

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-20-0710-1_改0
提出年月日	2020年12月25日

補足-710-1【竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書の
補足説明資料】

目次

1. 強度計算の方針に関する補足説明資料
 - 1.1 風力係数について
 - 1.2 強度計算時の施設の代表性について
 - 1.3 構造強度評価における評価対象部位の選定について
2. 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算に関する補足説明資料
 - 2.1 コンクリートの裏面剥離に対する設備対策の評価手法について
 - 2.2 鉄筋コンクリートの衝突解析モデルにおける破断限界の設定について
 - 2.3 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ変形評価の許容値の設定について
 - 2.4 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの貫通及び裏面剥離評価について
 - 2.5 鉄筋コンクリート部材の貫通評価及び裏面剥離評価について
3. 屋外の重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算に関する補足説明資料
 - 3.1 固縛装置の設計における保守性について
 - 3.2 固縛装置の設計における設備の代表性について
 - 3.3 屋外の重大事故等対処設備の収納ラックに対する固縛対応について
 - 3.4 固縛装置の評価対象部位について
4. 防護対策施設の強度計算に関する補足説明資料
 - 4.1 竜巻防護ネットの衝突解析について
 - 4.2 飛来物のオフセット衝突の影響について
 - 4.3 金網の設計裕度の考え方
 - 4.4 ワイヤロープの変形を考慮したネットシステムのたわみについて
 - 4.5 ワイヤロープの初期張力について
 - 4.6 補助金網の影響について
 - 4.7 衝突解析の解析手法の保守性について
5. 排気筒の強度計算に関する補足説明資料
 - 5.1 設計飛来物による構造欠損の想定箇所について
 - 5.2 起因事象を竜巻とした場合の排気筒に求められる機能について
 - 5.3 腐食代の考慮について

: 今回提出範囲

4. 防護対策施設の強度計算に関する補足説明資料

4.1 竜巻防護ネットの衝突解析について

1. はじめに

竜巻防護ネットはネット、防護板及び支持部材で構成され、各構成要素の設計方針及び評価方針について「VI-3-別添 1-2 防護対策施設の強度計算の方針」に示している。このうち、支持部材については、フレーム、大梁、ゴム支承、可動支承等により構成されており、フレームや大梁等の支持部材の主要部材は、認可実績プラントの竜巻防護対策施設における架構等と同様に鋼製であるが、フレームを支持する部材の一部材料にゴム（ゴム支承）を採用している点で、認可実績プラントの竜巻防護対策施設と異なる設計・構造を採用している。

ゴム支承を採用した目的は、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により、地震時の海水ポンプ室への反力を低減することである。一方、竜巻防護ネットの強度計算に関して、設計飛来物である鋼製材の衝突解析においても、飛来物衝突時のゴム支承の影響について適切に考慮する必要がある。

竜巻防護ネットの構成要素のうち、支持部材の強度評価フロー図を図 1-1 に示す。

本資料は、竜巻防護ネットの構造強度評価（衝突解析）の評価方針について、解析モデルの設定の考え方及び評価に資するゴム支承の鉛直剛性に係る特性試験で得られた知見を踏まえた方針の妥当性について説明し、構造成立性の見通しについて示すものである。

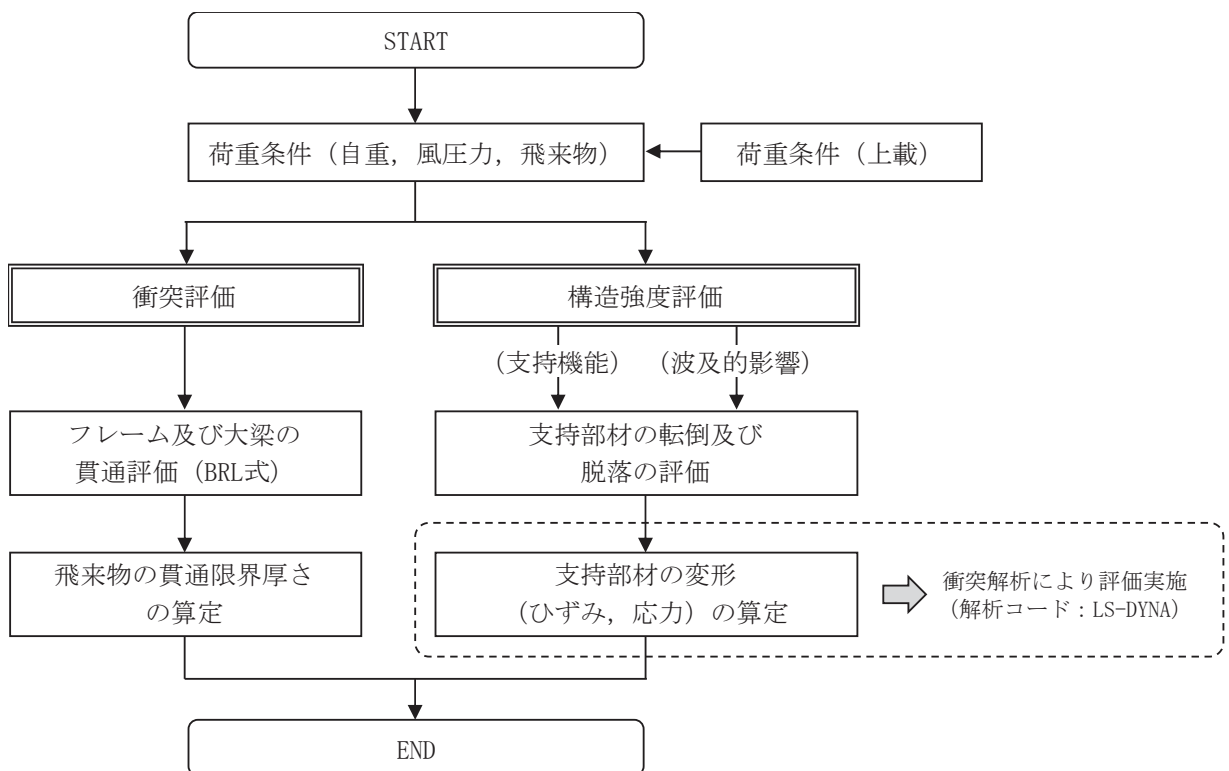


図 1-1 支持部材の強度評価フロー図

2. 構造概要

竜巻防護ネット全体及び各構成要素の構造概要について以下に示す。

(1) 竜巻防護ネット全体

竜巻防護ネットは、ネット、防護板及び支持部材で構成し、海水ポンプ室補機ポンプエリア上面に設置することで、飛来物が外部事象防護対象施設へ衝突することを防止し、外部事象防護対象施設とネットの離隔を確保することなどにより、ネットにたわみが生じたとしても、外部事象防護対象施設に飛来物を衝突させない構造とする。また、竜巻防護ネットは、海水ポンプ室躯体に支持される構造とする。

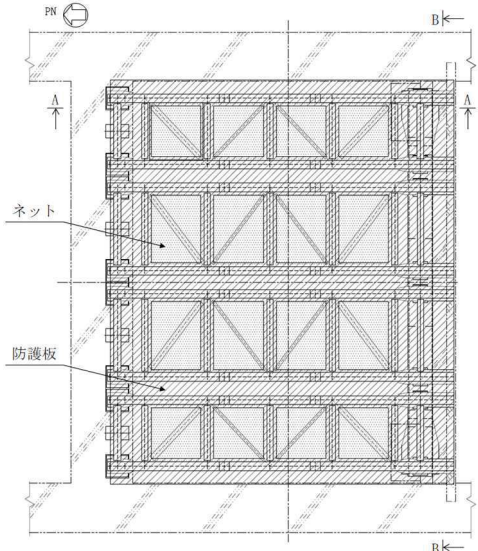
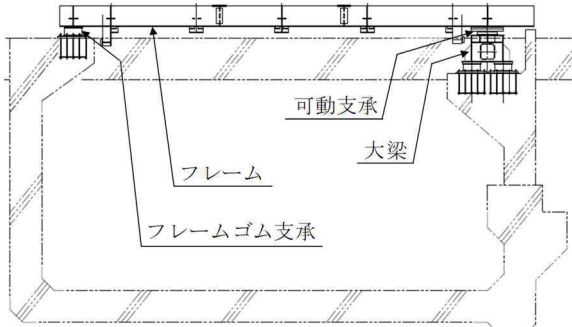
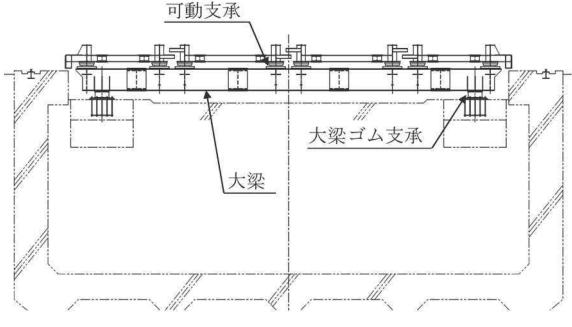
ネットは金網、ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）により構成され、ネットに作用する荷重をワイヤロープ及び接続治具を介してフレームに伝達し、フレームから海水ポンプ室躯体に伝達する構造とする。

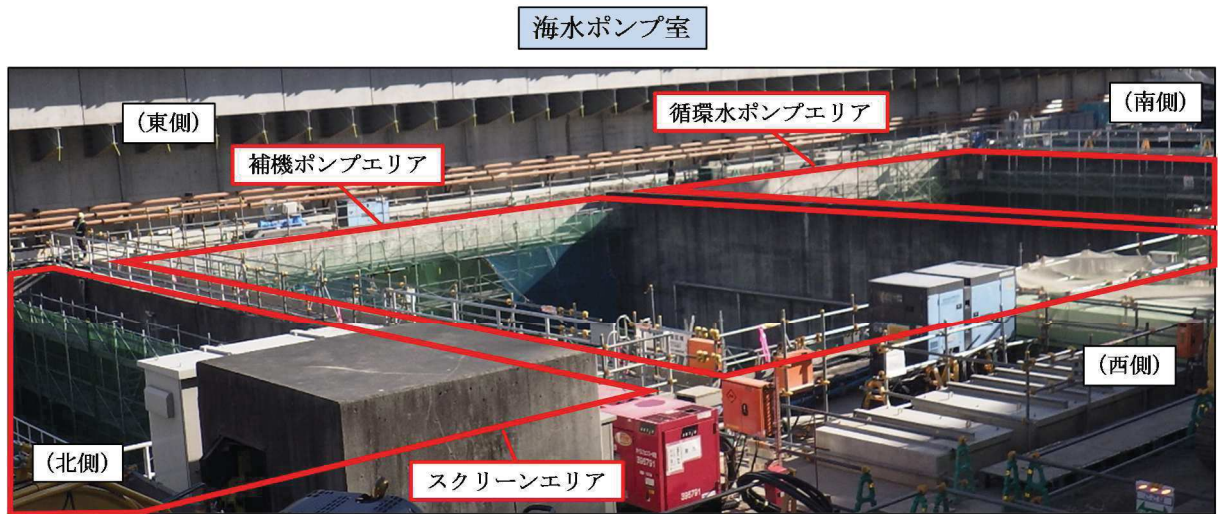
金網は、らせん状の硬鋼線を3次的に編み込み、編み込みの方向によって荷重を受け持つ展開方向と展開直角方向の異方性を持ち、支持部材の配置、金網に作用する荷重及び外部事象防護対象施設との離隔に応じて、金網の展開方向と展開直角方向の長さの比を考慮して、フレーム内に複数枚を重ねて設置する構造とする。また、金網に飛来物が衝突した際、ワイヤロープに瞬間的な大荷重が作用するのを防ぐため、金網の外側の四隅には緩衝材を設置する構造とする。

防護板は、鋼板により構成され、防護板に作用する荷重は支持部材に伝達する構造とする。

ネット及び防護板の支持部材は、フレーム、大梁、可動支承、ゴム支承により構成され、上載するネット及び防護板を支持する構造とし、支持部材に作用する荷重は、アンカーボルトを介して、海水ポンプ室躯体に伝達する構造とする。また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないために、支持部材を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない構造とする。竜巻防護ネットの構造計画を表 2-1 に示す。また、竜巻防護ネットの概要図を図 2-1 に示す。

表 2-1 竜巻防護ネットの構造計画

構成要素	計画の概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】</p> <p>ネット，防護板及び支持部材は，飛来物が侵入した場合に，外部事象防護対象施設に衝突する可能性のある海水ポンプ室補機ポンプエリア上面に設置する設計としている。</p>			
ネット	ネットは，金網，ワイヤロープ及び接続治具により構成する。	<p>ネットに作用する荷重は，ワイヤロープ及び接続治具を介して支持部材に伝達し，支持部材から鉄筋コンクリート造の海水ポンプ室躯体に伝達する構造とする。</p> <p>また，防護板に作用する荷重は，支持部材に伝達し，支持部材から海水ポンプ室躯体に伝達する構造とする。</p>	 <p>(平面図)</p>
防護板	防護板は鋼製の鋼板により構成する。		 <p>(A～A 矢視)</p>
支持部材	支持部材は，フレーム，大梁，ゴム支承，可動支承により構成する。		 <p>(B～B 矢視)</p>



竜巻防護ネット取付け状態

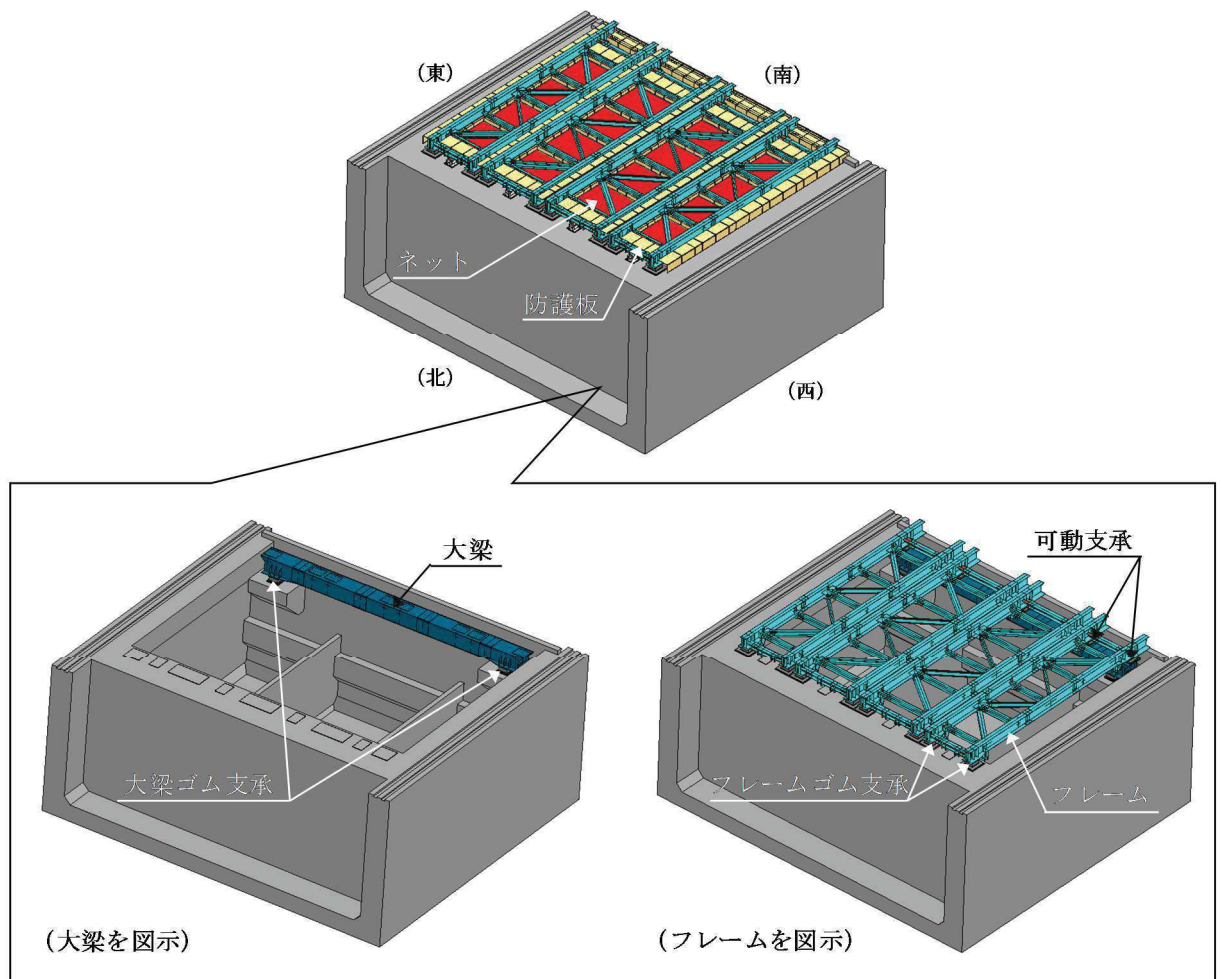


図 2-1 竜巻防護ネットの概要図

(2) ネットの構造概要

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飛来物の持つ運動エネルギーを吸収し、外部事象防護対象施設への衝突を防止する設計とする。ネットは、金網、ワイヤロープ及び接続治具により構成され、金網の4辺をワイヤロープにより支持し、ワイヤロープはフレームに設置した接続治具にて支持する構造とする。ワイヤロープの端部はターンバックル又はシャックルを設置し、ターンバックル又はシャックルをフレームに設置した取付プレートに接続する構造とする。ネットの概要図を図2-2に示す。

金網は、50 mm目合いの主金網2枚及び40 mm目合いの補助金網1枚で構成する。

金網は、電力中央研究所報告書「竜巻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」(研究報告：N13014)及び電力中央研究所報告書「高強度金網を用いた竜巻飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法」(総合報告：O01)(以下「電中研報告書」という。)にて適用性が確認されている評価式及び金網の物性値を用いた設計とする。ネットを構成する金網、ワイヤロープ及び接続治具についての構造設計を以下に示す。

a. 金網

金網は、らせん状の硬鋼線を山形に折り曲げて列線とし、3次元的に交差させて編み込んだものであり、編み込みの向きにより、展開方向とその直角方向の異方性を有する。展開方向が主に荷重を受け持ち、展開方向と展開直角方向で剛性や伸び量が異なるため、これらの異方性を考慮した設計とする。金網は、電中研報告書において、その剛性、最大たわみ時のたわみ角、1目合いの破断変位等が確認されている。

金網の寸法は、フレームの主桁及び横補強材の間隔並びに金網の展開方向と展開直角方向の剛性や伸び量の異方性を考慮して、展開方向と展開直角方向の寸法の比(以下「アスペクト比」という。)について、原則として電中研報告書にて適用性が確認されている範囲(1:1~2:1)に入るように設計する。ただし、設定する寸法での限界吸収エネルギー量等を踏まえ、設置する金網の枚数を増やし、衝撃荷重に対する耐力を持たせるとともにたわみ量を低減させる設計とする。

b. ワイヤロープ

ワイヤロープの取付部は、展開方向のワイヤロープと展開直角方向のワイヤロープで荷重の伝達分布が異なり、さらにワイヤロープの巻き方によりワイヤロープ間の荷重伝達に影響を及ぼす可能性があるため、金網に対して2本をL字に設置することにより、ワイヤロープに作用する荷重が均一となるような設計とする。

c. 接続治具(支持部及び固定部)

電中研報告書の評価式を適用するため、衝突試験における試験体と同じ構造を採用しており、飛来物衝突時に急激な大荷重が作用するのを抑制するために、緩衝装置を四隅に設置する設計とする。

接続治具は、金網への飛来物の衝突により金網からワイヤロープを介して直接作用する荷重若しくは発生する応力に対して、破断することのない強度を有する設計とする。接続治具（支持部）はワイヤロープを支持するターンバックル及びシャックルであり、接続治具（固定部）は隅角部固定ボルト及びターンバックル又はシャックルをフレームに接続する取付けプレートである。

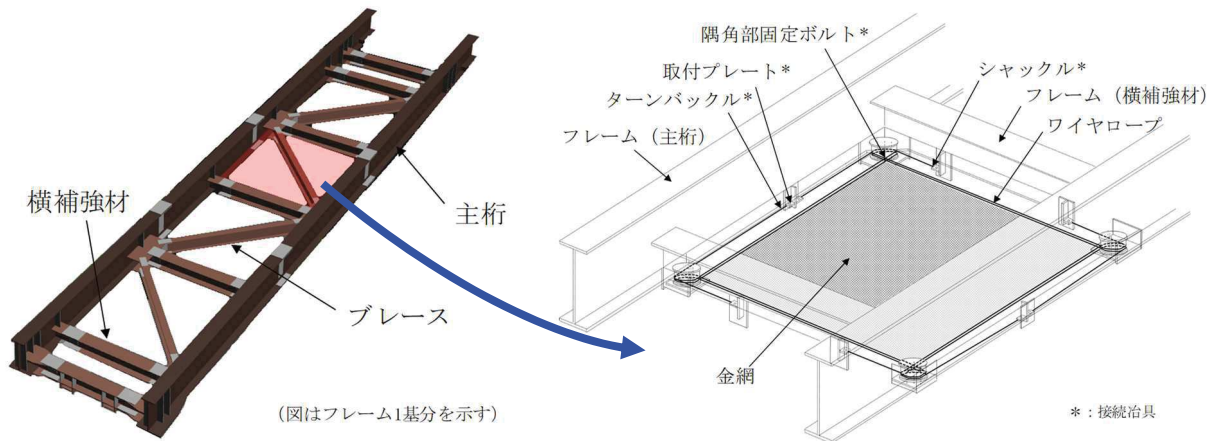


図 2-2 ネットのフレーム取付け概要図

(3) 防護板の構造概要

竜巻防護ネットを構成する防護板は、地震時に発生する変位を踏まえて確保しているフレーム間のクリアランス並びにフレーム及び海水ポンプ室補機ポンプエリア側壁間のクリアランスから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内に侵入しない構造とし、飛来物による衝突に対し、貫通しない部材厚さを確保する設計とする。防護板の配置概要図を図 2-3 に示す。

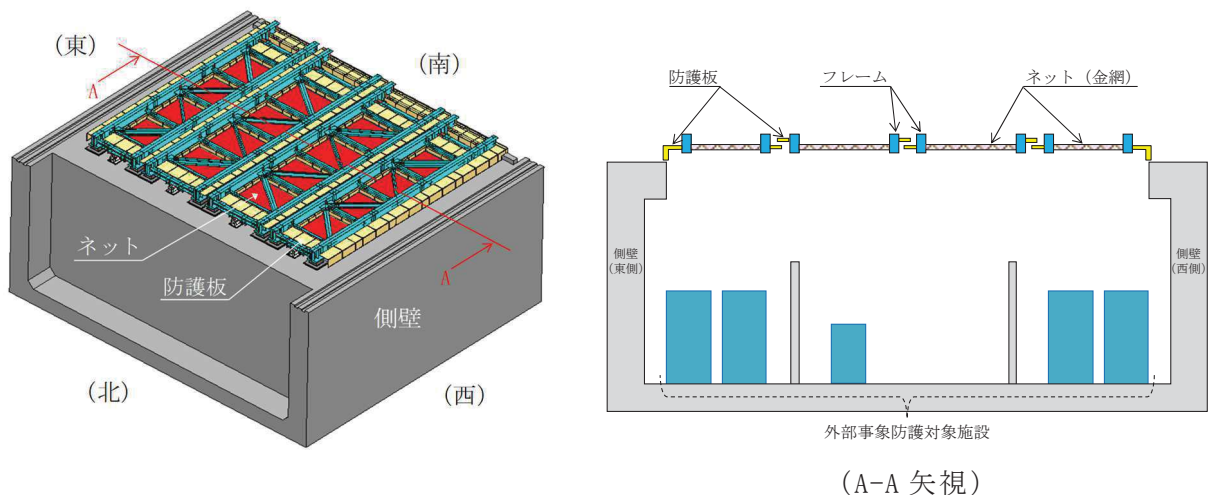


図 2-3 防護板の配置概要図

(4) フレーム及び大梁の構造概要

竜巻防護ネットの支持部材は、フレーム、大梁、可動支承、ゴム支承等により構成する。このうち、フレームは主桁、横補強材、ブレース等により構成し、上載するネット及び防護板を支持する構造とする。また、大梁は海水ポンプ室補機ポンプエリアの南側隔壁上に設置し、海水ポンプ室補機ポンプエリアの北側隔壁と大梁にて、フレームを支持する構造とする。フレーム及び大梁は、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考慮すべき荷重に対し、飛来物が外部事象防護対象施設に衝突することを防止し、また、上載するネット及び防護板の自重並びにネット、防護板及び支持部材への飛来物の衝突時の荷重に対し、これらを支持する構造強度を有する設計とする。

また、ゴム支承及び可動支承に支持されているフレーム並びにゴム支承に支持されている大梁は、地震力等によって水平方向の変位が生じることから、他の設備との干渉について考慮する必要がある。そのため、フレーム間及びフレームや大梁と海水ポンプ室補機ポンプエリア壁面との間に地震時に発生する変位を踏まえてクリアランスを確保する設計とする。

なお、フレームにはストッパーを取り付け、フレームを支持するゴム支承に期待しない場合でも、フレームの水平方向移動を拘束し、竜巻防護ネットが落下せず、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えない構造とする。フレーム及び大梁の配置概要図を図 2-4 に示す。

