

表 6-12 基本ケースの評価結果 (3/6)

評価対象部位		評価項目	評価ケース	発生値 (MPa)		許容限界 (MPa)
				西側	東側	
フレーム ゴム支承	内部鋼板	引張応力	G1-EW-3	11	11	280
			G1-V-3	22	11	
			G1-V-6	22	22	
			G1-V-7	22	11	
			G2-V-2	22	11	
			G2-V-5	11	22	
			G2-V-6	<u>22</u>	11	
	取付ボルト	組合せ応力	G1-EW-3	88	88	420
			G1-V-3	72	94	
			G1-V-6	81	84	
			G1-V-7	72	<u>95</u>	
			G2-V-2	60	66	
			G2-V-5	72	74	
			G2-V-6	63	67	
	基礎ボルト	組合せ応力	G1-EW-3	54	56	257
			G1-V-3	59	55	
			G1-V-6	69	<u>71</u>	
			G1-V-7	59	56	
			G2-V-2	50	54	
			G2-V-5	61	62	
			G2-V-6	52	55	

注記 * : 下線部は発生値最大を示す。

表 6-12 基本ケースの評価結果(4/6)

評価対象部位		評価項目	評価ケース	発生値	許容限界
大梁 ゴム支承	ゴム本体	引張応力	G1-V-1	0.2	2.0 MPa
			G1-V-4	<u>0.2</u>	
			G1-V-5	0.1	
			G2-NS-1	0	
			G2-V-1	0	
			G2-V-3	0	
			G2-V-4	0	
			B-V-1	0.2	
			B-V-2	0.2	
		せん断 ひずみ	G1-V-1	64	250 %
			G1-V-4	64	
			G1-V-5	64	
			G2-NS-1	<u>65</u>	
			G2-V-1	64	
			G2-V-3	64	
			G2-V-4	64	
			B-V-1	64	
			B-V-2	64	
		圧縮応力	G1-V-1	1	23 MPa
			G1-V-4	<u>1</u>	
			G1-V-5	1	
			G2-NS-1	1	
			G2-V-1	1	
			G2-V-3	1	
			G2-V-4	1	
			B-V-1	1	
			B-V-2	1	

注記 * : 下線部は発生値最大を示す。

表 6-12 基本ケースの評価結果 (5/6)

評価対象部位		評価項目	評価ケース	発生値 (MPa)	許容限界 (MPa)
大梁 ゴム支承	内部鋼板	引張応力	G1-V-1	11	280
			G1-V-4	<u>11</u>	
			G1-V-5	11	
			G2-NS-1	11	
			G2-V-1	11	
			G2-V-3	11	
			G2-V-4	11	
			B-V-1	11	
			B-V-2	11	
	取付ボルト	組合せ応力	G1-V-1	72	420
			G1-V-4	<u>76</u>	
			G1-V-5	72	
			G2-NS-1	61	
			G2-V-1	61	
			G2-V-3	61	
			G2-V-4	61	
			B-V-1	72	
			B-V-2	72	
	基礎ボルト	組合せ応力	G1-V-1	36	257
			G1-V-4	<u>37</u>	
			G1-V-5	36	
			G2-NS-1	31	
			G2-V-1	32	
			G2-V-3	32	
			G2-V-4	31	
			B-V-1	36	
			B-V-2	36	

注記 * : 下線部は発生値最大を示す。

表 6-12 基本ケースの評価結果 (6/6)

評価対象部位	評価項目	評価ケース	発生値 (kN)		許容限界 (kN)
			西側	東側	
可動支承	水平荷重	G1-EW-1	<u>1275</u>	726	2900
		G1-V-4	883	850	
		G1-V-5	558	384	
		G2-NS-1	359	213	
		G2-V-1	391	285	
		G2-V-3	1011	881	
		G2-V-4	518	340	
	鉛直荷重 (圧縮)	G1-EW-1	364	269	5600
		G1-V-4	487	445	
		G1-V-5	577	231	
		G2-NS-1	53	22	
		G2-V-1	250	<u>641</u>	
		G2-V-3	572	291	
		G2-V-4	194	413	
	鉛直荷重 (引張)	G1-EW-1	442	420	1800
		G1-V-4	519	563	
		G1-V-5	368	242	
		G2-NS-1	139	120	
		G2-V-1	264	369	
		G2-V-3	<u>564</u>	447	
		G2-V-4	248	272	

