承に生じる引張応力が許容限界以下であり、フレームが浮き上がる損傷モードが発生しないことを確認した。			

竜巻防護ネットの設置位置

- ▶ 竜巻防護ネットは海水ポンプ室補機ポンプエリア上面に設置し，外部事象防護対象施設（原子炉補機冷却海水ポンプ等）に対して，竜巻による設計飛来物が衝突することを防止する設計とする。また，基準地震動 S_s による地震力に対して十分な構造強度を有し，下部に設置された耐震重要度分類の上位クラス機器（原子炉補機冷却海水ポンプ等）に対して，波及的影響を及ぼさない設計とする。

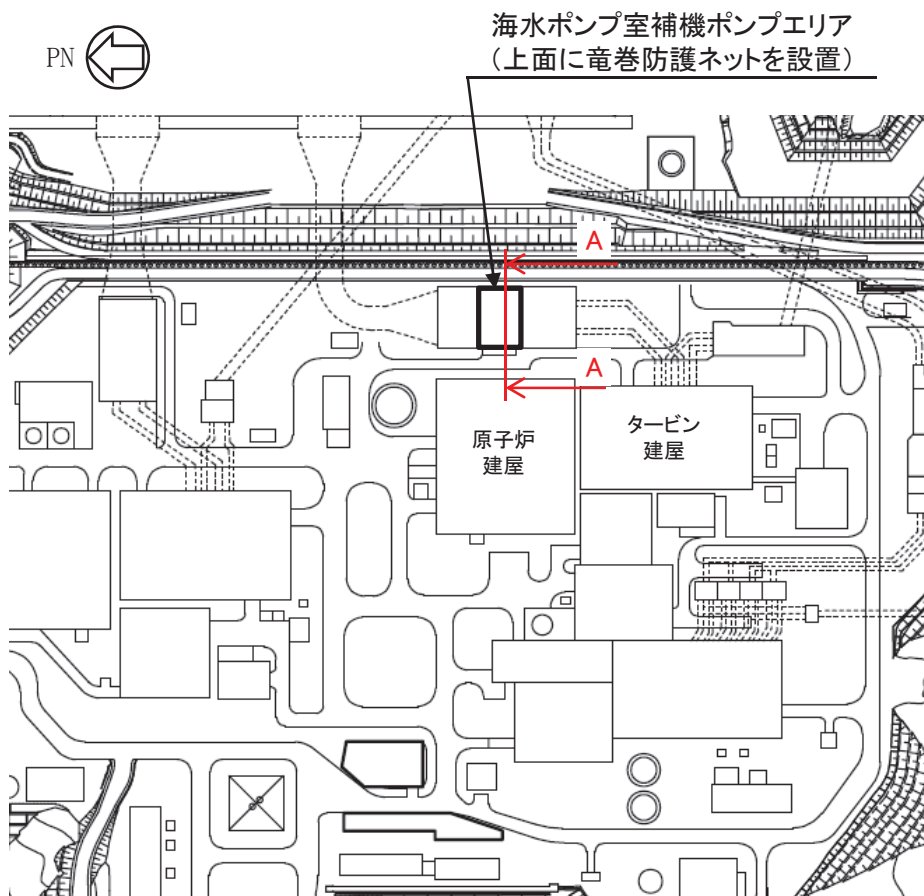


図3-1 竜巻防護ネットの設置位置図



A-A矢視

図3-2 海水ポンプ室補機ポンプエリアの断面模式図

枠囲みの内容は，防護上の観点から公開できません。

竜巻防護ネットの構成及び特徴

- 竜巻防護ネットはネット、防護板及び支持部材(フレーム、大梁、ゴム支承、可動支承等)により構成する。
- 竜巻防護ネットの特徴は、支持構造にゴム支承及び可動支承を採用している点である。

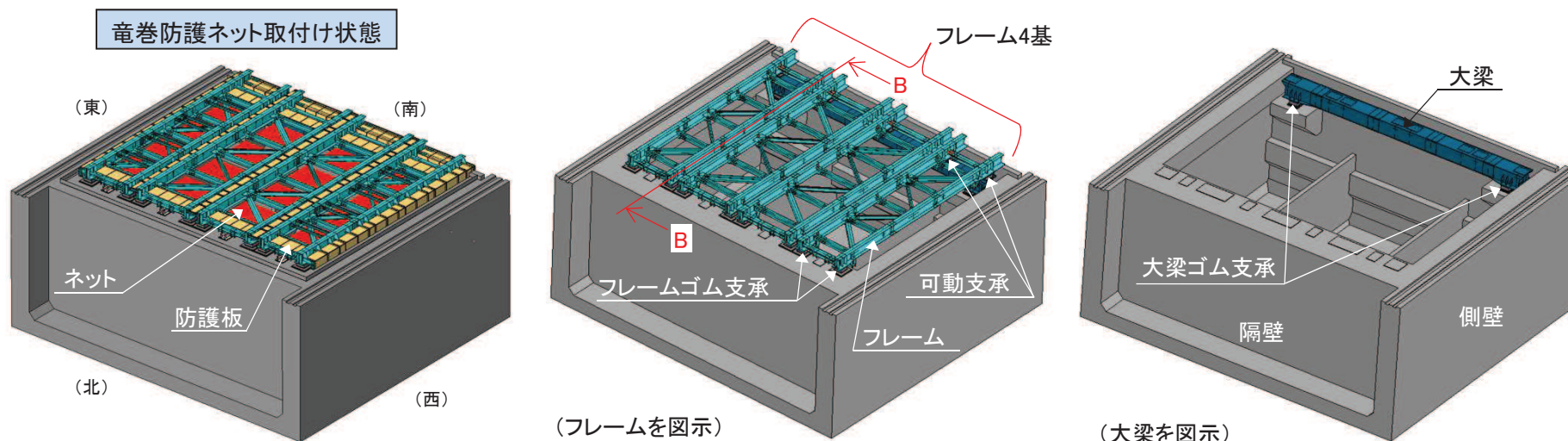


図3-3 竜巻防護ネットの概要図

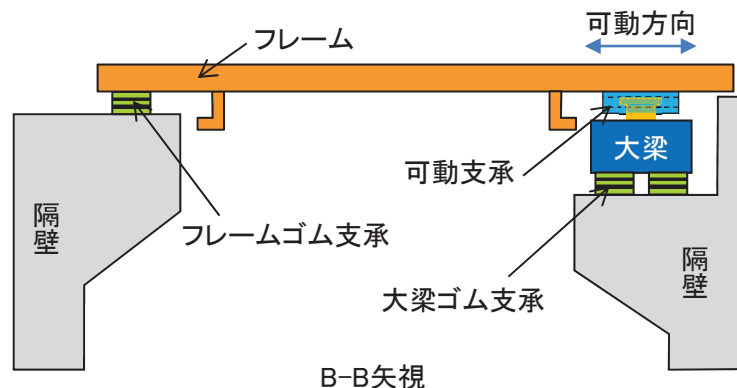


図3-4 竜巻防護ネットの断面模式図

【ゴム支承を採用した目的】

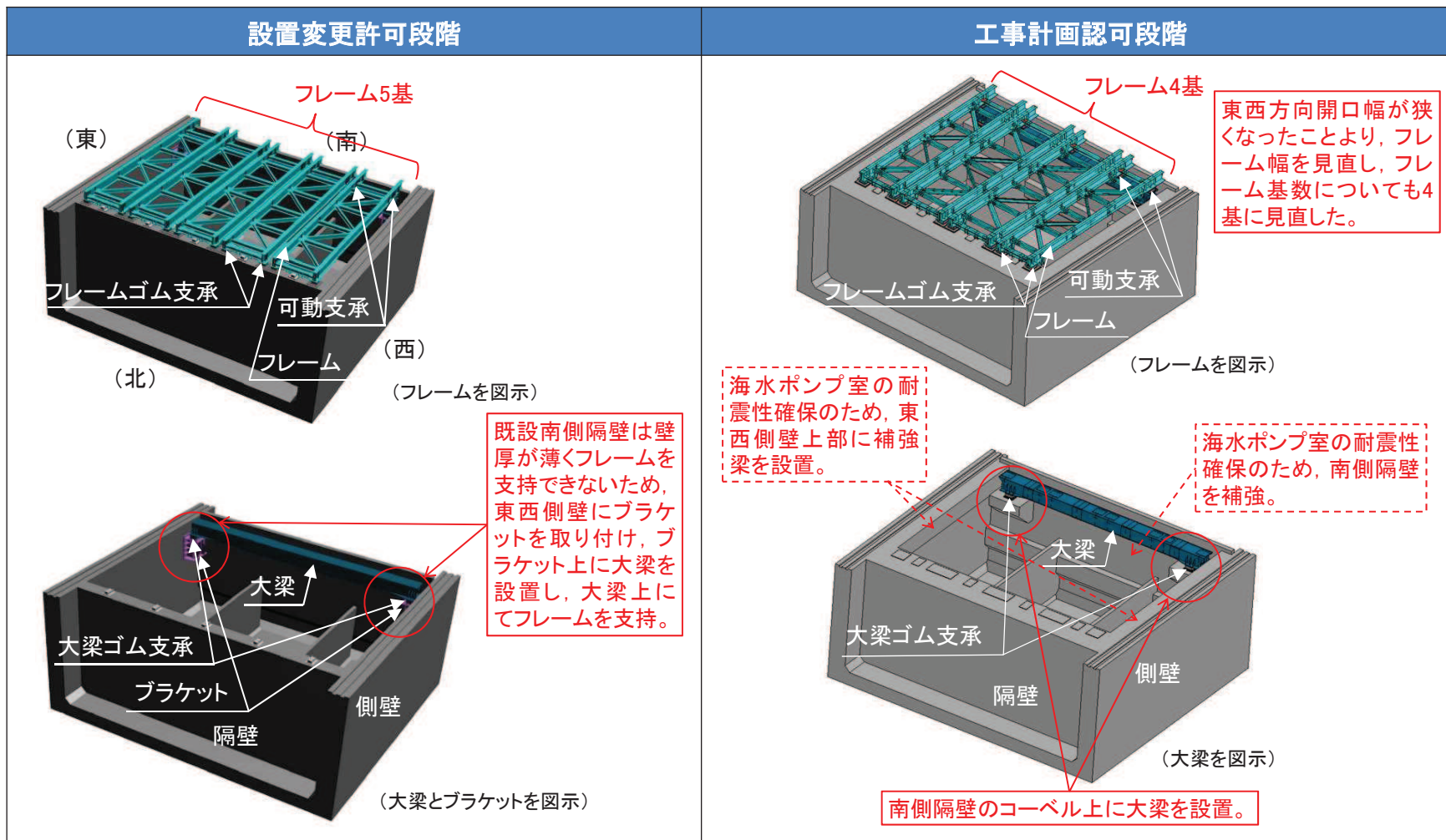
ゴム支承のアイソレート機能により竜巻防護ネットの固有値をやや長周期化することで、地震時の海水ポンプ室への反力を低減すること。

【可動支承を採用した目的】

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

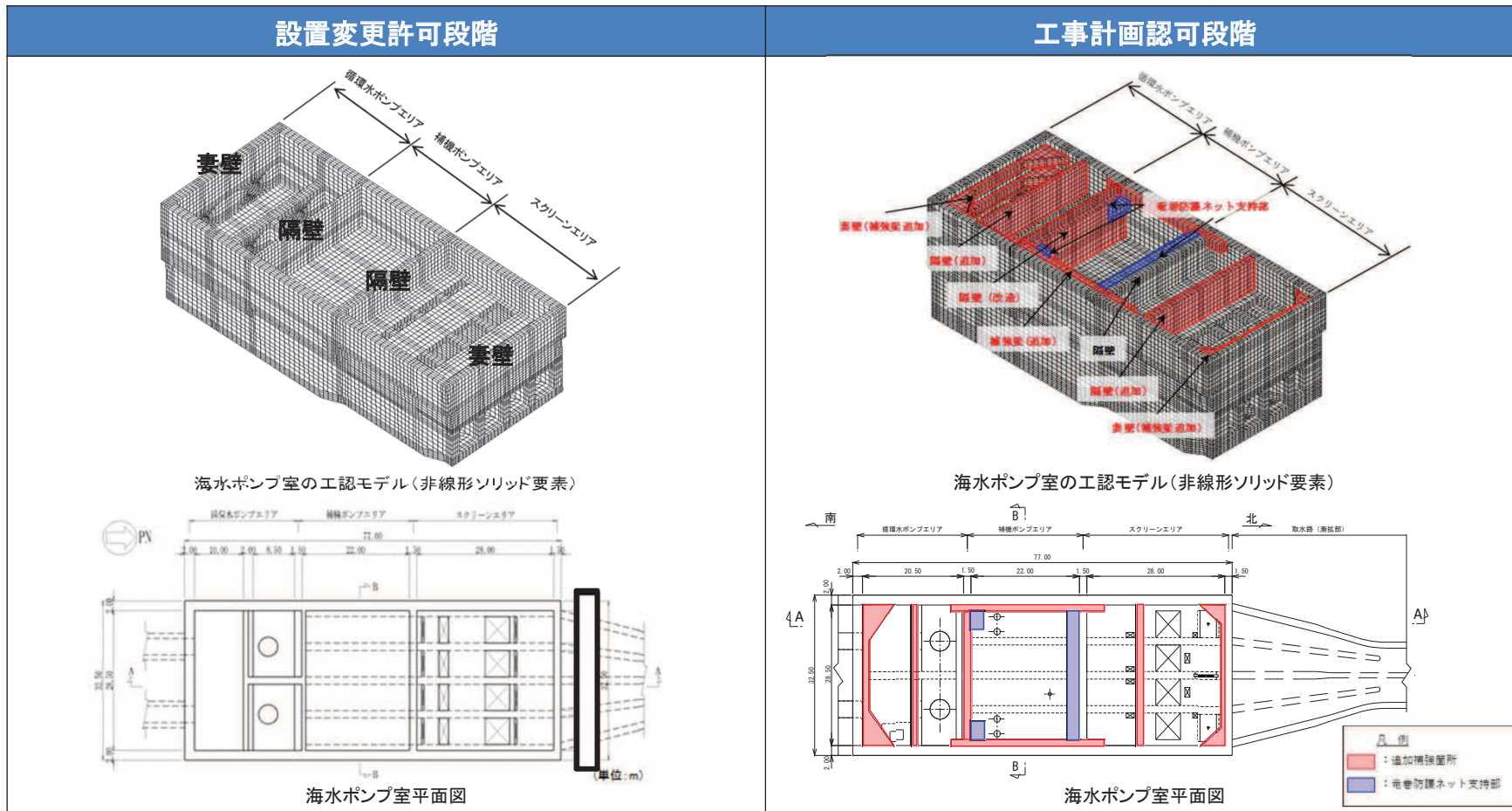
(1) フレーム基数及び幅の変更及び(2)大梁の支持方法の変更

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



(参考)海水ポンプ室の構造諸元について

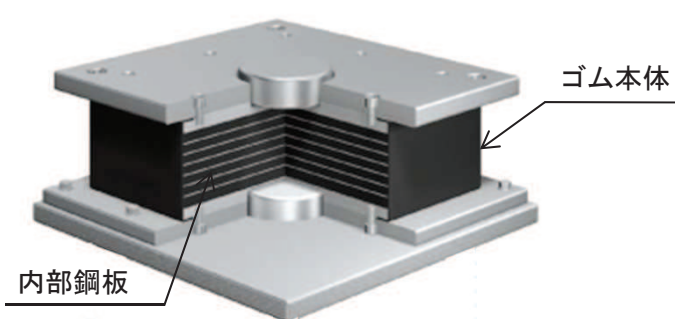
- 海水ポンプ室構造について、工事計画認可段階における対応状況を示す。
- 曲げ・軸力系の破壊に対し、許容限界を確保するため部材を追加した。また、せん断破壊に対しては、後施工せん断補強工法による補強を行うこととした。
- 竜巻防護ネットの支持のため、補機ポンプエリアの南北に支持部材(コーベル)を追加した。



枠囲みの内容は、防護上の観点から公開できません。

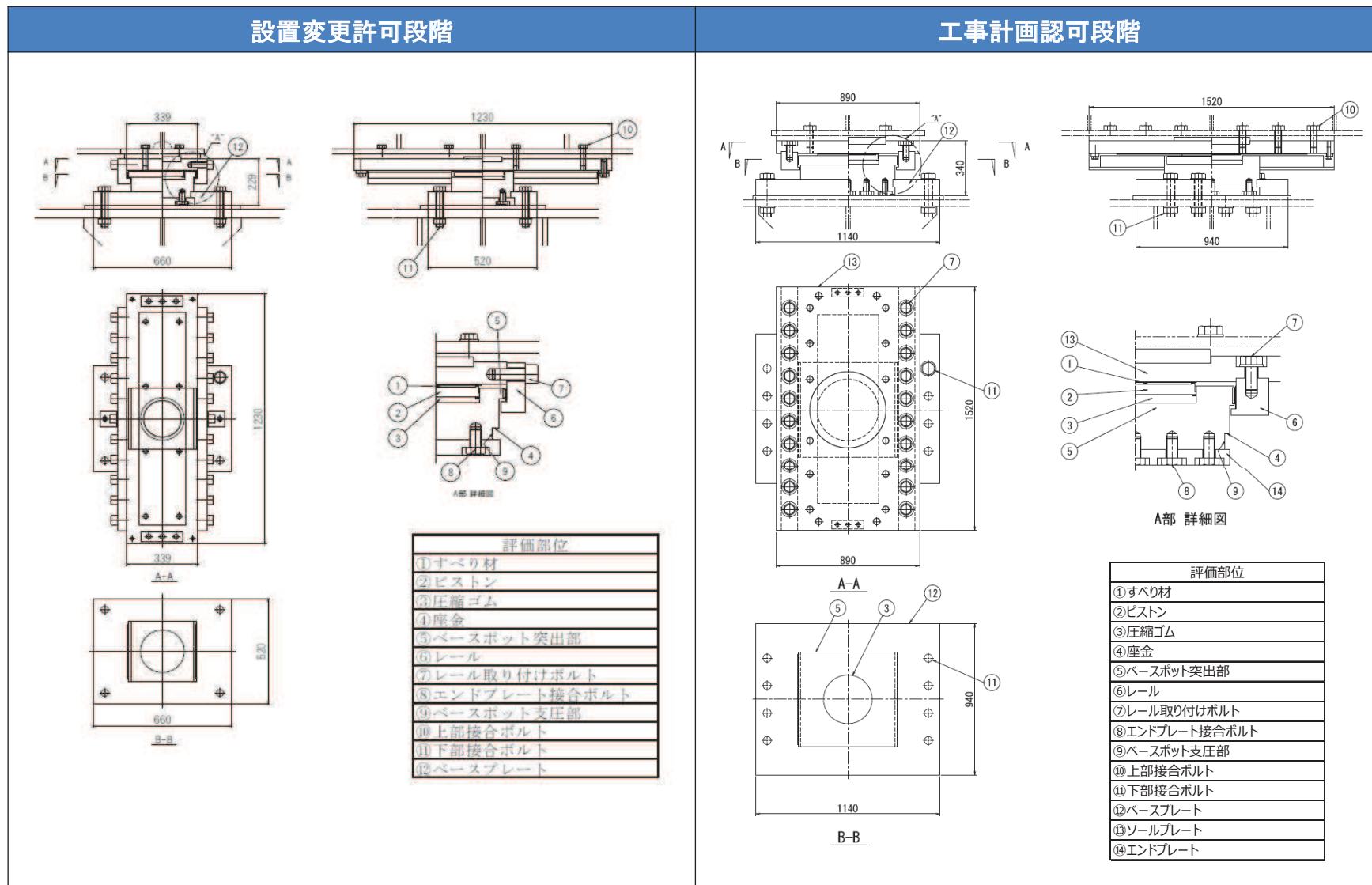
(3) フレームゴム支承の仕様変更

- 4.1(1)フレーム基数及び幅の変更及び(2)大梁の支持方法の変更に伴い、ゴム支承についても再設計を行った結果、フレームゴム支承の仕様を、大梁ゴム支承と同様の仕様に変更した。