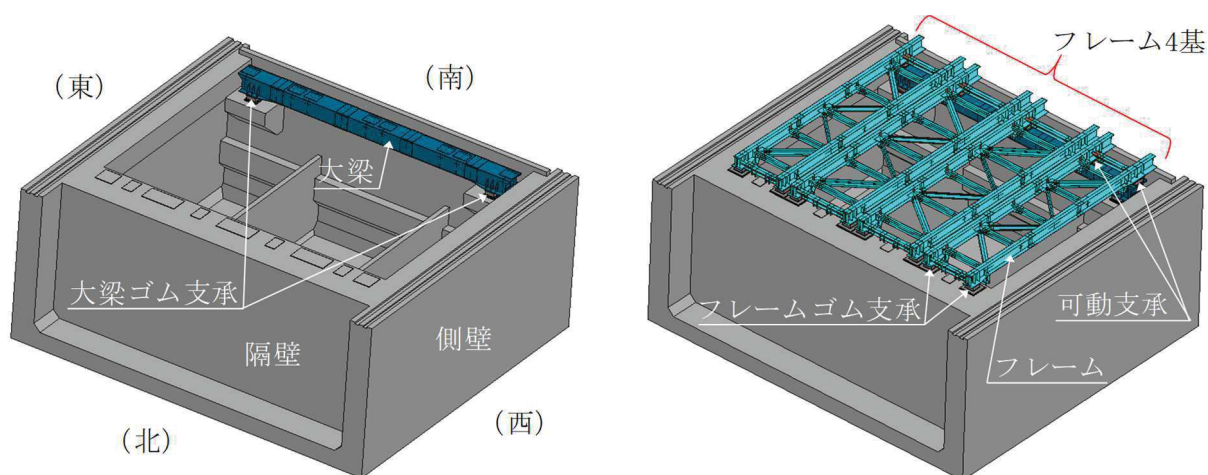


図 2-4 フレーム及び大梁の配置概要図

(5) ゴム支承及び可動支承の構造概要

支持部材のうちゴム支承及び可動支承については、地震によるフレーム及び大梁の発生応力並びに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設置する。支持部材に作用する荷重は、アンカーボルトを介して、海水ポンプ室躯体に伝達する構造とする。

ゴム支承はフレームと北側隔壁の接続部及び大梁と南側隔壁の接続部に設置する。フレームと北側隔壁の接続部には、フレーム 1 基に対して、北側隔壁の天面に 2 個のゴム支承を取り付け、フレームを支持する構造とする。大梁と南側隔壁の接続部は、片側 1 箇所あたり 2 個のゴム支承を取り付けることで、ゴム支承によりフレーム及び大梁を支持する構造とする。

可動支承は大梁とフレームの接続部に設置する。可動支承は南北方向の水平変位に追従し、フレーム 1 基に対して、2 個の可動支承を取り付けることで、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構造とする。

ゴム支承及び可動支承は、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考慮すべき荷重に対し、上載するネット及び防護板の自重並びにネット、防護板及び支持部材への飛来物の衝突時の荷重に対し、これらを支持する構造強度を有する設計とする。竜巻防護ネットの支持構造模式図を図 2-5 に示す。

また、竜巻防護ネットに使用するゴム支承は道路橋用ゴム支承であり、地震時水平力分散型ゴム支承に分類される。ゴム支承は、「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編（平成 14 年 3 月）」（以下「道路橋示方書」という。）に従い、「道路橋支承便覧（平成 16 年 4 月）」（以下「道路橋支承便覧」という。）に則り、設計・製作するものであり、ゴム支承の特性、評価式及び許容値は同規格・基準に従う。ゴム支承の構造図を図 2-6 に、可動支承の構造図を図 2-7 に示す。

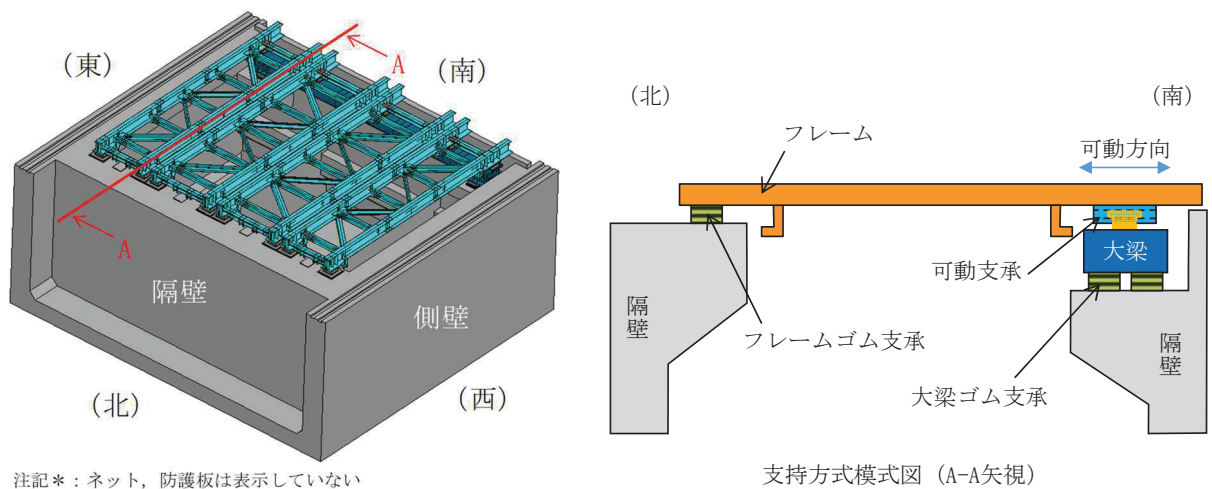


図 2-5 竜巻防護ネットの支持構造模式図

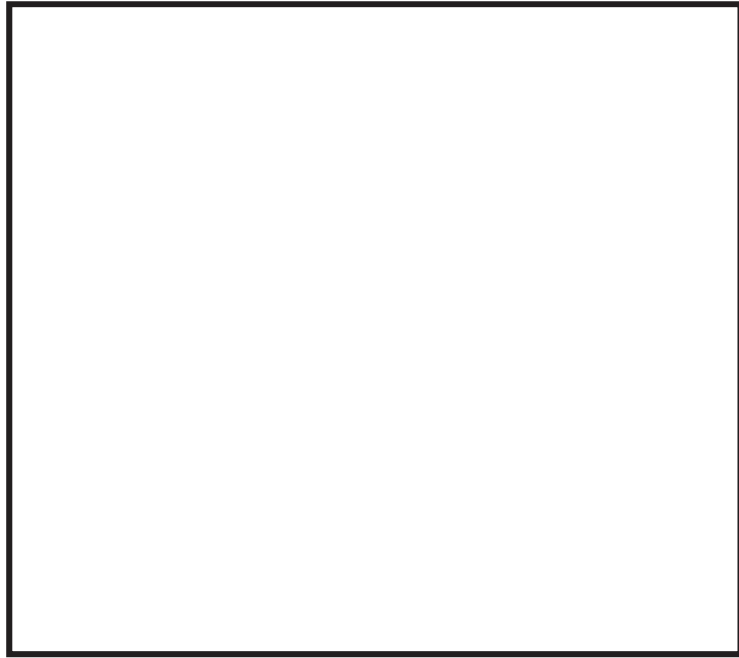


図2-6 ゴム支承の構造図



図2-7 可動支承の構造図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(6) 詳細設計による竜巻防護ネットの構造について

竜巻防護ネットの構造については、海水ポンプ室の補強部材配置及び非常用海水ポンプのメンテナンス性を考慮した配置設計を実施している。設置許可段階における構造概要との比較を図 2-8 及び表 2-1 にそれぞれ示す。また、表 2-1 を踏まえ詳細設計を反映した仕様比較について表 2-2 に示す。なお、これらの構造変更によって、設置許可段階で説明している竜巻防護ネットの設計方針を変更するものではない。

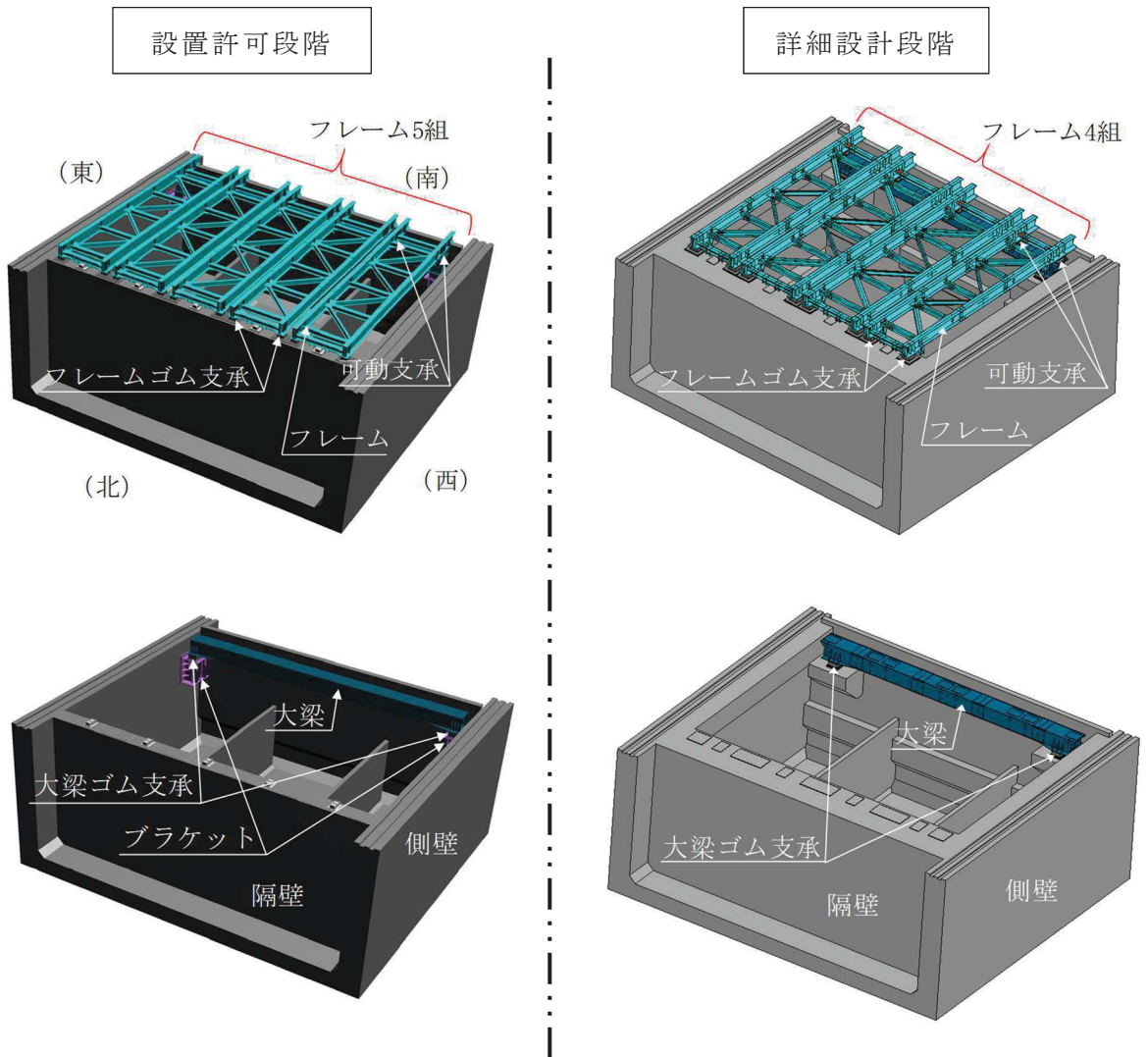


図 2-8 竜巻防護ネット構造概要比較

表 2-1 竜巻防護ネットの構造比較

	設置許可段階	詳細設計段階	備考
a. フレーム 基数変更	フレーム基数 : 5 基	フレーム基数 : 4 基	東西側壁補強に伴い東西方向開口幅が狭くなったことを詳細設計に反映(フレーム幅を調整)した。
b. 大梁の支持位置の変更	既設東西隔壁にブラケットを設置し大梁を支持	海水ポンプ室補強計画に合わせ、補強する南側隔壁にて大梁を支持	東西側壁補強に伴い東西方向開口幅が狭くなったことで、ポンプ吊上げ等のメンテナンス性に影響を及ぼす可能性があるため、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。

表 2-2 竜巻防護ネット主要仕様比較

項目		設置許可段階	詳細設計段階
総質量		約 500ton	約 358ton
全体形状		約 29m (東西方向) × 約 24m (南北方向) 高さ 約 1m	約 26m (東西方向) × 約 23m (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	— (変更なし)
	寸法	線径 : φ 4mm 目合い寸法 : 主ネット 50mm, 補助ネット 40mm	— (変更なし)
	主要材料	硬鋼線材, 亜鉛めっき鋼線	— (変更なし)
フレーム	数量	5 組	4 組
	寸法	長さ×幅×高さ : 約 23m×4.3m×1m	長さ×幅×高さ : 約 23m×5.4m×1m 約 23m×4.3m×1m
	主要材料	SM490A, SM400A, SS400	— (変更なし)
大梁	寸法	長さ×幅×高さ : 約 26m×1.5m×1.5m	長さ×幅×高さ : 約 25m×1.6m×1.3m
	主要材料	SM520B, SM490A	SM490A
ゴム支承	仕様	水平力分散型	— (変更なし)
	数量	大梁用 : 4 個 (2 組 (2 個/組)) 隔壁用 : 10 個 (5 組 (2 個/組))	大梁用 : 4 個 (2 組 (2 個/組)) フレーム用 : 8 個 (4 組 (2 個/組))
可動支承	数量	10 個 (5 組 (2 個/組))	8 個 (4 組 (2 個/組))
防護板	材料	SM400A, SS400	SM400A
耐震 クラス	—	C (S s)	— (変更なし)

3. 設置許可段階における主な説明事項

(1) 竜巻防護ネットの各部位の設計方針

竜巻防護ネット各部位に対する設計方針については、表 3-1 のとおり説明している。また、別紙 1 に示すとおり、先行プラントとの設計方針についても比較し、支持構造に相違はあるが、「竜巻に対する設計の基本方針」、「竜巻防護ネットの設計方針」、「支持部材の設計方針」及び「評価項目」に対して、先行プラントとの相違はないことを確認している。

表 3-1 竜巻防護ネット各部位に対する設計方針*

部位の名称		設計方針	評価項目
ネット (金網部)		ネットは、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、主要な部材が破断せず、たわみが生じても、非常用海水ポンプ等の機能喪失に至る可能性がある飛来物が非常用海水ポンプ等と衝突しないよう捕捉できる設計とする。	吸収エネルギー評価
			破断評価
			たわみ評価
防護板		防護板は、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、飛来物が防護板を貫通せず、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。	貫通評価
支持部材	フレーム	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。	貫通評価
	大梁		支持機能評価
	ブラケット		
	フレーム ゴム支承		
	大梁ゴム 支承		
	可動支承		
	ストッパー		

注記*：本表は EP まとめ資料 6 条（竜巻）-別添 1-添付 3.7-10 表 6 抜粋

(2) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響

設置許可段階では、構造成立性を見通しを確認するため、竜巻防護ネットを構成する支持部材に対し、代表的な飛来物衝突の解析評価を以下の2ステップで実施した。各ステップの評価フロー図を図3-1に示す。

【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）と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実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）として衝突解析を行い、構造成立性の確認を行った。

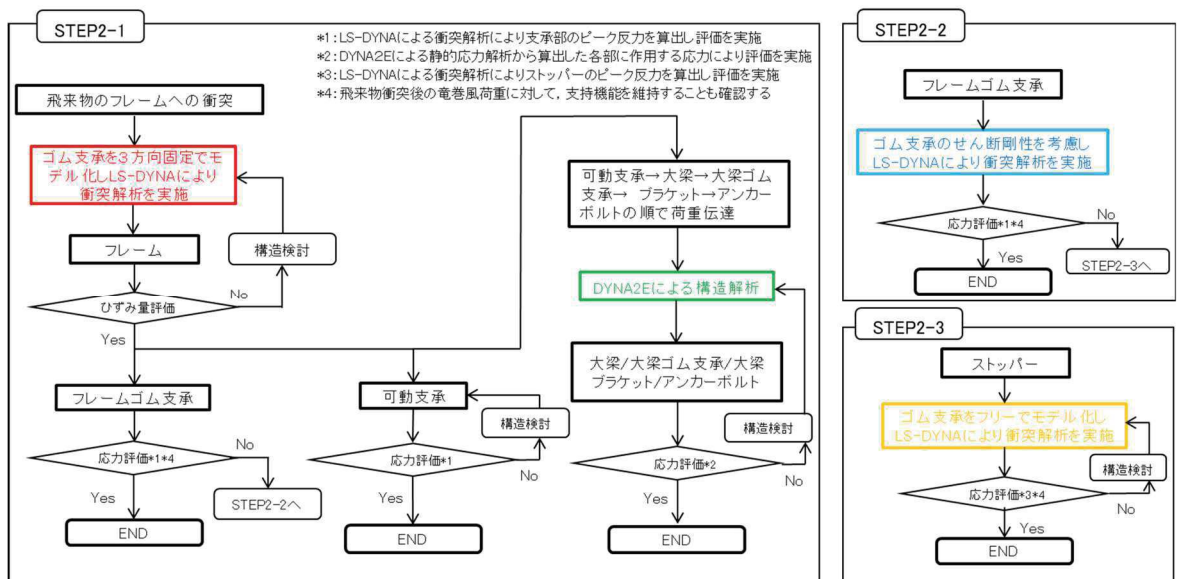
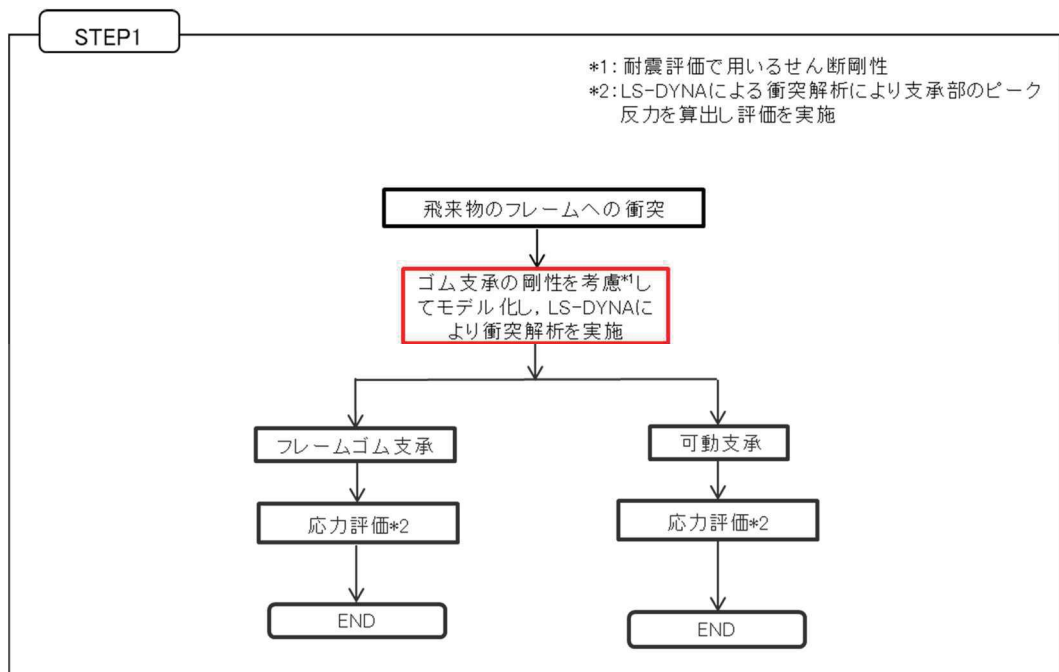


図 3-1 各ステップの評価フロー図*

(注記*: 本図は EP まとめ資料 6 条 (竜巻) -別添 1-添付 3.7-28 図 14 抜粋)

また、衝突解析における耐震評価時に用いるせん断剛性の適用性（別紙 2 参照）や、構造成立性の見通し（別紙 3 参照）を踏まえ、詳細設計段階における設計方針（説明事項）について、設置許可段階で以下のとおり整理している（別紙 4 参照）。

- ① 詳細設計段階では現実に即した解析モデルとして、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。
- ② 設置許可段階での構造成立性の見通し時に用いた評価フローを組み替え、詳細設計段階の評価フローを設定する。
- ③ 可動支承について、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、許容値を超える結果となったため、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、許容値を満足させる方針とする。
- ④ 基本ケースによる各部材の設計を実施した後に、不確かさケースの確認として、ゴム支承の剛性のばらつきを考慮した解析モデルの設定、衝突姿勢の影響を考慮した衝突解析（飛来物の長辺衝突）を実施し、評価を実施する方針とする。

4. 詳細設計段階における設計方針

(1) 設置許可段階の設計方針との比較

設置許可段階で説明している設計方針に対する、詳細設計段階での設計方針との相違について、支持部材の一部変更はあるものの、設計方針に変更がないことを確認した。確認した結果について表 4-1 に示す。

表 4-1 設置許可段階の設計方針に対する比較

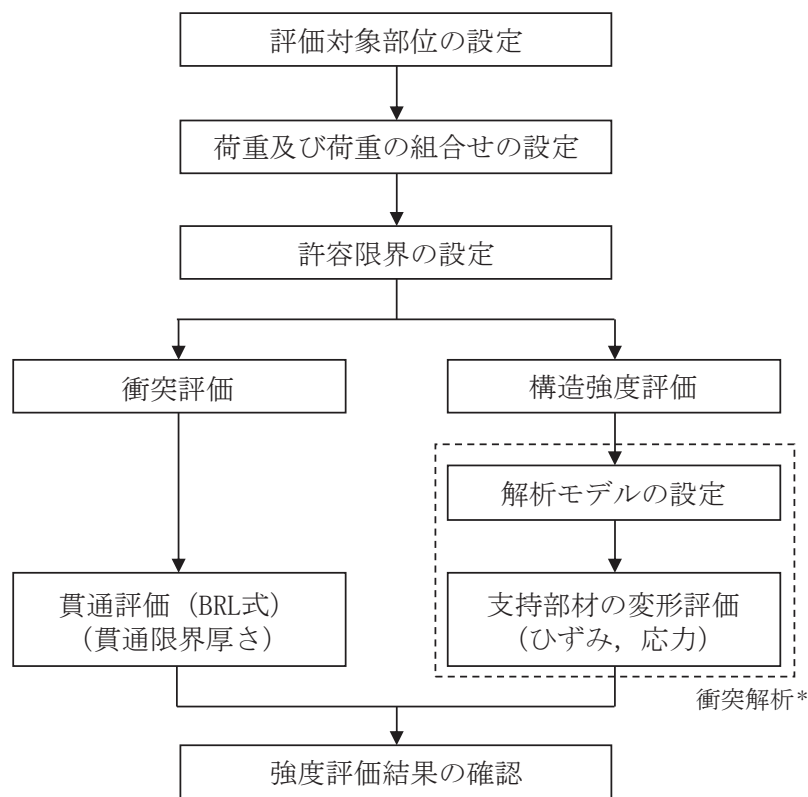
設置許可段階の設計方針			詳細設計段階における方針との相違
部位の名称	設計方針	評価項目	
ネット (金網部)	ネットは、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が非常用海水ポンプ等へ衝突することを防止するために、主要な部材が破断せず、たわみが生じても、非常用海水ポンプ等の機能喪失に至る可能性がある飛来物が非常用海水ポンプ等と衝突しないよう捕捉できる設計とする。	吸収エネルギー評価	無し
		破断評価	無し
		たわみ評価	無し
防護板	防護板は、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が非常用海水ポンプ等へ衝突することを防止するために、飛来物が防護板を貫通せず、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。	貫通評価	無し
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。	貫通評価	無し
		支持機能評価	無し
			無し
			*1
			無し
			無し
			無し

注記*1:「2. (6) 詳細設計による竜巻防護ネットの構造について」に示す構造により、ブラケットは設置しない。

(2) 詳細設計段階における設計フロー

詳細設計段階での説明事項を踏まえ、竜巻防護ネットの衝突解析において基本ケース及び不確かさケースを設定し評価を実施する。詳細設計段階における竜巻防護ネットの支持部材の評価フロー図を図 4-1 に示す。また、詳細設計段階における説明事項に対する対応方針について、別紙 5 に示す。

支持部材の評価に当たり、解析モデルの設定においては、現実に即したゴム支承の特性を踏まえたゴム支承の剛性を設定することとし、特性試験の実施及び試験により得られた知見を踏まえた剛性の設定の考え方について次章に示す。



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

図 4-1 詳細設計における竜巻防護ネット支持部材の評価フロー図

5. 衝突解析に係るゴム支承の剛性の設定

5.1 ゴム支承剛性の設定方針

衝突解析におけるゴム支承の剛性は、道路橋支承便覧より算出する設計値を基に設定することとする。ここで、支持部材のモデル化については、ゴム支承をばね要素としてモデル化し、ゴム支承の荷重－変位の関係である剛性をばね定数として設定している。また、竜巻防護ネット周囲の構造物の設置状況や防護板の設置の考慮により、飛来物はゴム支承には直接衝突せず、フレームに衝突し、ゴム支承に荷重が伝達する。竜巻防護ネットへの飛来物衝突のイメージを図 5-1 に示す。

ゴム支承のせん断剛性については、各種依存性試験を実施し、衝突解析への適用性について設置許可段階にて説明している（別紙 2 参照）。詳細設計段階においても、構造変更による影響は軽微であることから、設置許可段階で適用した条件と同様の設定方針とする。