注記 * : 下線部は発生値最大を示す。

7.2 不確かさケース(1)（ゴム支承の剛性のばらつきに対する影響）に対する評価結果
不確かさケース(1)（ゴム支承の剛性のばらつきに対する影響）の評価結果を表 6-
13 及び表 6-14 に示す。

全ての解析ケースにおいて、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 6-13 不確かさケース (1) (ゴム支承剛性変化+側) の評価結果まとめ

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		発生値最大	許容限界												
		西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側														
フレーム 大梁	主桁																								
	横補強材																								
	大梁																								
フレーム ゴム支承 大梁ゴム 支承	引張応力	0.2	0.1	0.4	0.3	0.3	0.2	0.6	0.4	1.4	1.2	1.4 MPa	2.0 MPa												
	せん断ひずみ	40	45	44	48	40	44	40	44	40	44	48 %	250 %												
	圧縮応力	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2 MPa	23 MPa												
	引張応力	11	11	11	11	11	11	22	11	22	22	22 MPa	280 MPa												
	組合せ応力	72	76	93	90	78	76	75	97	103	97	103 MPa	420 MPa												
	組合せ応力	47	50	57	58	49	49	60	57	87	80	87 MPa	257 MPa												
	引張応力	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0.1	0.1	0.2 MPa	2.0 MPa												
	せん断ひずみ	46	46	44	44	43	43	43	43	43	43	46 %	250 %												
	圧縮応力	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1 MPa	23 MPa												
	引張応力	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11 MPa	280 MPa												
組合せ応力	66	66	60	60	79	79	58	58	68	68	79 MPa	420 MPa													
組合せ応力	34	34	31	31	39	39	30	30	34	34	39 MPa	257 MPa													
可動支承	水平荷重	1249	752	529	329	587	390	447	215	394	234	1249 kN	2900 kN												
	鉛直荷重 (圧縮)	372	265	221	230	701	101	99	50	107	211	701 kN	5600 kN												
	鉛直荷重 (引張)	356	419	247	259	397	192	108	121	101	289	419 kN	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。

表 6-14 不確かさケース(1) (ゴム支承剛性変化一側) の評価結果まとめ

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		発生値最大	許容限界													
		西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側															
フレーム 大梁	主桁																									
	横補強材																									
	大梁																									
フレーム ゴム支承 大梁ゴム 支承	引張応力	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2													
	せん断ひずみ	85	94	91	99	85	94	85	94	85	94	85	94	99 %												
	圧縮応力	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	23 MPa												
	引張応力	0	0	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	280 MPa												
	組合せ応力	64	70	71	76	67	71	70	73	70	72	70	72	420 MPa												
	組合せ応力	44	47	48	51	44	47	45	48	45	48	45	48	257 MPa												
	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	96	96	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	250 %												
	圧縮応力	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	23 MPa												
	引張応力	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	280 MPa												
組合せ応力	64	64	60	60	61	61	61	61	61	61	61	61	420 MPa													
組合せ応力	31	31	29	29	30	30	31	31	31	31	30	31	257 MPa													
可動支承	水平荷重	1316	721	520	365	621	379	458	191	478	198	1316	2900 kN													
	鉛直荷重 (圧縮)	332	268	177	191	735	150	150	115	179	218	735	5600 kN													
	鉛直荷重 (引張)	448	322	211	239	272	253	168	223	199	346	448	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。

7.3 不確かさケース(2) (飛来物の衝突姿勢に対する影響) に対する評価結果

不確かさケース(2) (飛来物の衝突姿勢に対する影響) の評価結果を表 6-15 にそれぞれ示す。

全ての解析ケースにおいて、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を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。G1-EW-1 の長辺衝突による衝突解析結果を図 6-7 に示す。