項目	設置変更許可段階		工事計画認可段階
	大梁ゴム支承	フレームゴム支承	大梁ゴム支承 フレームゴム支承
支承種類	地震時水平力分散型ゴム支承		同左
ゴム本体種類	天然ゴム(NR)		同左
ゴム本体有効平面寸法(mm)	800×800	550×550	800×800
総ゴム厚(mm) (ゴム厚(mm)×層数)	192 (24×8層)	135 (15×9層)	192 (24×8層)
せん断弾性係数(N/mm ²)	1.0(G10)	1.2(G12)	1.0(G10)
一次形状係数	8.33	9.17	8.33
二次形状係数	4.17	4.07	4.17
水平剛性(kN/mm)	3.333	2.689	3.33
鉛直剛性(kN/mm)	972	863	972
構造概要			

(4) 可動支承の仕様変更

- 構造強度を向上させるため、寸法等の仕様を変更した。なお、可動支承の機能(水平1方向へ滑りを生じ変位を吸収する機能)に変更はない。



(1) 機能維持に関する方針の変更(1/2)

- 4.1(3)及び(4)に示した支承部の仕様変更を踏まえ、衝突解析に関する竜巻防護ネットの支持部材の機能維持方針を以下のとおり変更した。

設置変更許可段階	工事計画認可段階
<p>○下記注記*1に記載のとおり、フレームゴム支承は、2つのうち1つ以上の支承が構造強度上の評価方針を満足することを確認することとしていた。</p> <p>○下記注記*2に記載のとおり、ストッパーに支持機能を期待する場合がありますとしていた。</p>	<p>○下記注記*1に関して、いずれの支承部も構造強度上の評価方針を満足することを確認することとした。</p> <p>○下記注記*2に関して、工事計画認可段階においては、耐震・強度評価ともに支承部の機能を維持することとし、ストッパーに評価上期待しない方針(ストッパーは機能維持のための必要部材ではない)とした。</p>

(参考資料2) 支持部材に対する構造強度上の性能目標と評価方針

35

フレームゴム支承、可動支承に対する構造強度上の性能目標と評価方針について、今回、評価対象部材について改めて選定を実施した結果を反映し、以下のとおり設定する。

表1 支持部材に対する構造強度上の性能目標と評価方針(フレームゴム支承、可動支承)

評価対象	支持部材の設計方針	構造強度上の性能目標	構造強度上の評価方針	評価部材	主な機能損傷モード		許容限界
					作用荷重	限界状態	
竜巻防護ネット(支持部材)	支持部材は設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、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、飛来物が支持部材を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載するネット及び防護板を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、非常用海水ポンプ等に波及的影響を与えないために、支持部材を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。	【支持機能】 支持部材は設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、上載するネット及び防護板を支持する機能を維持可能な構造強度を有する。	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、支持機能を維持するため、作用する応力等が「道路標示方書・同解説V耐震設計編(H14.3)」又は許容応力状態IV _s Sの許容応力に基づく基準値を超えないことを確認する。	フレームゴム支承	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷重(ネット、フレーム) 竜巻風荷重 衝撃荷重 	終局状態	<p>【ゴム体】</p> <ul style="list-style-type: none"> 発生する引張応力が道路橋支承便覧の許容値以下 発生するせん断ひずみが道路橋支承便覧の許容値以下 <p>【内部鋼板、取付ボルト、アンカーボルト】</p> <p>発生する応力がJGEG 4601のIV_sS以下</p>
				可動支承	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷重(ネット、フレーム) 竜巻風荷重 衝撃荷重 	終局状態	発生する応力がJGEG 4601のIV _s S以下

設置変更許可段階においては、衝突解析によりゴム支承の機能が損なわれる可能性があったことから、ストッパーについても竜巻影響評価上、機能維持が必要な設備としていた。

*1. フレームゴム支承は、2つのうち1つ以上の支承が構造強度上の評価方針を満足することを確認する。許容限界を満足しない結果となった場合、二次的影響評価を実施する。
*2. 不確かケースではストッパーに支持機能を期待する場合があります

別添資料-1-添付資料3.7

2019年7月4日 第740回審査会合
(資料1-3-3)に一部加筆

(1) 機能維持に関する方針の変更(2/2)

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

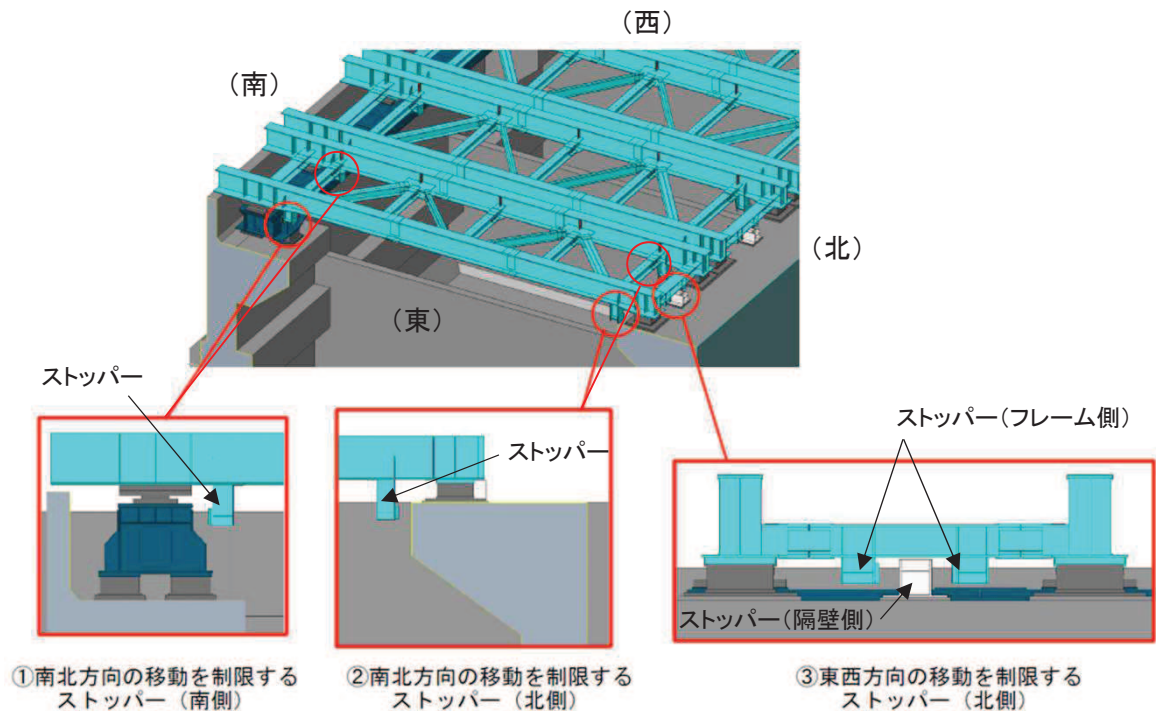


表4-1 ストッパーの応力評価結果

	発生値				許容限界
	ストッパー①	ストッパー②	ストッパー③		
	フレーム側	フレーム側	隔壁側	フレーム側	
曲げ応力	57	58	25	27	343 MPa
せん断応力	49	41	79	63	198 MPa
組合せ応力	0.30	0.27	0.41	0.33	1.0

表4-2 ストッパー(隔壁側)のボルトの応力評価結果

	発生値	許容限界
	ストッパー③	
	ボルト	
引張応力	89	257 MPa
せん断応力	65	198 MPa
組合せ応力	89	255 MPa

(1) SRSS法の適用性に関する妥当性確認

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

表5-1 SRSS法の適用性に係る妥当性確認結果

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

(2) スペクトルモーダル解析の適用性に関する妥当性確認

- スペクトルモーダル解析の適用性に関して、スペクトルモーダル解析法による評価結果と、時刻歴解析による評価結果を比較し、結果の差異は小さいことからスペクトルモーダル解析の適用が妥当であることを確認した。

表5-2 スペクトルモーダル解析の適用性に係る妥当性確認結果

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

5. 申送り事項に対する対応

(3)耐震設計手法の保守性の確認及び(4)地震時における荷重の組合せ(風荷重の影響)に関する確認

- 耐震設計手法の保守性に関して、設計で適用しているスペクトルモーダル解析(床応答スペクトルに拡幅有)の結果と、5.(1)及び(2)で実施した各種検討結果を比較して、設計手法による結果が保守性を有していることを確認した。

表5-3 設計手法の保守性に係る妥当性確認結果 (単位:MPa)

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

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

表5-4 風荷重の考慮に係る確認結果 (単位:MPa)

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

(5-1) ゴム支承の衝撃荷重に対する試験の実施及び影響確認(1/5)

- 衝突解析におけるゴム支承の影響については、評価に関する十分な知見・実績がないことから、ゴム支承が不確かさを有すること踏まえて、設計する必要がある。
- せん断剛性については設置変更許可段階において各種依存性試験を実施し、衝突解析への適用性についても説明しているが、一方で、鉛直剛性については竜巻影響評価の特徴を踏まえ、「道路橋支承便覧」に基づく設計値の適用及び支承の不確かさとして考慮すべきばらつきについて検討する必要があると考え、ゴム支承の鉛直剛性に係る特性試験を実施した。なお、試験に当たっては、飛来物の衝突による影響が大きいと想定する衝突位置・方向を考慮して検討した。
- 試験は、「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)」(以下「JIS K 6411」という。)及び上記せん断剛性の各種依存性試験を参考に、鉛直剛性に係る試験への適用を検討し、また、設計における適用条件を踏まえて試験項目を設定した。
- a. 圧縮／引張剛性確認試験からe. 熱老化特性については、せん断特性試験と同様の二軸試験装置にて試験を実施した。f. 速度依存性試験については、落錘式衝撃試験装置を用いて試験を実施した。

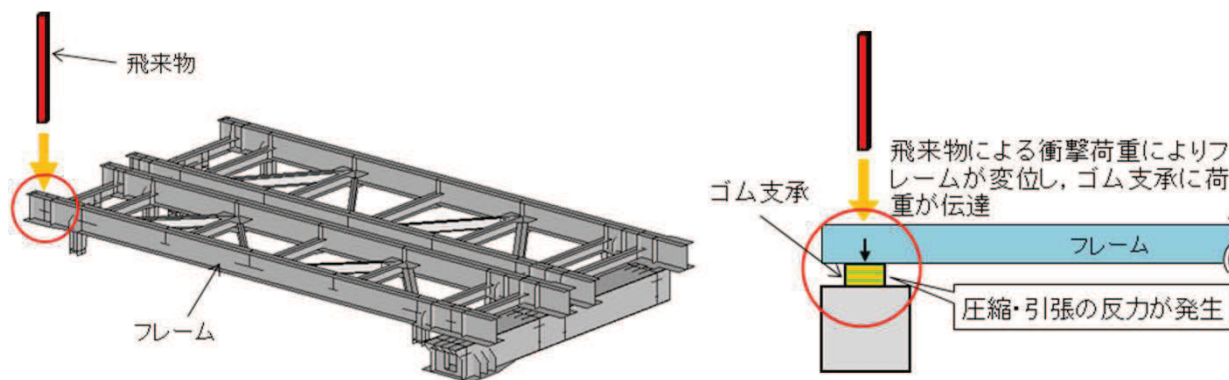


図5-1 竜巻防護ネットへの飛来物の鉛直衝突のイメージ

(5-1) ゴム支承の衝撃荷重に対する試験の実施及び影響確認(2/5)

表5-5 鉛直剛性に係る特性試験項目

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

表5-6 鉛直剛性に係る特性試験項目と試験体

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

注記*: JIS K 6411で寸法等が規定されている試験体

(試験項目毎にJISに規定されている標準試験体寸法のうち、大きい(実機寸法に近い)供試体を選定。)

(5-1) ゴム支承の衝撃荷重に対する試験の実施及び影響確認(3/5)

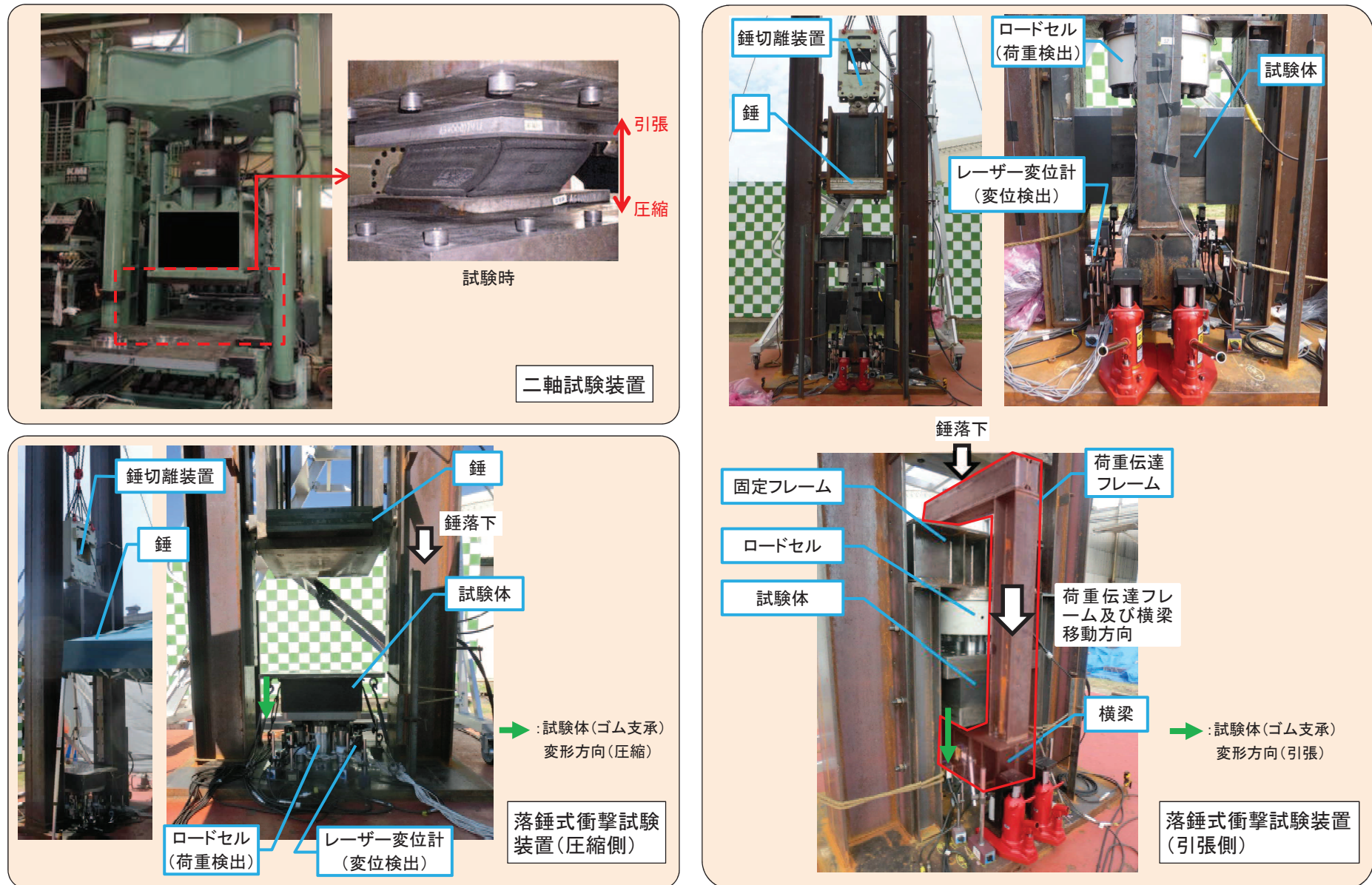


図5-2 試験装置外観

(5-1) ゴム支承の衝撃荷重に対する試験の実施及び影響確認(4/5)

▶ 試験結果

a. 圧縮／引張剛性確認試験

⇒ 圧縮剛性は道路橋支承便覧から求める設計値とほぼ同等であることを確認した。一方、引張剛性は、圧縮剛性の設計値の20%程度であることを確認した。この結果を踏まえ、ゴム支承の剛性設定に関して、圧縮剛性の基準値は道路橋支承便覧に基づく設計値とし、引張剛性の基準値は本試験結果の平均値とした。

⇒ 上記基準値を基に初期ばらつきを評価した結果、圧縮剛性のばらつきはプラス側で最大+2%程度、マイナス側で最大-15%程度であること、引張剛性のばらつきはプラス側で最大16%程度、マイナス側で最大-21%程度であり、道路橋支承便覧に規定されている製品初期ばらつき±30%以内であることを確認した。

⇒ 一般に、ゴム支承のゴム(天然ゴム)材料単体に着目すると、天然ゴムは粘弾性材料であり速度依存性を有すること、また、圧縮側の剛性に対して引張側の剛性が小さいことが知られていることから、本試験で圧縮剛性に対して引張剛性が小さくなったことについて、ゴム支承においてもゴム材料自体の性質が表れたものと考えられる。

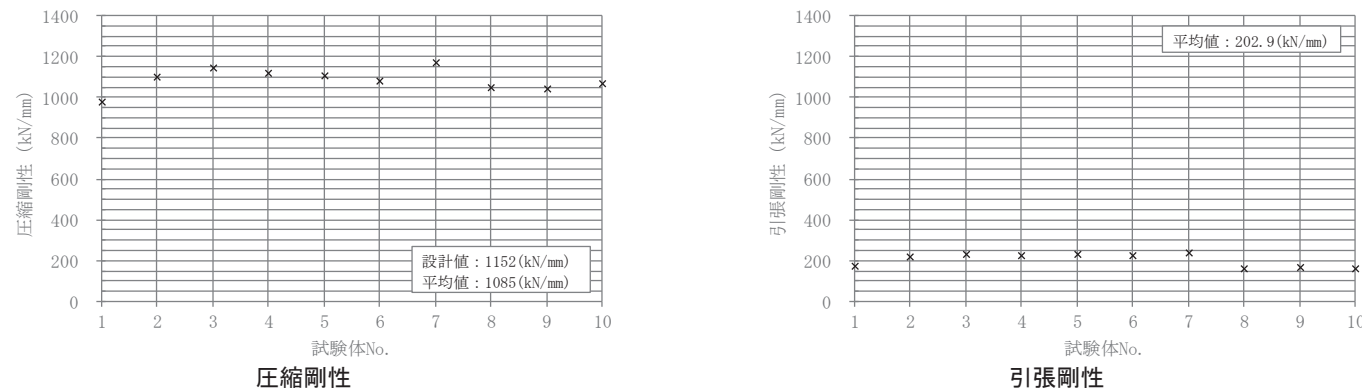


図5-3 圧縮／引張剛性確認試験結果(算出値)

b. せん断ひずみ依存性確認

⇒ 試験体にせん断ひずみを与え保持した状態における鉛直剛性の変化率について、圧縮剛性は、最大で-11%程度の変化率となること、一方、引張剛性はひずみの増減によらずほぼ一定の傾向を示すことが分かった。

c. 繰返し数依存性試験結果

⇒ 試験体に繰返し水平加振50回を与えたときの圧縮及び引張剛性の変化率について、圧縮剛性は-7%程度、引張剛性は-13%程度となった。

(5-1) ゴム支承の衝撃荷重に対する試験の実施及び影響確認(5/5)

▶ 試験結果

d. 温度依存性確認

⇒試験体に複数の温度条件を与えたときの鉛直剛性の変化率について、圧縮剛性は-15℃では+27%程度、40℃では-8%程度となり、一方、引張剛性は-15℃では+14%程度、40℃では-4%程度となった。

e. 熱老化特性試験結果

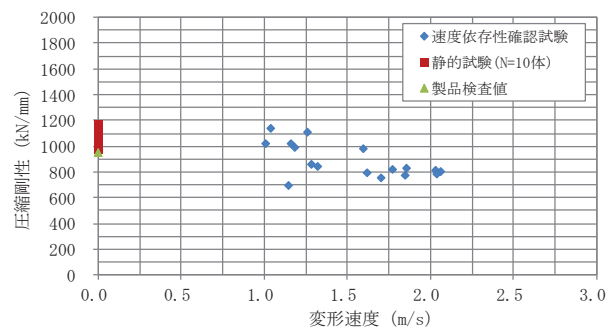
⇒試験体の熱老化前後の圧縮及び引張剛性の変化率について、圧縮剛性は+5%程度、引張剛性は-18%程度となった。

f. 速度依存性確認

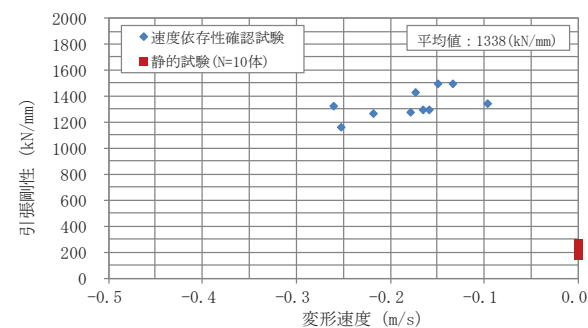
⇒圧縮剛性の速度依存性試験について、試験条件(ゴムの変形速度)を満足していることを確認した。また、結果のばらつき及び変形速度が大きくなるにしたがって剛性が低下する傾向が見られたが、一般に速度依存性は変形速度の増加に応じて剛性が高くなる特性であることから、これは錘の落下距離が大きくなるにしたがって、錘切り離し時のわずかな回転力により錘衝突時に傾斜角が増えたことが要因と考えられ、速度依存性がないと判断した。