なお、せん断剛性に係る各種依存性試験については「補足-600-12 竜巻防護ネットの耐震構造設計（支承構造）についての補足説明資料」に示す。

一方、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性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。そのため、鉛直剛性に係る特性試験を実施し、設計値を適用することの妥当性及びばらつき範囲を確認する。衝突解析における鉛直剛性の設定フロー図について図 5-2 に示す。特性試験の実施及びゴム支承の鉛直剛性の設定に当たっては、飛来物の衝突による影響が大きいと想定する衝突位置・方向を考慮する観点から、図 5-1 に示すゴム支承直上のフレームに飛来物が鉛直衝突するケースについて検討する。

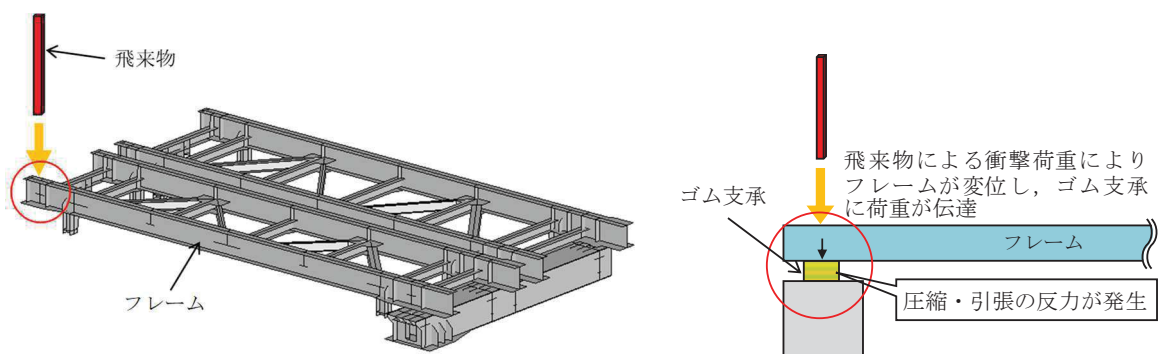


図 5-1 竜巻防護ネットへの飛来物衝突のイメージ

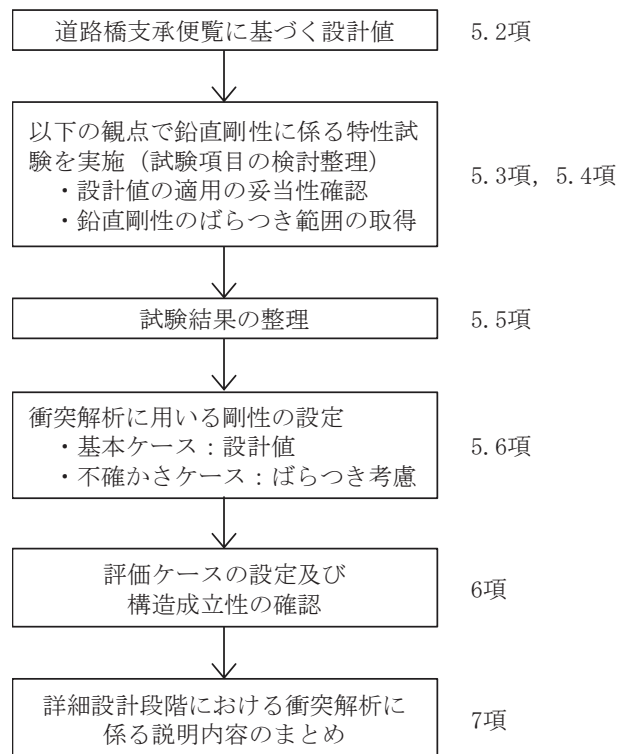


図 5-2 衝突解析における鉛直剛性の設定フロー図

5.2 道路橋支承便覧に基づくせん断剛性及び鉛直剛性の設計値

竜巻防護ネットに採用しているゴム支承の構造諸元を表 5-1 に示す。ここで、表 5-1 に示しているせん断剛性及び鉛直剛性は、道路橋支承便覧に基づき、以下の式により算出する設計値である。

表 5-1 ゴム支承の構造諸元

項目	諸元
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	800 mm×800 mm
総ゴム厚 (ゴム厚×層数)	192 mm (24 mm×8 層)
せん断弾性係数	1.0 N/mm ² (G10)
一次形状係数	8.33
二次形状係数	4.17
せん断剛性	3.33 kN/mm
鉛直剛性	972 kN/mm

$$K_s = \frac{G_e \cdot A_e}{\Sigma t_e} \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

$$K_v = \frac{E \cdot A_e}{\Sigma t_e} \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

$$E = \alpha \cdot \beta \cdot S_1 \cdot G_e \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

$$S_1 = \frac{A_e}{2 \cdot (a + b) \cdot t_e} \quad (0.5 \leq \frac{b}{a} \leq 2.0 \text{ のとき}) \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

ここで、

- K_s : ゴム支承のせん断剛性 (N/mm)
- K_v : ゴム支承の鉛直剛性 (圧縮ばね定数) (N/mm)
- G_e : ゴムのせん断弾性係数 (=1.0N/mm²)
- A_e : ゴム支承本体の側面被覆ゴムを除く面積 (mm²)
- Σt_e : 総ゴム厚 (mm)
- E : ゴム支承の縦弾性係数 (N/mm²)
- α : ゴム支承の種類による係数 (=35)
- β : ゴム支承の平面形状による係数 (=1.0)
- S_1 : 一次形状係数
- a : 橋軸方向の有効寸法 (mm)
- b : 橋軸直角方向の有効寸法 (mm)
- t_e : ゴム一層の厚さ (mm)

上記のとおり、剛性値はゴム支承の形状によって定まる値であるが、鉛直剛性については、ゴム支承の圧縮性を考慮して定められたものであることが道路橋支承便覧から読み取れる。また、ゴム支承の性能の検証として、道路橋支承便覧では圧縮ばね定数が設計値に対して±30%以内であることを確認を要求しており、竜巻防護ネットで用いるゴム支承においても、製品検査時に圧縮ばね定数の初期ばらつきが設計値の±30%以内であることを確認することから、この製品初期ばらつきの±30%について、鉛直剛性のばらつき範囲設定条件の1つとして考慮することとする。

5.3 鉛直剛性に係る特性試験項目整理及び試験方法

「5.1 ゴム支承剛性の設定方針」及び「5.2 道路橋支承便覧に基づくせん断剛性及び鉛直剛性の設計値」を踏まえ、ゴム支承の鉛直剛性に係る特性試験を実施する。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(J I S K 6 4 1 1 : 2 0 1 2)」(以下「J I S K 6 4 1 1」という。)及びせん断剛性の各種依存性試験を参考に、設計における適用条件を踏まえて試験項目及び試験条件を設定する。試験項目の比較整理を表5-2に、鉛直剛性に係る特性試験項目を表5-3にそれぞれ示す。また、各試験の実施フロー図について図5-3に示す。

試験体は、J I S K 6 4 1 1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に対して実施する。試験体諸元を表5-4に示す。

表 5-2 試験項目の比較

J I S K 6 4 1 1		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	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	—
	せん断特性	試験体に一定の圧縮力を載荷した状態でのせん断変形を与え、せん断特性を求める。	—	道路橋支承値を 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 $1\text{N}/\text{mm}^2$ 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。	—	—
	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 $1\text{N}/\text{mm}^2$ 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。	—	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。
	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 $1\text{N}/\text{mm}^2$ 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。	—	—

表 5-2 試験項目の比較

J I S K 6 4 1 1		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	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の繰返し数 を与え、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繰返し加 振み 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、せん断繰返し加振を 50 回 による正負繰返し加振を算出する。 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繰返し加 振み 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。	—	—
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

表 5-2 試験項目の比較

J I S K 6 4 1 1		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	備考
	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。熱老化後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。	—	—
耐久性	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、圧縮特性及びひせん断特性の繰返し回数による依存性を求める。	—	繰返しによる せん断剛性に 関する試験で ないため対象 外	繰返しによる せん断剛性に 関する試験で ないため対象 外
繰速変形特性	繰速変形特性	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	—

表 5-3 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	(1) 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 圧縮力：0.5～8.0N/mm ² 引張力：0.5～-2.0N/mm ²
	(2) 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	(3) 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
	(4) 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℃の 6 水準
	(5) 熟老化特性	熟老化試験により熟老化前後の圧縮／引張剛性の経年変化を求める。	試験体数：1 体 熟老化：23℃×60 年相当
	(6) 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

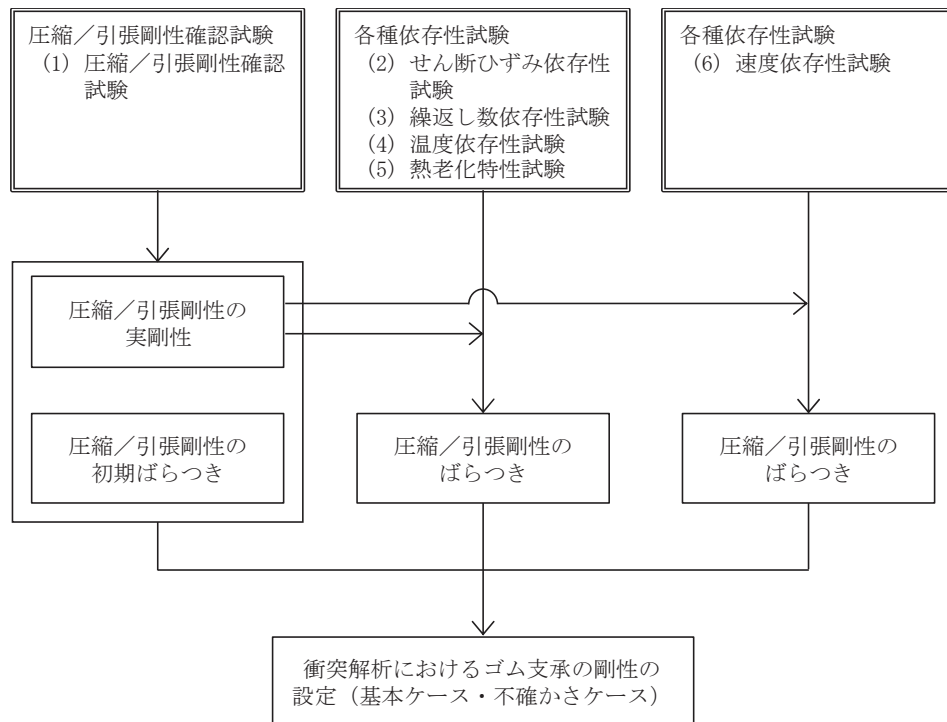


図 5-3 鉛直剛性に係る特性試験の実施フロー図

表 5-4 試験体の諸元

試験	測定項目	試験体		
		適用規格	形状	せん断 弾性係数
(1) 圧縮／引張剛性確認 (2) せん断ひずみ依存性 (3) 繰返し数依存性 (4) 温度依存性 (6) 速度依存性	圧縮剛性 引張剛性	J I S K 6 4 1 1 標準試験体 No. 3*	有効平面寸法 400mm×400mm 総ゴム厚 54mm (9mm×6層)	G10 1.0N/mm ²
(5) 熟老化特性		J I S K 6 4 1 1 標準試験体 No. 2*	有効平面寸法 240mm×240mm 総ゴム厚 30mm (5mm×6層)	

注記*： J I S K 6 4 1 1 で寸法等が規定されている試験体

(1) 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/mm² 程度に相当する鉛直荷重を原点として、圧縮応力度 8.0N/mm² による圧縮試験及び引張応力度 2.0N/mm² 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、J I S K 6 4 1 1 及び道路橋支承便覧を参考に 1.5～6.0N/mm² とし、引張側は、引張応力度の許容値を基に 0～2.0N/mm² とする。試験結果は、(4) 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。

(2) 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/mm² 程度に相当する鉛直荷重を原点として、圧縮応力度 8.0N/mm² による圧縮試験及び引張応力度 2.0N/mm² 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。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、J I S K 6 4 1 1 及び道路橋支承便覧を参考に 1.5～6.0N/mm² とし、引張側は、引張応力度の許容値を基に 0～2.0N/mm² とする。試験結果は、(4) 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。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。

(3) 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 回載荷し、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、J I S K 6 4 1 1 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、(4) 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。

(4) 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、J I S K 6 4 1 1 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。

(5) 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、J I S K 6 4 1 1 及び道路橋支承便覧を参考に 1.5～6.0N/mm² とし、引張側は、引張応力度の許容値を基に 0～2.0N/mm² とする。試験結果は、(4)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。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。

(6) 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。以下に、運動量保存則及び衝突解析によるゴム支承の変形速度の評価について示す。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により、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する。

a. 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。(図 5-4 参照)

以上の条件から、運動量保存則から以下の式が成り立つ。

$$m v = (m + M) V \cdots \textcircled{1}$$

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)

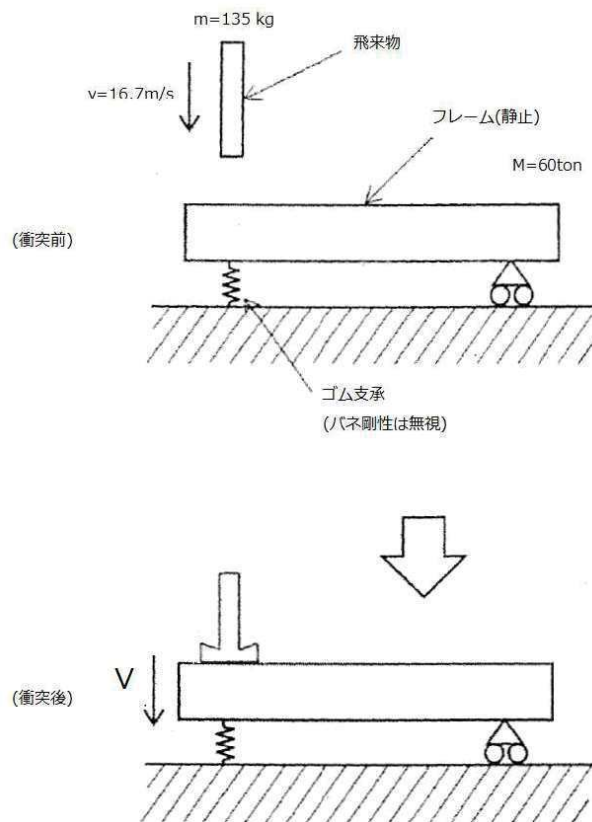


図 5-4 飛来物衝突前後のイメージ

①式より,

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

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。

b. 衝突解析によるゴム支承の変形速度の評価

(a) 解析モデル

速度依存性試験条件を確認するために実施した衝突解析のモデル図を図 5-5 に示す。

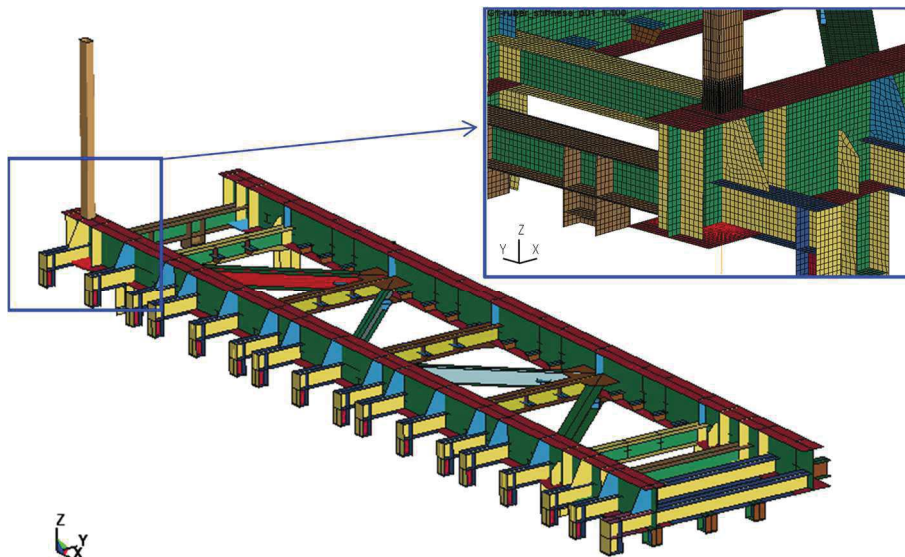


図 5-5 解析モデル図

(b) 飛来物諸元

飛来部諸元を表 5-5 に示す。

表 5-5 飛来物諸元

	鋼製材
寸法 (m)	4.2×0.3×0.2
質量 (kg)	135
水平方向の飛来速度 (m/s)	46.6
鉛直方向の飛来速度 (m/s)	16.7

(c) 荷重条件

本解析はゴム支承の鉛直方向変形速度の評価を目的としていることから、荷重条件としては、飛来物の衝撃荷重のみを考慮した。

(d) 拘束条件

拘束条件を表 5-6 に示す。ゴム支承のせん断剛性は道路橋支承便覧に基づく設計値を入力し、鉛直剛性については、設計値に対して 1/100~100 倍までの範囲でパラメータスタディを実施した。

表 5-6 拘束条件

方向	フレームゴム支承	可動支承
X	設計値 (3.33 kN/mm)	自由
Y	設計値 (3.33 kN/mm)	拘束
Z	設計値 (972 kN/mm) を基準に, 「(f) 解析ケース」に示す条件で実施	拘束

(e) 材料物性等

イ. 材料の応力-ひずみ関係

材料の応力-ひずみ関係は、バイリニア型とした。

材料に適用する応力-ひずみ関係の概念図を図 5-6 に示す。

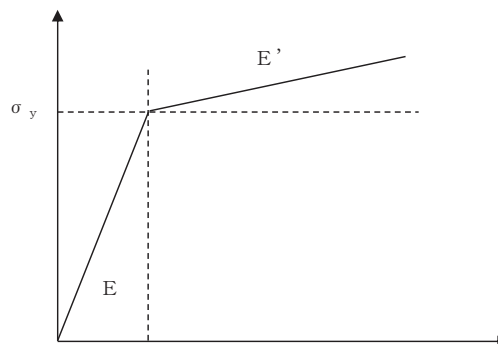


図 5-6 応力-ひずみ関係の概念図

ロ. ひずみ速度依存性

竜巻による飛来物に対する解析は、衝撃問題で変形速度が大きいため、衝突時の鋼材のひずみ速度による影響を Cowper-Symonds 式により考慮する。

$$\sigma_D = \sigma_S \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right\}$$

ここで、 σ_D は動的応力、 σ_S は静的応力、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、 C 及び p はひずみ速度依存性のパラメータである。

ひずみ速度依存性パラメータを表 5-7 に示す。

表 5-7 ひずみ速度依存性パラメータ

	飛来物 (鋼製材)	竜巻防護ネット (フレーム)	
材質	SS400	SM400	SM490
C (1/s)			
p			

ハ. 破断ひずみ

衝突解析における許容限界は、鋼材の破断ひずみを設定する。破断ひずみについては、J I Sに規定されている伸びの下限値を基に設定するが、「NEI07-13 : Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」においてTF（多軸性係数）を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮して設定する。

(f) 解析ケース

解析ケースを表 5-8 に示す。

表 5-8 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				

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(g) 解析結果

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図 5-7 に示す。最大速度はおおむね衝突直後の圧縮側で生じている。また、各解析ケースにおける鉛直剛性と最大速度の関係を表 5-9 及び図 5-8 に示す。ゴム支承の変形速度は鉛直剛性が小さいほど大きくなり、鉛直剛性が大きくなると変形速度は小さくなる傾向となった。

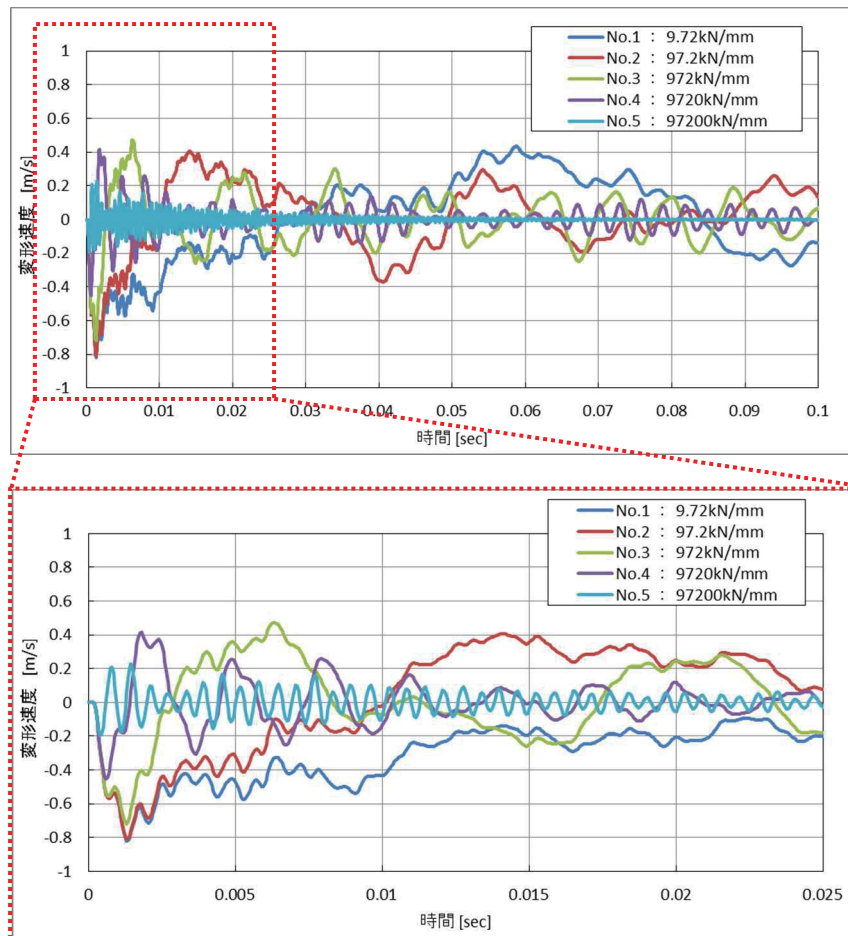


図 5-7 飛来物衝突位置直下のゴム支承変形速度履歴

表 5-9 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

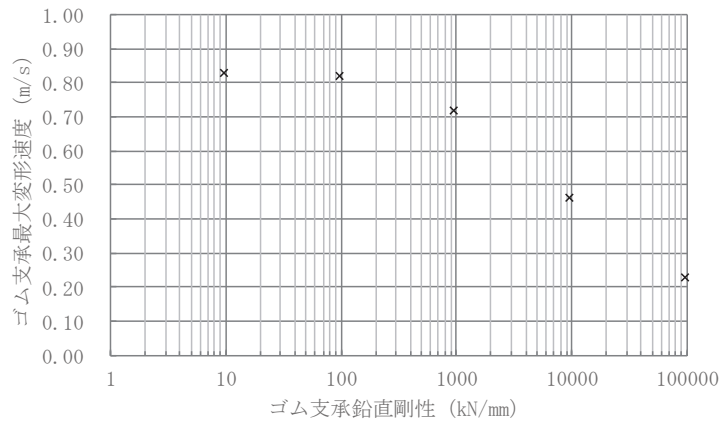


図 5-8 ゴム支承の鉛直剛性と最大変形速度の関係

c. 試験条件

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。

5.4 試験装置

(1)～(5)の試験には 2MN 二軸試験機，(6)の試験には落錘式衝撃試験装置を用いる。試験装置の主な仕様を表 5-10 及び表 5-11 に，試験装置の概要を図 5-9～図 5-11 に示す。

表 5-10 2MN 二軸試験機の主な仕様

項目		2MN 二軸試験機	制御系	計測
鉛直方向	最大荷重	2000kN (圧縮) 1000kN (引張)	荷重制御 変位制御	荷重 変位
	最大変位	300mm		
水平方向	最大荷重	±400kN	変位制御 (正弦波，矩形波，三角波)	荷重 変位
	最大変位	±200mm		
	最大速度	630mm/s		