⇒一方、引張剛性の速度依存性試験については、変形速度の増加に伴い剛性が高くなり速度依存性があることを確認した。なお、引張剛性の速度依存性試験において、ゴム支承の変形速度が圧縮側に対して小さいが、圧縮側と同様の外力を負荷しており、ゴムの速度依存性により変形が抑制されたことによるものと考えられる。

⇒既往文献より、鉛直剛性の算出に用いる一次形状係数 S_1 (ゴムの拘束による影響を定性的に評価する指標)が小さい場合に速度依存性(振動数特性)を示すことが報告されており、圧縮側については、 S_1 が大きいことから、ゴム材料自体の特性が出にくく、今回の試験範囲において速度依存性が見られない結果となったと考えられる。一方、引張側については、静的な引張剛性確認試験において圧縮剛性に対して引張剛性が小さかったことにより、ゴム材料自体が持つ速度依存性を有する特性が発現したものと考えられる。



圧縮剛性



引張剛性

図5-4 速度依存性試験結果

(5-2) 試験を踏まえたゴム支承の剛性の設定

- 各種依存性試験の結果を以下のとおり整理し、各項目のばらつきを積算することにより、ゴム支承の物性の不確かさとして考慮するばらつき範囲を設定した。

表5-7 せん断剛性のばらつき設定

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

表5-8 鉛直剛性のばらつき設定

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

注記 *1: 設計条件における基本ケースの剛性値(道路橋支承便覧から算出する設計値)。

*2: 速度依存性試験結果を基準値として考慮する。

*3: 静的な引張剛性試験結果を基準値として考慮する。

*4: 圧縮剛性及び引張剛性について、それぞれの基準値にばらつきを考慮した場合の剛性が大きい方を考慮する。

*5: 圧縮剛性及び引張剛性について、それぞれの基準値にばらつきを考慮した場合の剛性が小さい方を考慮する。

- 耐震評価及び構造強度評価に用いるゴム支承の剛性の設定について下記のとおり整理した。

【基本ケース】

道路橋支承便覧に基づく水平(せん断)剛性及び鉛直剛性の設計値を設定する。

【不確かさケース】

せん断剛性及び鉛直剛性の設計値に対して、各種依存性試験より得られたばらつき範囲をプラス側とマイナス側でそれぞれ重畳させ、最大のばらつき範囲を想定した剛性値を設定する。

表5-9 評価に用いるゴム支承の剛性の設定(せん断/鉛直剛性の組合せ)

	剛性値(kN/mm)		
	基本ケース	不確かさケース	
		剛性変化(+側)	剛性変化(-側)
せん断剛性	3.33	5.00	2.33
鉛直剛性	972	1700	42.7
備考	道路橋支承便覧に基づく設計値	各種依存性試験を踏まえたばらつきを考慮した値	

(5-3) ゴム支承の剛性のばらつきに対する影響の考慮(1/3)

- 基準地震動Ss7波の設計用床応答スペクトルに対して、ゴム支承の剛性のばらつきを考慮した条件での地震応答解析を実施し、いずれの不確かさケースについても各部材の発生応力等が許容限界を下回ることを確認した。

表5-10 耐震評価結果

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

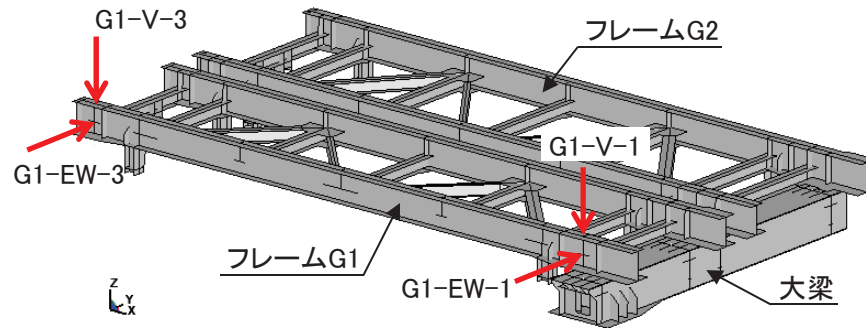
注記 *1:発生値, 許容限界は無次元(%)

*2:発生値, 許容限界の単位(kN)

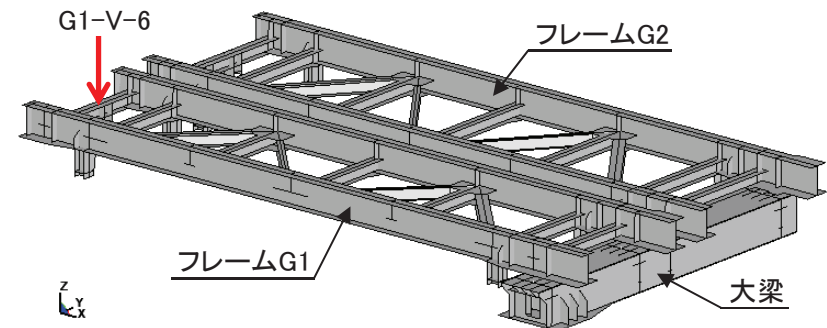
*3:発生値, 許容限界の単位(mm)

(5-3) ゴム支承の剛性のばらつきに対する影響の考慮(2/3)

- 衝突解析の評価ケースについては、飛来物の衝突を考慮する部材や、構造及び荷重伝達により影響を受ける部材の検討を踏まえて設定している。
- ゴム支承の剛性のばらつきによる影響の確認については、支承部近傍に飛来物が衝突した評価ケースが影響を受けると考えられることから、フレームゴム支承及び可動支承部近傍の飛来物衝突に関して、ゴム支承の剛性のばらつきによる影響を確認した。また、基本ケース全体の結果を踏まえて裕度が小さいケースに対しても影響を確認した。



(主桁への飛来物衝突)



(横補強材への飛来物衝突)

→ : ゴム支承の剛性のばらつきの影響確認ケース

方向	支持条件		可動支承
	ゴム支承		
	大梁 ゴム支承	フレーム ゴム支承	
X	弾性	弾性	自由
Y	弾性	弾性	剛
Z	弾性	弾性	剛

図5-5 強度評価における解析モデル図

(5-3) ゴム支承の剛性のばらつきに対する影響の考慮(3/3)

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

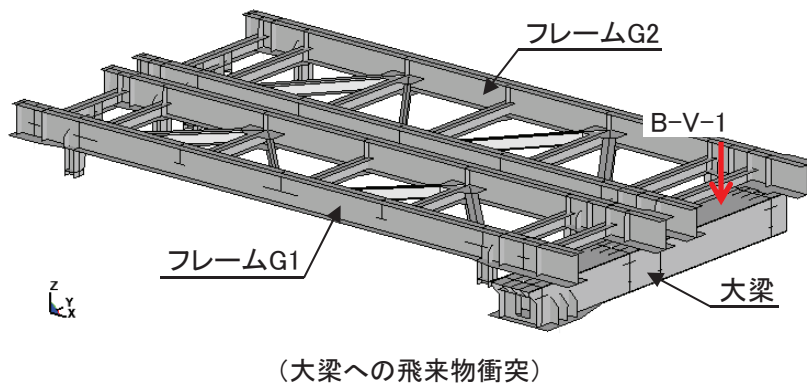
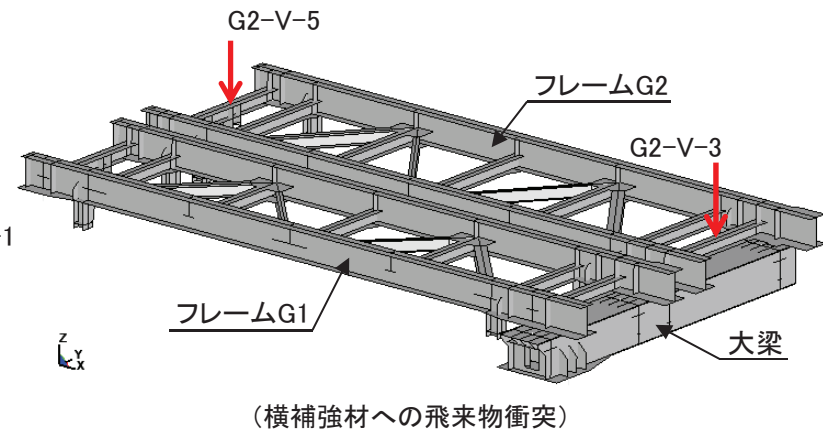
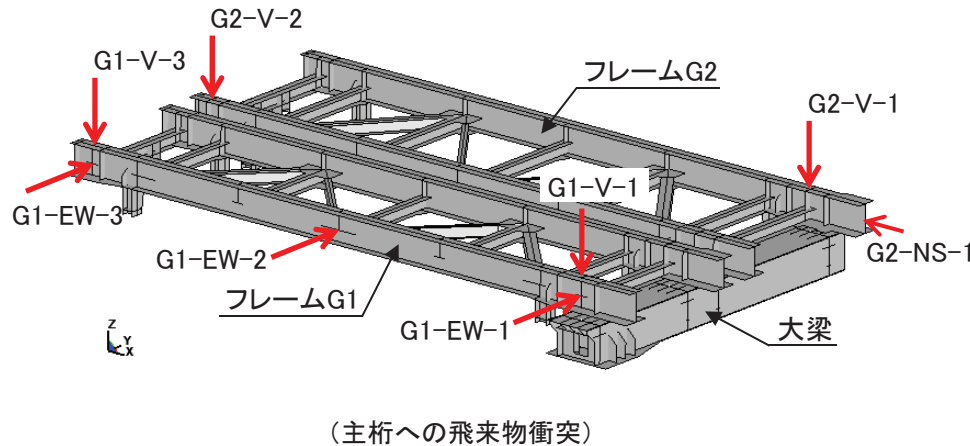
表5-11 強度評価結果

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

枠囲みの内容は、商業機密の観点から公開できません。

(6) 飛来物衝突姿勢に関する影響について(1/3)

- 衝突解析の評価ケースについては、飛来物の衝突を考慮する部材や、構造及び荷重伝達により影響を受ける部材の検討を踏まえて設定している。
- 飛来物衝突姿勢(長辺衝突)に関する影響については、飛来物が長辺衝突しうる評価ケースに対して影響を確認した。



→ : 飛来物衝突姿勢(長辺衝突)の影響確認ケース

支持条件			
方向	ゴム支承		可動支承
	大梁 ゴム支承	フレーム ゴム支承	
X	弾性	弾性	自由
Y	弾性	弾性	剛
Z	弾性	弾性	剛

図5-6 飛来物長辺衝突に関する解析モデル図

(6) 飛来物衝突姿勢に関する影響について(2/3)

- いずれの飛来物衝突姿勢(長辺衝突)の影響確認ケースについても支持部材に発生するひずみ, 応力等は許容限界を超えず, 構造強度上の評価方針を満足することを確認した。なお, 一部評価において破断ひずみを超えるひずみが確認されたケースについても, 全断面の破断に至らないことを確認している。

表5-12 飛来物長辺衝突の衝突解析結果(1/2)

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

注記 *: 全断面の破断に至らないことを確認している。

枠囲みの内容は, 商業機密の観点から公開できません。

(6) 飛来物衝突姿勢に関する影響について(3/3)

表5-12 飛来物長辺衝突の衝突解析結果(2/2)

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

注記*: 全断面の破断に至らないことを確認している。

枠囲みの内容は、商業機密の観点から公開できません。

(7) 飛来物衝突時の上向反力に対する確認結果

- 衝突解析を実施し、ゴム支承のゴム本体に生じる引張応力が許容値を満足し、フレームが浮き上がるような損傷モードが発生しないことを確認した。

表5-13 フレームゴム支承のゴム本体の評価結果(基本ケース)

評価対象部位	評価項目	評価ケース	発生値*		許容限界
			西側	東側	
フレーム ゴム支承	引張応力	G1-EW-3	0.4	0.3	2.0 MPa
		G1-V-3	0.7	0.5	
		G1-V-6	<u>1.1</u>	1.1	
		G1-V-7	0.7	0.5	
		G2-V-2	0.6	0.7	
		G2-V-5	1.0	0.9	
		G2-V-6	0.7	0.7	
	せん断 ひずみ	G1-EW-3	65	<u>70</u>	250 %
		G1-V-3	60	66	
		G1-V-6	60	66	
		G1-V-7	60	66	
		G2-V-2	45	53	
		G2-V-5	45	53	
		G2-V-6	45	53	
	圧縮応力	G1-EW-3	1	1	23 MPa
		G1-V-3	2	1	
		G1-V-6	2	2	
		G1-V-7	2	1	
		G2-V-2	2	1	
		G2-V-5	1	2	
		G2-V-6	<u>2</u>	1	

注記*: 下線部は発生値最大を示す。

6. まとめ

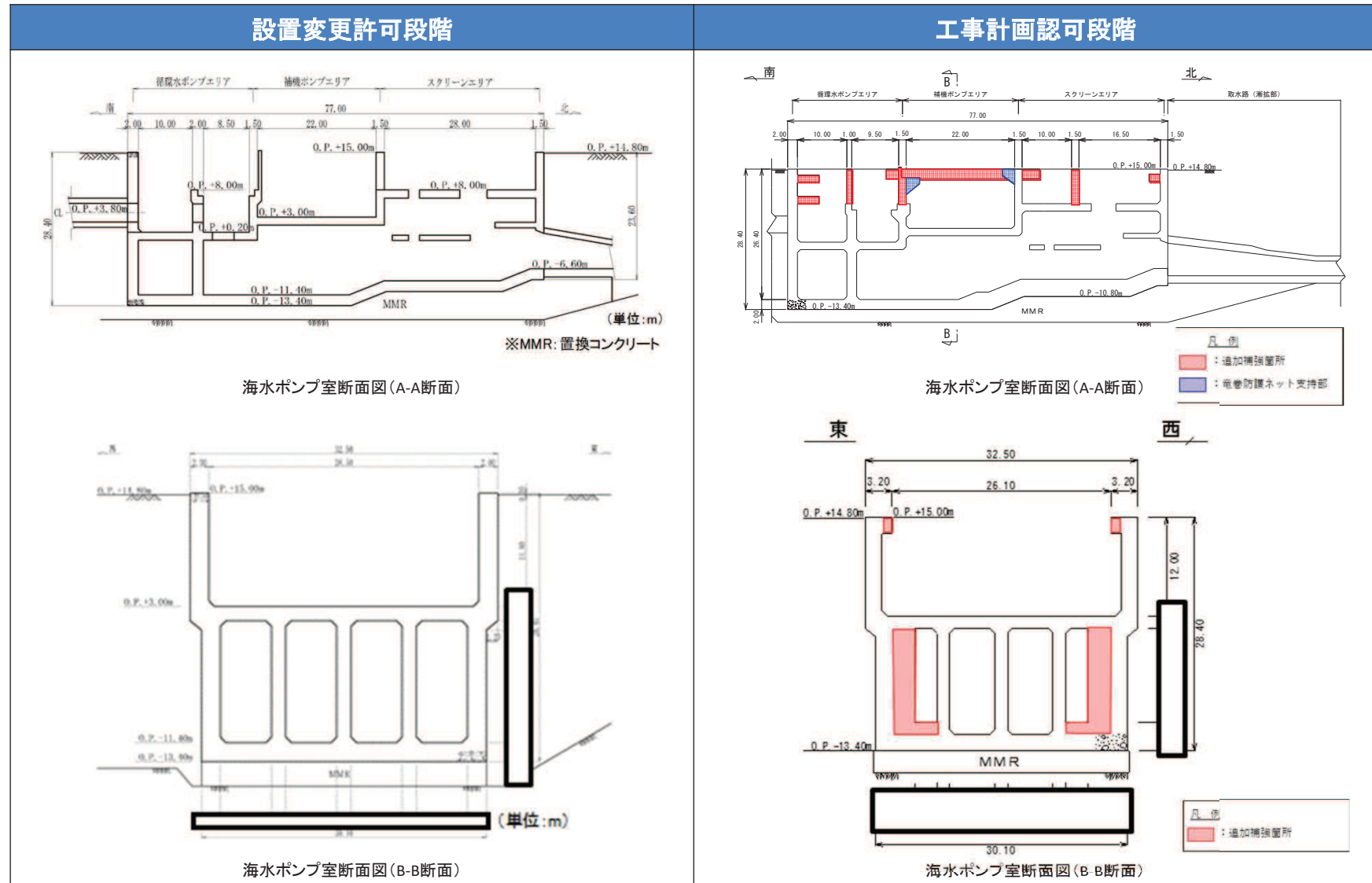
- 竜巻防護ネットについて、設置変更許可段階からの詳細設計進捗を反映した事項及び詳細設計申送り事項を踏まえた、工事計画認可段階における論点及び報告事項について説明した。
- これら論点及び報告事項を踏まえた、竜巻防護ネットの耐震計算及び強度計算については、添付書類「VI-2-11-2-2 竜巻防護ネットの耐震性についての計算書」及び「VI-3-別添1-2-1-1 竜巻防護ネットの強度計算書」にそれぞれ示している。

参考資料

- 参考1 海水ポンプ室の構造諸元について
- 参考2 竜巻防護ネットの支持部材の強度評価フローについて
- 参考3 ゴム支承のせん断剛性に係る各種依存性試験について
- 参考4 ゴム支承の鉛直剛性に係る各種依存性試験について
- 参考5 ゴム支承の剛性のばらつきに対する影響確認について
- 参考6 飛来物衝突姿勢に関する影響確認について
- 参考7 竜巻防護ネットの耐震性についての計算結果の概要
- 参考8 竜巻防護ネットの強度計算結果の概要

参考1 海水ポンプ室の構造諸元について

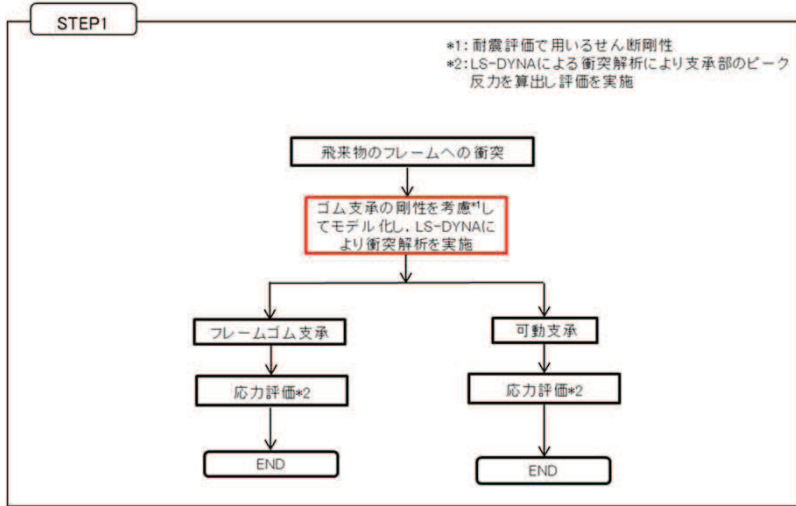
➤ 海水ポンプ室断面図について以下に示す。



枠囲みの内容は、防護上の観点から公開できません。

設置変更許可段階における説明事項(1/3)