表 5-11 落錘式衝撃試験装置の主な仕様

種類	落錘式衝撃試験装置
最大衝撃力	圧縮方向：2000kN 引張方向：500kN
最大衝突速度	3m/s (落下高さ 0.5m)
錘最大重量	3000kg

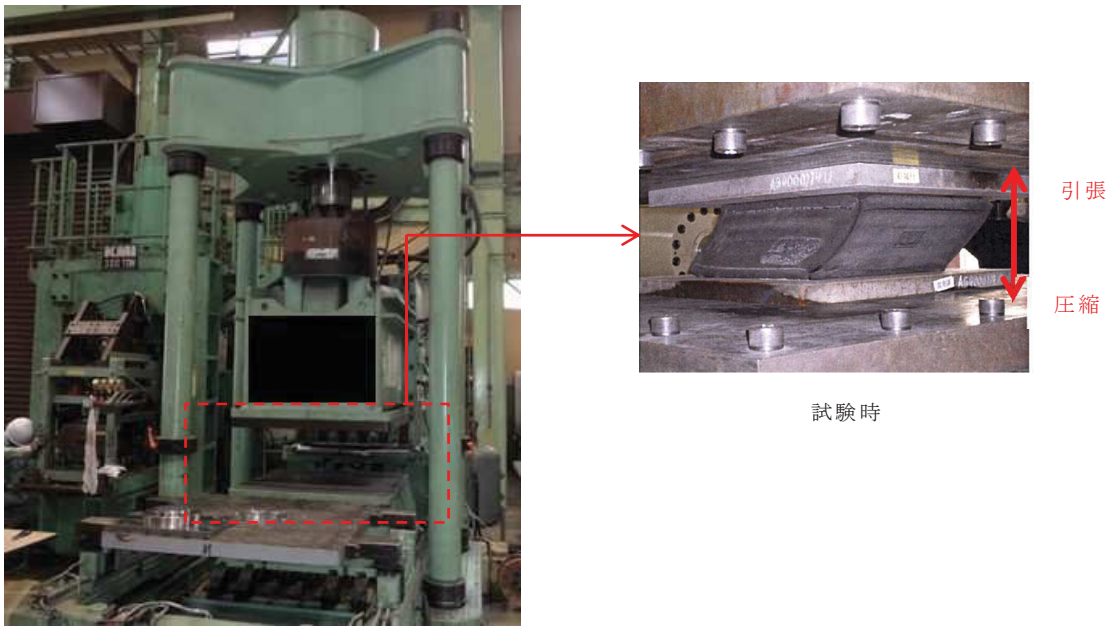


図 5-9 試験装置（2MN 二軸試験機）の外観

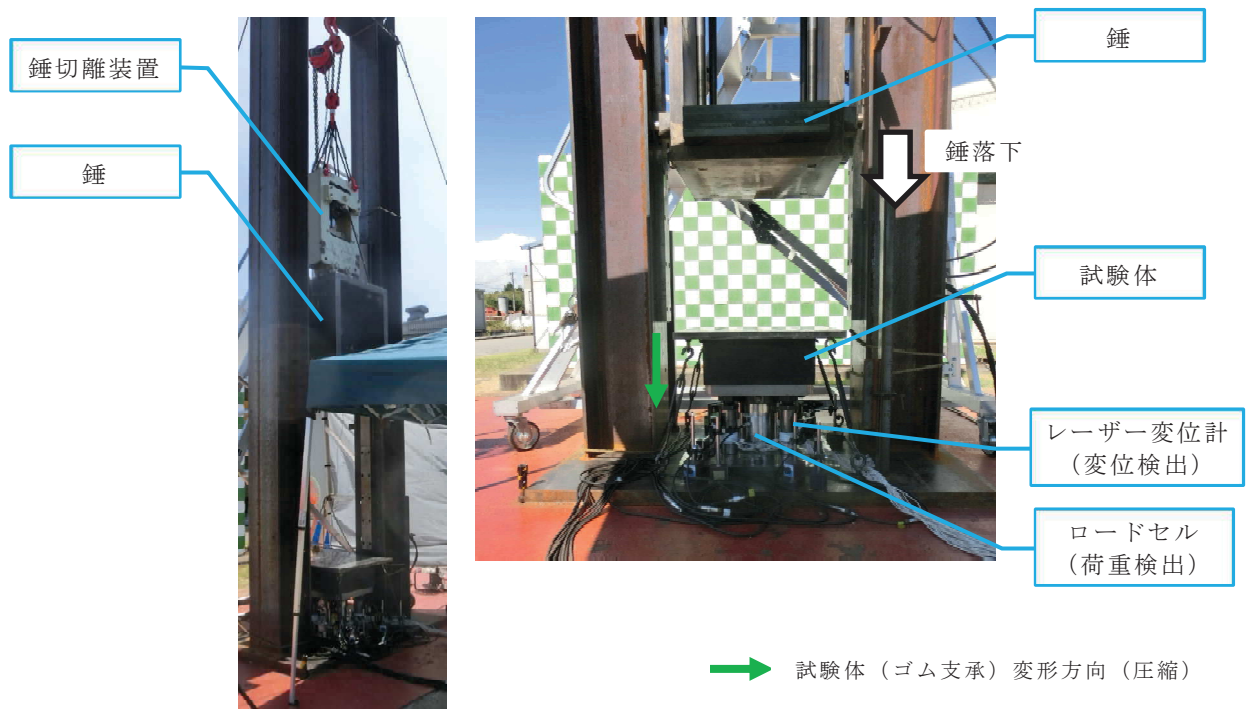


図 5-10 試験装置（落錘式衝撃試験装置）の外観（圧縮側）

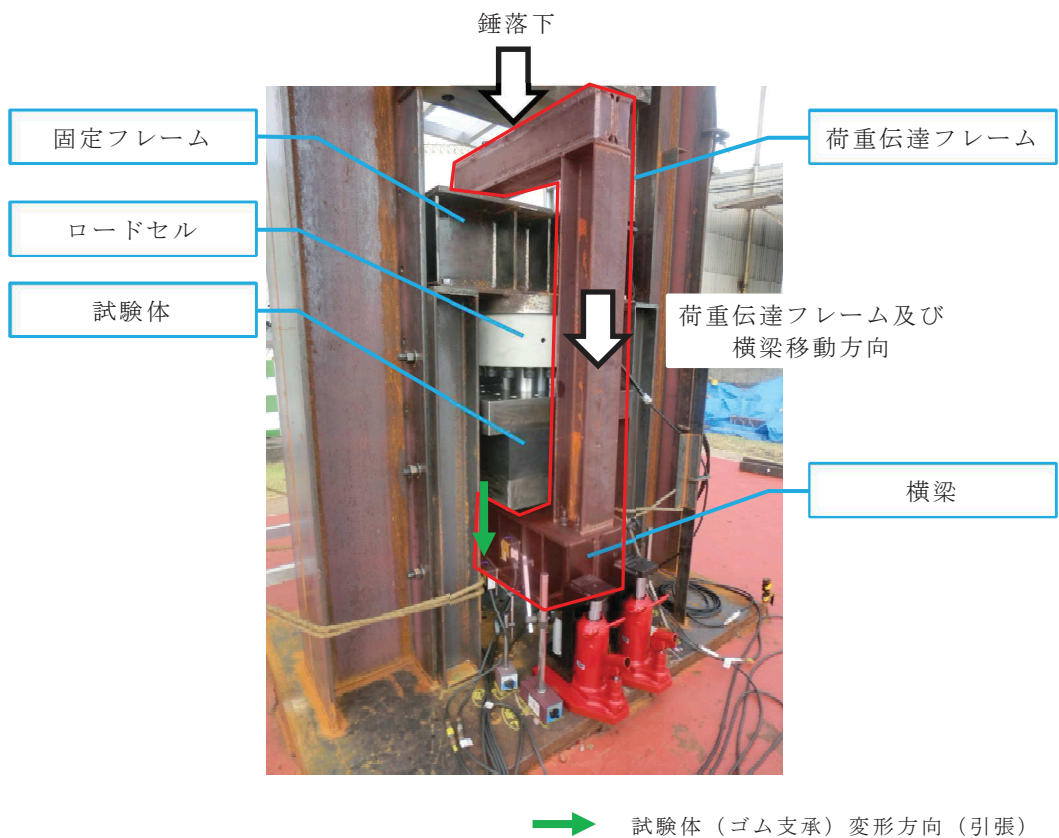
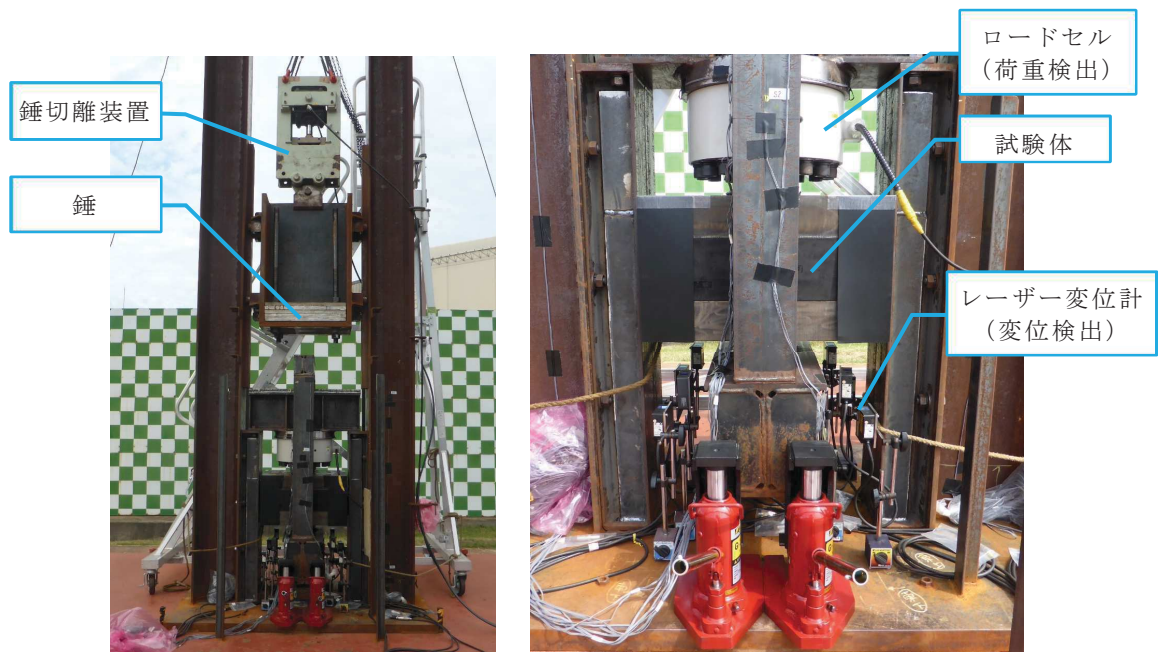


図 5-11 試験装置 (落錐式衝撃試験装置) の外観 (引張側)

5.5 試験結果

各種試験より得られた鉛直剛性特性結果を図 5-12～図 5-18 に示す。以下にその結果を記載する。

(1) 圧縮／引張剛性確認試験

図 5-12 に示す結果より、圧縮剛性は式 (5.2) 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、圧縮剛性の基準値は式 (5.2) から求める設計値とし、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、図 5-13 に示す結果より、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。

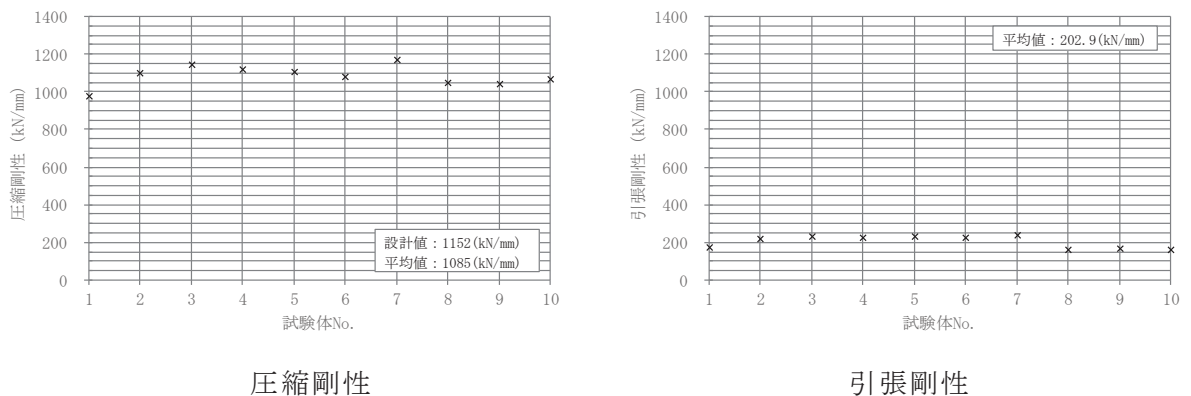


図 5-12 圧縮／引張剛性確認試験結果（算出値）

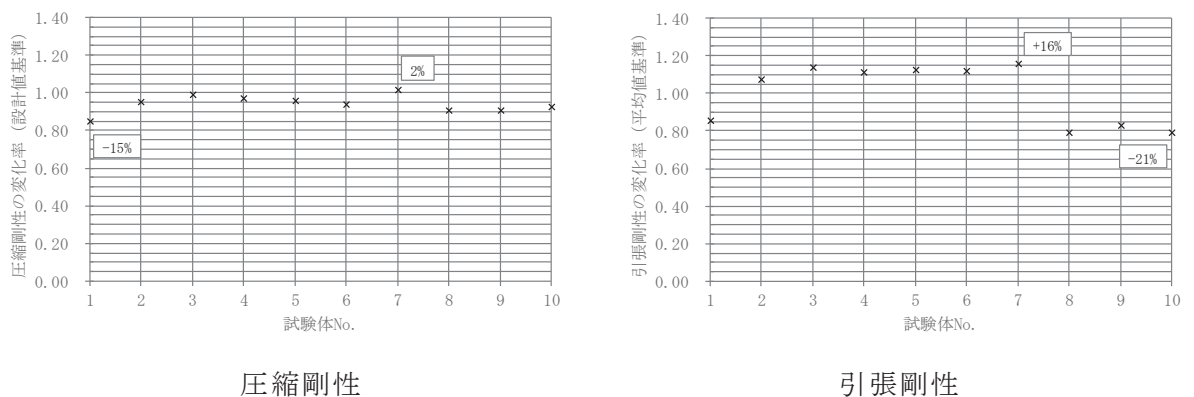


図 5-13 圧縮／引張剛性確認試験結果（変化率）

(2) せん断ひずみ依存性試験

竜巻防護ネットの強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せを考慮し、水平方向に竜巻による風荷重が負荷された状態でのゴム支承に生じるせん断ひずみを想定し、せん断ひずみ 0%を基準に、せん断ひずみ 100%までの範囲を確認している。

図 5-14 に示す結果より、圧縮剛性はせん断ひずみの増加により最大で-11%程度の変化率となることが分かった。一方、引張剛性については最大で-2%程度であり、せん断ひずみの増加によらずほぼ一定の傾向を示すことが分かった。

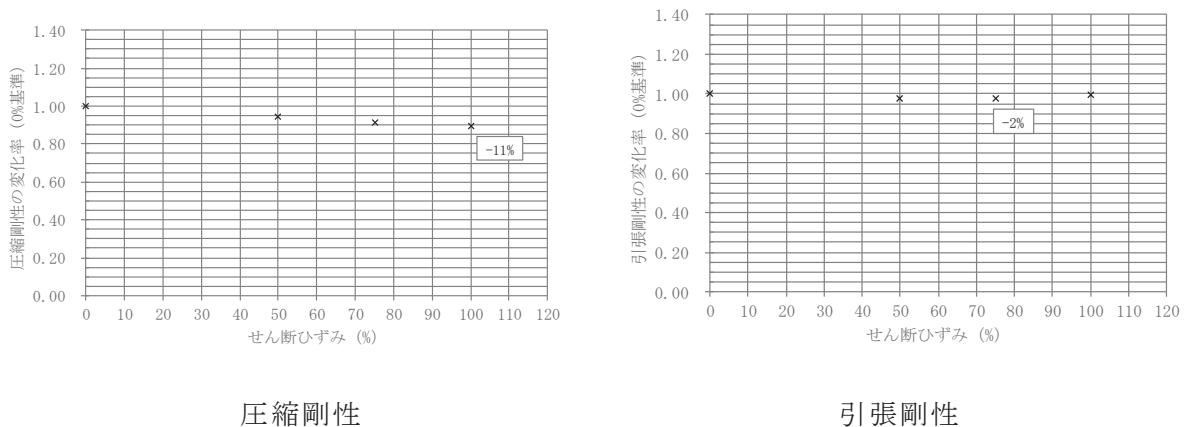


図 5-14 せん断ひずみ依存性試験結果

(3) 繰返し数依存性試験

図 5-15 に示す結果より、50 回の正負繰返し加振後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。

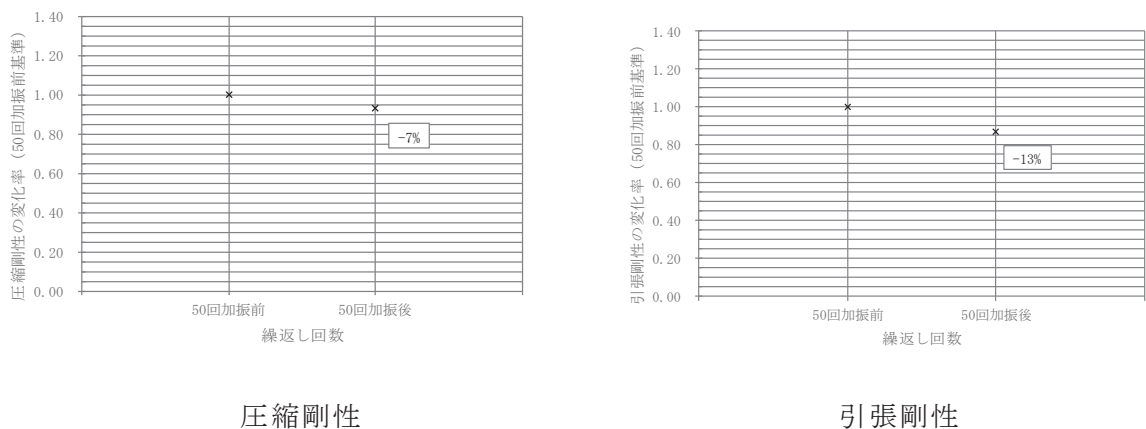
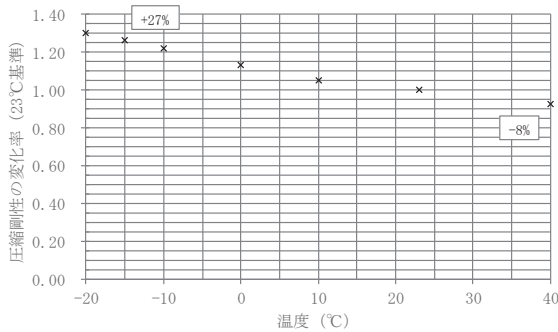


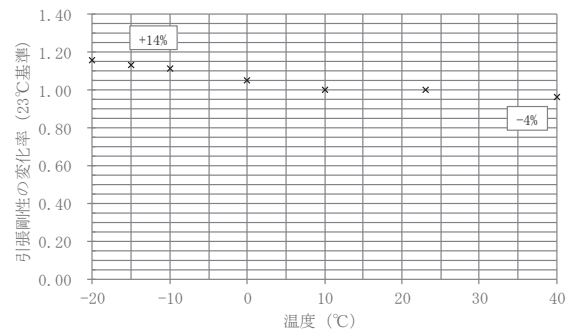
図 5-15 繰返し数依存性試験結果

(4) 温度依存性試験

図 5-16 に示す結果より，低温になるほど剛性が大きくなることが分かる。基準温度 23℃に対する圧縮及び引張剛性の変化率は，女川 2 号機の環境条件を踏まえて，-15℃から 40℃までの範囲を確認しており，圧縮剛性については，-15℃では+27%程度，40℃では-8%程度となること，引張剛性については，-15℃では+14%程度，40℃では-4%程度となることが分かった。



圧縮剛性*



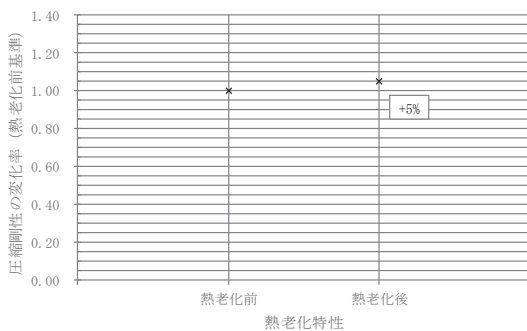
引張剛性*

注記* : -15℃の結果は補正式より算出

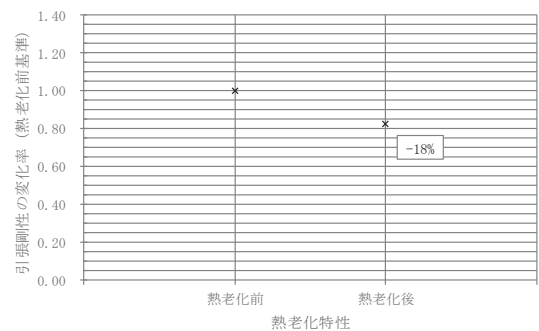
図 5-16 温度依存性試験結果

(5) 熱老化特性試験

図 5-17 に示す結果より，使用期間 60 年相当の熱老化に対する圧縮及び引張剛性の変化率は，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。



圧縮剛性



引張剛性

図 5-17 熱老化特性試験結果

(6) 速度依存性試験

図 5-18 より、圧縮剛性の速度依存性試験について、「5.3(6)c. 試験条件」にて設定した試験条件（ゴムの変形速度）を満足していることを確認した。また、結果のばらつきや変形速度が大きくなるにしたがい、剛性が低下する傾向が見られるが、一般に速度依存性は変形速度の増加により剛性が高くなることから、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ものと考えられる。

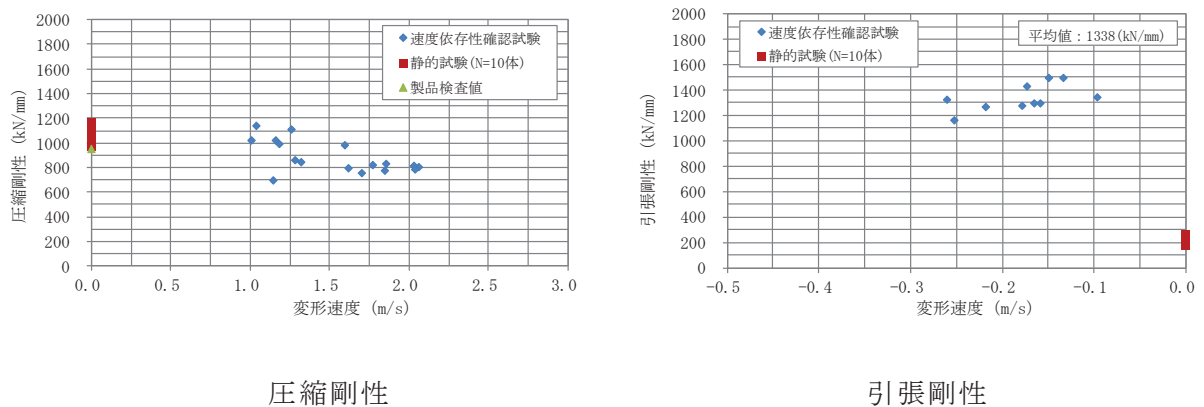


図 5-18 速度依存性試験結果

5.6 試験結果を踏まえた剛性の設定

竜巻防護ネットの衝突解析においては、設置許可段階で実施したせん断剛性の各種依存性試験及び鉛直剛性に係る特性試験結果より得られたばらつきについて、飛来物衝突解析に反映し、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構造健全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) せん断剛性

各種依存性試験結果を適用し、道路橋支承便覧から求める設計値（3.33 kN/mm）に対するばらつきをプラス側とマイナス側それぞれ考慮する。せん断剛性のばらつきを表 5-12 に示す。

なお、試験結果については、「補足-600-12 竜巻防護ネットの耐震構造設計（支承構造）についての補足説明資料」に示す。

表 5-12 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	3.33
繰返し数依存性	—	-10%
温度依存性	+25%	-5%
熱老化依存性	+10%	—
初期ばらつき	+10%	-10%
積算値	+45%	-25%
考慮するばらつき範囲	+50%	-30%
ばらつきを考慮した剛性値（kN/mm）	5.00	2.33

(2) 鉛直剛性

「5.5 試験結果」の試験結果を踏まえ、圧縮剛性については、道路橋支承便覧から求める設計値（972 kN/mm）と同程度の剛性であることを確認したことから、せん断剛性と同様に、設計値に対するばらつきをプラス側とマイナス側それぞれ考慮する。また、引張剛性については、圧縮剛性とは異なる特性が試験により得られたことから、これらを包含するようなばらつき範囲を設定する。具体的には、「5.5(1) 圧縮／引張剛性確認試験」の引張剛性試験において、低い剛性を示したことから、マイナス側は、この静的な引張剛性試験結果を踏まえたばらつきを考慮する。また、「5.5(6) 速度依存性試験」において、静的な引張剛性試験結果より大きい剛性を示したことを踏まえ、プラス側は速度依存性試験結果を踏まえたばらつきを考慮する。鉛直剛性のばらつきを表 5-13 に示す。

表 5-13 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	1130* ¹	972	171* ²
初期ばらつき* ³	+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)
ばらつきを 考慮した剛性値 (kN/mm)	1700* ⁴		42.7* ⁵	

注記*1：速度依存性試験結果を，以下のとおり基準値として考慮する。

$$(\text{実機ゴム支承の圧縮剛性の基準値}) \times \frac{(\text{J I S 試験体の速度依存性試験結果の平均値})}{(\text{J I S 試験体の圧縮剛性の基準値})}$$

$$= 972 \times \frac{1338}{1152}$$

$$= 1128 \div 1130 \text{ (kN/mm)}$$

*2：引張剛性試験結果を，以下のとおり基準値として考慮する。

$$(\text{実機ゴム支承の圧縮剛性の基準値}) \times \frac{(\text{J I S 試験体の引張剛性試験結果の平均値})}{(\text{J I S 試験体の圧縮剛性の基準値})}$$

$$= 972 \times \frac{202.9}{1152}$$

$$= 171.1 \div 171 \text{ (kN/mm)}$$

*3：5.2項に示す初期ばらつきを考慮する。

*4：圧縮剛性及び引張剛性のばらつきの大きい方を考慮する。

*5：圧縮剛性及び引張剛性のばらつきの小さい方を考慮する。

(3) 衝突解析におけるゴム支承の剛性設定

以上を踏まえ、竜巻防護ネットの構造強度評価（衝突解析）におけるゴム支承の剛性の基本ケース及び不確かさケースについて表 5-14 に示す。

表 5-14 衝突解析におけるゴム支承の剛性値

	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	

6. 評価ケースの設定方針及び構造成立性の確認

設置許可段階での説明事項（別紙3参照）を踏まえ、衝突解析の評価ケースの設定方針を整理する。評価ケースの設定に当たっては、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を踏まえ、飛来物の衝突する方向が安全側の設計となるように設定する。また、前章までに説明した衝突解析におけるゴム支承の剛性設定を踏まえ、代表的な評価ケースに対して構造成立性を確認する。