➤ 設置変更許可段階においては、下記の評価フローにて構造成立性を評価した。

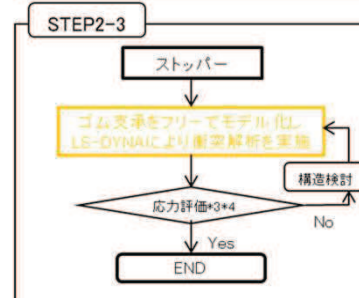
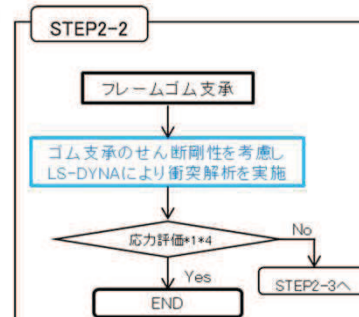
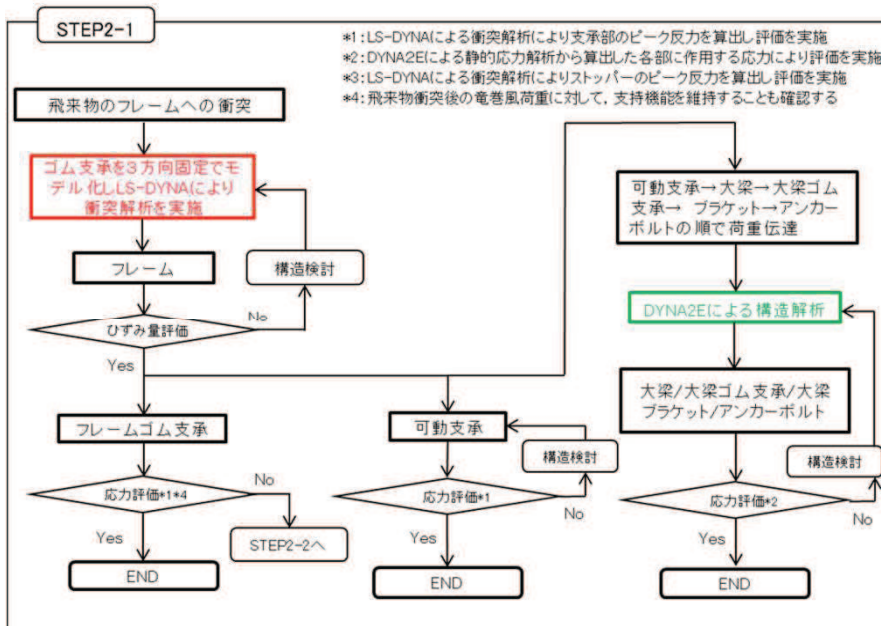


【STEP1】

ゴム支承に支持されるフレームに飛来物が衝突した際の挙動を確認するため、ゴム支承の剛性を考慮した衝突解析を実施した。衝突解析は、フレームゴム支承による影響が最も大きくなると想定される条件(飛来物姿勢、衝突位置、飛来方向)で実施し、ゴム支承の影響を考慮した場合において、フレームゴム支承、可動支承がフレームを支持する機能を維持可能な構造強度を有することを確認した。

【STEP2】

衝突時の竜巻防護ネットを構成する支持部材の構造成立性を確認するため、以下の評価を実施した。



STEP2-1: 竜巻防護ネットを構成する支持部材(ストッパーを除く)はゴム剛性の結合条件を3方向固定(衝撃荷重のピーク値が大きくなると推測される条件)にて衝突解析を行い、構造成立性の確認を行った。

STEP2-2: STEP2-1 はフレームゴム支承に対し非常に厳しい条件であるため、STEP2-1 の条件で評価を実施した結果、許容値を満足しない場合には、詳細評価としてゴム支承のせん断剛性を考慮した解析条件にて評価を実施した。

STEP2-3: STEP2-2 のフレームゴム支承の評価結果を踏まえて、ストッパーの評価を実施した。ストッパーの評価はゴム剛性の結合条件を自由(ゴム支承による荷重の負担は期待せずストッパーに全ての荷重を伝達する条件)とし衝突解析を行い、構造成立性の確認を行った。

設置変更許可段階における説明事項(2/3)

- 詳細設計段階における評価フローと対応方針について設置変更許可段階で説明しており、これを踏まえて工事計画認可段階における評価フローを設定した。

2. 詳細設計段階の評価フローと対応方針【指摘事項②, ③, ④】(1/2)

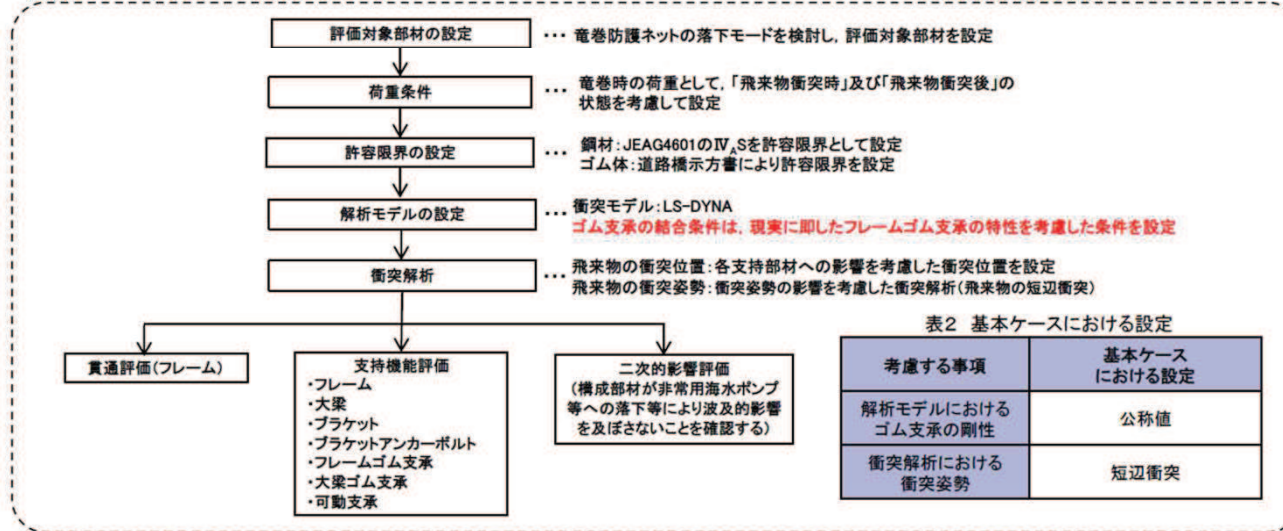
28

詳細設計段階における評価フローと対応方針(1/2)

- 設置許可段階における構造成立性の見通し確認においては、構造成立性評価フローを定め、各ステップごとに条件を設定し評価を実施した。(構造成立性評価フローについては、参考資料1参照)
- 詳細設計段階では現実に即した解析モデルとして、フレームゴム支承の特性を考慮した解析モデルを適用し、評価を実施する方針とする。そのため、設置許可段階での構造成立性の見通し時に用いた構造成立性評価フローを組み替え、詳細設計段階の評価フロー(基本ケース)を以下のとおり設定する。【指摘事項②への回答】
- 可動支承の評価対象部材について、設置許可段階における構造成立性の見通し確認において、可動支承近傍へ飛来物が衝突した場合、許容限界を超える結果となっているが、詳細設計段階では、可動支承のサイズアップやボルトの仕様変更等の対応を行うことで、許容限界を満足させる方針とする。【指摘事項③への回答】
- 衝撃荷重の設定は、設計飛来物(鋼製材)が衝突した場合の影響が大きくなる向き、衝突位置を考慮する方針とする。【指摘事項④への回答】

評価フロー(基本ケース)【STEP2-2】

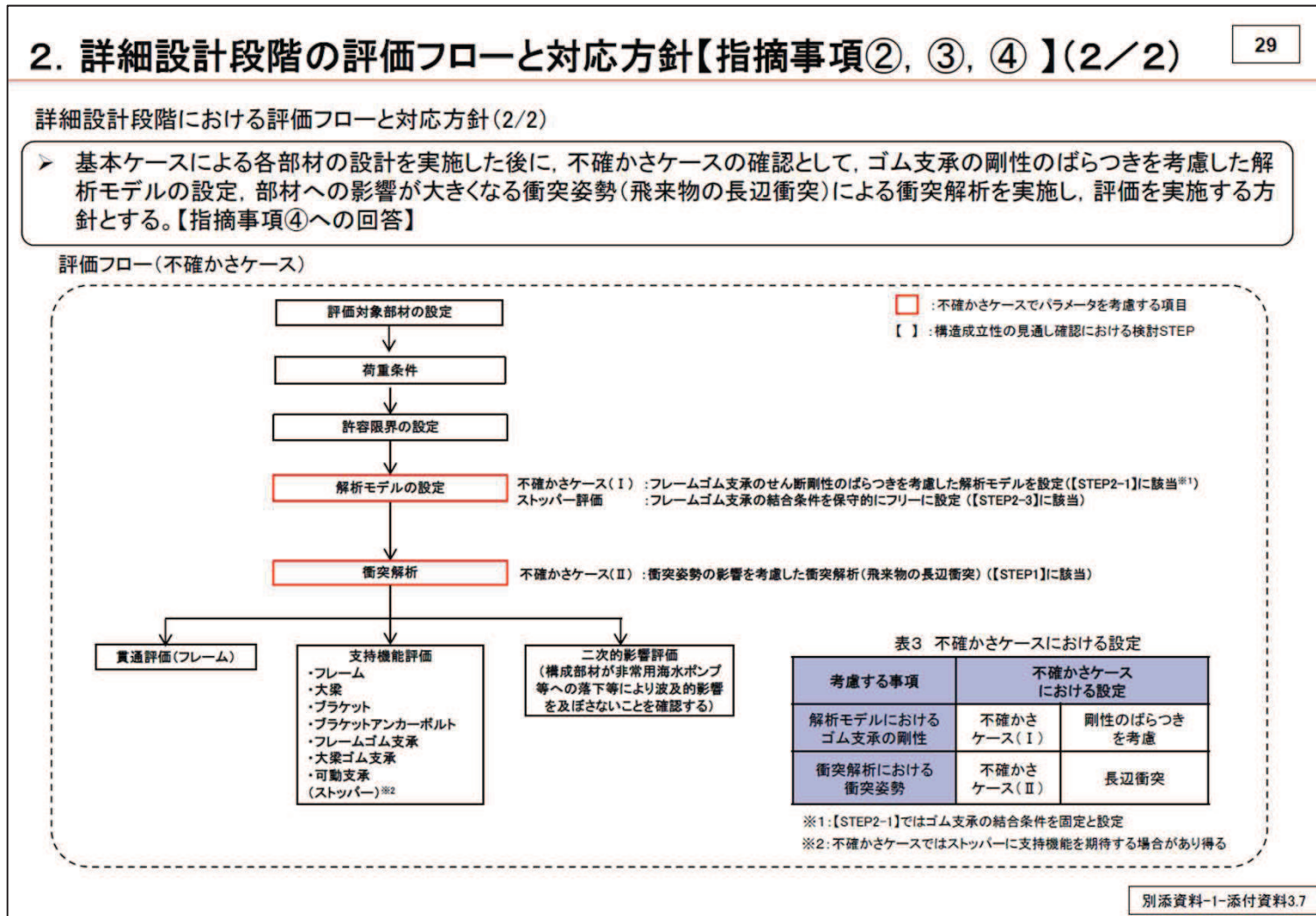
【 】: 構造成立性の見通し確認における検討STEP



別添資料1-添付資料3.7

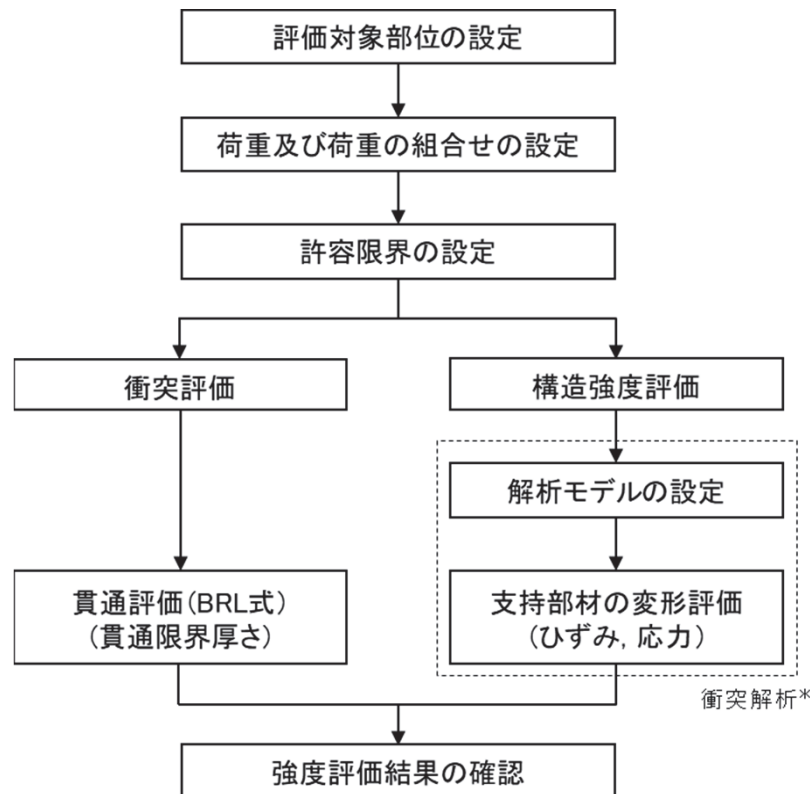
設置変更許可段階における説明事項(3/3)

- 詳細設計段階における評価フローと対応方針について設置変更許可段階で説明しており、これを踏まえて工事計画認可段階における評価フローを設定した。



支持部材の構造強度評価(衝突解析)における解析ケースの設定(1/3)

- 工事計画認可段階における評価フローを以下に示す。
- 衝突解析に入力するゴム支承の剛性については、道路橋支承便覧に基づく設計値を基本ケースとし、各種依存性試験より得られたばらつき範囲をプラス側とマイナス側でそれぞれ重畳させ、最大のばらつき範囲を想定した剛性値を不確かさケースとして評価した。なお、ゴム支承の剛性の設定方針については、耐震評価においても同様の方針にて評価を実施している。
- 飛来物の衝突姿勢については、飛来物衝突面積が小さい短辺衝突を基本ケースとし、飛来物衝突面積が大きい長辺衝突による影響を不確かさケースとして評価した。



注記*: 衝突解析において、以下を考慮し解析ケースを設定する。

考慮する事項	基本ケース における設定	不確かさケース における設定	
解析モデルにおける ゴム支承の剛性	設計値を設定	不確かさ ケース(1)	剛性のばらつきを考慮し た値を設定
衝突解析における 衝突姿勢	短辺衝突	不確かさ ケース(2)	長辺衝突による影響を 確認

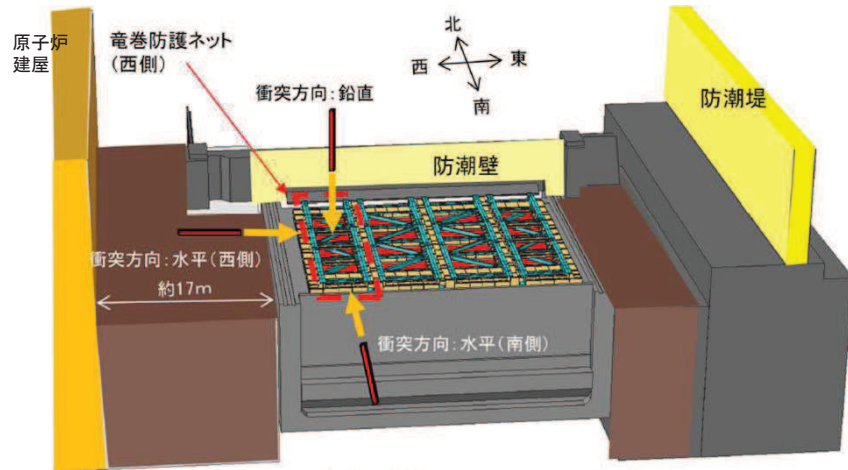
参考図2-1 工事計画認可段階における竜巻防護ネットの支持部材の強度評価フロー

支持部材の構造強度評価(衝突解析)における解析ケースの設定(2/3)

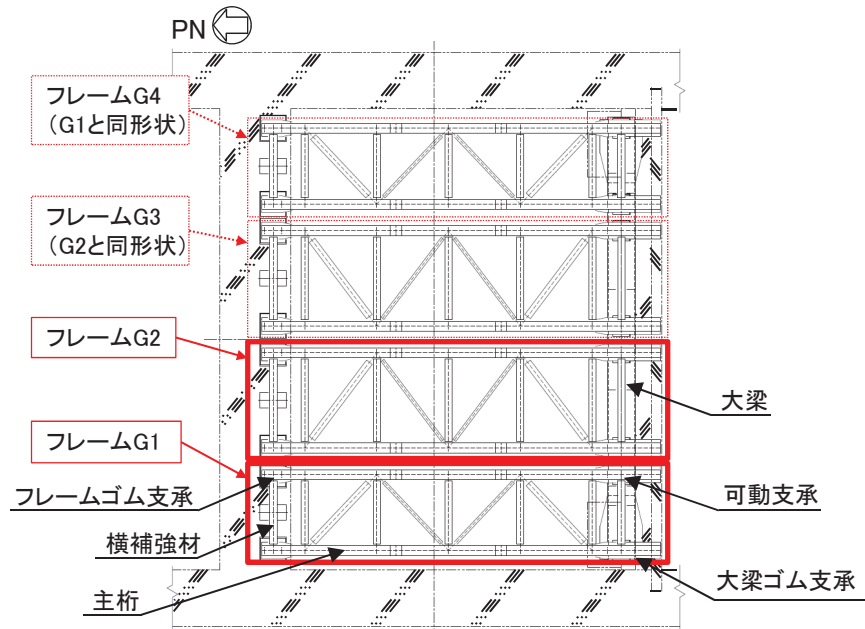
- 飛来物が衝突する位置について、竜巻防護ネットが先行プラントと異なり支持部材に支承構造を採用していることを踏まえ、竜巻防護ネットの支持部材の衝突解析における評価ケースを設定した。具体的には、飛来物の衝突を考慮する部材や、構造及び荷重伝達により影響を受ける部材の検討を踏まえて、飛来物の衝突位置及び評価対象部位を設定した。
- a. 飛来物の衝突を考慮する部材の検討
 - ⇒以下に示す竜巻防護ネットの構造や周辺構造物の配置を踏まえて、飛来物が衝突しうる部材を設定する。
 - 南北方向の飛来物衝突に関して、北側については防潮壁が近接していることから飛来物衝突を考慮しない。
 - 東西方向の飛来物衝突に関して、西側は原子炉建屋、東側は防潮壁が近接しているが、保守的に飛来物衝突を考慮する。なお、竜巻防護ネットの対称性から、代表して西側からの飛来物衝突を考慮する。
 - 鉛直方向の飛来物衝突に関して、竜巻防護ネットの対称性から、代表して西側のフレーム2基への飛来物衝突を考慮する。
 - ⇒以上を踏まえ、支持部材のうち飛来物が衝突しうる部材としては、フレームのうち主桁、横補強材及びブレース並びに大梁が考えられるが、ブレースはネットの上部に設置しており、ネットの吸収エネルギー評価及び破断評価に包含されるため、主桁、横補強材及び大梁を対象とする。
- b. 飛来物衝突により影響を受ける部材(評価対象)の検討
 - ⇒支持部材を構成する主桁、横補強材、大梁、フレームゴム支承、大梁ゴム支承、可動支承を評価対象とし、a.項に示した部材に飛来物が衝突した際の荷重の伝達経路を考慮して評価ケースを設定した。

支持部材の構造強度評価(衝突解析)における解析ケースの設定(3/3)