(1) 評価ケースの設定

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は、飛来物の衝突を考慮する部材の検討、構造及び荷重伝達経路を考慮して飛来物衝突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する。また、各評価ケースにおける衝突解析結果を踏まえて、ゴム支承の剛性の不確かさや飛来物の姿勢の不確かさの影響について評価する。

a. 飛来物の衝突を考慮する部材の検討

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する。

表6-1に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示す。また、これを踏まえ、衝突解析における解析モデルは、3次元FEMによりフレーム、大梁及び鋼製材をシェル要素でモデル化する。解析モデル図を図6-1に示す。また、フレーム配置図を図6-2に、飛来物衝突位置を示した解析モデル図を図6-3にそれぞれ示す。表6-1に示す評価ケースを基本ケースとし、評価結果については「VI-3-別添1-2-1-1竜巻防護ネットの強度計算書」にて説明する。また、不確かさケースとしてゴム支承の剛性の不確かさ及び飛来物の姿勢の不確かさの影響について評価した結果について「補足説明資料710-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書の補足説明資料」にて説明する。

表 6-1 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(1/7) 評価ケース

飛来物衝突部材	構造及び荷重伝達経路	b. 評価対象	評価に対する考え方	ケース	衝突位置	衝突方向	備考
a. 飛来物衝突部材 主桁 (フレーム G1)	【構造】 主桁は、北側はフレームゴム支承により支持され、ゴム支承はアンカールトにて海水ポンプ室躯体に固定されている。南側は可動支承及び大梁により支持されており、大梁はゴム支承により支持され、ゴム支承はアンカールトにて海水ポンプ室躯体に固定されている。また、2つの主桁は横補強材により連結している。 【荷重伝達経路】 北側：主桁⇒フレームゴム支承⇒アンカールト⇒海水ポンプ室躯体 南側：主桁⇒可動支承⇒大梁⇒ゴム支承⇒アンカールト⇒海水ポンプ室躯体 また、水平方向衝突による西側主桁から東側主桁への荷重伝達は、横補強材を経由する。	主桁	主桁自身への影響を確認するため、曲げの影響が大きい主桁中央と衝突荷重が集中する主桁端部への水平/鉛直方向の衝突を考慮する。ただし、設置許可段階での評価結果を踏まえて、ケース G1-EW-3 を評価ケースとして選定する。	G1-EW-1	端部 (南側)	水平 EW	(別紙 3 ⑤水平(EW)-1 に対応)
				G1-EW-2	中央	水平 EW	(別紙 3 ⑥水平(EW)-2 に対応)
				G1-EW-3	端部 (北側)	水平 EW	(別紙 3 ⑦水平(EW)-3 に対応)
				G1-NS-1	端部	水平 NS	(別紙 3 ④水平(NS)-1 に対応)
				G1-V-1	端部 (南側)	鉛直	(別紙 3 ①鉛直-1 に対応)
				G1-V-2	中央	鉛直	(別紙 3 ②鉛直-2 に対応)
				G1-V-3	端部 (北側)	鉛直	(別紙 3 ③鉛直-3 に対応)
				G1-EW-1	端部 (南側)	水平 EW	横補強材への影響を確認するため、横補強材に近い位置で衝突荷重が集中するよう、横補強材取付位置近傍の主桁中央及び主桁端部への水平方向の衝突を考慮する。 なお、鉛直衝突に対しては、主桁の方が十分に曲げ剛性が高く、横補強材には有意な荷重が伝達されないと考えられるため対象外とする。
				G1-EW-2	中央	水平 EW	
				G1-EW-3	端部 (北側)	水平 EW	
				G1-EW-1	端部 (南側)	水平 EW	大梁に対しての影響を確認するため、大梁に近い位置で衝突荷重が集中するよう、可動支承近傍の主桁端部への水平/鉛直方向の衝突を考慮する。ただし、設置許可段階での評価結果を踏まえて、ケース G1-V-1 を評価ケースとして選定する。
				G1-NS-1	端部	水平 NS	
				G1-V-1	端部 (南側)	鉛直	

表 6-1 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(2/7) 評価ケース

飛来物衝突部材	構造及び荷重伝達経路	b. 評価対象	評価に対する考え方	ケース	衝突位置	衝突方向	備考	
主桁 (フレームム G1)	<p>【構造】</p> <p>主桁は、北側はフレームムゴム支承により支持され、ゴム支承はアンカーボルトにて海水ポンプ室躯体に固定されている。南側は可動支承及び大梁により支持されており、大梁は大梁ゴム支承により支持され、ゴム支承はアンカーボルトにて海水ポンプ室躯体に固定されている。また、2つの主桁は横補強材により連結している。</p> <p>【荷重伝達経路】</p> <p>北側：主桁⇒フレームムゴム支承⇒アンカーボルト⇒海水ポンプ室躯体</p> <p>南側：主桁⇒可動支承⇒大梁⇒大梁ゴム支承⇒アンカーボルト⇒海水ポンプ室躯体</p> <p>また、水平方向衝突による西側主桁から東側主桁への荷重伝達は、横補強材を経由する。</p>	フレームムゴム支承	フレームムゴム支承に対しての影響を確認するため、フレームムゴム支承に近い位置で衝突荷重が集中するよう、フレームムゴム支承近傍の主桁端部への水平/鉛直方向の衝突を考慮する。	G1-EW-3	端部 (北側)	水平 EW	—	
					G1-V-3	端部 (北側)	鉛直	—
		大梁ゴム支承	大梁ゴム支承に対しての影響を確認するため、大梁に近い位置で衝突荷重が集中するよう、可動支承近傍の主桁端部への水平/鉛直方向の衝突を考慮する。ただし、設置許可段階での評価結果を踏まえて、ケース G1-V-1 を評価ケースとして選定する。	G1-NS-1	端部	水平 NS	(別紙 3 1 に対応)	
					G1-EW-1	端部 (南側)	水平 EW	(別紙 3 ⑤ 水平 (EW)- 1 に対応)
			可動支承	可動支承に対しての影響を確認するため、可動支承に近い位置で衝突荷重が集中するよう、可動支承近傍の主桁端部への水平/鉛直方向の衝突を考慮する。ただし、設置許可段階での評価結果を踏まえて、ケース G1-EW-1 を評価ケースとして選定する。	G1-V-1	端部 (南側)	鉛直	(別紙 3 ① 鉛直-1 に 対応)
					G1-EW-1	端部 (南側)	水平 EW	(別紙 3 ⑤ 水平 (EW)- 1 に対応)
					G1-NS-1	端部	水平 NS	(別紙 3 ④ 水平 (NS)- 1 に対応)
					G1-V-1	端部 (南側)	鉛直	(別紙 3 ① 鉛直-1 に 対応)

表 6-1 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(3/7) 評価ケース

a. 飛来物衝突部材	構造及び荷重伝達経路	b. 評価対象	評価に対する考え方	ケース	衝突位置	衝突方向	備考
横補強材 (フレーム G1)	【構造】 横補強材は主桁に取り付いている。 主桁は、北側はフレームゴム支承により支持され、ゴム支承はアンカーボルトにて海水躯体に固定されている。 南側は可動支承及び大梁により支持されており、大梁はフレーム支承により支持され、ゴム支承はアンカーボルトにて海水躯体に固定されている。 また、2つの主桁は横補強材により連結している。	主桁	横補強材への衝突により、主桁へ伝達される荷重は両側の主桁に分散されるため、主桁衝突時の主桁評価に包絡される。	-	-	-	-
		横補強材	横補強材自身への影響については、横補強材の上フランジがBRL式による貫通限界板厚以上であることを確認する。	-	-	-	-
	大梁	大梁に対しての影響を確認するため、大梁に近い、可動支承近傍の横補強材への鉛直方向の衝突を考慮する。	G1-V-4	中央	鉛直	-	
			G1-V-5	端部	鉛直	-	
	フレームゴム支承	フレームゴム支承に対しての影響を確認するため、フレームゴム支承近傍に位置する横補強材への鉛直方向の衝突を考慮する。	G1-V-6	中央	鉛直	-	
			G1-V-7	端部	鉛直	-	
	大梁ゴム支承	大梁ゴム支承に対しての影響を確認するため、大梁に近い、可動支承近傍の横補強材への鉛直方向の衝突を考慮する。	G1-V-4	中央	鉛直	-	
			G1-V-5	端部	鉛直	-	
	可動支承	可動支承に対しての影響を確認するため、可動支承近傍に位置する横補強材への鉛直方向の衝突を考慮する。	G1-V-4	中央	鉛直	-	
			G1-V-5	端部	鉛直	-	

表 6-1 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(4/7) 評価ケース

a. 飛来物衝突部材	構造及び荷重伝達経路	b. 評価対象	評価に対する考え方	ケース	衝突位置	衝突方向	備考
主桁 (フレーム G2)	主桁 (フレーム G1) と同 様	主桁	主桁自身への影響を確認するため、曲げの影響が大きい主桁中央と衝突荷重が集中する主桁端部への水平/鉛直方向の衝突を考慮するが、主桁自身の仕様はフレーム G1 と同じため、G1 の評価に包絡される。	-	-	-	-
		横補強材	横補強材への影響を確認するため、横補強材に近い位置で衝突荷重が集中するよう、横補強材取付位置近傍の主桁中央及び主桁端部への水平方向の衝突を考慮するが、G2 には隣接するフレームが配置されていることから対象となる評価ケースは無い。 なお、鉛直衝突に対しては、主桁の方が十分に曲げ剛性が高く、横補強材には有意な荷重が伝達されないと考えられるため対象外とする。	-	-	-	-
		大梁	大梁に対しての影響を確認するため、大梁に近い位置で衝突荷重が集中するよう、可動支承近傍の主桁端部への水平/鉛直方向の衝突を考慮する。 また、大梁の曲げモーメントが大きくなるように、大梁中央に近い方の東側主桁に衝突させる。	G2-NS-1	端部	水平 NS	-
				G2-V-1	端部 (南側)	鉛直	-

表 6-1 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(5/7) 評価ケース

a. 飛来物衝突部材	構造及び荷重伝達経路	b. 評価対象	評価に対する考え方	ケース	衝突位置	衝突方向	備考
主桁 (フレーム G2)	主桁 (フレーム G1) と同 様	フレーム ゴム支承	フレームゴム支承に対しての影響を確認するため、フレームゴム支承に近い位置で衝突荷重が集中するよう、フレームゴム支承近傍の主桁端部への鉛直方向の衝突を考慮する。	G2-V-2	端部 (北側)	鉛直	—
		大梁ゴム 支承	大梁ゴム支承に対しての影響を確認するため、大梁に近い位置で衝突荷重が集中するよう、可動支承近傍の主桁端部への水平/鉛直方向の衝突を考慮する。	G2-NS-1	端部	水平 NS	—
				G2-V-1	端部 (南側)	鉛直	—
		可動支承	可動支承に対しての影響を確認するため、可動支承に近い位置で衝突荷重が集中するよう、可動支承近傍の主桁端部への水平/鉛直方向の衝突を考慮する。	G2-NS-1	端部	水平 NS	—
				G2-V-1	端部 (南側)	鉛直	—

表 6-1 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(6/7) 評価ケース

a. 飛来物衝突部材	構造及び荷重伝達経路	b. 評価対象	評価に対する考え方	ケース	衝突位置	衝突方向	備考
横補強材 (フレームG2)	【構造】 横補強材は主桁に取り付いている。 主桁は、北側はフレームゴム支承により支持され、ゴム支承はアンカーボルトにて海水ポンプ室躯体に固定されている。 南側は可動支承及び大梁により支持されており、大梁は大梁ゴム支承により支持され、ゴム支承はアンカーボルトにて海水ポンプ室躯体に固定されている。 また、2つの主桁は横補強材により連結している。	主桁	横補強材への衝突により、主桁へ伝達される荷重は両側の主桁に分散されるため、主桁衝突時の主桁評価に包絡される。	-	-	-	-
		横補強材	横補強材自身への影響については、横補強材の上フランジがBRL式による貫通限界板厚以上であることを確認する。	-	-	-	-
	大梁	大梁に対しての影響を確認するため、大梁に近い、可動支承近傍の横補強材への衝突を考慮する。	G2-V-3	中央	鉛直	-	
			G2-V-4	端部	鉛直	-	
	フレームゴム支承	フレームゴム支承に対しての影響を確認するため、フレームゴム支承近傍に位置する横補強材への水平/鉛直方向の衝突を考慮する。	G2-V-5	中央	鉛直	-	
			G2-V-6	端部	鉛直	-	
	大梁ゴム支承	大梁に対しての影響を確認するため、大梁に近い、可動支承近傍の横補強材への衝突を考慮する。	G2-V-3	中央	鉛直	-	
			G2-V-4	端部	鉛直	-	
	可動支承	南側：横補強材⇒主桁⇒可動支承⇒大梁⇒大梁ゴム支承⇒アンカーボルト⇒海水ポンプ室躯体 北側：横補強材⇒主桁⇒フレームゴム支承⇒アンカーボルト⇒海水ポンプ室躯体	G2-V-3	中央	鉛直	-	
			G2-V-4	端部	鉛直	-	

表 6-1 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(7/7) 評価ケース

a. 飛来物衝突部材	構造及び荷重伝達経路	b. 評価対象	評価に対する考え方	ケース	衝突位置	衝突方向	備考
大梁	<p>【構造】 大梁は大梁ゴム支承を介してアンカーボルトにて海水ポンプ室躯体に固定されている。</p> <p>【荷重伝達経路】 大梁⇒大梁ゴム支承⇒アンカーボルト⇒海水ポンプ室躯体</p>	主桁	構造上, 有意な荷重が伝達されないため対象外とする。	—	—	—	—
		横補強材	構造上, 有意な荷重が伝達されないため対象外とする。	—	—	—	—
		大梁	大梁自身への影響については, BRU 式による貫通限界板厚以上であることを確認する。	—	—	—	—
		フレーム ゴム支承	構造上, 有意な荷重が伝達されないため対象外とする。	—	—	—	—
		大梁ゴム 支承	B-V-1	中央	鉛直	—	—
			B-V-2	端部	鉛直	—	—
可動支承	構造上, 有意な荷重が伝達されないため対象外とする。	—	—	—	—		

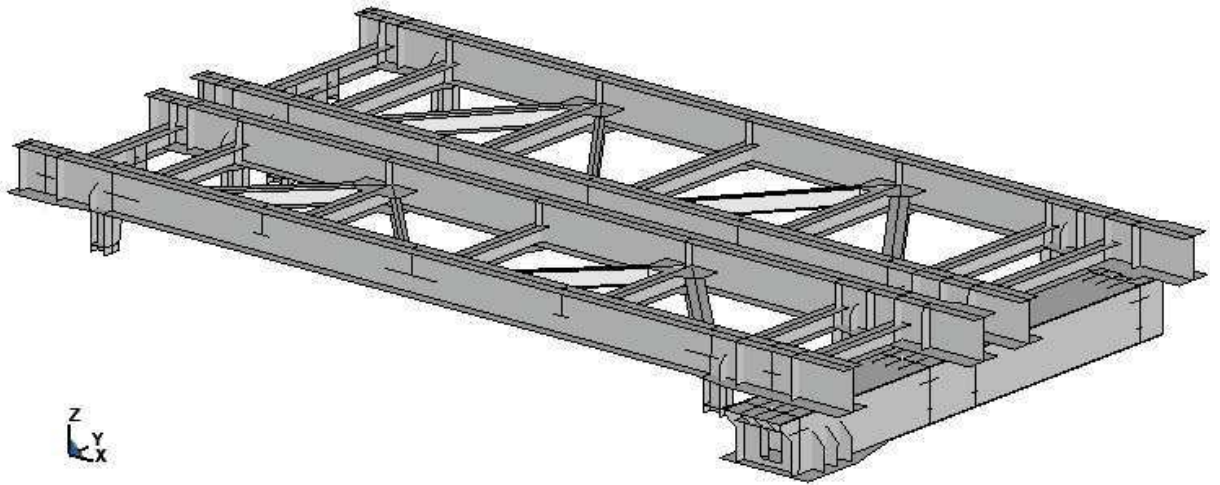


図 6-1 解析モデル図

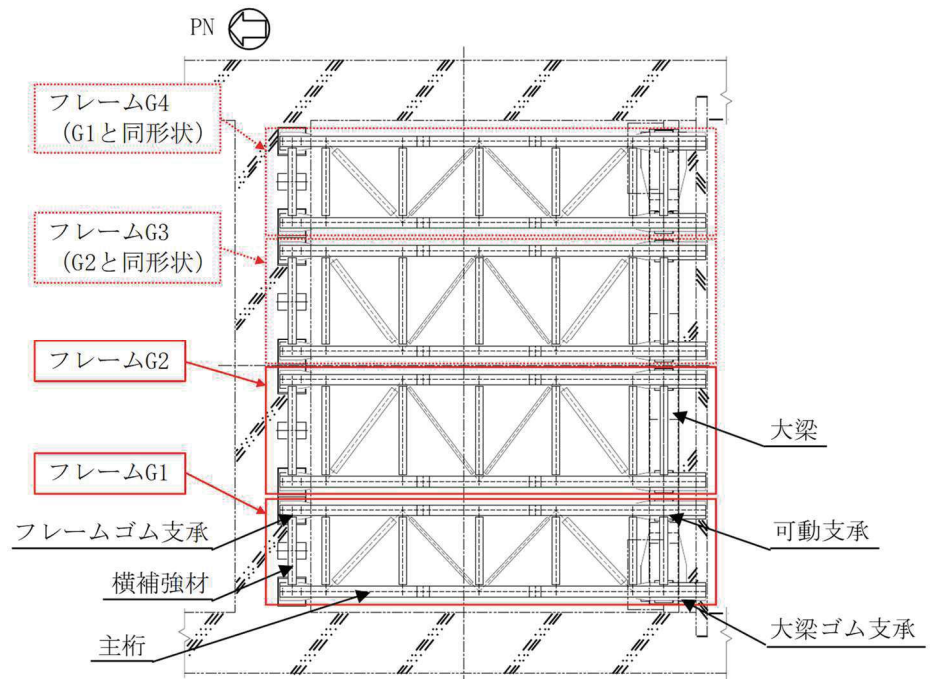
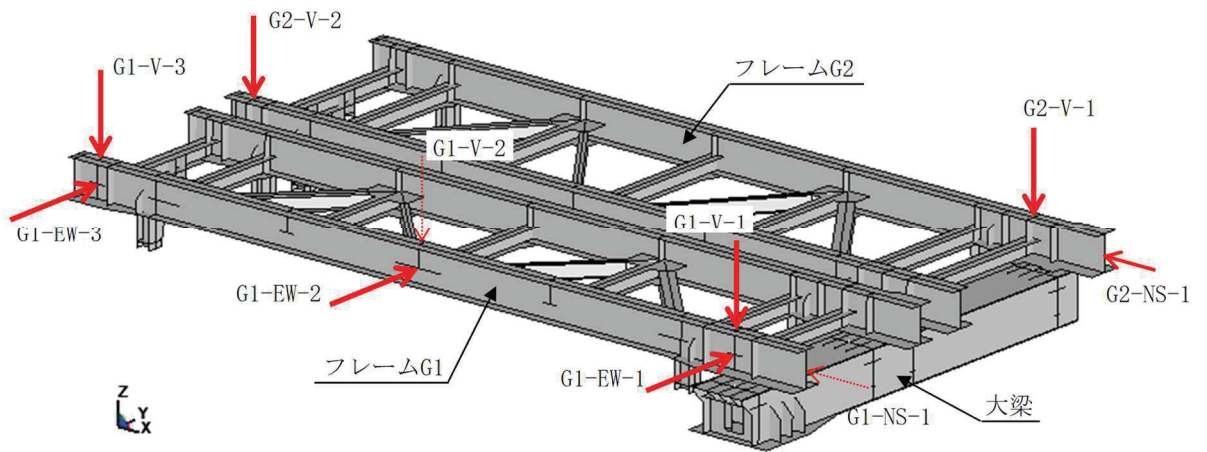
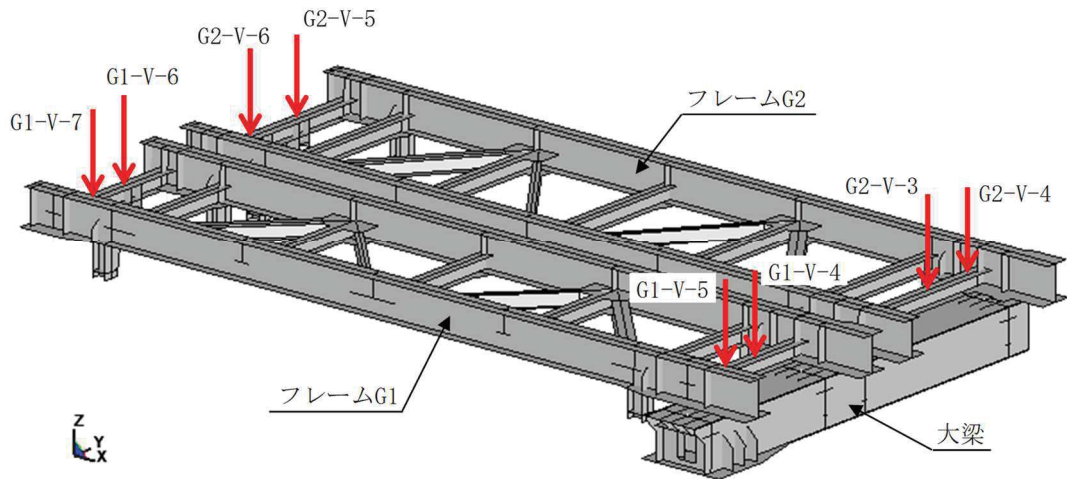


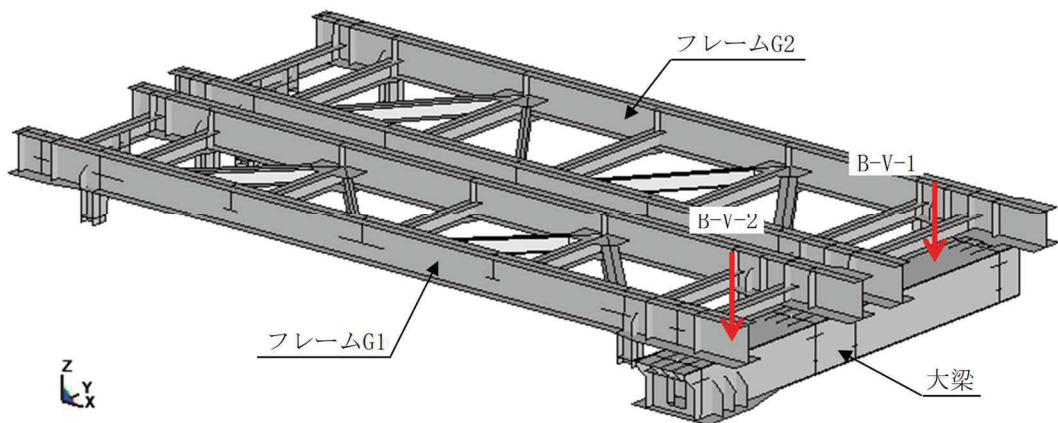
図 6-2 フレーム配置図



(主桁への飛来物衝突)



(横補強材への飛来物衝突)



(大梁への飛来物衝突)

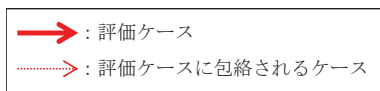


図 6-3 飛来物衝突位置図

(2) 構造成立性の確認

前項で整理した評価ケースのうち，設置許可段階で評価結果が厳しくなることが明らかとなった（別紙 3 参照），フレームゴム支承及び可動支承を対象として，構造健全性を確認する。確認に当たっては，ゴム支承の剛性のばらつきも考慮する。

a. 解析モデル

図 6-1 に示す解析モデルとする。

b. 飛来物諸元

飛来物諸元については，表 5-5 と同様である。

c. 荷重条件

自重，風圧力及び飛来物の衝撃荷重を考慮する。

d. 拘束条件

可動支承の拘束条件については表 5-6 と同様とする。また，ゴム支承については，表 5-14 に示す剛性を持つばね要素としてモデル化する。

e. 材料物性等

(a) 材料定数

飛来物及び竜巻防護ネットの材料定数を表 6-2 に示す。

材料定数は，「発電用原子力設備規格設計・建設規格 J S M E S N C 1 - 2005/2007」に基づき設定する。

表 6-2 材料定数

	材質	降伏応力 σ_y (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)
飛来物 (鋼製材)	SS400 ($t \leq 16$)	245	202000
竜巻防護ネット (フレーム及び大梁)	SM490 ($16 < t \leq 40$)	315	202000

(b) 材料の応力-ひずみ関係

材料の応力-ひずみ関係は，バイリニア型とする。

材料に適用する応力-ひずみ関係の概念図を図 6-4 に示す。

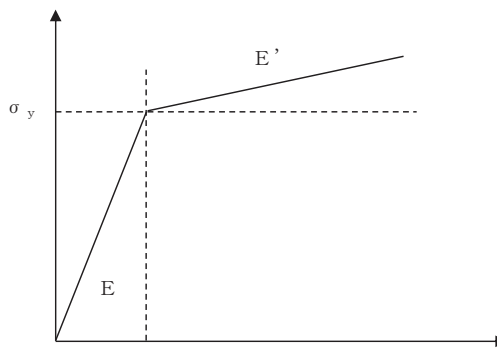


図 6-4 応力-ひずみ関係の概念図

(c) ひずみ速度依存性

竜巻による飛来物に対する解析は、衝撃問題で変形速度が大きいため、衝突時の鋼材のひずみ速度による影響を Cowper-Symonds 式により考慮する。

$$\sigma_D = \sigma_s \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^p \right\}$$