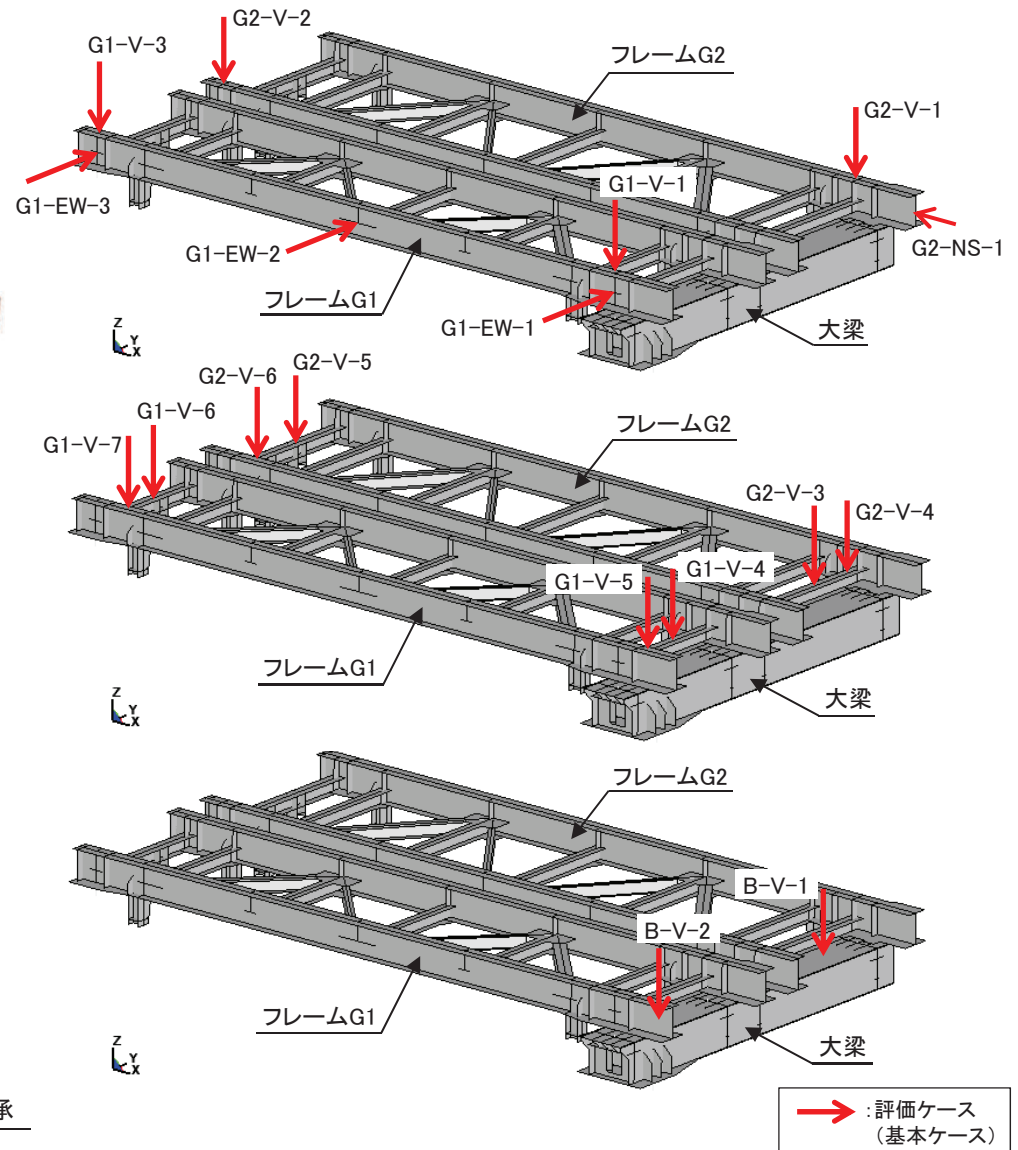
➤ 評価ケース(基本ケース)については、下記に示す18ケースを設定した。



参考図2-2 竜巻防護ネットの配置図(俯瞰図)



参考図2-3 フレーム配置図



参考図2-4 解析モデル図及び飛来物衝突位置図

参考3 ゴム支承のせん断剛性に係る各種依存性試験について(1/6)

- 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変化が生じるため、温度変化等の各種依存性試験を実施しせん断剛性の変化率を確認し、せん断剛性のばらつきに対する影響確認を実施した(設置変更許可段階において説明)。
- 試験方法はJIS K 6411に規定されている試験方法を基に、設計における適用条件を踏まえて設定した。

参考表3-1 せん断特性試験項目

試験	項目	試験内容	試験条件
各種依存性試験	a. 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。	試験体数:1体 せん断ひずみ:±100%, ±175%, ±200%の3水準
	b. 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。	試験体数:1体 圧縮応力:0.2N/mm ² , 0.5N/mm ² , 1.0N/mm ² , 3.0N/mm ² , 6.0N/mm ² の5水準
	c. 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。	試験体数:1体 振動数:0.1Hz, 0.5Hz, 1.0Hzの3水準
	d. 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。	試験体数:1体 繰返し数:50回
	e. 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。	試験体数:1体 温度:-20, -10, 0, 10, 23, 40°Cの6水準
熱老化特性試験	f. 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。	試験体数:1体 熱老化:23°C×60年相当

参考3 ゴム支承のせん断剛性に係る各種依存性試験について(2/6)

- 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変化が生じるため、温度変化等の各種依存性試験を実施しせん断剛性の変化率を確認し、せん断剛性のばらつきに対する影響確認を実施した(設置変更許可段階において説明)。
- 試験方法はJIS K 6411に規定されている試験方法を基に、設計における適用条件を踏まえて設定した。

参考表3-2 せん断特性試験項目と試験体

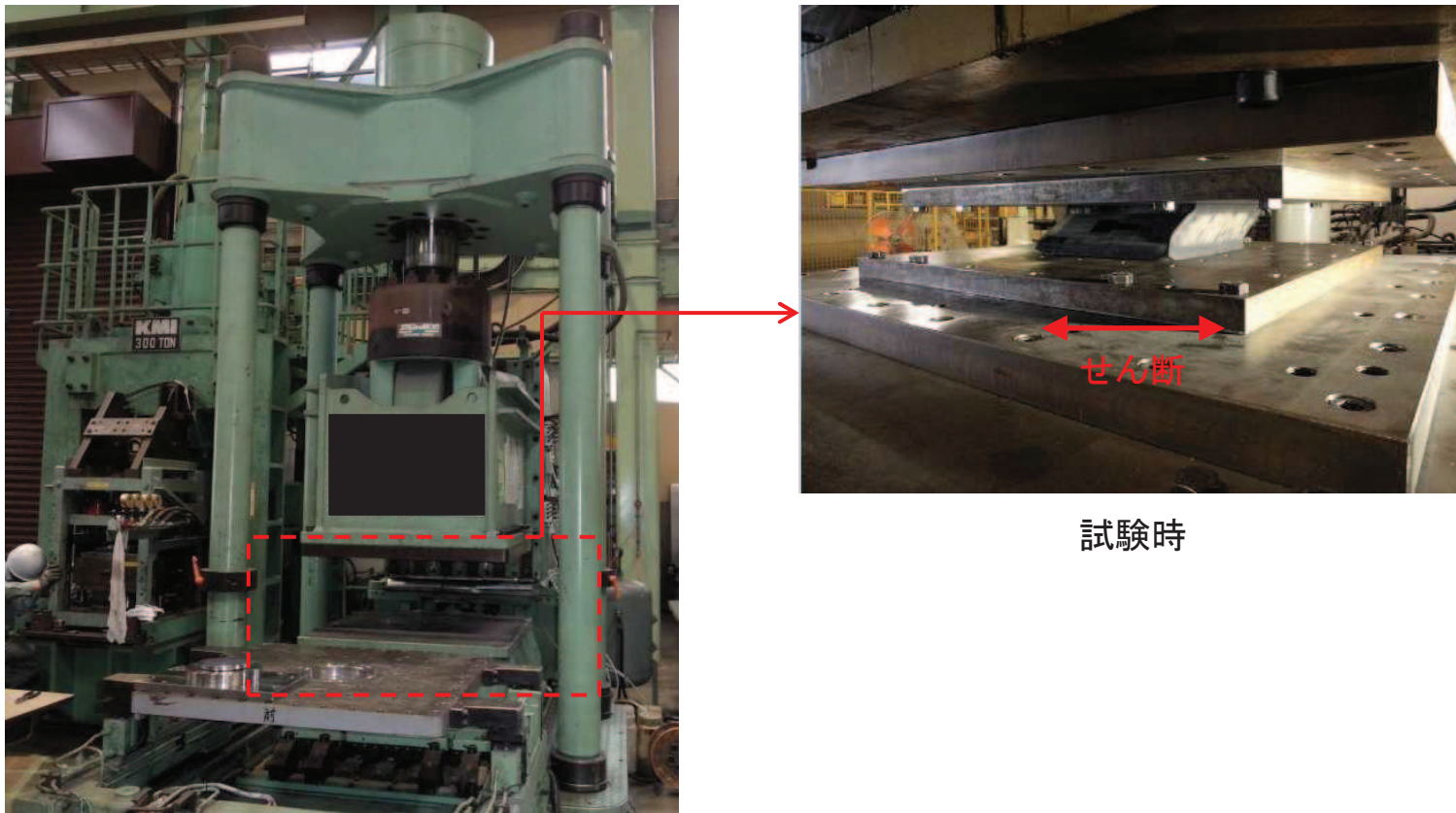
試験	測定項目	試験体		
		適用規格	形状	せん断弾性係数
各種依存性試験	せん断特性 ・せん断剛性 ・等価減衰定数	JIS K 6411-2012 標準試験体No.3*	有効平面寸法 400mm×400mm 総ゴム厚 54mm(9mm×6層)	1.0N/mm ²
熱老化特性試験	せん断特性 ・せん断剛性 ・等価減衰定数 せん断変形性能 ・破断せん断ひずみ	JIS K 6411-2012 標準試験体No.2*	有効平面寸法 240mm×240mm 総ゴム厚 30mm(5mm×6層)	1.0N/mm ²

注記* : JIS K 6411で寸法等が規定されている試験体

(試験項目毎にJISに規定されている標準試験体寸法のうち、大きい(実機寸法に近い)供試体を選定。)

参考3 ゴム支承のせん断剛性に係る各種依存性試験について(3/6)

- 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変化が生じるため、温度変化等の各種依存性試験を実施しせん断剛性の変化率を確認し、せん断剛性のばらつきに対する影響確認を実施した(設置変更許可段階において説明)。
- 試験方法はJIS K 6411に規定されている試験方法を基に、設計における適用条件を踏まえて設定した。



参考図3-1 試験装置外観

参考3 ゴム支承のせん断剛性に係る各種依存性試験について(4/6)

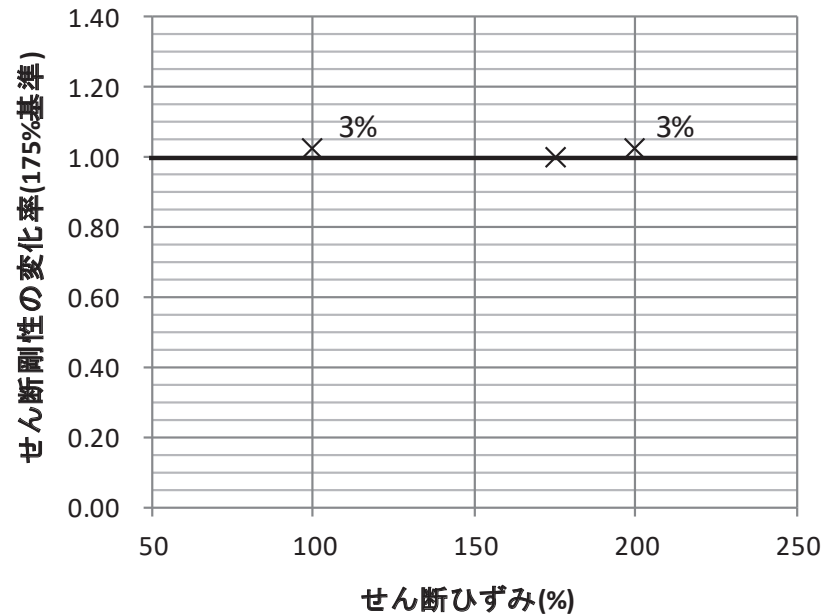
➤ 試験結果

a. せん断ひずみ依存性

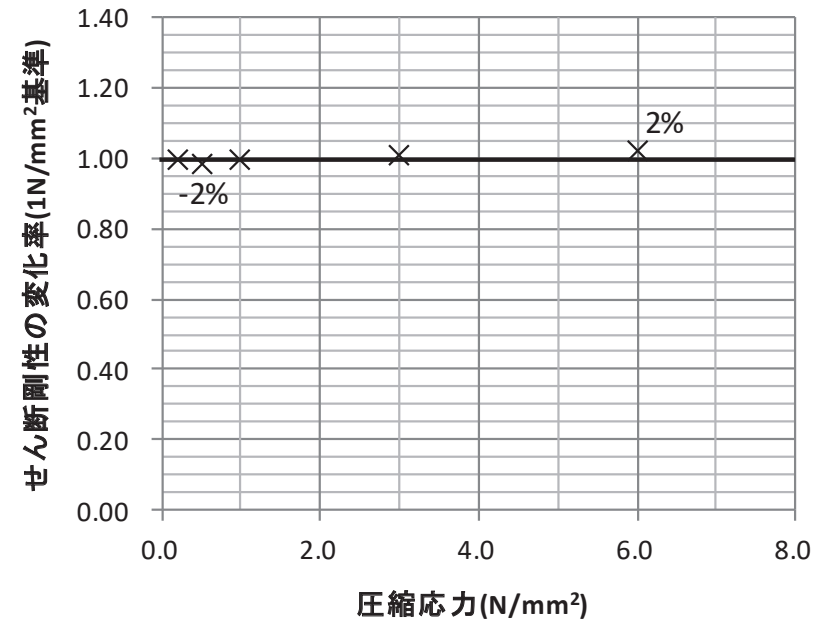
⇒ひずみの増減によらず、せん断剛性はほぼ一定の傾向を示すことが分かった。

b. 圧縮応力依存性

⇒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。



参考図3-2 せん断ひずみ依存性試験結果



参考図3-3 圧縮応力依存性試験結果

参考3 ゴム支承のせん断剛性に係る各種依存性試験について(5/6)

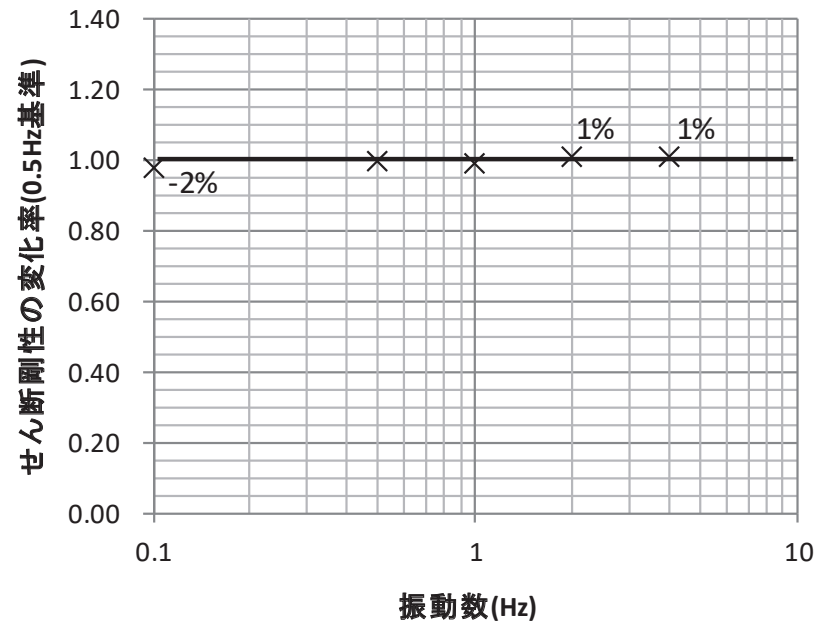
➤ 試験結果

c. 振動数依存性

⇒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。

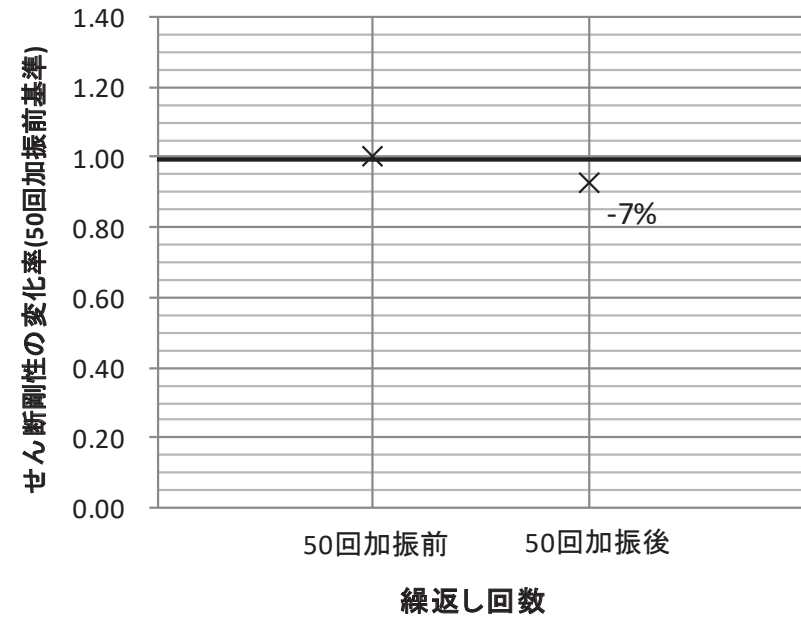
d. 繰返し数依存性

⇒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-7%程度となることが分かった。



注記* : 2Hz, 4Hzの結果は補正式より算出

参考図3-4 振動数依存性試験結果



参考図3-5 繰返し数依存性試験結果

参考3 ゴム支承のせん断剛性に係る各種依存性試験について(6/6)

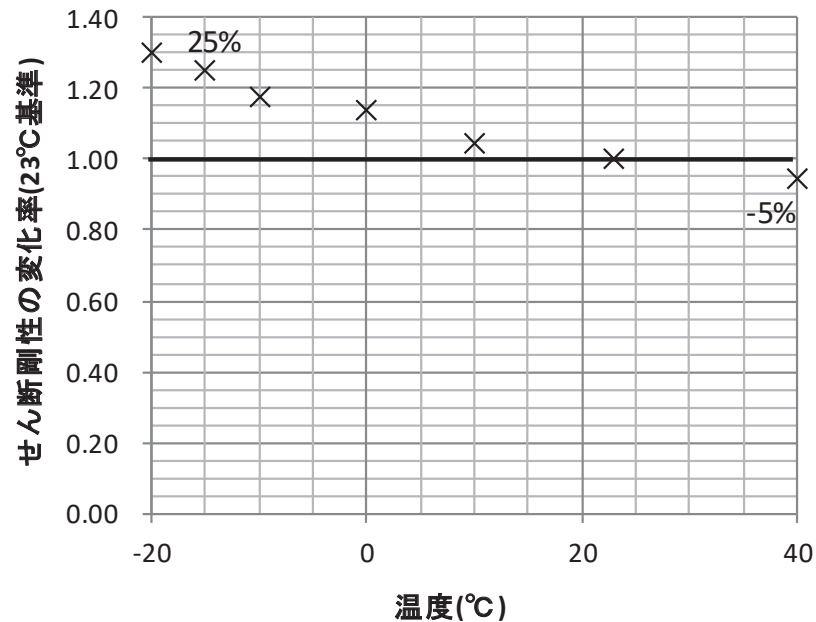
➤ 試験結果

e. 温度依存性

⇒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が分かる。基準温度(23°C)に対するせん断剛性の変化率は、女川2号機の環境条件を踏まえ-15°Cから+40°Cまでの範囲を確認しており、-15°Cでは+25%程度、+40°Cでは-5%程度であった。

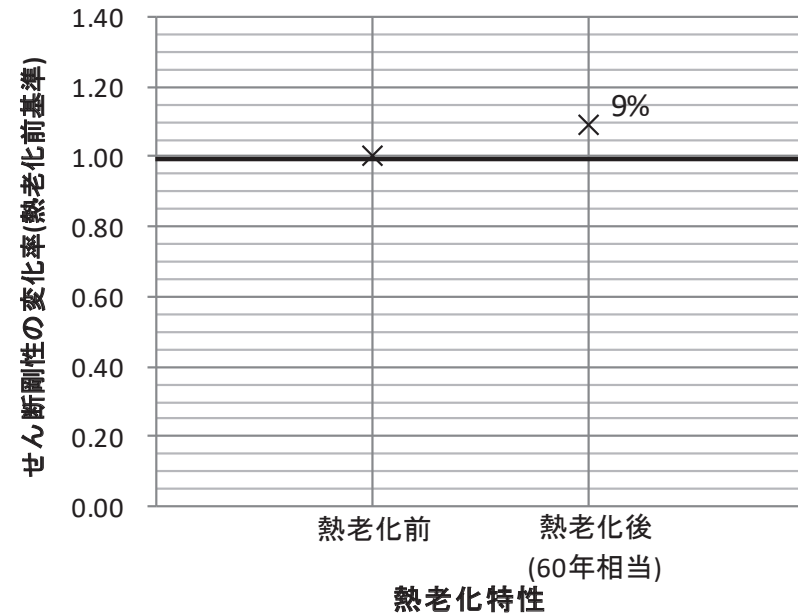
f. 熱老化特性

⇒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。



注記* :-15°Cの結果は補正式より算出

参考図3-6 温度依存性試験結果



参考図3-7 熱老化試験結果

試験項目の検討について(1/3)