ここで、 σ_D は動的応力、 σ_s は静的応力、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、 C 及び p はひずみ速度依存性のパラメータである。

ひずみ速度依存性パラメータを表 6-3 に示す。

表 6-3 ひずみ速度依存性パラメータ

	飛来物 (鋼製材)	竜巻防護ネット (フレーム及び大梁)
材質	SS400	SM490
C (1/s)		
p		

(d) 破断ひずみ

衝突解析における許容限界は、鋼材の破断ひずみを設定する。破断ひずみについては、J I S に規定されている伸びの下限値を基に設定するが、「NEI07-13 : Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」において TF (多軸性係数) を とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として TF = を考慮して設定する。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

f. 解析ケース

解析ケースを表 6-4 に示す。衝突位置及び衝突方向は、設置許可段階でフレームゴム支承及び可動支承の評価結果が厳しかった、図 6-5 に示す位置及び方向とする。

表 6-4 解析ケース

No.	評価ケース	ゴム支承剛性値		飛来物の衝突条件				
		水平剛性 (kN/mm)	鉛直剛性 (kN/mm)	衝突位置	衝突 姿勢	衝突 方向	衝突速度 (m/s)	
1	G1-V-3 -基本	3.33	972	主桁 (フレームゴム 支承近傍)	短辺	鉛直	16.7	
2	G1-V-3 -不確かさ(+)	5.00	1700					
3	G1-V-3 -不確かさ(-)	2.33	42.7					
4	G1-EW-3 -基本	3.33	972			水平		46.6
5	G1-EW-3 -不確かさ(+)	5.00	1700					
6	G1-EW-3 -不確かさ(-)	2.33	42.7					
7	G1-EW-1 -基本	3.33	972	主桁 (可動支承近 傍)	短辺	水平	46.6	
8	G1-EW-1 -不確かさ(+)	5.00	1700					
9	G1-EW-1 -不確かさ(-)	2.33	42.7					

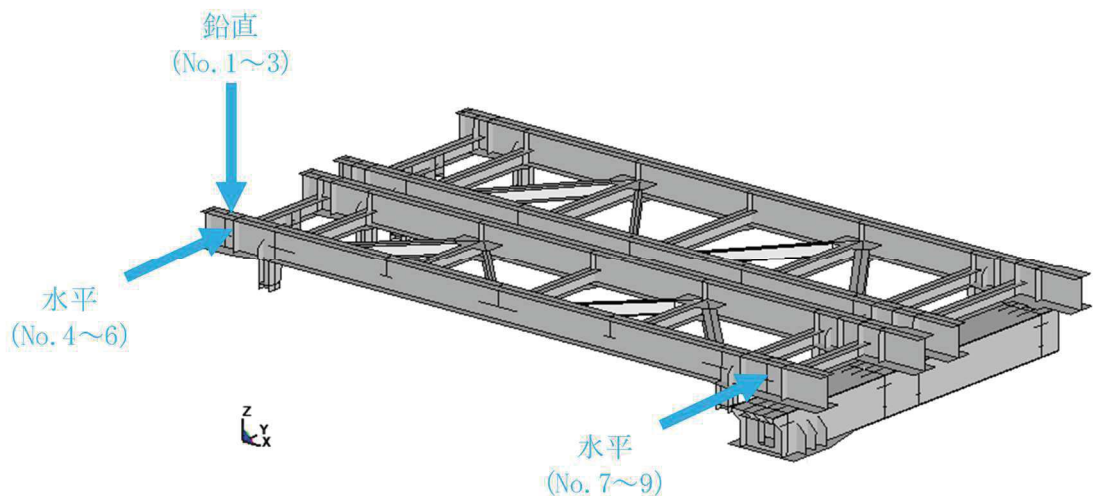


図 6-5 飛来物衝突位置及び衝突方向

g. 解析結果

フレームゴム支承の衝突解析結果を表 6-5 に、可動支承の衝突解析結果を表 6-6 にそれぞれ示す。全ての解析ケースにおいて、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。

表 6-5 フレームゴム支承の衝突解析結果*1

評価対象部位		評価項目	No. 1		No. 2		No. 3		No. 4		No. 5		No. 6		許容値
			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)	12	5	14	5	3	2	3	4	3	4	2	3	280 MPa
	取付 ボルト	応力度 (組合せ)	72	96	75	98	71	73	89	89	94	92	72	77	420 MPa
	アンカー ボルト	応力度 (組合せ)	59	55	60	57	45	48	54	56	57	58	48	51	257 MPa

注記*1：本表に記載の結果は暫定値。

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。

表 6-6 可動支承の衝突解析結果*1

評価対象部位		評価項目	No. 7		No. 8		No. 9		許容値
			発生値		発生値		発生値		
			西側	東側	西側	東側	西側	東側	
可動支承	構造部材	水平荷重	1276	726	1249	752	1316	721	2900 kN
		鉛直荷重 (圧縮)	364	269	372	265	332	268	5600 kN
		鉛直荷重 (引張)	442	420	356	419	448	322	1800 kN

注記*1：本表に記載の結果は暫定値。

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。

7. まとめ

本資料では、竜巻防護ネットのうち支持部材の強度評価に係る設計方針及び評価方針を示し、構造成立性について確認した。

- ・詳細設計段階において、設置許可段階の説明事項から方針変更がないことを確認した。
- ・ゴム支承の鉛直剛性に係る特性試験を実施し、衝突解析におけるゴム支承剛性の設定方針、解析モデルの設定及び評価ケースの考え方を示した。
- ・試験結果を踏まえたゴム支承の剛性の不確かさも考慮し、衝突解析の代表的な評価ケースに対して、構造成立性が確保できることを確認した。

なお、詳細設計段階における対応事項について、別紙 5 に示す。

以上

先行プラントとの設計方針の比較 (EP まとめ資料抜粋)

別紙 1

竜巻防護ネットの設計方針に関する先行プラントとの比較

竜巻防護ネットの設計方針等について、先行プラントと比較した結果を表1に整理する。構成部材のうち、ネット(金網部)と防護板は先行プラントと構造設計の相違がないが、ゴム支承及び可動支承を用いることで先行プラントと支持部材が異なることを踏まえて、支持部材に対する設計方針について比較を実施した。

表1 竜巻に対する設計の基本方針、竜巻防護ネットの設計方針等の比較

プラント	女川	(参考) 東海第二	差異理由
竜巻に対する設計の基本方針	竜巻飛来物防護対策設備は、竜巻防護ネット、防護鋼板等から構成し、飛来物から外部事象防護対象施設を防護できる設計とする。 (まとめ資料:1.8.2.1設計方針(1) 竜巻に対する設計の基本方針より抜粋)	竜巻飛来物防護対策設備は、防護ネット、防護鋼板等から構成し、飛来物から外部事象防護対象施設を防護できる設計とする。 (設置変更許可申請書(一部補正)1.7.2.1設計方針(1) 竜巻に対する設計の基本方針より抜粋)	差異無し
竜巻防護ネットの設計方針	竜巻防護ネットは、竜巻時及び竜巻通過後において、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、内包する非常用海水ポンプ等が安全機能を損なわないよう、設計飛来物が非常用海水ポンプ等に衝突することを防止可能な設計とする。 また、竜巻防護ネットは、その他考えられる自然現象に対して、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。	防護対策施設は、竜巻時及び竜巻通過後において、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、内包する外部事象防護対象施設が安全機能を損なわないよう、設計飛来物等が外部事象防護対象施設に衝突することを防止可能な設計とする。 また、防護対策施設は、その他考えられる自然現象(地震等)に対して、外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼさない設計とする。 (工認 V-1-1-2-3-1 竜巻への配慮に関する基本方針 2.1.3 竜巻の影響を考慮する施設の竜巻防護設計方針 c. 防護対策施設)	設備名称の相違
支持部材の設計方針	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。	架構は、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、飛来物が外部事象防護対象施設へ衝突することを防止するために、飛来物が架構を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載する防護ネット及び防護鋼板を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないために、架構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。 (工認 V-3-別添 1-2 防護対策施設の強度計算の方針 2.2 構造強度の設計方針(3) 架構)	部材名称の相違 設備名称の相違
支持機能を担保する部材	フレーム、大梁、ブラケット、ゴム支承、可動支承、ストッパー	架構	支持構造の相違
支持部材に対する評価項目	貫通評価及び支持機能評価	貫通評価及び支持機能評価	差異無し

女川 2 号炉の竜巻防護ネットは、先行プラントと支持構造に相違はあるが、「竜巻に対する設計の基本方針」、「竜巻防護ネットの設計方針」、「支持部材の設計方針」、「評価項目」に対して、先行プラントとの相違はないことを確認した。

以上

ゴム支承のせん断剛性の衝突解析への適用性 (EP まとめ資料抜粋)

別紙 3 (補足 1)

衝突解析に対するゴム支承の影響に対する検討

竜巻防護ネットに採用する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機能を持つ。耐震設計については「道路橋示方書・同解説 ((社) 日本道路協会, 平成 14 年 3 月)」及び「道路橋支承便覧 ((社) 日本道路協会, 平成 16 年 4 月)」に則り、線形ばね要素でモデル化し、ゴム支承による荷重の低減効果を見込んだ耐震評価を実施する。(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)

一方、飛来物の衝撃荷重によるゴム支承の影響・評価については、先行プラントにおいて審査実績がないことや、評価に関わる規格類が制定されていないことを踏まえ、衝突解析におけるゴム支承の影響について、以下のとおり検討を実施した。

1. 飛来物衝突時と地震時におけるゴム支承変位速度の比較

(1) 検討方法

竜巻防護ネットのフレームはゴム支承に支持されているため、飛来物が衝突した場合や地震時にはフレームが移動する。フレームの移動速度が飛来物衝突時と地震時で異なる場合、ゴム支承の挙動が異なることが考えられる。

この影響を検討するため、飛来物衝突後のフレーム移動速度から想定されるゴム支承の変位速度と、耐震評価において想定するゴム支承の変位速度を比較し検討する。

(2) 飛来物衝突時のフレーム速度の算出

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は、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。飛来物はフレームの南側に衝突し、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。(図 1 参照)

以上の条件から、運動量保存則から以下の式が成り立つ

$$m v = (m + M) V \cdots \textcircled{1}$$

ここで、 m : 設計飛来物 (鋼製材) 重量 ($m = 135 \text{ kg}$)

v : 設計飛来物 (鋼製材) 衝突速度 ($v = 46.6 \text{ m/s}$)

M : フレーム重量 ($M = 62000 \text{ kg}$)

V : 衝突後のフレーム移動速度 (m/s)

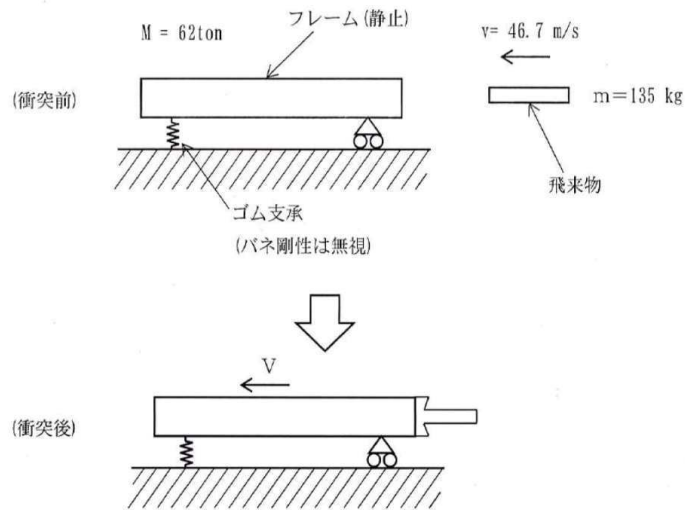


図1 飛来物衝突前後のイメージ

①式より,

$$\begin{aligned}
 V &= m v / (m + M) \\
 &= 135 \times 46.6 / (135 + 62000) \\
 &\doteq 0.1 \text{ (m/s)}
 \end{aligned}$$

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移動速度は最大でも約0.1m/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。

(3) ゴム支承特性試験について

ゴム支承の動的特性を把握するための試験のうち振動数依存性試験を実施している。本試験は、ゴム支承を振幅95mmの単振動(0.1~1Hzの振動数)でせん断変形させた際の剛性を実測したものである。試験結果を図2に示す。

(図2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)』より抜粋)

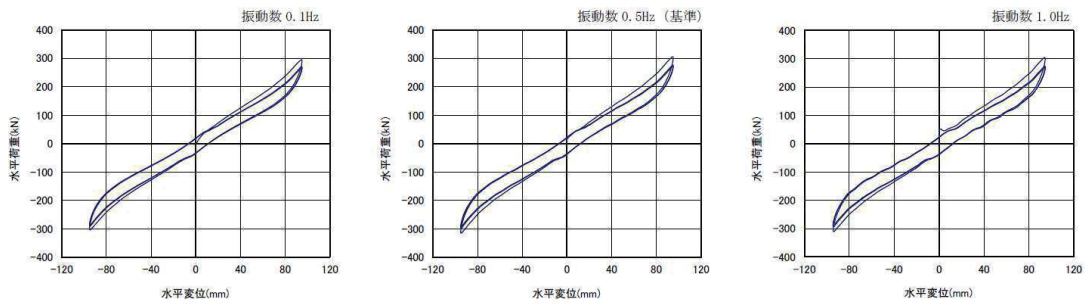
ここで、変位 $x = A \sin \omega t$ より ($A=95\text{mm}$, $\omega = 2\pi f$, $f=0.1, 0.5, 1.0\text{Hz}$)

変位速度 $\dot{x} = A\omega \cos \omega t$ であるから、変位速度の最大値は $A\omega$ となる。

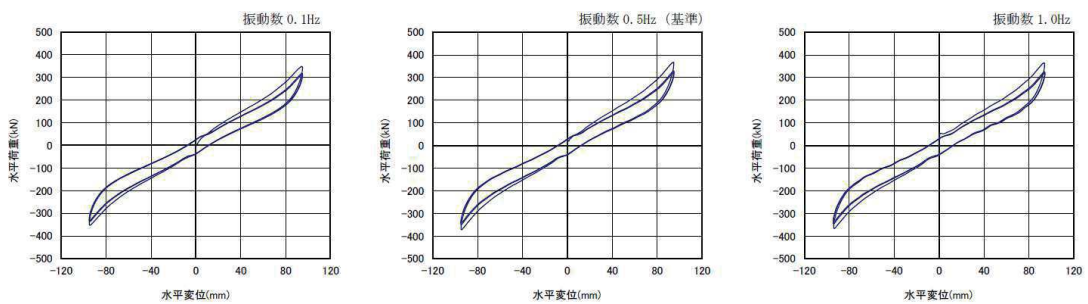
$$f = 0.1\text{Hzのとき}, A\omega = 95 \times 2\pi \times 0.1 \doteq 0.06\text{m/s}$$

$$f = 1.0\text{Hzのとき}, A\omega = 95 \times 2\pi \times 1.0 \doteq 0.60\text{m/s}$$

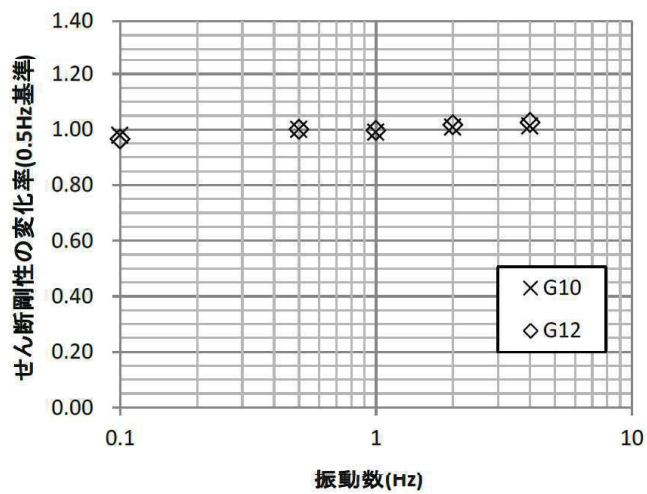
よって振動数依存性試験における変位速度の最大値は約0.06~0.60m/sの範囲となる。試験結果から、この速度範囲において、せん断剛性の変化は無視できるものであることを確認している。



荷重-変位曲線 (G10)



荷重-変位曲線 (G12)



*2Hz, 4Hzの結果は補正式より算出

(c) 振動数依存性試験

図2 せん断特性試験結果

6条(竜巻)一別添1一添付3.7一別紙3-7

(4) 検討結果

飛来物衝突後のフレーム移動速度から想定されるゴム支承の変位速度は約0.1m/s程度である。一方、振動数依存性試験結果から、ゴム支承の変位速度が約0.06～0.60m/sの速度範囲において、せん断剛性の変化は無視できるものであることを確認している。

よって、飛来物衝突時のゴム支承の変位速度は、振動数依存性試験で確認している速度範囲内であることから、飛来物衝突時においてもゴム支承のせん断剛性は適用できると考える。

2. 衝突解析におけるゴム支承境界条件の影響確認

前項の検討を踏まえて、耐震評価に使用したせん断剛性を考慮した衝突解析を実施し、衝突解析におけるゴム支承せん断剛性の影響を確認する。

(1) 検討方法

ゴム支承に支持される竜巻防護ネットに飛来物が衝突した場合、飛来物による衝撃荷重がフレームや大梁を介してゴム支承に伝わり変形することにより、衝撃荷重が低減されることが考えられる。

この影響について、衝突解析におけるゴム支承の境界条件を耐震評価に使用した線形ばねモデルと同等としたものと、ゴム支承の影響を排除する観点で3方向固定としてモデル化したものでそれぞれ衝突解析を実施し、ゴム支承と可動支承へ伝達される衝撃荷重の差を比較する。

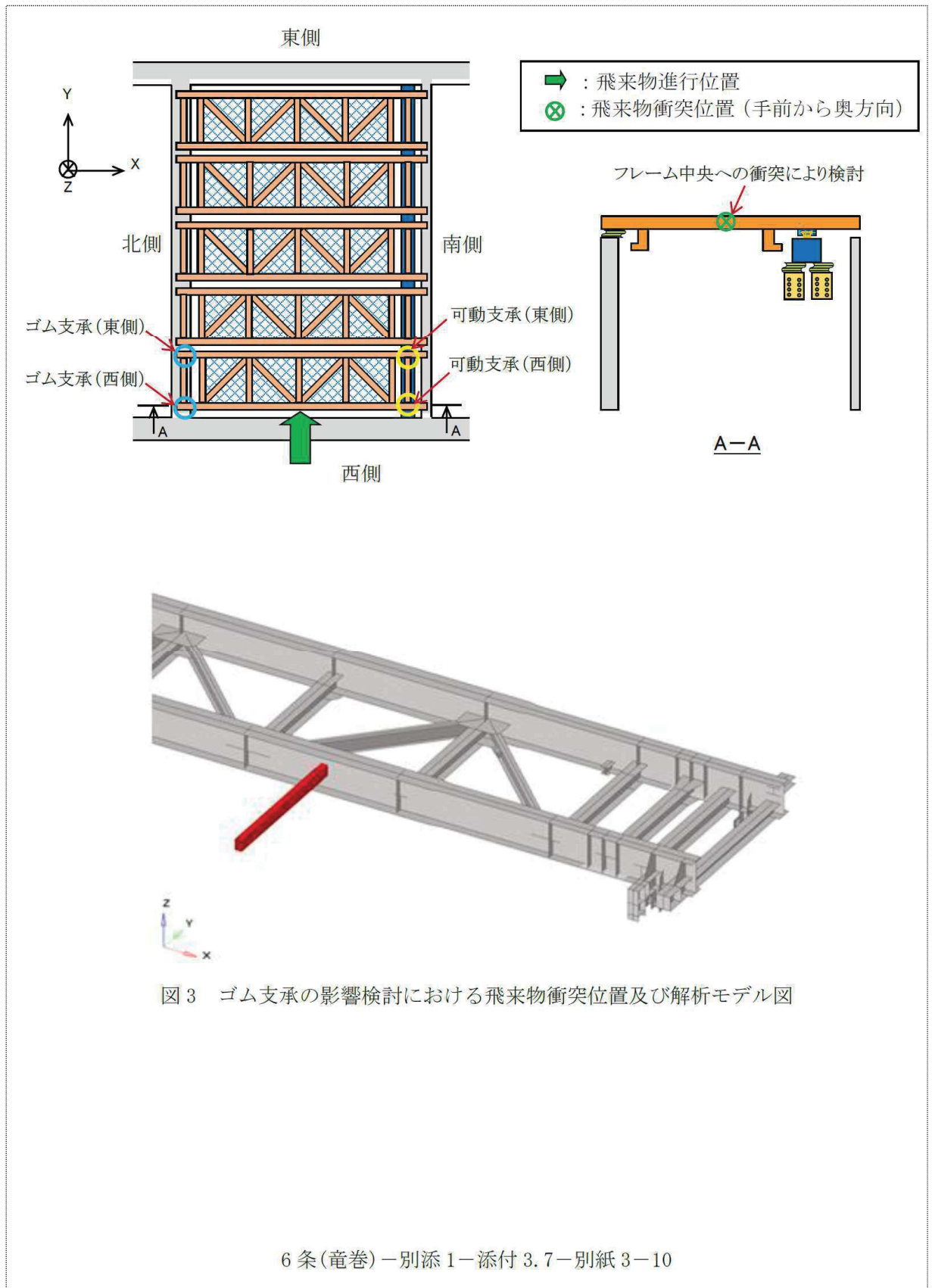
(2) 検討における解析条件

衝突解析は、解析コード「LS-DYNA」を用いて3次元 FEM モデルによりフレームをモデル化し評価を実施する。フレームはシェル要素でモデル化し、境界条件は端部を固定条件としたものと、ゴム支承を線形ばねモデルとし、水平剛性を考慮したものでそれぞれ解析を実施する。可動支承の境界条件は、可動方向はフリー、固定方向は固定の条件とする。飛来物の衝突方向については、ゴム支承の剛性が小さく、変形が大きい水平方向からの水平衝突とし、衝突位置はフレームの中央に衝突したケースを代表として実施する。検討における解析条件を表1に、検討に用いる衝突位置や解析モデルを図3に示す。

表1 検討における解析条件

検討ケース	①フレームゴム支承部を固定としてモデル化	②フレームゴム支承部を線形ばねモデル化
解析モデル	LS-DYNAによる3次元FEMモデル	
境界条件	ゴム支承	固定条件 線形ばねモデル* ¹ 水平剛性：2.689 (kN/mm) 鉛直方向：863 (kN/mm)
	可動支承	可動方向は拘束なし 非可動方向は固定条件
衝突方向	ゴム支承の剛性が小さく、変形量が大きい水平方向（西から東）からの衝突	
衝突位置	フレーム中央	

*1：耐震評価モデルと同様の水平剛性を設定



(3) 検討結果

検討の結果，ゴム支承と可動支承へ伝達される衝撃荷重は，ゴム支承の境界条件を固定条件とした場合に大きな反力が発生する結果となることを確認した。特にゴム支承における衝撃荷重に大きな差が生じており，ゴム支承のせん断剛性を固定条件とすると，ゴム支承自体に発生する衝撃荷重が非常に大きくなることを確認した。検討結果を表2に示す。

なお，今回の検討は水平方向からの衝突に対する結果であるが，ばね剛性を考慮することによる影響は鉛直方向についても同様であり，境界条件を固定とした場合，衝撃荷重は大きくなることが想定される。

表2 ゴム支承せん断剛性影響の検討結果

評価対象			衝撃荷重（ピーク値）（kN）	
			ゴム支承境界条件	
			固定	せん断剛性有
ゴム支承 （東側）	X 方向	+側	456	2
		-側	-478	-4
	Y 方向	+側	229	1
		-側	-265	-24
ゴム支承 （西側）	X 方向	+側	429	4
		-側	-415	-2
	Y 方向	+側	224	1
		-側	-260	-24
可動支承 （東側）	X 方向	+側	0	0
		-側	0	0
	Y 方向	+側	454	424
		-側	-508	-392
可動支承 （西側）	X 方向	+側	0	0
		-側	0	0
	Y 方向	+側	300	265
		-側	-375	-355

3. まとめ

衝突時と地震時においてゴム支承の変位速度について有意な差がないことから，衝突解析においても耐震評価と同等条件でゴム支承をモデル化した評価が適用可能と考えられる。

そこで，ゴム支承のせん断剛性を考慮したものと，考慮しない固定条件としたものでそれぞれ衝突解析を実施し，衝突時におけるゴム支承のせん断剛性の影響を確認した。解析の結果から，ゴム支承を固定条件とすると特にゴム支承自体に発生する衝撃荷重が非常に大きくなることを確認した。この場合，ゴム支承の下部構造に伝達される荷重も大きくなるため，下部構造に対しても厳しい条件となることを確認した。

以上

支持部材の構造成立性について（EP まとめ資料抜粋）

別紙 3

竜巻防護ネットの構造成立性確認結果について（STEP1）
 （ゴム支承の剛性を耐震評価時に用いるせん断剛性とする場合）

1. 解析条件

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、図1に示すフローのとおり、ゴム支承の剛性を考慮した衝突解析を実施する。