- 試験は、JIS K 6411及び上記せん断剛性の各種依存性試験を参考に、鉛直剛性に係る試験への適用を検討した。

参考表4-1 試験項目の検討(1/3)

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

試験項目の検討について(2/3)

参考表4-1 試験項目の検討(2/3)

JIS K 6411			せん断剛性に係る特性試験		鉛直剛性に係る特性試験	
特性	試験項目	原理	試験内容	備考	試験内容	備考
せん断特性の各種依存性	繰返し数依存性	試験体に一定圧縮力を載荷した状態で繰返しせん断変位を連続して与え、せん断特性の繰返し数に対する依存性を求める。	圧縮応力1N/mm ² 相当の圧縮力を載荷した状態でせん断ひずみ175%による正負繰返し加振を行い、せん断剛性を算出する。その後、せん断ひずみ175%による正負繰返し加振を50回行い、せん断剛性を算出する。50回加振前の測定値を基準として50回加振後の測定値との変化率を求める。	—	せん断ひずみ175%による正負繰返し加振を行う前及び行った後の試験体に圧縮力又は引張力を載荷し、荷重-変位曲線から圧縮又は引張剛性を算出する。50回加振前の測定値を基準として50回加振後の測定値との変化率を求める。	—
	温度依存性	試験体を複数水準の温度に保持して、一定圧縮力を載荷した状態でせん断変位を与え、せん断特性の環境温度の変化に対する依存性を求める。	各温度で加熱された試験体に圧縮応力1N/mm ² 相当の圧縮力を載荷した状態でせん断ひずみ175%による正負繰返し加振を行い、せん断剛性を算出する。23℃の測定値を基準として各温度におけるせん断剛性との変化率を求める。	—	各温度で加熱された試験体に圧縮力又は引張力を載荷し、荷重-変位曲線から圧縮又は引張剛性を算出する。23℃の測定値を基準として各温度における圧縮又は引張剛性との変化率を求める。	—
終局特性	せん断変形性能	試験体に一定の圧縮力を載荷した状態でせん断変形を与え、積層ゴムが破断又はせん断力-せん断変位曲線において、せん断力が急激に低下するなどの安定性が失われる限界を求める。	—	依存性を求める試験でないため対象外	—	鉛直剛性に関する試験でないため対象外
	引張特性	試験体にせん断変位0又は一定のせん断変形を与えた状態で引張力を加え、その引張力-引張変位曲線において降伏又は破断が生じる時点の引張力及びせん断変位を求める。	—	道路橋支承便覧の中で確認されているため省略	—	道路橋支承便覧の中で確認されているため省略

試験項目の検討について(3/3)

参考表4-1 試験項目の検討(3/3)

JIS K 6411			せん断剛性に係る特性試験		鉛直剛性に係る特性試験	
特性	試験項目	原理	試験内容	備考	試験内容	備考
耐久性	熱老化特性	積層ゴムの各特性における経年劣化を熱老化試験から求める試験であり、熱老化後、せん断特性及び終局特性を測定し、熱老化前に対する熱老化後の変化率から、積層ゴムの熱老化特性を求める。	圧縮応力1N/mm ² 相当の圧縮力を載荷した状態でせん断ひずみ175%による正負繰返し加振を行い、せん断剛性を算出する。その後60年相当の熱老化を行い、熱老化前と同様にせん断剛性を算出する。熱老化前の測定値を基準として熱老化後の測定値との変化率を求める。	—	試験体に圧縮力又は引張力を載荷し、荷重-変位曲線から圧縮又は引張剛性を算出する。その後60年相当の熱老化を行い、熱老化前と同様に圧縮又は引張剛性を算出する。熱老化前の測定値を基準として熱老化後の測定値との変化率を求める。	—
	クリープ	積層ゴムの長期圧縮力によるクリープひずみの予測方法であり、試験体にせん断変形を与えずに、一定の圧縮力を載荷し、規定時間経過後の圧縮変位を計測し、長期間後のクリープひずみを予測する。	—	せん断剛性に関する試験でないため対象外	—	鉛直剛性に関する試験でないため対象外
	繰返し圧縮疲労	試験体に一定のせん断変位を与えた状態で圧縮力を繰返し与え、圧縮特性及びせん断特性の繰返し回数による依存性を求める。	—	圧縮による繰返し荷重を受ける構造でないため対象外	—	圧縮による繰返し荷重を受ける構造でないため対象外
緩速変形特性	緩速変形特性	橋梁の上部構造の温度変化による伸縮によって生じるような低速のせん断変形弾性係数を求める。	—	変形速度によりせん断剛性が変化する免震支承ではないため対象外	—	鉛直剛性に関する試験でないため対象外

試験内容に関する補足(1/5)

➤ a. 圧縮／引張剛性確認試験

⇒試験体に鉛直方向の圧縮及び引張荷重を与えたときの鉛直剛性を求める。試験方法は、圧縮応力度 0.5N/mm^2 程度に相当する鉛直荷重を原点として、圧縮応力度 8.0N/mm^2 による圧縮試験及び引張応力度 2.0N/mm^2 による引張試験を行う。それぞれの試験において3回载荷し、3回目の鉛直荷重－鉛直変位曲線から、圧縮及び引張剛性を求める。剛性を算出する応力範囲は、圧縮側は、JIS K 6411及び道路橋支承便覧を参考に $1.5\sim 6.0\text{N/mm}^2$ とし、引張側は、引張応力度の許容値を基に $0\sim 2.0\text{N/mm}^2$ とする。試験結果は、d. 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°C)相当に補正したものを測定値とする。

➤ b. 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保持した状態で、圧縮方向及び引張方向の鉛直剛性を測定する。試験方法は、せん断ひずみを与えた状態で、圧縮応力度 0.5N/mm^2 程度に相当する鉛直荷重を原点として、圧縮応力度 8.0N/mm^2 による圧縮試験及び引張応力度 2.0N/mm^2 による引張試験を実施し、これを各せん断ひずみに対して行う。それぞれの試験において3回载荷し、3回目の鉛直荷重－鉛直変位曲線から圧縮及び引張剛性を求める。また、試験に用いる鉛直荷重は、各せん断ひずみにおける試験体の有効支圧面積より算出した圧縮／引張応力度相当の荷重とする。剛性を算出する応力範囲は、圧縮側は、JIS K 6411及び道路橋支承便覧を参考に $1.5\sim 6.0\text{N/mm}^2$ とし、引張側は、引張応力度の許容値を基に $0\sim 2.0\text{N/mm}^2$ とする。試験結果は、d. 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°C)相当に補正したものを測定値とする。圧縮及び引張剛性は、せん断ひずみ0%の測定値を基準として、各せん断ひずみにおける測定値との変化率を求める。

➤ c. 繰返し数依存性試験

⇒試験体に繰返し水平加振50回を与えたときの鉛直剛性の依存性を求める。試験方法は50回加振試験の前に圧縮応力度 0.5N/mm^2 程度に相当する鉛直荷重を原点として、圧縮応力度 8.0N/mm^2 による圧縮試験及び引張応力度 2.0N/mm^2 による引張試験を行う。それぞれの試験において3回载荷し、3回目の鉛直荷重－鉛直変位曲線から鉛直剛性を求める。その後、50回加振試験後に同様の試験を実施し、圧縮及び引張剛性を求める。剛性を算出する応力範囲は、圧縮側は、JIS K 6411及び道路橋支承便覧を参考に $1.5\sim 6.0\text{N/mm}^2$ とし、引張側は、引張応力度の許容値を基に $0\sim 2.0\text{N/mm}^2$ とする。試験結果は、d. 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°C)相当に補正したものを測定値とする。圧縮及び引張剛性は、50回繰返し加振前の測定値を基準として、50回繰返し加振後における測定値との変化率を求める。

試験内容に関する補足(2/5)

➤ d. 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鉛直剛性の依存性を求める。試験方法は、試験体を試験温度になるまで恒温槽で保持したのち、迅速に二軸試験機へ取り付け、圧縮応力度 0.5N/mm^2 程度に相当する鉛直荷重を原点として、圧縮応力度 8.0N/mm^2 による圧縮試験及び引張応力度 2.0N/mm^2 による引張試験を行う。それぞれの試験において3回載荷し、3回目の鉛直荷重－鉛直変位曲線から圧縮及び引張剛性を求める。剛性を算出する応力範囲は、圧縮側は、JIS K 6411及び道路橋支承便覧を参考に $1.5\sim 6.0\text{N/mm}^2$ とし、引張側は、引張応力度の許容値を基に $0\sim 2.0\text{N/mm}^2$ とする。圧縮及び引張剛性は、基準温度(23°C)時の測定値を基準として、各温度条件における測定値との変化率を求める。なお、各温度条件における恒温槽での保持時間(試験体を恒温槽に入れてから取り出すまでの時間)は、8時間以上とする。

➤ e. 熱老化特性試験

⇒熱老化前後の鉛直剛性の変化を確認する。熱老化は基準温度(23°C)で60年に相当する試験条件とする。試験方法は、試験体の熱老化を行う前に、圧縮応力度 0.5N/mm^2 程度に相当する鉛直荷重を原点として、圧縮応力度 8.0N/mm^2 による圧縮試験及び引張応力度 2.0N/mm^2 による引張試験を行う。それぞれの試験において3回載荷し、3回目の鉛直荷重－鉛直変位曲線から圧縮及び引張剛性を求める。その後、恒温槽で試験条件の熱老化をさせ、熱老化前と同様の試験を実施し、圧縮及び引張剛性を求める。圧縮側は、JIS K 6411及び道路橋支承便覧を参考に $1.5\sim 6.0\text{N/mm}^2$ とし、引張側は、引張応力度の許容値を基に $0\sim 2.0\text{N/mm}^2$ とする。試験結果は、d. 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°C)相当に補正したものを測定値とする。圧縮及び引張剛性は、熱老化前の測定値を基準として、熱老化後の測定値との変化率を求める。

➤ f. 速度依存性試験

⇒試験体を高速で変形させたときの鉛直剛性の速度依存性について確認する。試験方法は、試験装置上に設置した供試体上に錘を落下し衝突させ、衝撃力を与える。負荷された荷重値、変位時刻履歴を計測し、荷重－変位曲線から圧縮及び引張剛性を求める。

なお、速度は計測された変位時刻履歴から速度時刻履歴に変換し、最大荷重到達時までの平均速度を当該試験の速度条件とする。

ここで、速度依存性を確認する試験範囲については、運動量保存則に基づくゴム支承の変形速度及び衝突解析によってゴム支承が変形するときの最大鉛直変形速度を基に設定する。

試験内容に関する補足(3/5)

➤ 速度依存性試験条件の検討

(1) 運動量保存則によるゴム支承の変形速度の評価

⇒ 竜巻防護ネットのフレームに飛来物が衝突した際のフレームの移動速度を、衝突前後の運動量保存則から算出する。算出にあたって、ゴム支承のばね剛性はフレームの移動に対し抵抗となり得るが、この影響はないものとして扱う。また、フレームを剛体と仮定し、簡便に一次元の衝突問題として、飛来物はゴム支承直上のフレーム北側に衝突し、衝突後はフレームと飛来物が一体となって移動を始めるものとする。

以上の条件から、運動量保存則から以下の式が成り立つ。

$$mv = (m + M)V \quad \dots \textcircled{1}$$

ここで、

m: 飛来物(鋼製材)重量 (m=135kg)

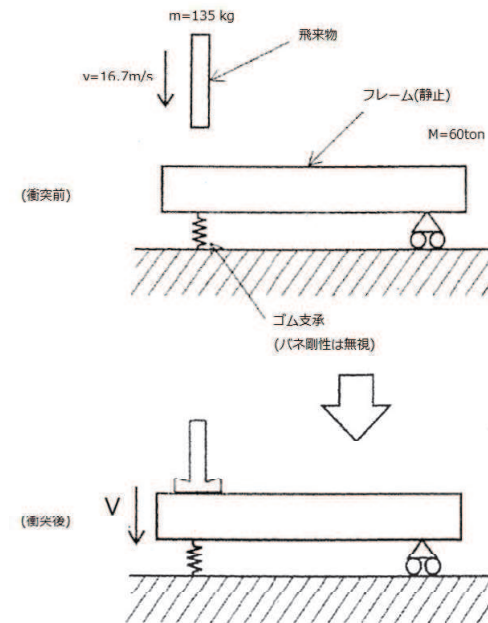
v: 飛来物(鋼製材)衝突速度 (v=16.7m/s)

M: フレーム重量 (M=60000kg)

V: 衝突後のフレーム移動速度 (m/s)

①式より、

$$\begin{aligned} V &= mv / (m + M) \\ &= 135 \times 16.7 / (135 + 60000) \\ &\doteq 0.04 \text{ (m/s)} \end{aligned}$$



参考図4-1 飛来物衝突前後のイメージ

上記のとおり、フレームの質量が飛来物に比べて著しく大きいことから、衝突後のフレームの変形速度は最大でも約0.04m/sとなる。フレームはゴム支承に支持されていることから、ゴム支承の変位速度はフレームの移動速度と同等の速度になると想定される。

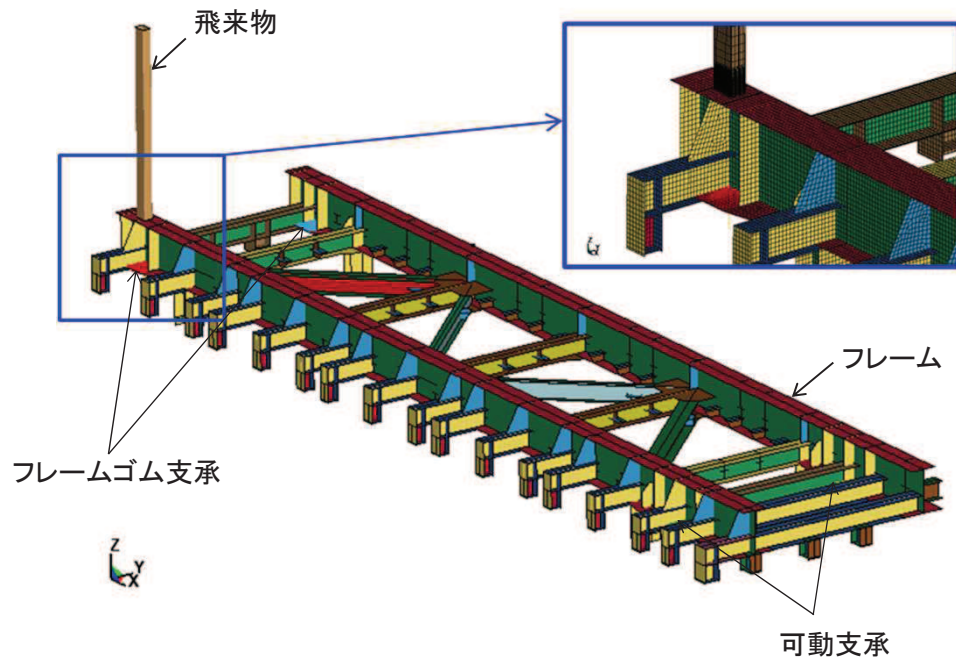
試験内容に関する補足(4/5)

➤ 速度依存性試験条件の検討

(2) 衝突解析によるゴム支承の変形速度の評価

⇒ 衝突解析によるゴム支承の変形速度は解析時の鉛直剛性の影響を受け、鉛直剛性が小さいほど変形速度が大きくなると考えられるため、剛性値をパラメータにした衝突解析を実施し、鉛直剛性に対するゴム支承変形速度の傾向を踏まえて試験条件を設定した。

⇒ 衝突解析は解析コード「LS-DYNA」による非線形時刻歴解析により評価した。



支持条件		
方向	フレームゴム支承	可動支承
X	道路橋支承便覧に基づく設計値 (3.33kN/mm ²)	自由
Y	道路橋支承便覧に基づく設計値 (3.33kN/mm ²)	剛
Z	道路橋支承便覧に基づく設計値 (972kN/mm ²)を基準に、下記の解析ケースに示す条件を設定	剛

解析 ケース No.	鉛直剛性		飛来物の衝突条件			
	入力値 (kN/mm)	設計値から の比率	衝突位置	衝突 姿勢	衝突 方向	衝突 速度 (m/s)
1	9.72	1/100	主桁 (ゴム支承 の直上)	短辺	鉛直	16.7
2	97.2	1/10				
3	972	1				
4	9720	10				
5	97200	100				

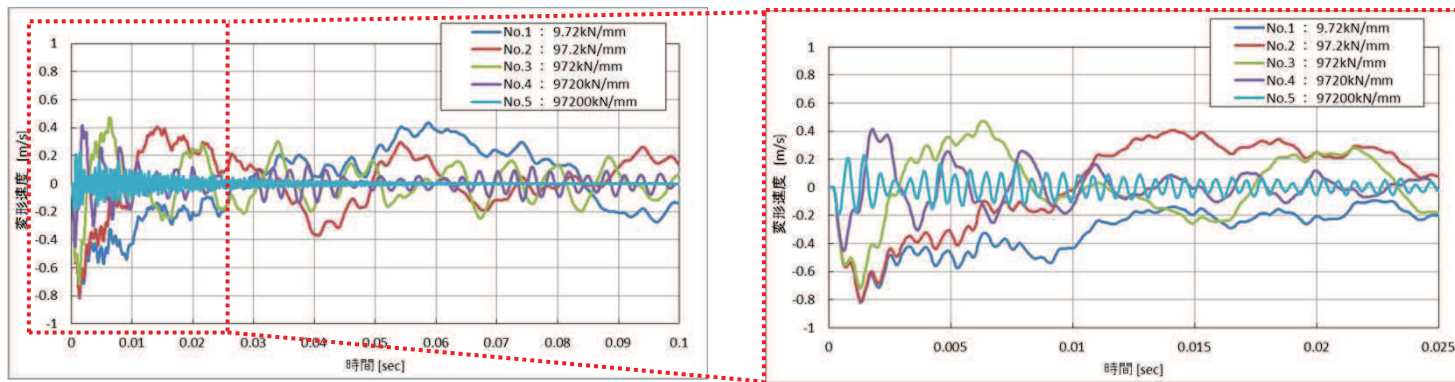
参考図4-2 解析モデル図

試験内容に関する補足(5/5)

速度依存性試験条件の検討

(2) 衝突解析によるゴム支承の変形速度の評価

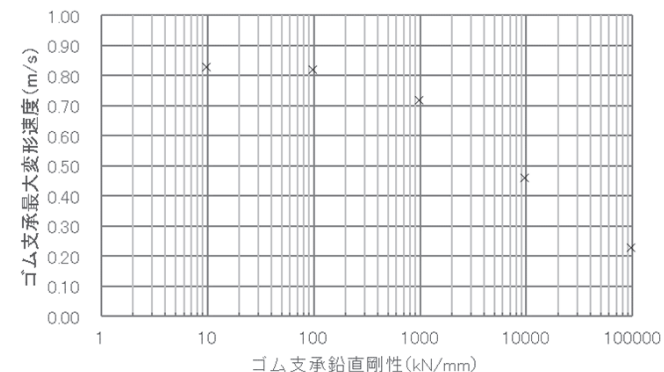
⇒評価結果(飛来物が衝突した直下にあるゴム支承の鉛直方向変形速度履歴)を下記に示す。これを踏まえ、速度依存性が存在する場合、一般的には速度が速くなると剛性が大きくなることから、上記予備解析の結果より、変形速度の最大値(0.83m/s)を包絡するよう、目標とするゴム支承の変形速度を1.0m/sとして試験を実施する。その際、参考としてより大きな速度である1.5m/s及び2.0m/sについても試験を実施することとする。なお、運動量保存則より、飛来物がフレームに衝突した際のゴム支承の変形速度は0.04m/s程度であり、この速度は今回設定した試験条件に十分包絡される。



参考図4-2 解析結果(飛来物衝突位置直下のゴム支承変形速度履歴)

参考表4-2 ゴム支承の鉛直剛性と最大変形速度の関係

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



参考図4-3 ゴム支承の鉛直剛性と最大変形速度の関係

試験項目及び試験条件の整理

参考表4-3 鉛直剛性に係る特性試験項目

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

参考表4-4 鉛直剛性に係る特性試験項目と試験体

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

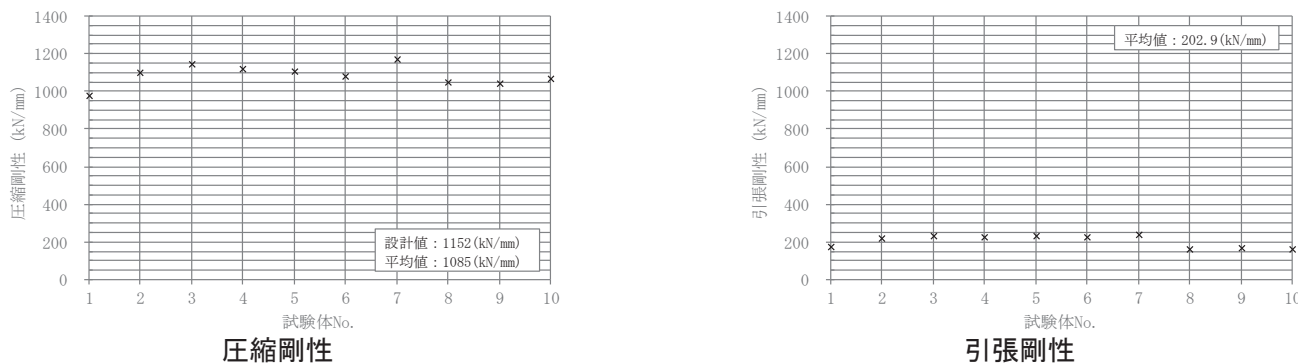
注記*: JIS K 6411で寸法等が規定されている試験体
(試験項目毎にJISに規定されている標準試験体寸法のうち、大きい(実機寸法に近い)供試体を選定。)

ゴム支承の鉛直剛性に係る各種依存性試験結果(1/5)

➤ 試験結果

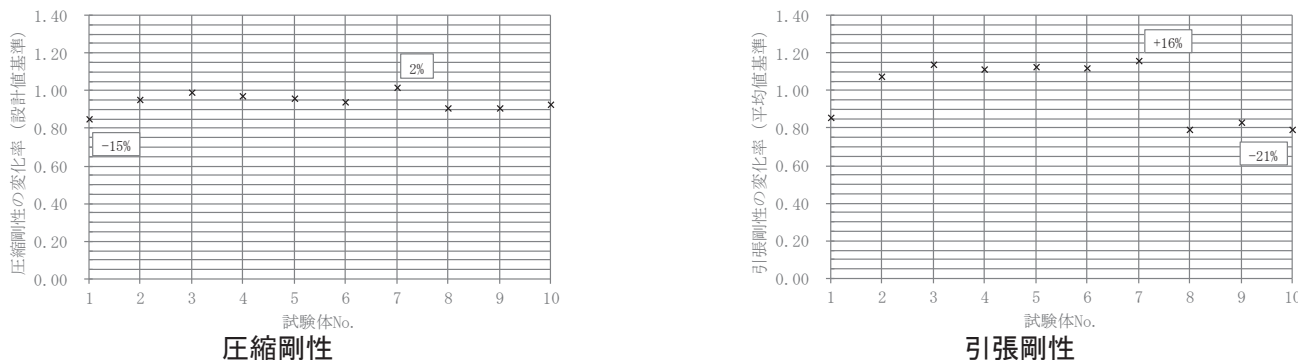
a. 圧縮／引張剛性確認試験

⇒ 圧縮剛性は道路橋支承便覧から求める設計値とほぼ同等であることを確認した。一方、引張剛性は、圧縮剛性の設計値の20%程度であることを確認した。この結果を踏まえ、ゴム支承の剛性設定に関して、圧縮剛性の基準値は道路橋支承便覧に基づく設計値とし、引張剛性の基準値は本試験結果の平均値とした。



参考図4-4 圧縮／引張剛性確認試験結果(算出値)

⇒ 上記基準値を基に初期ばらつきを評価した結果、圧縮剛性のばらつきはプラス側で最大+2%程度、マイナス側で最大-15%程度であること、引張剛性のばらつきはプラス側で最大16%程度、マイナス側で最大-21%程度であり、道路橋支承便覧に規定されている製品初期ばらつき±30%以内であることを確認した。



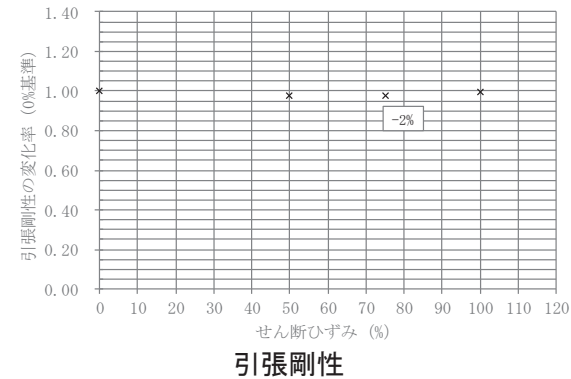
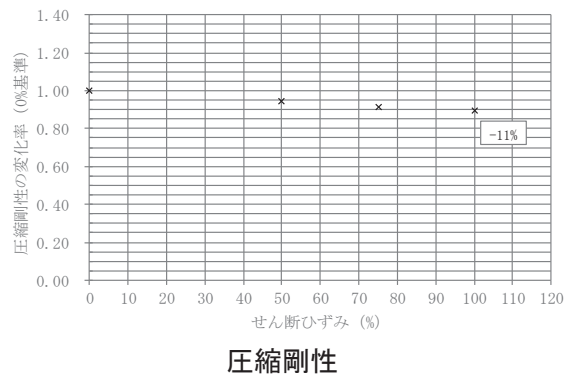
参考図4-5 圧縮／引張剛性確認試験結果(変化率)

ゴム支承の鉛直剛性に係る各種依存性試験結果(2/5)

➤ 試験結果

b. せん断ひずみ依存性確認

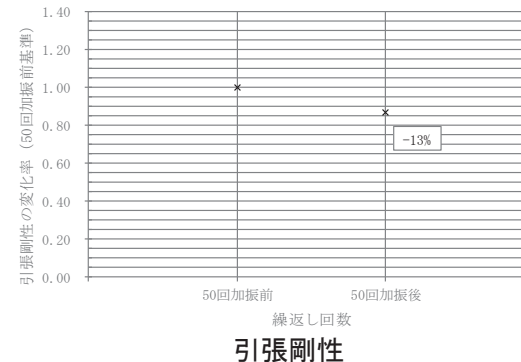
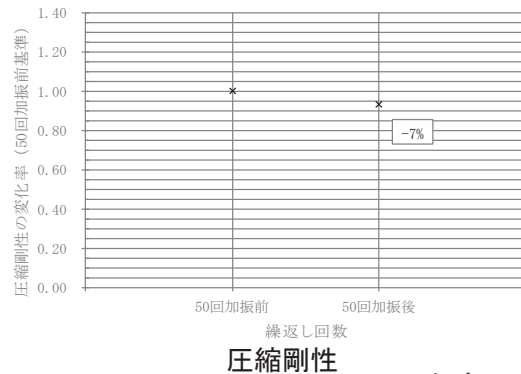
⇒試験体にせん断ひずみを与え保持した状態における鉛直剛性の変化率について、圧縮剛性は、最大で-11%程度の変化率となること、一方、引張剛性は、ひずみの増減によらず、ほぼ一定の傾向を示すことが分かった。



参考図4-6 せん断ひずみ依存性試験結果

c. 繰返し数依存性試験結果

⇒試験体に繰返し水平加振50回を与えたときの圧縮及び引張剛性の変化率について、圧縮剛性は-7%程度、引張剛性は-13%程度となることが分かった。



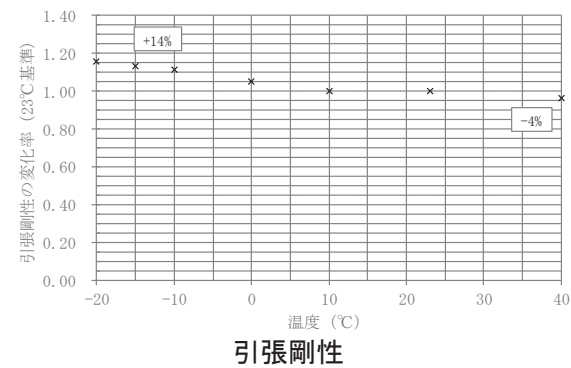
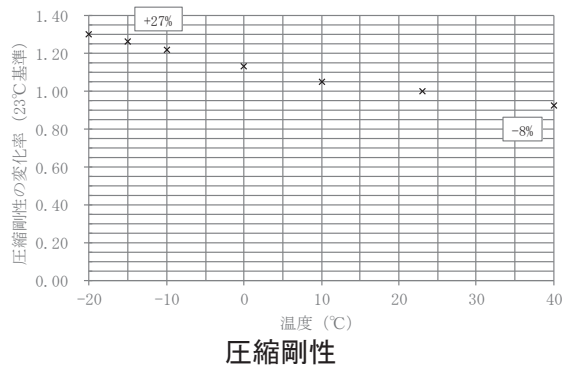
参考図4-7 繰返し数依存性試験結果

ゴム支承の鉛直剛性に係る各種依存性試験結果(3/5)

➤ 試験結果

d. 温度依存性確認

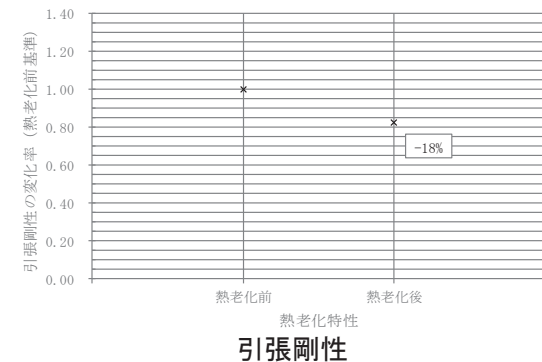
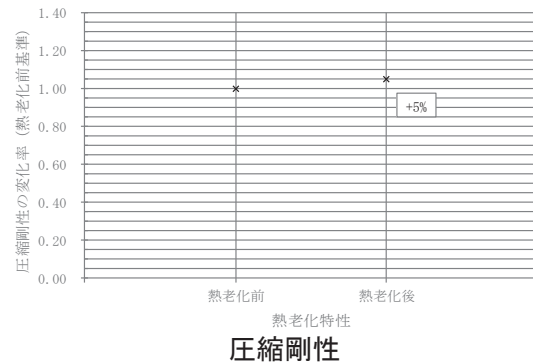
⇒試験体に複数の温度条件を与えたときの鉛直剛性の変化率について、圧縮剛性は、 -15°C では+27%程度、 40°C では-8%程度となること、一方、引張剛性は、 -15°C では+14%程度、 40°C では-4%程度となることが分かった。



参考図4-8 温度依存性試験結果

e. 熱老化特性試験結果

⇒試験体の熱老化前後の圧縮及び引張剛性の変化率について、圧縮剛性は+5%程度、引張剛性は-18%程度となることが分かった。



参考図4-9 熱老化特性試験結果

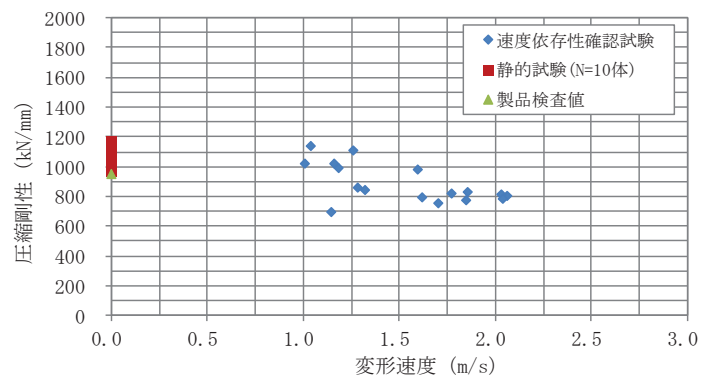
ゴム支承の鉛直剛性に係る各種依存性試験結果(4/5)

➤ 試験結果

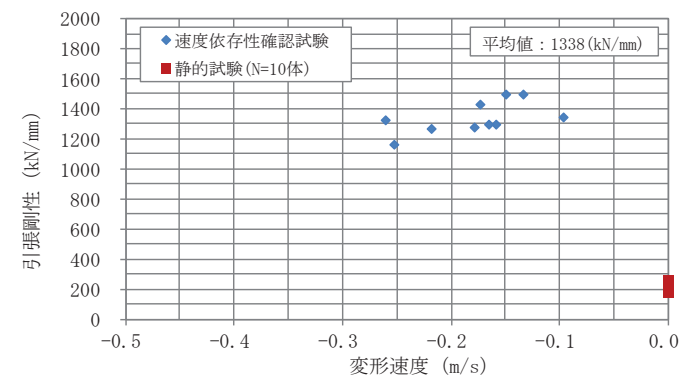
f. 速度依存性確認

⇒ 圧縮剛性の速度依存性試験について、試験条件(ゴムの変形速度)を満足していることを確認した。また、結果のばらつき及び変形速度が大きくなるにしたがって剛性が低下する傾向が見られたが、一般に速度依存性は変形速度の増加に応じて剛性が高くなる特性であることから、これは錘の落下距離が大きくなるにしたがって、錘切り離し時のわずかな回転力により錘衝突時に傾斜角が増えたことが要因と考えられ、速度依存性がないと判断した。

⇒ 一方、引張剛性の速度依存性試験については、変形速度の増加に伴い剛性が高くなり、速度依存性があることを確認した。なお、引張剛性の速度依存性試験において、ゴム支承の変形速度が圧縮側に対して小さいが、圧縮側と同様の外力を負荷しており、ゴムの速度依存性により変形が抑制されたことによるものと考えられる。



圧縮剛性



引張剛性

参考図4-10 速度依存性試験結果

ゴム支承の鉛直剛性に係る各種依存性試験結果(5/5)

➤ 試験結果に対する考察

今回、引張剛性に関して、静的な引張剛性確認試験において低い剛性を示したこと、また、速度依存性試験において速度依存性が発現したことについて、以下のとおり考察した。

⇒一般に、ゴム支承のゴム(天然ゴム)材料単体に着目すると、天然ゴムは粘弾性材料であり速度依存性を有すること、また、圧縮側の剛性に対して引張側の剛性が小さいことが知られている。

⇒a. 圧縮／引張剛性確認試験において、圧縮剛性に対して引張剛性が小さくなったことについては、ゴム支承においてもゴム材料自体の性質が表れたものと考えられる。

⇒鉛直剛性の算出に用いる一次形状係数 S_1 は、ゴム1層当たりの拘束面積及びゴム1層当たりの自由面積から求められ、ゴムの拘束による影響を定性的に評価する指標である。 S_1 が小さい場合に速度依存性を示すことが報告されている(下図参照)。 S_1 が小さいほどゴム支承の鉛直剛性も小さくなり、このときゴム材料自体が持つ速度依存性を有する特性が顕著に表れるものと考えられる。

⇒f. 速度依存性試験において、圧縮側については、 S_1 が参考7-10図に比べて大きい($S_1=8.33$)ため、ゴム材料自体の特性が出にくく、今回の試験範囲において速度依存性が見られない結果となったと考えられる。一方、引張側については、静的な引張剛性確認試験において圧縮剛性に対して引張剛性が小さかったことにより、ゴム材料自体が持つ速度依存性を有する特性が発現したのと考えられる。

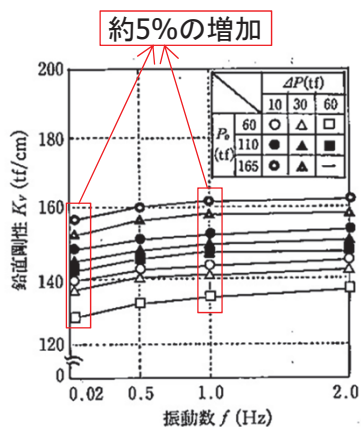


図-1 鉛直剛性変化率¹⁾

($G=5.6, 1,000(230)-48 \times 5, S_1=4, S_2=4.2$)

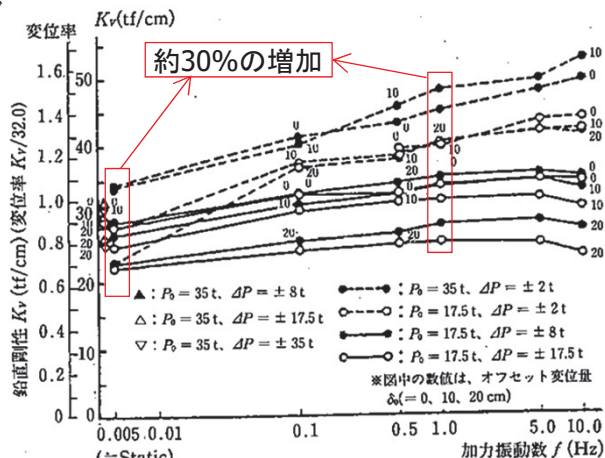


図-2 鉛直剛性変化率²⁾

($G=5.6, 520(110)-32 \times 8, S_1=3.2, S_2=2.0$)

(注記*:免震用積層ゴムハンドブック, (社)日本ゴム協会, 理工図書 より抜粋。

図-1の一次形状係数 $S_1=4$ の場合は、鉛直剛性が準静的に対し1.0Hzで約5%増加し、図-2の一次形状係数 $S_1=3.2$ の場合は、鉛直剛性が準静的に対し1.0Hzで約30%増加している。)

参考5 ゴム支承の剛性のばらつきに対する影響確認について(1/2)

- 耐震評価におけるゴム支承の剛性のばらつきに対する影響について、基準地震動Ss7波の設計用床応答スペクトルに対して、ゴム支承の不確かさを考慮した条件での地震応答解析を実施し、いずれの不確かさケースについても各部材の発生応力等が許容限界を下回ることを確認した。なお、下記の傾向が見られた。

【不確かさケース(+側)】

- ⇒各部の発生応力や発生荷重については、基本ケースに比べてゴム支承の剛性が高くなった影響により固有周期が全体に短周期側に遷移したため、入力震度(設計用床応答スペクトルの読み取り値)が大きくなり、全体的に発生応力や発生荷重が増加する傾向になった。
- ⇒各部の移動量については、ゴム支承の剛性が大きくなったためゴム支承の変形が生じ難くなっているため減少する傾向だが、発生応力や発生荷重と同様に固有周期の遷移による入力震度の増加が影響し、大きくなった場合もあった。

【不確かさケース(-側)】

- ⇒各部の発生応力や発生荷重については、基本ケースに比べてゴム支承の剛性が低下した影響により固有周期が全体に長周期側に遷移したため、入力震度(設計用床応答スペクトルの読み取り値)が小さくなり、全体的に発生応力や発生荷重が低下する傾向になった。しかし、大梁、ゴム支承等の一部部材では基本ケースに比べて応力が大きくなる傾向になっており、これは前述のとおりゴム支承部が剛結合からばね結合の挙動となり、基本ケースでははりの振動モードによる応答のみが生じていたが、ゴム支承の不確かさケース(-側)でははりの振動モードによる応答に加え、ばね要素の振動モードにより生じる応答も作用したためと考えられる。
- ⇒各部の移動量については、ゴム支承の剛性が低下したため、ゴム支承の変形が生じやすくなっている影響で基本ケースよりも結果が大きくなった。

参考5 ゴム支承の剛性のばらつきに対する影響確認について(2/2)

- 強度評価(衝突解析)におけるゴム支承の剛性のばらつきに対する影響について、ゴム支承の剛性の変化が評価に与える影響が大きいのは、支承部に対してであると考えられることから、フレームゴム支承及び可動支承部近傍の飛来物衝突に関して、ゴム支承の剛性のばらつきによる影響を確認した。
- いずれの解析ケースにおいても、フレームゴム支承及び可動支承の部材に発生する応力等は許容値を超えず、構造強度上の評価方針を満足することを確認した。
- ゴム支承の剛性が大きくなると各部の発生応力も大きくなり、ゴム支承の剛性が小さくなると、ゴム支承が変形しやすくなり、ゴム支承に生じるせん断ひずみが大きくなる傾向が見られた。