衝突解析は、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する。

評価対象は支持機能に大きな影響を与える部材であるフレームゴム支承と可動支承とする。解析条件とその考え方を表1、2及び図2に示す。

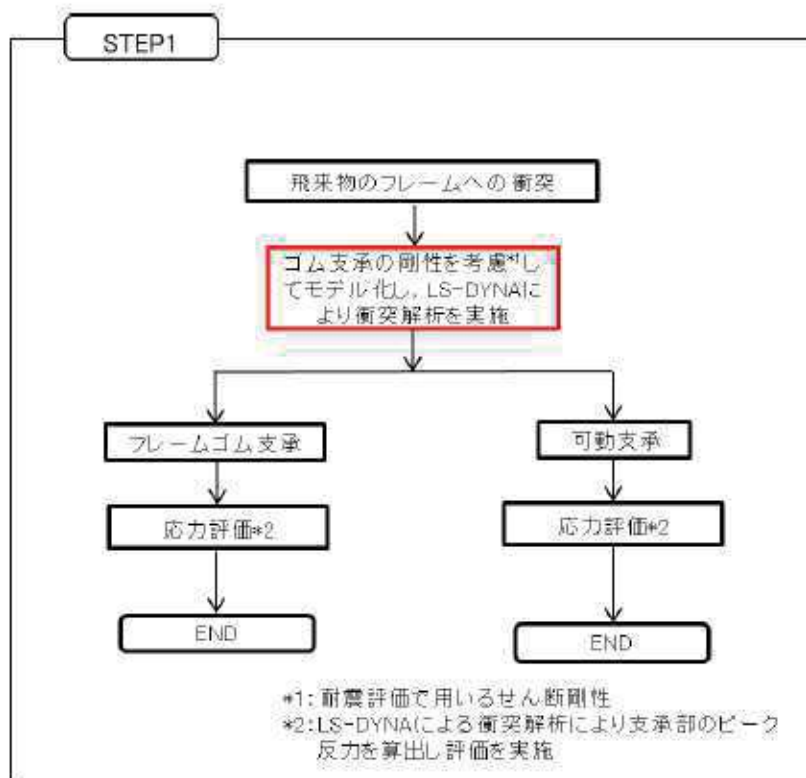


図1 STEP1 構造成立性確認フロー

表1 STEP1の解析条件

設定項目	設定条件	考え方
ゴム支承の剛性	耐震評価で用いるせん断剛性(表2参照)	設計飛来物がフレームに衝突した場合に想定されるゴム支承の変位速度は、約0.1m/sと考えられる(別紙3(補足1)参照)。この変位速度は、地震時のゴム支承の動的特性を把握するために実施した振動数依存性試験におけるゴム支承の変位速度(0.06~0.6m/s)に包絡されることから、飛来物衝突においても、耐震評価で用いるゴム支承のせん断剛性を適用する。
衝突方向	水平方向	配置及び形状から水平方向から衝突する可能性は極めて低いと考えられるが、鉛直速度よりも最大速度が大きく、ゴム支承のせん断剛性への影響が大きい方向。
衝突位置	ゴム支承近傍	ゴム支承への影響が大きくなると考えられる位置。
飛来物姿勢	長辺全面で衝突	フレームには防護板や補強用のリブが設置されることから、平面となる面積が限られており、長辺全面が部材に垂直に衝突する可能性は極めて低いと考えるが、最もゴム支承に対し厳しい姿勢による挙動を確認する観点から、長辺全面が衝突すると設定。

表2 フレームゴム支承、可動支承の結合条件

方向	フレームゴム支承	可動支承
X	弾性	自由
Y	弾性	剛
Z	剛	剛

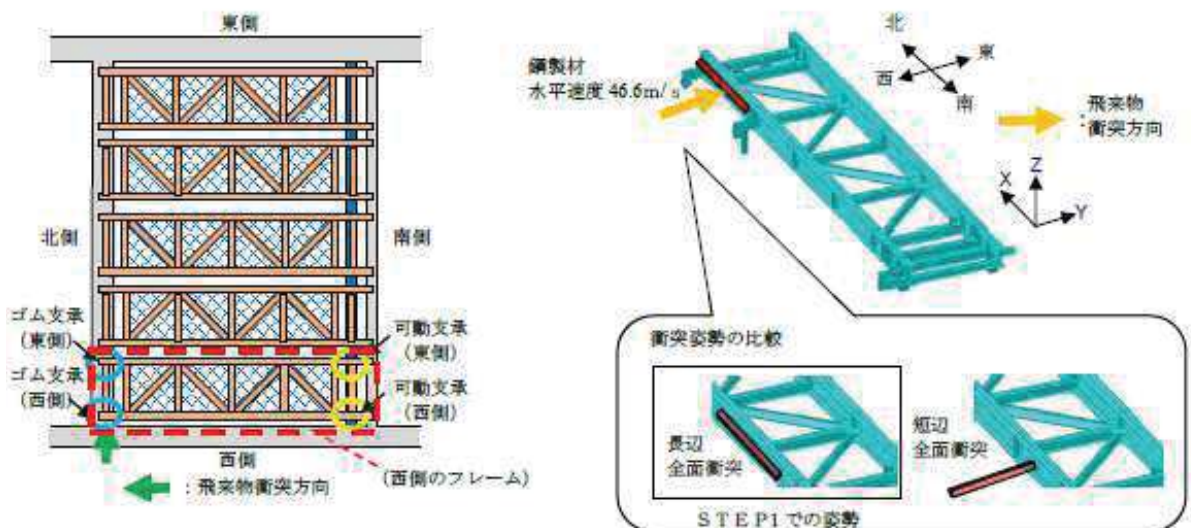


図2 飛来物衝突位置及び解析モデル図 (STEP1)

6条(竜巻)一別添1-添付3.7-別紙3-2

2. 解析結果

フレームゴム支承の衝突解析結果を表3、可動支承の衝突解析結果を表4に示す。
 フレームゴム支承の評価対象部材に発生する応力等は許容値を超えず、「4.1.2 支持部材 (4)」に定める構造強度上の評価方針を満足する。

可動支承については、評価対象部材のうち、「レール」「レール取付ボルト」「エンドプレート接合ボルト」について許容値を超える結果となった。

STEP1 の評価結果から、フレームゴム支承の剛性を考慮した場合において、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個所に飛来物が衝突した場合でもフレームゴム支承は構造強度上の評価方針を満足し、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。可動支承については一部部材が許容値を超える結果となったが、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、許容値を満足させる方針とする。

表3 STEP1におけるフレームゴム支承の解析結果 (注) 本評価結果は暫定値

評価対象		評価項目	発生値		許容値
			西側	東側	
フレーム ゴム支承	①ゴム体	応力度 (引張)	1.2 MPa	0.7MPa	2.0 MPa ^{※1}
		せん断ひずみ	61%	60%	250. % ^{※1}
		応力度 (圧縮)	2.3MPa	2.1MPa	29.8MPa ^{※1}
	②内部鋼板	応力度 (引張)	22MPa	20MPa	280 MPa ^{※2}
③取付ボルト	応力度 (組合せ)	63MPa	56MPa	420 MPa ^{※2}	
④アンカーボルト	応力度 (組合せ)	86MPa	68MPa	294 MPa ^{※2}	

※1: 「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (H14.3)」に基づく道路橋支承便覧による許容値

※2: JEAG4601に基づく許容応力状態IV,Sの許容応力

注) 上記の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。

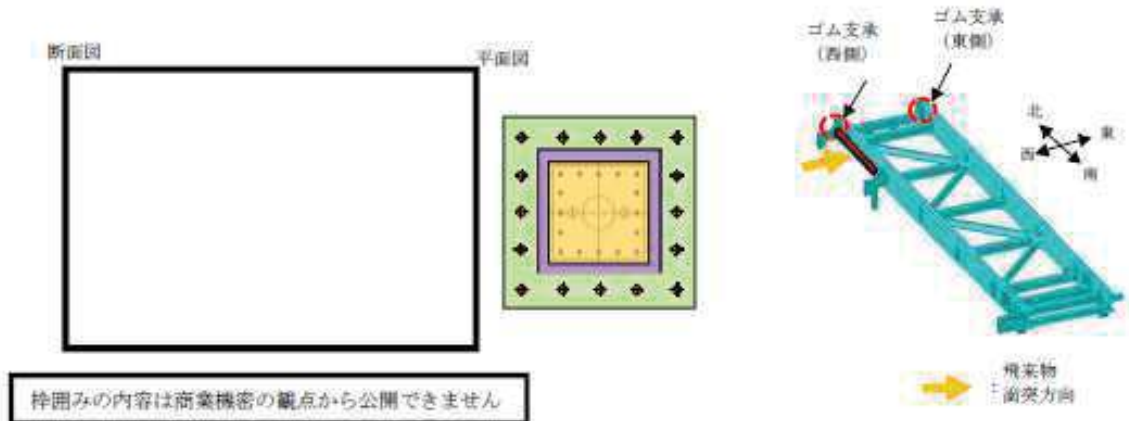


図3 フレームゴム支承の構造図

6条(竜巻)一別添1一添付3.7一別紙3-3

表4 STEP1における可動支承の評価結果

(注) 本評価結果は暫定値

評価対象	評価項目	発生値[MPa]		許容値[MPa] ^{※1}	
		西側	東側		
① ソールプレート	支圧応力	18	21	351	
② すべり材	支圧応力	22	25	60 (メーカー値)	
③ 圧縮ゴム	支圧応力	18	21	50 (メーカー値)	
④ ピストン	曲げ応力	65	74	280	
⑤ 座金	支圧応力	57	65	335	
⑥ ベースポット	突出部	せん断応力	16	15	148
	支圧部	曲げ応力	33	32	258
⑦ レール	支圧部	支圧応力	67	66	351
	引張部	支圧応力	110	110	351
⑧ レール	引張部	曲げ応力	400	390	343
	引張部	引張応力	8.8	8.7	343
⑨ レール取付ボルト	せん断部	せん断応力	54	54	198
	引張部	引張応力	600	600	525
⑩ エンドプレート接合ボルト	引張部	引張応力	450	450	420
⑪ 上部接合ボルト	せん断部	せん断応力	220	220	323
	引張部	組合せ	208 (211)	206 (212)	※2
⑫ 下部接合ボルト	せん断部	せん断応力	11	11	198
	引張部	曲げ応力	180	170	343

※1: メーカー値でないものは、JEAG4601に基づく許容応力状態IV_Sの許容応力

※2: 組合せ応力の許容値については()内に許容引張応力を記載

□: 支持機能に係る部材

■: 支持機能に係る部材のうち許容値を超えるもの

注) 上記の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。

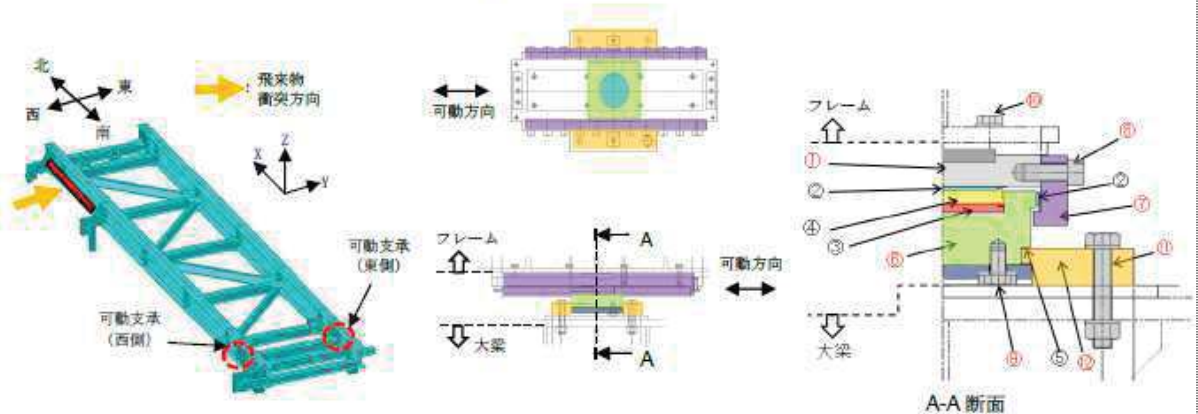


図4 可動支承の構造図

6条(竜巻)一別添1-添付3.7-別紙3-4

竜巻防護ネット構造成立性確認結果について (STEP2)
(支持部材全体の構造成立性)

1. 評価方法

飛来物衝突時の竜巻防護ネットを構成する支持部材全体の構造成立性を確認するため、図1に示すフローで評価を実施する。

STEP2-1 の条件で、支持部材全体に対し評価を実施する。STEP2-1 の条件で評価を実施した結果、フレームゴム支承が許容値を満足しない場合、詳細評価としてSTEP2-2 で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する。STEP2-2 の結果を踏まえて、STEP2-3 としてストッパーの評価を実施する。

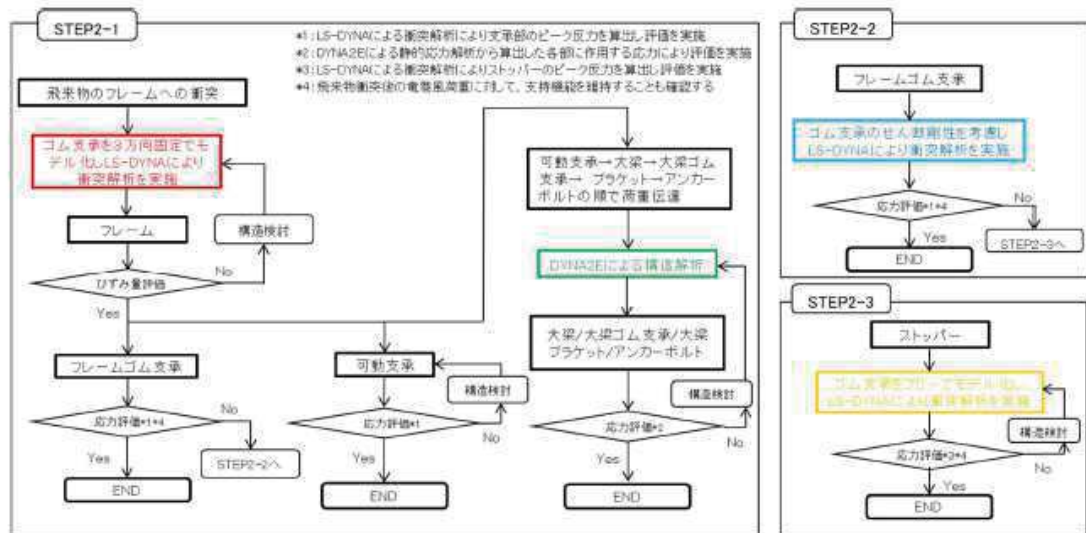


図1 STEP2 評価フロー

2. ゴム剛性の結合条件を3方向固定 (STEP2-1)

(1) 解析条件

評価はフレームに飛来物が衝突したときに、直接荷重を受けるフレーム及びその荷重が伝達されるフレームゴム支承、可動支承、大梁、大梁ゴム支承、ブラケットに対して実施する。解析条件とその考え方を表1、2及び図2に示す。

表1 STEP2-1 解析条件

設定項目	設定条件	考え方
ゴム支承の剛性	3方向固定 (表2参照)	下部構造物に伝達する衝撃荷重のピーク値が大きくなるため
衝突方向	水平及び鉛直	鉛直・水平方向からの衝突による部材への影響をそれぞれ確認するため (配置及び形状から水平方向から衝突する可能性は極めて低いと考えられるが、鉛直速度よりも速度が大きいため、評価を行う)
衝突位置	7パターン	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 衝突方向は衝突面積が大きい鉛直 (①～③), 障害物がないNS方向南側からの水平 (④) に加えて、障害物があり飛来物衝突の可能性が低いと考えられるEW方向からの水平 (⑤～⑦) も考慮する ➤ 各部材に対する影響が大きいと考えられる箇所を抽出 <ul style="list-style-type: none"> ・ フレームの曲げモーメントが最大になるフレームの中央部への衝突 (②, ⑥) ・ 可動支承、大梁ゴム支承、ブラケットが影響を受けるように、当該部材の近傍に衝突 (①, ⑤) ・ ゴム支承が大きな影響を受けるように、当該部材の近傍に衝突 (③, ⑦) ・ 可動支承のスライドによるフレームの変位によりゴム支承が大きな影響を受ける部位への衝突 (④)
飛来物姿勢	短辺全面で衝突	竜巻防護ネットの形状、衝突時の影響、先行プラントの審査実績を踏まえて設定

表2 フレームゴム支承、可動支承の結合条件

方向	フレームゴム支承	可動支承
X	剛	自由
Y	剛	剛
Z	剛	剛

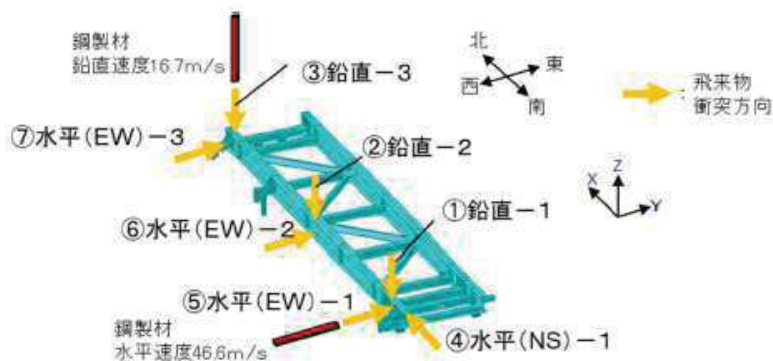


図2 飛来物衝突位置及び解析モデル図 (STEP2-1)

6条(竜巻)一別添1一添付3.7一別紙4-2

(2) 解析結果

各部材の衝突解析結果を表3に示す。

全ての衝突ケースにおいて、フレーム、大梁、ブラケット、大梁ゴム支承は許容値を超えず、構造強度上の評価方針を満足することを確認した。

また、フレームゴム支承は表4に示すとおり、①～⑥の衝突位置の評価条件において、構造強度上の評価方針を満足することを確認した。⑦の衝突位置の場合には、2つのゴム支承が許容値を満足しないことから、詳細評価(STEP2-2)としてゴム剛性を考慮した衝突解析を行い、構造成立性の確認を行う。

可動支承については一部部材が許容値を超える結果となったが、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、許容値を満足させる方針とする。

表3 STEP2-1における解析結果

(注) 本評価結果は暫定値

評価対象部位	評価項目 (単位)	飛来物衝突位置												許容値				
		①		②		③		④		⑤		⑥			⑦			
		鉛直-1	鉛直-2	鉛直-3	水平(NS)-1	水平(EW)-1	水平(EW)-2	水平(EW)-3										
フレーム	最大ひずみ(%)	0.23	0.46	1.66	1.41	1.12	1.83	9.05 ^{※1}	7.0									
大梁	応力度(組合せ)(MPa)	260 (364)	160 (364)	110 (364)	120 (364)	150 (364)	130 (364)	120 (364)	※2									
ブラケット	本体	100 (343)	64 (343)	45 (343)	47 (343)	63 (343)	53 (343)	46 (343)	※2									
	アノボット	140	100	79	84	130	100	84	294									
フレーム ゴム 支承	ゴム体	応力度(引張)(MPa)	0	0	1.4	0.9	14	0.6	0.3	0.2	0.1	0	1.2	0.9	23	3.2	2.0	
		せん断ひずみ(%)	58	56	190	200	310	98	170	140	130	190	230	240	360	310	250	
		応力度(圧縮)(MPa)	1.2	1.2	3.4	2.6	47.5	2.1	2.2	1.8	1.6	2.2	3.8	3.4	25	7.7	29.8	
	内部鋼板	応力度(引張)(MPa)	11	11	32	24	450	20	21	17	15	21	36	32	240	72	280	
	取付ボルト	応力度(組合せ)(MPa)	45 (420)	44 (420)	160 (420)	160 (420)	660 (392)	95 (420)	140 (420)	120 (420)	100 (420)	160 (420)	200 (420)	210 (420)	420 (349)	310 (392)	※2	
	アノボット	応力度(組合せ)(MPa)	40 (294)	38 (294)	170 (259)	160 (253)	370 (163)	93 (294)	130 (272)	110 (294)	100 (255)	130 (255)	180 (230)	180 (220)	310 (110)	210 (163)	※2	
大梁 ゴム 支承	ゴム体	応力度(引張)(MPa)	1.2	0.7	0.2	0.3	0.8	0.6	0.2	0.8	0.6	0.6	0.2	0.2	2.0			
		せん断ひずみ(%)	110	96	89	95	170	120	91	250								
		応力度(圧縮)(MPa)	4.7	2.8	1.8	1.9	3.2	2.3	1.9	23.1								
	内部鋼板	応力度(引張)(MPa)	50	30	19	20	34	25	20	280								
取付ボルト	応力度(組合せ)(MPa)	110 (420)	130 (420)	100 (420)	110 (420)	180 (420)	140 (420)	100 (420)	※2									
可動 支承	ソールプレート	応力(圧縮)(MPa)	82	23	33	22	13	13	15	14	22	24	19	18	15	14	351	
	ナベリ材	応力(圧縮)(MPa)	100	28	40	27	16	16	18	17	27	30	23	22	18	17	60	
	圧縮ゴム	応力(圧縮)(MPa)	82	23	33	22	13	13	15	14	22	24	19	18	15	14	50	
	ピストン	応力(曲げ)(MPa)	290	81	120	79	48	46	54	49	80	86	66	65	53	48	280	
	座金	応力(圧縮)(MPa)	260	70	100	69	41	40	47	43	70	75	58	57	46	40	335	
	ベース ット突出部	応力(せん断)(MPa)	43	20	21	12	3.5	0.1	3.8	3.3	20	10	14	11	2.7	0.4	148	
		応力(曲げ)(MPa)	91	43	45	24	7.3	0.2	7.9	6.9	42	21	30	23	5.5	0.8	258	
		応力(圧縮)(MPa)	190	89	92	50	15	0.3	16	14	85	44	61	47	11	1.5	351	
	ベース ット支圧部	応力(圧縮)(MPa)	93	82	62	68	51	52	61	63	160	230	95	110	54	56	351	
		レール	応力(曲げ)(MPa)	430	320	260	250	170	160	200	210	550	740	340	390	180	180	343
			応力(引張)(MPa)	25	12	12	6.6	2.0	0.1	2.2	1.9	11	5.8	8.1	6.2	1.5	0.2	343
	応力(せん断)(MPa)		49	40	30	33	25	25	30	31	77	110	47	56	26	28	198	
	レール取付ボルト	応力(引張)(MPa)	500	440	340	360	270	280	330	340	840	1220	510	610	290	300	525	
	エンドプレート接合ボルト	応力(引張)(MPa)	520	380	310	280	190	170	220	230	620	810	390	430	190	190	420	
	上部接合ボルト	応力(せん断)(MPa)	190	160	120	140	100	100	120	130	310	460	190	230	110	110	323	
	下部接合ボルト	応力度(組合せ)(MPa)	320 (273)	200 (309)	180 (376)	140 (358)	77 (416)	62 (412)	91 (379)	91 (374)	280 (56)	320 (183)	180 (264)	190 (202)	76 (405)	70 (397)	※2	
ベースプレート		応力(せん断)(MPa)	16	10	9.1	7.0	4.0	3.2	4.7	4.7	14	16	9.3	9.5	3.9	3.5	198	
	応力(曲げ)(MPa)	270	170	150	120	65	52	77	77	240	270	150	150	64	58	343		

※1：フレーム部材端部に生じる最大ひずみが破断ひずみを上回るが、全断面欠損に至らず部材は支持されることを確認

※2：組合せ応力の許容値については()内に許容引張応力を記載

□：支持機能に係る部材

■：支持機能に係る部材以外で許容値を超えるもの

■：支持機能に係る部材のうち許容値を超えるもの

注) 上記の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。また、可動支承については一部部材が許容値を超える結果となったが、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、許容値を満足させる方針とする。

表 4 STEP2-1 における支承部の評価

衝突位置		飛来物衝突位置							
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	
衝突方向	衝突位置	鉛直-1 フレーム 可動支承近傍	鉛直-2 フレーム 中央部	鉛直-3 フレーム ゴム支承近傍	水平(NS)-1 フレーム 南側端部	水平(W)-1 フレーム 可動支承近傍	水平(EW)-2 フレーム 中央部	水平(W)-3 フレーム ゴム支承近傍	
	位置	鉛直	鉛直	鉛直	水平(NS)	水平(EW)	水平(EW)	水平(W)	
評価対象	評価方針	構造強度上の評価方針		構造強度上の評価方針		構造強度上の評価方針		構造強度上の評価方針	
	フレーム ゴム支承 *1	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「道路橋(114.3)」又は許容応力状態IVの許容応力に基づく基準値を超えないことを確認する。	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、搭載するフレーム等を支持する機能に係る部材が支持機能を維持するため、作用する応力が許容応力状態IVの許容応力を超えないことを確認する。	許容値を超える部材 ・ゴム体 ・内部鋼板 ・取付ボルト ・ブカボルト	許容値を超える部材 ・レール ・レール取付ボルト ・コトフレーム接合ボルト ・下部接合ボルト	許容値を超える部材*2 ・レール ・レール取付ボルト ・コトフレーム接合ボルト ・上部接合ボルト ・下部接合ボルト	許容値を超える部材 ・レール ・レール取付ボルト ・コトフレーム接合ボルト	許容値を超える部材 ・ゴム体 ・取付ボルト ・ブカボルト	許容値を超える部材 ・ゴム体 ・取付ボルト ・ブカボルト
評価結果	可動支承	○	○	○	○	○	○	○	○