参考表5-1 衝突解析結果(フレームゴム支承近傍)

評価対象部位		衝突部位・ 衝突姿勢	G1-V-3						G1-EW-3						許容値
			設計値(基本)		ゴム支承 剛性変化+側		ゴム支承 剛性変化-側		設計値(基本)		ゴム支承 剛性変化+側		ゴム支承 剛性変化-側		
			発生値		発生値		発生値		発生値		発生値		発生値		
			西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	
フレーム ゴム支承	ゴム本体	応力度(引張)	0.7	0.5	0.6	0.4	0.2	0.2	0.4	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2	2.0 MPa
		せん断ひずみ	60	66	40	44	85	94	65	70	44	48	91	99	250 %
		応力度(圧縮)	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	23 MPa
	内部鋼板	応力度(引張)	22	11	22	11	11	11	11	11	11	11	11	11	280 MPa
	取付ボルト	応力度(組合せ)	72	94	75	97	70	73	88	88	93	90	71	76	420 MPa
	基礎ボルト	応力度(組合せ)	59	55	60	57	45	48	54	56	57	58	48	51	257 MPa

参考表5-2 衝突解析結果(可動支承近傍)

評価対象部位		衝突部位・ 衝突姿勢	G1-V-1						G1-EW-1						許容値
			設計値(基本)		ゴム支承 剛性変化+側		ゴム支承 剛性変化-側		設計値(基本)		ゴム支承 剛性変化+側		ゴム支承 剛性変化-側		
			発生値		発生値		発生値		発生値		発生値		発生値		
			西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	
可動支承	構造部材	水平荷重	1275	726	1249	752	1316	721	596	378	587	390	621	379	2900 kN
		鉛直荷重(圧縮)	364	269	372	265	332	268	629	110	701	101	735	150	5600 kN
		鉛直荷重(引張)	442	420	356	419	448	322	319	198	397	192	272	253	1800 kN

参考6 飛来物衝突姿勢に関する影響確認について(1/2)

- 強度評価(衝突解析)における飛来物衝突姿勢に関する影響について、設置変更許可段階で評価結果が厳しかったフレームゴム支承及び可動支承に着目して評価結果を以下に整理した。
- いずれの解析ケースにおいても、フレームゴム支承及び可動支承の部材に発生する応力等は許容値を超えず、構造強度上の評価方針を満足することを確認した。なお、ゴム支承に対しては衝突姿勢を長辺衝突とした場合の影響は軽微であったが、可動支承に対しては与える影響が大きい傾向が見られた。

参考表6-1 衝突解析結果(フレームゴム支承近傍)

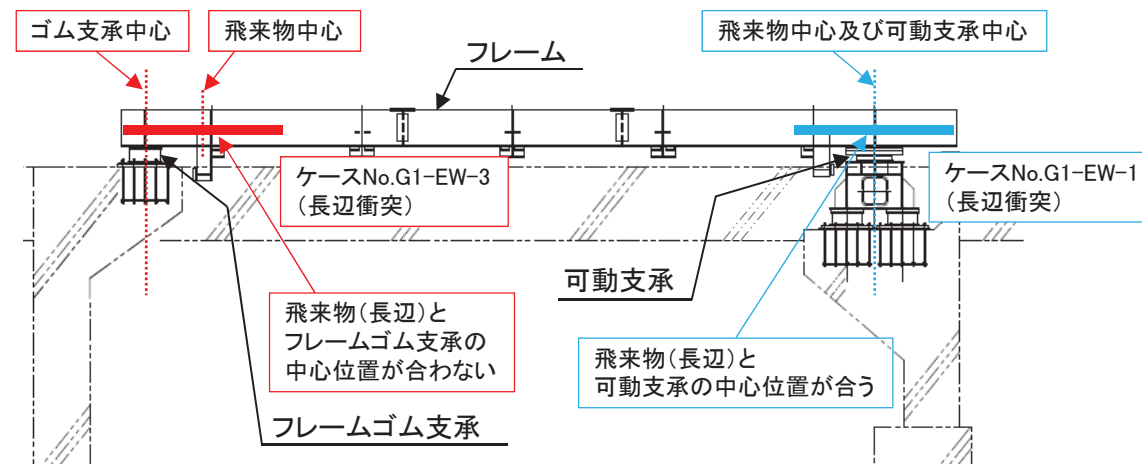
評価対象部位		衝突部位・ 衝突姿勢 評価項目	G1-V-3				G1-EW-3				許容値
			短辺(基本)		長辺		短辺(基本)		長辺		
			発生値		発生値		発生値		発生値		
			西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	
フレーム ゴム支承	ゴム本体	応力度(引張)	0.7	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.4	0.6	2.0 MPa
		せん断ひずみ	60	66	60	66	65	70	64	70	250 %
		応力度(圧縮)	2	1	1	1	1	1	1	1	23 MPa
	内部鋼板	応力度(引張)	22	11	11	11	11	11	11	11	280 MPa
	取付ボルト	応力度(組合せ)	72	94	95	91	88	88	93	109	420 MPa
	基礎ボルト	応力度(組合せ)	59	55	54	54	54	56	56	62	257 MPa

参考表6-2 衝突解析結果(可動支承近傍)

評価対象部位		衝突部位・ 衝突姿勢 評価項目	G1-V-1				G1-EW-1				許容値
			短辺(基本)		長辺		短辺(基本)		長辺		
			発生値		発生値		発生値		発生値		
			西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	
可動支承	構造部材	水平荷重	1275	726	2792	1689	596	378	816	451	2900 kN
		鉛直荷重(圧縮)	364	269	843	590	629	110	3156	451	5600 kN
		鉛直荷重(引張)	442	420	718	715	319	198	1629	438	1800 kN

参考6 飛来物衝突姿勢に関する影響確認について(2/2)

- 長辺衝突では、短辺衝突に対して荷重作用面が大きいいため飛来物の局部に作用する荷重は小さく、また、細長比が小さいことから、飛来物の圧壊に対する強度が高く、衝突時エネルギー消費がないため、被衝突物に伝達される荷重が大きくなったものと考えられる。また、参考図10-2に示すとおり、ゴム支承に対しては、支承の配置上、支承の設置位置と飛来物の衝突位置の中心が合わないことにより、飛来物の衝突によるエネルギーは支承部に集中せず分散したと考えられる。一方、可動支承に対しては、影響が大きくなるよう支承の設置位置と飛来物の衝突位置の中心を合わせていることで、飛来物の衝突によるエネルギーが支承部に十分に伝達され、支承部に与える影響が大きくなったと考えられる。

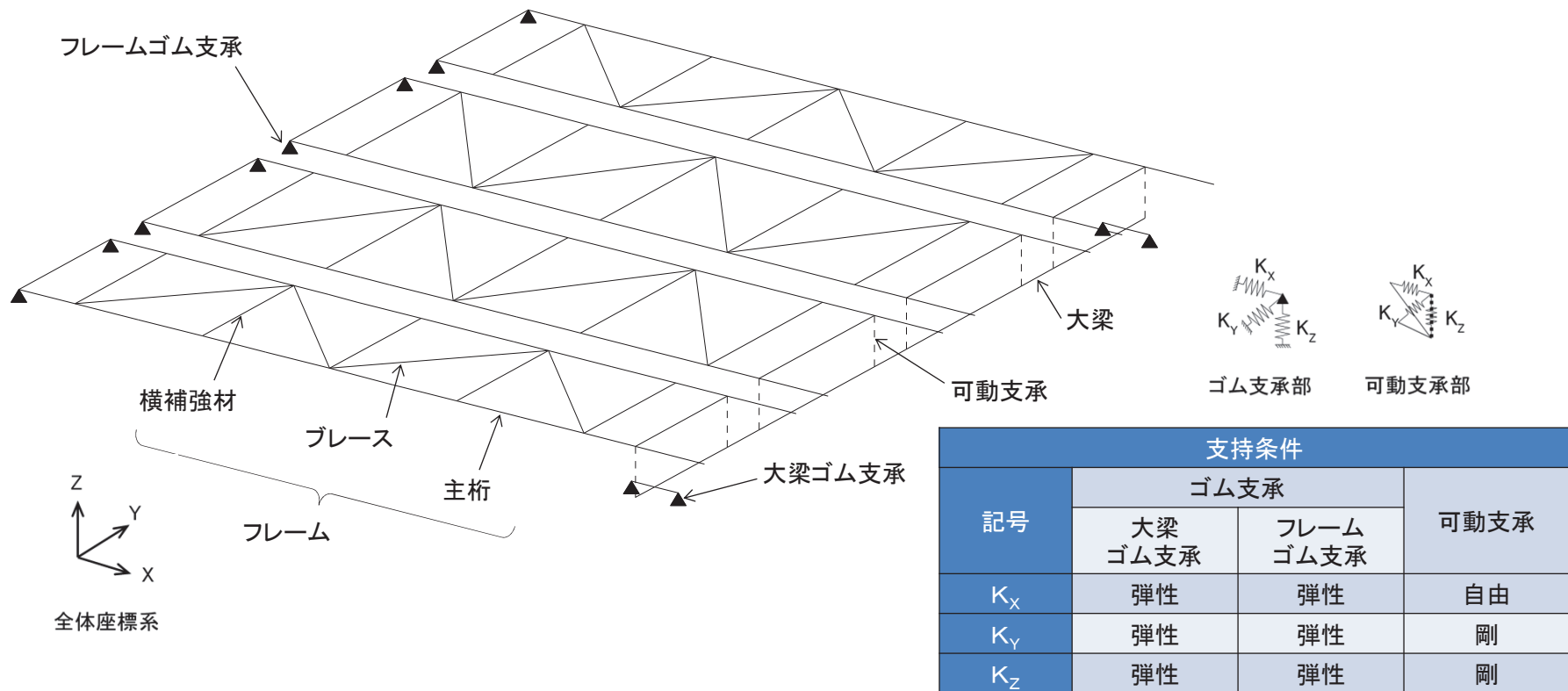


参考図6-1 飛来物衝突位置の概要(長辺衝突)

- その他も含め、いずれの飛来物衝突姿勢(長辺衝突)の影響確認ケースについても支持部材に発生するひずみ、応力等は許容限界を超えず、構造強度上の評価方針を満足することを確認した。なお、一部評価において破断ひずみを超えるひずみが確認されたケースについても、全断面の破断に至らないことを確認している。

耐震評価における地震応答解析モデル

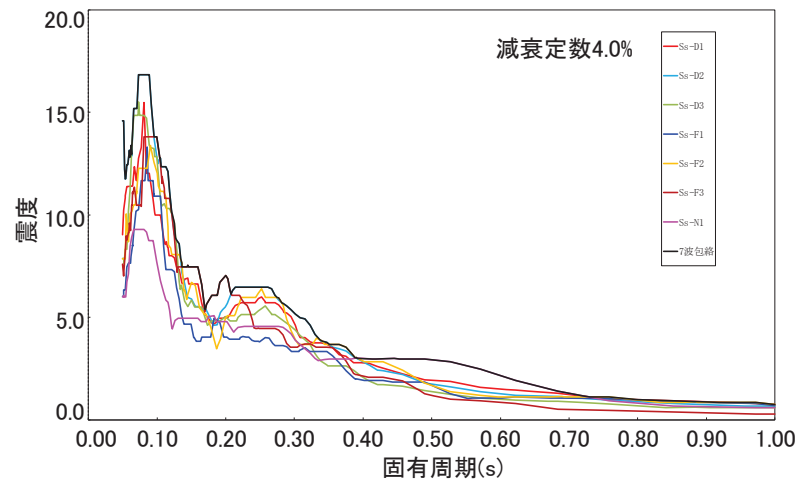
- 竜巻防護ネットの耐震評価については、地震時に上位クラス機器（原子炉補機冷却海水ポンプ等）に対する波及的影響を及ぼさないことを確認するため、基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有することを確認する。
- 申送り事項への対応を踏まえ、添付書類「VI-2-11-2-2 竜巻防護ネットの耐震性についての計算書」において、基準地震動 S_s 7波の地震応答の基本ケース及び地盤の不確かさを考慮した不確かさケースを包絡した設計用床応答スペクトルを用いた耐震評価を実施した。



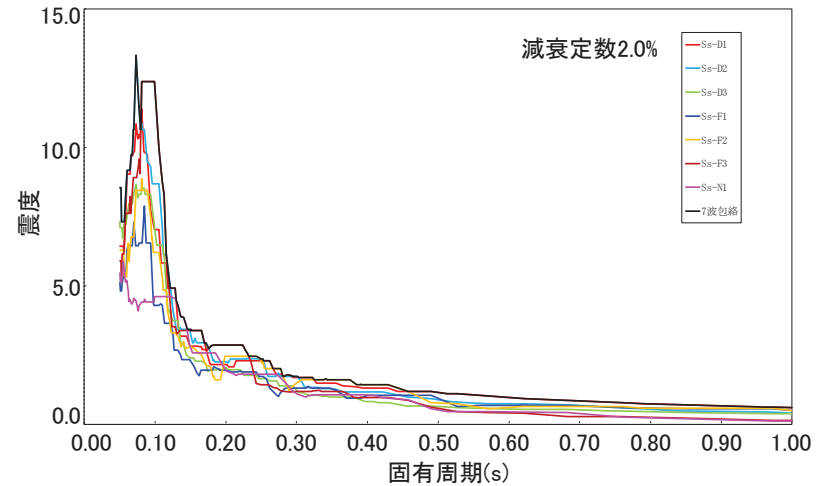
参考図7-1 耐震評価における解析モデル図

設計用床応答スペクトル

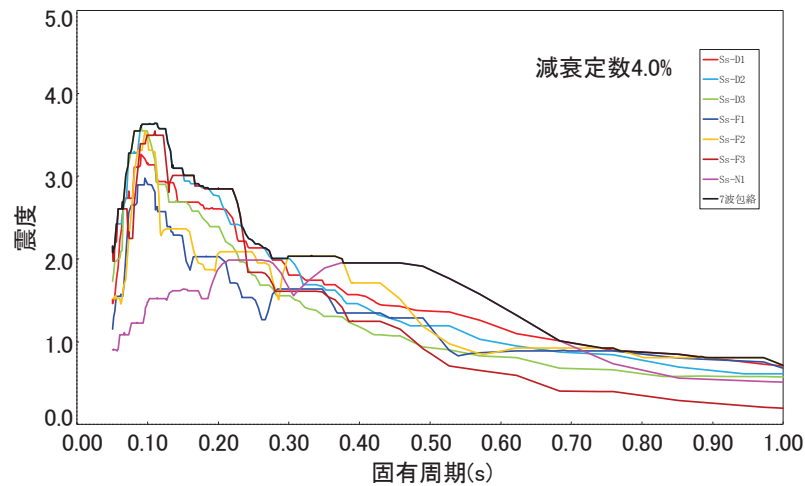
- 基準地震動Ss7波の地震応答の基本ケース及び地盤の不確かさを考慮した不確かさケースを包絡した設計用床応答スペクトルを以下に示す。



(a) 水平方向(横断面) 減衰定数4.0%



(c) 鉛直方向 減衰定数2.0%



(b) 水平方向(縦断面) 減衰定数4.0%

参考図7-2 設計用床応答スペクトル図

耐震評価結果

- 基準地震動Ss7波の地震応答の基本ケース及び地盤の不確かさを考慮した不確かさケースを包絡した設計用床応答スペクトルを用いた耐震評価を実施し、竜巻防護ネットは十分な構造強度を有し、上位クラス施設に対して波及的影響を及ぼさないことを確認した。

参考表7-1 耐震評価結果

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

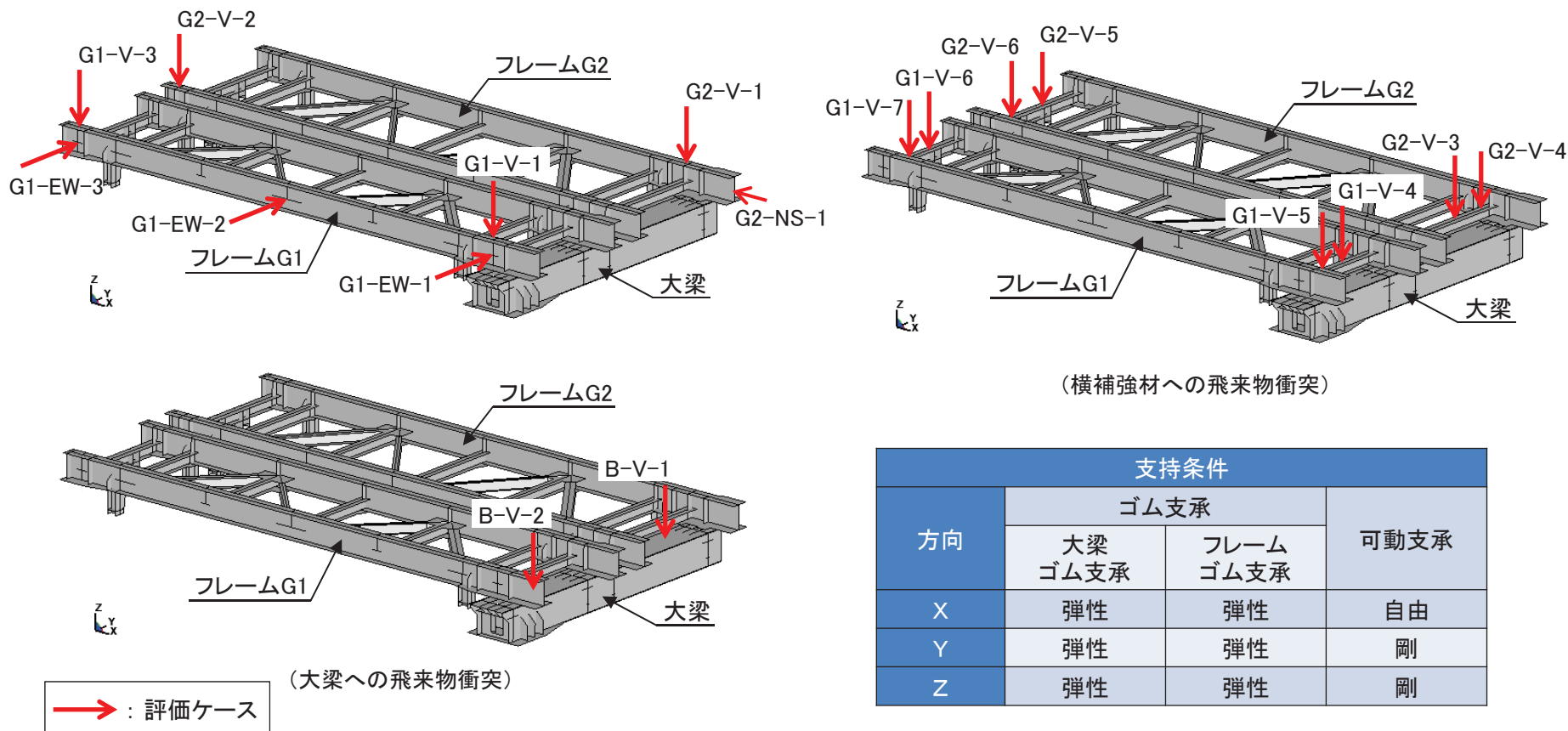
注記 *1:発生値, 許容限界は無次元(%)

*2:発生値, 許容限界の単位(kN)

*3:発生値, 許容限界の単位(mm)

支持部材の強度評価における衝突解析モデル図

- 竜巻防護ネットの強度評価については、外部事象防護対象施設(原子炉補機冷却海水ポンプ等)の機能喪失に至る可能性のある飛来物が衝突することを防止するために、竜巻発生時に想定する荷重(風圧力による荷重, 飛来物の衝撃による荷重等)に対して十分な構造強度を有することを確認する。
- 申送り事項への対応を踏まえ、添付書類「VI-3-別添1-2-1-1 竜巻防護ネットの強度計算書」において、竜巻防護ネットの支持部材に対して、風圧力による荷重, 飛来物衝突による衝撃荷重等の設計竜巻荷重に対する構造強度評価を実施した。



支持条件			
方向	ゴム支承		可動支承
	大梁 ゴム支承	フレーム ゴム支承	
X	弾性	弾性	自由
Y	弾性	弾性	剛
Z	弾性	弾性	剛

参考図8-1 強度評価における解析モデル図

強度評価結果

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

参考表8-1 強度評価結果

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

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

枠囲みの内容は、商業機密の観点から公開できません。