*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
 *2: 一部部材が許容値を超える結果となったが、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、許容値を満足させる方針とする

□: STEP2-2 にて詳細評価を実施

3. 詳細評価（ゴム支承のせん断剛性を考慮した解析）（STEP2-2）

(1) 解析条件

STEP2-1における⑦の衝突位置の場合には、2つのゴム支承が許容値を満足しないことを踏まえて、詳細評価としてゴム剛性を考慮した衝突解析を行い、構造成立性の確認を行う。解析条件とその考え方を表5、6及び図3に示す。

表5 STEP2-2 解析条件

設定項目	設定条件	考え方
ゴム支承の剛性	耐震評価で用いるせん断剛性 (表6参照)	実現象に近いと考えられる条件で評価を行う観点から、STEP1で用いた耐震評価で用いるゴム支承のせん断剛性を適用する
衝突方向	水平	STEP2-1の⑦の衝突位置と同様
衝突位置	ゴム支承近傍	
飛来物姿勢	短辺全面で衝突	

表6 フレームゴム支承、可動支承の結合条件

方向	フレームゴム支承	可動支承
X	弾性	自由
Y	弾性	剛
Z	剛	剛

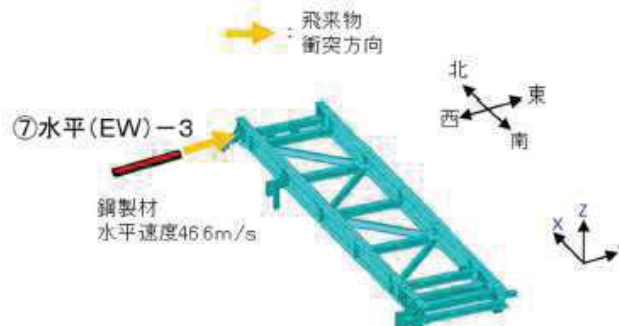


図3 飛来物衝突位置及び解析モデル図 (STEP2-2)

(2) 解析結果

フレームゴム支承の衝突解析結果を表7に示す。

フレームゴム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。

表7 STEP2-2におけるフレームゴム支承の解析結果 (注) 本評価結果は暫定値

評価対象	評価項目	発生値		許容値	
		西側	東側		
フレーム ゴム支承	①ゴム体	応力度 (引張)	1.1 MPa	0.8 MPa	2.0 MPa ^{※1}
		せん断ひずみ	62 %	62 %	250 % ^{※1}
		応力度 (圧縮)	2.0 MPa	2.0 MPa	29.8 MPa ^{※1}
	②内部鋼板	応力度 (引張)	19 MPa	19 MPa	280 MPa ^{※2}
③取付ボルト	応力度 (組合せ)	61 MPa	60 MPa	420 MPa ^{※2}	
④アンカーボルト	応力度 (組合せ)	98 MPa	82 MPa	294 MPa ^{※2}	

※1: 「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (H14.3)」に基づく道路橋支承便覧による許容値

※2: JEAG4601に基づく許容応力状態IV,Sの許容応力

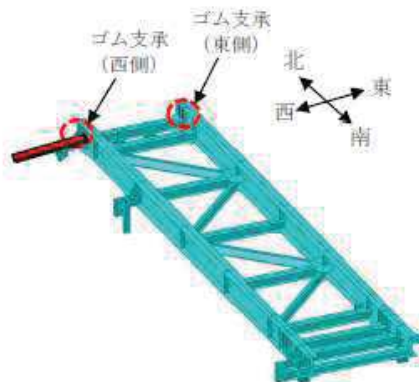


図4 飛来物衝突位置及び評価対象 (STEP2-2)

3. ストッパーの評価（ゴム剛性の結合条件を自由とした解析）（STEP2-3）

(1) 解析条件

今回実施した①～⑦の衝突ケースでは、フレームゴム支承が許容値を満足しない場合は確認されなかったことから、ストッパーに支持機能が必要な状況ではないが、STEP2-2 の評価で許容値を満足しない場合を想定し、ストッパーの評価を実施する。

飛来物の衝撃荷重に対して、ゴム支承による荷重を負担せずに、ストッパーに全ての荷重を伝達する条件で評価する。解析条件とその考え方を表 8、9 及び図 5 に示す。

表 8 STEP2-3 解析条件

設定項目	設定条件	考え方
ゴム支承の剛性	自由 (表 9 参照)	飛来物がフレームに衝突した場合の荷重をすべて伝達し、ゴム支承による荷重の負担を期待せず、ストッパーへかかる衝撃荷重が大きくなる条件とするため
衝突方向	水平	フレームの水平移動によるストッパーへの影響が大きい方向
衝突位置	1 パターン	可動支承の拘束が期待できない可動方向（NS 側）として、南側端部への衝突を考慮
飛来物姿勢	短辺全面で衝突	竜巻防護ネットの形状、衝突時の影響、先行プラントの審査実績を踏まえて設定

表 9 フレームゴム支承、可動支承の結合条件

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

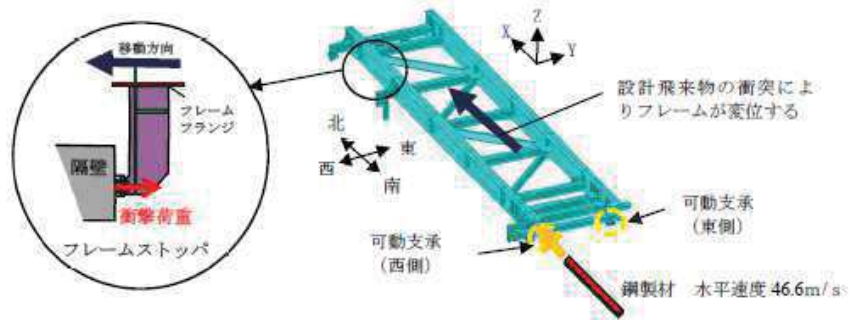


図 5 可動支承の挙動確認における飛来物衝突位置及び解析モデル図（STEP2-3）

6 条(竜巻)－別添 1－添付 3.7－別紙 4－8

(2) 解析結果

ストッパーの評価結果を図 6 及び表 10 に示す。発生する応力は許容値を満足する。

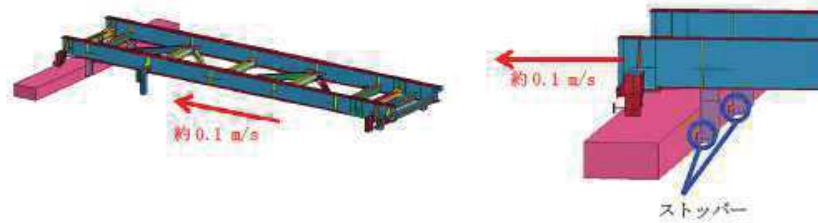


図 6 設計飛来物衝突時のフレーム変位イメージ

表 10 ストッパー応力評価結果

	発生値 (MPa)	許容値 (MPa)
せん断応力	19	198
曲げ応力	228	343
組合せ応力	230	343

4. 飛来物衝突後の竜巻風荷重に対する評価

飛来物衝突後の竜巻による風荷重に対して、竜巻防護ネットは非常用海水ポンプ等に波及的影響を与えないことが要求される。

STEP2-1 及び STEP2-2 の評価結果から、許容値を超えないゴム支承が少なくとも1つは残るため、フレーム全体が受ける竜巻による風荷重が、ゴム支承1つに対して作用する条件で評価を実施した。評価条件は以下のとおり。

- ・風速 100m/s (設計竜巻風速)
- ・風力係数 C は 2.1 とする
- ・受圧面積は形状を考慮した投影面積
- ・フレームゴム支承 (西側) のみが残存し風荷重を受ける場合を代表とした
- ・評価モデル図は図 7 のとおり

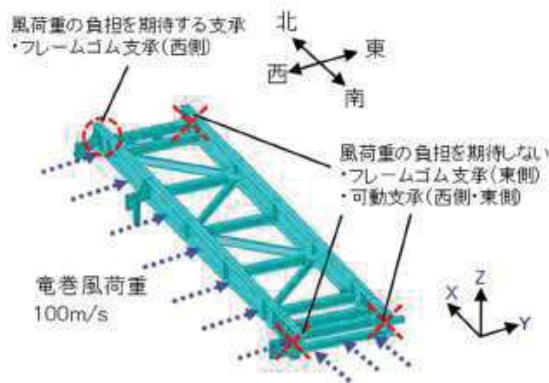


図 7 竜巻風荷重に対する評価モデル図

以上の条件で評価を行ったところ、フレームゴム支承1つが残存すれば、竜巻風荷重を受けても当該支承に生じる応力等は許容値以下となり、竜巻風荷重に対する支持機能を維持することを確認した。評価結果を表 11 に示す。

表 11 竜巻風荷重に対するフレームゴム支承の評価結果

(注) 本評価結果は暫定値

評価対象		評価項目	発生値	許容値
			東側	
フレーム ゴム支承	①ゴム体	応力度 (引張)	0.4 MPa	2.0 MPa ^{※1}
		せん断ひずみ	130 %	250 % ^{※1}
		応力度 (圧縮)	1.2 MPa	29.8 MPa ^{※1}
	②内部鋼板	応力度 (引張)	11 MPa	280 MPa ^{※2}
③取付ボルト	応力度 (組合せ)	100 MPa	420 MPa ^{※2}	
④アンカーボルト	応力度 (組合せ)	73 MPa	294 MPa ^{※2}	

※1: 「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (H14. 3)」に基づく道路橋支承便覧による許容値

※2: JEAG4601 に基づく許容応力状態 IV_S の許容応力

5. STEP2における構造成立性見直し

①～⑦の全ての衝突位置において、フレーム、大梁、ブラケット、大梁ゴム支承は許容値を超えず、構造強度上の評価方針を満足することを確認した。

フレームゴム支承については、STEP2-1においてフレームゴム支承近傍に設計飛来物が水平に衝突する場合のみ(⑦の衝突位置)、フレームゴム支承が2つ許容値を満足しない結果となったが、STEP2-2において詳細評価を実施し、フレームゴム支承が構造強度上の評価方針を満足することを確認した。

また、飛来物衝突後には、構造健全性を保つゴム支承が少なくとも1つ残存することから、1つのゴム支承にて竜巻による風荷重及び常時作用する荷重に対し、フレームの支持機能を維持することを確認した。

さらに、STEP2-1及びSTEP2-2の評価において、許容値を超えないゴム支承が1つ残存するため、ストッパーに支持機能が必要な状況ではないが、STEP2-3として飛来物の衝撃荷重に対してフレームゴム支承による荷重を負担せずに、ストッパーに全ての荷重を伝達する条件で評価を実施し、構造強度上の評価方針を満足することを確認した。

可動支承については一部部材が許容値を超える結果となったが、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、許容値を満足させる方針とする。

以上より、竜巻防護ネットの支持部材は構造強度上の評価方針を満足する方針である。よって、飛来物衝突時及び衝突後において竜巻防護ネットの支持機能を維持するため、構造成立性を見直しがあることを確認した。

以上

詳細設計段階における説明事項（EP まとめ資料抜粋）

別紙 6

設置許可段階と詳細設計段階での説明事項

3 項の説明事項 No. に対応

設置許可段階では、【STEP1】及び【STEP2】の評価のとおり、竜巻防護ネットの構造成立性にかかわる代表的な評価結果をもって、構造成立性の見通しを説明した。

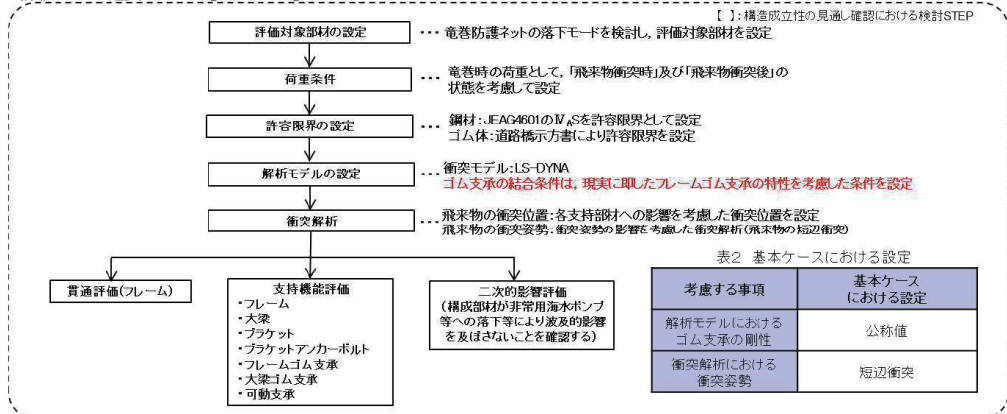
① 詳細設計段階では現実に即した解析モデルとして、フレームゴム支承の特性を考慮した解析モデルを適用し、評価を実施する方針とする。

② 設置許可段階での構造成立性の見通し時に用いた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。

③ 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、許容値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、許容値を満足させる方針とする。

④ 基本ケースによる各部材の設計を実施した後に、不確かさケースの確認として、ゴム支承の剛性のばらつきを考慮した解析モデルの設定、衝突姿勢の影響を考慮した衝突解析（飛来物の長辺衝突）を実施し、評価を実施する方針とする。

評価フロー（基本ケース）【STEP2-2】



評価フロー（不確かさケース）

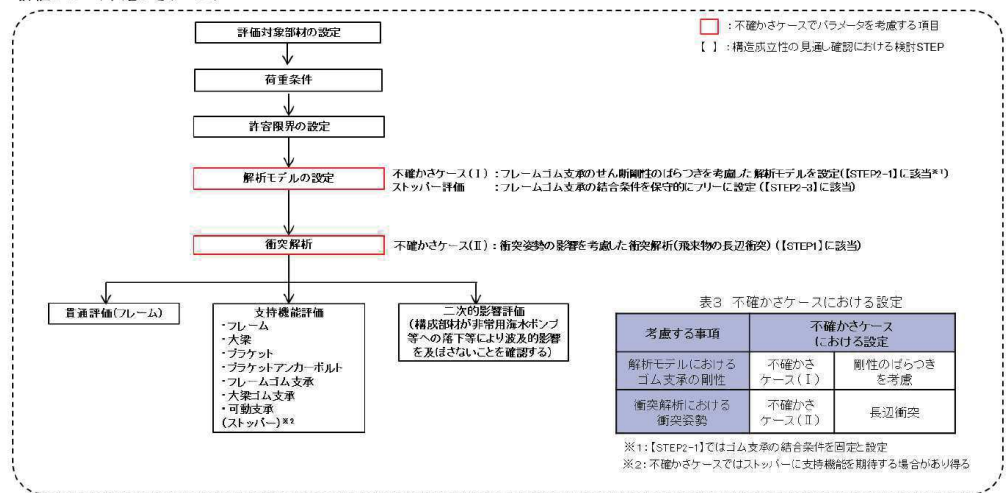


図1 詳細設計段階における評価フロー

6 条(竜巻)－別添1－添付 3.7－別紙 6－1

表 1 設置許可段階及び詳細設計段階での説明事項 (1/3)

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		説明段階			
					作用荷重	限界状態	許容限界	E P (構造成立性見直し) STEP1	STEP2	C P
竜巻防護ネット(支持部材)	<p>支持部材は設計竜巻の風圧力による衝撃荷重及びその他の荷重に、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。</p>	<p>【貫通】 設計飛来物の支持部材への衝突に対して、衝突箇所を貫通させない。</p> <p>【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、上載するネットを支持する機能を維持可能な構造強度を有し、飛来物による他の荷重に、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。</p>	設計飛来物が支持部材に衝突した場合に、衝突箇所によって貫通が生じないよう、フレームの鋼材が終局状態に至るようなひずみを生じないことを確認する。	フレーム	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷重(ネット) 竜巻風荷重 衝撃荷重 	衝突面の全断面欠損	NEI07-13にTF(多軸性係数)を考慮して設定した破断ひずみ以下(LS-DYNAによりひずみ量を算出)	-	○ (STEP2-1)	○ (基本ケース及び不確かさケース)
			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、上載するネットを支持するため、フレームの鋼材が終局状態に至るようなひずみを生じないことを確認する。							
			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、上載するフレーム等を支持し、上載するネットを支持するため、構造強度を維持するため、作用する応力が許容応力状態IV _S の許容応力を超えないことを確認する。	<p>大梁</p> <p>ブラケット</p> <p>ブラケットアンカーボルト</p>	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷重(ネット、フレーム、大梁) 竜巻風荷重 衝撃荷重 	終局状態	発生する応力がJEM 4601のIV _S 以下	○ (STEP2-1)	○ (基本ケース及び不確かさケース)	

※ EP：設置許可段階 CP：詳細設計段階

6条(竜巻)一別添1一添付3.7一別紙6-2

表 1 設置許可段階及び詳細設計段階での説明事項 (2/3)

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	説明段階※		
					作用荷重	限界状態		EP (構造成立性見直し)	CP	
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。支持部材が支持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】 支持部材に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、作用する応力等が「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (H14.3)」又は許容応力状態 IV.S の許容応力に基づき基準値を超えないことを確認する。	大梁ゴム支承	コム体	<ul style="list-style-type: none"> 自重 上載荷 (ネット、フレーム、大梁) 竜巻風荷重 衝撃荷重 	終局状態	<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 発生する応力が JEAG 4601 の IV.S 以下 	-	○ (STEP2-1)	○ (基本ケース及び不確かさケース)
				大梁ゴム支承						
				フレームゴム支承 (*1)*2)						

*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: 不確かさ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。

※ EP: 設置許可段階 CP: 詳細設計段階

表 1 設置許可段階及び詳細設計段階での説明事項 (3/3)

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	説明段階*	
					作用荷重	限界状態		EP (構造成立性見直し)	CP
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、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、上載するネット及び防護板を支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、上載するフレーム等を支持する機能に保つた支持機能を維持するため、作用する応力が許容応力状態IV _{AS} の許容応力を超えないことを確認する。	可動支承 カウルプレート ベアリング プレート レール レール取付ボルト エントランスプレート 接合ボルト 上部接合ボルト 下部接合ボルト ベアリングプレート	<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、JEAG 4601のIV _{AS} 以下	○ (STEP2-1)	○ (基本ケース及び不確かさケース)

※ EP：設置許可段階 CP：詳細設計段階

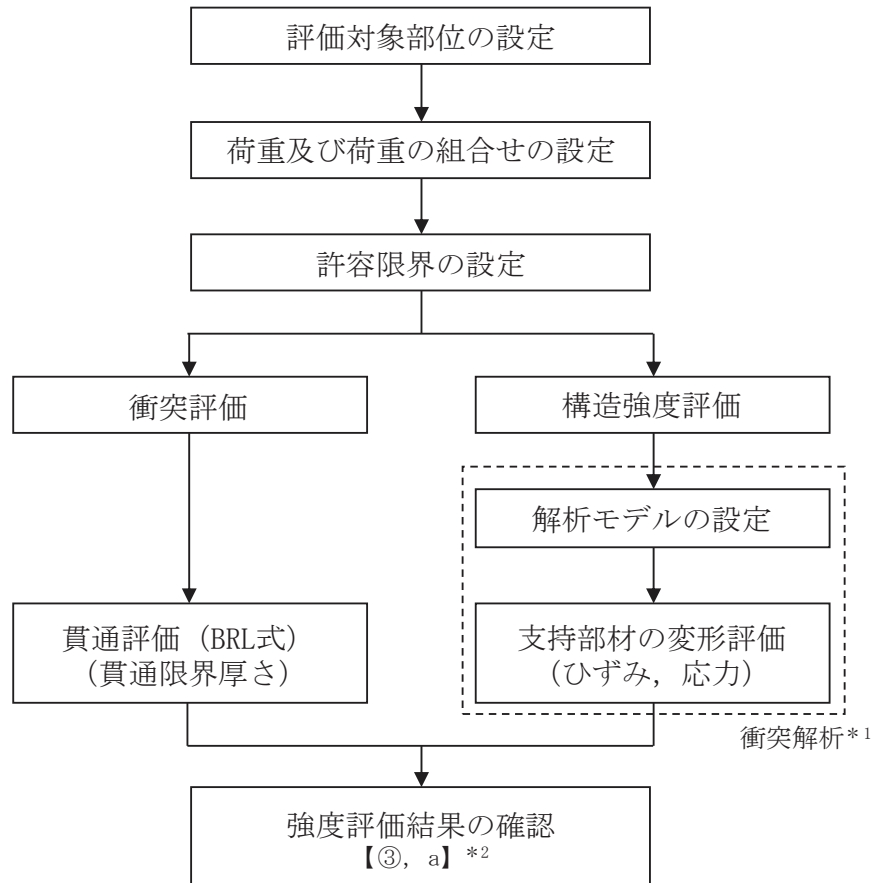
(注) 可動支承については一部部材が許容値を超える結果となったが、詳細設計段階では、可動支承のサイズアップやボルトの仕様変更等の対応を行うことで、許容値を満足させる方針とする。

以上

6条(竜巻)一別紙1一添付3.7一別紙6-4

詳細設計段階での説明事項及び申送り事項への対応方針

竜巻防護ネットの支持部材の評価フロー図に対して、詳細設計段階における説明事項及び申送り事項への対応方針を整理した結果について図 1 及び表 1 に示す。



注記*1：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 【②】*2	不確かさケース における設定 【④】*2	
解析モデルにおける ゴム支承の剛性 【①】*2	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【c】*2
衝突解析における 衝突姿勢 【b】*2	短辺衝突	不確かさ ケース (2)	長辺衝突による影響を 確認

*2：【 】内は表1に示す各No. に対応

図 1 竜巻防護ネットの支持部材の評価フロー図

表 1 詳細設計段階における対応事項整理結果(1/2)

分類	No.	内容	対応方針	資料等への反映
説明事項	①	詳細設計段階では現実に即した解析モデルとして、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。	「5. 衝突解析に係るゴム支承の剛性の設定方針」にて実施したゴム支承の鉛直剛性に係る特性試験結果を踏まえ、ゴム支承の特性を考慮した衝突解析を実施する方針を示した。	「補足-710-1 4.1 5. 衝突解析に係るゴム支承の剛性の設定方針」
	②	設置許可段階での構造成立性の見通し時に用いた評価フローを組み替え、詳細設計段階の評価フローを設定する。	「4. 詳細設計段階における設計方針」にて、衝突解析において基本ケース及び不確かさを設定する評価フローを示した。	「補足-710-1 4.1 4. 詳細設計段階における設計方針」
	③	可動支承について、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、許容値を超える結果となったため、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、許容値を満足させる方針とする。	「6. 評価ケースの設定方針及び構造成立性の確認」にて、設置許可段階において許容値を超える結果となった可動支承近傍への飛来物衝突に対して、許容値を満足し、可動支承の支持機能が維持されることを示した。	「補足-710-1 4.1 6. 評価ケースの設定方針及び構造成立性の確認」
	④	基本ケースによる各部材の設計を実施した後、不確かさケースの確認として、ゴム支承の剛性のばらつきを考慮した解析モデルの設定、衝突姿勢の影響を考慮した衝突解析（飛来物の長辺衝突）を実施し、評価を実施する方針とする。	「5. 衝突解析に係るゴム支承の剛性の設定方針」にてゴム支承の剛性のばらつきを考慮した解析モデルの設定方針及び構造成立性の確認」にて、衝突姿勢の影響を考慮した評価ケースの考え方について示した。なお、結果については、「VI-3-別添 1-2-1-1 竜巻防護ネットの強度計算書」及び「補足-710-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書の補足説明資料」に整理し説明する。	「VI-3-別添 1-2-1-1 竜巻防護ネットの強度計算書」及び「補足-710-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書の補足説明資料」

表 1 詳細設計段階における対応事項整理結果(2/2)

分類	No.	内容	対応方針	資料等への反映
<p>申送り 事項</p>	a	<p>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を詳細設計段階で説明する。</p>	<p>「6. 評価ケースの設定方針及び構造成立性の確認」にて、設置許可段階において厳しい評価結果となったフレームゴム支承近傍への飛来物衝突に対して、衝撃荷重による上向き反力によりフレームゴム支承に生じる引張応力度が許容値を満足し、フレームの浮き上がりによる損傷が生じないことを示した。</p>	<p>「補足-710-1 4.1 6. 評価ケースの設定方針及び構造成立性の確認」</p>
	b	<p>衝突方向に対する影響について、ガイドの考え方を踏まえて詳細設計段階で説明する。</p>	<p>「6. 評価ケースの設定方針及び構造成立性の確認」にて、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を踏まえた衝突解析の評価ケースの設定の考え方について示した。 なお、結果については、「VI-3-別添 1-2-1-1 竜巻防護ネットの強度計算書」及び「補足-710-1 竜巻への配慮が必要な施設に関する説明書の補足説明資料」に整理し説明する。</p>	<p>「VI-3-別添 1-2-1-1 竜巻防護ネットの強度計算書」及び「補足-710-1 竜巻への配慮が必要な施設に関する説明書の補足説明資料」</p>
	c	<p>ゴム支承の衝撃荷重に対する試験内容について、詳細設計段階で説明する。</p>	<p>「5. 衝突解析に係るゴム支承の剛性の設定方針」にて、衝突解析に資するゴム支承の鉛直剛性に係る特性試験を実施し、試験を踏まえたゴム支承の剛性の設定方針を示した。</p>	<p>「補足-710-1 4.1 5. 衝突解析に係るゴム支承の剛性の設定方針」</p>

以上