表 6-15 不確かさケース (2) (飛来物長辺衝突) の評価結果まとめ (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		G2-NS-1		
		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 大梁	主桁																	
	横補強材																	
	大梁																	
フレーム ゴム支承	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	0.3	0.2	
		60	66	62	68	64	70	64	70	60	66	60	66	60	66	60	66	58
	せん断ひずみ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
		84	88	97	100	93	109	73	78	78	78	75	87	82	95	91	67	70
基礎ボルト	組合せ応力	51	53	56	59	56	62	48	51	48	49	52	52	54	54	41	45	
		0	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	
大梁ゴム 支承	せん断ひずみ	68	66	66	66	65	65	64	64	64	64	64	64	64	64	65	65	
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	引張応力	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	
		67	67	68	68	61	61	59	59	67	67	70	66	66	66	59	59	
		35	35	35	35	31	31	29	29	34	34	35	34	34	34	30	30	
可動支承	水平荷重	2792	1689	818	538	770	496	647	364	816	451	580	373	605	340	544	560	
		843	590	577	522	568	543	439	207	3156	451	365	187	345	208	235	392	
		718	715	573	647	492	578	351	274	1629	438	440	282	377	278	307	358	

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。

表 6-15 不確かさケース (2) (飛来物長辺衝突) の評価結果まとめ (2/2)

評価対象部位	評価項目	G2-V-1		G2-V-2		G2-V-3		G2-V-5		B-V-1	発生値最大	許容限界													
		西側	東側	西側	東側	西側	東側	西側	東側																
フレーム 大梁	主桁																								
	横補強材																								
	大梁																								
フレーム ゴム支承	引張応力	0.3	0.2	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.9	0.8	0.3	0.3													
	せん断ひずみ	46	54	45	53	45	53	45	53	53	45	53	70 %	250 %											
	圧縮応力	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2 MPa	23 MPa											
	内部鋼板	11	11	22	11	11	11	11	11	11	11	11	22 MPa	280 MPa											
	取付ボルト	65	66	58	63	75	80	72	70	72	64	72	109 MPa	420 MPa											
	基礎ボルト	40	42	47	51	43	47	47	59	60	39	44	62 MPa	257 MPa											
	大梁ゴム 支承	引張応力	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1 MPa	2.0 MPa										
		せん断ひずみ	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	68 %	250 %										
		圧縮応力	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1 MPa	23 MPa										
		内部鋼板	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11 MPa	280 MPa										
取付ボルト		63	63	60	60	60	60	58	58	64	64	64	70 MPa	420 MPa											
基礎ボルト		32	32	31	31	31	31	28	28	33	33	33	35 MPa	257 MPa											
可動支承	水平荷重	749	642	510	383	1545	1509	570	388	1057	828	2792 kN	2900 kN												
	鉛直荷重 (圧縮)	543	4244	220	245	503	440	212	156	594	585	4244 kN	5600 kN												
	鉛直荷重 (引張)	814	1678	349	320	689	467	295	279	734	844	1678 kN	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。

モデル全体図	
衝突位置 拡大図	
ひずみ 分布図	

図 6-7 衝突解析結果（長辺衝突）（解析ケース G1-EW-1）

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

7.4 飛来物衝突時の上向き反力に対する損傷モードの確認結果

基本ケース及び不確かさケースの評価結果において、フレームゴム支承のゴム本体の引張に対して十分な構造強度を有していることを網羅的に確認し、飛来物衝突時の上向き反力に対して、ゴム支承が損傷し、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。確認結果を表 6-16 に示す。

表 6-16 飛来物衝突時の上向き反力に対する損傷モードの確認結果

評価対象部位	評価項目	評価ケース	発生値 (MPa)		許容限界 (MPa)		
			西側	東側			
フレーム ゴム支承	ゴム 本体	引張 応力	基本ケース	G1-EW-3	0.4	0.3	2.0
				G1-V-3	0.7	0.5	
				G1-V-6	1.1	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	
			不確かさ ケース(1)	G1-EW-1 (剛性変化+側)	0.2	0.1	
				G1-EW-1 (剛性変化-側)	0.1	0.1	
				G1-EW-3 (剛性変化+側)	0.4	0.3	
				G1-EW-3 (剛性変化-側)	0.2	0.2	
				G1-V-1 (剛性変化+側)	0.3	0.2	
				G1-V-1 (剛性変化-側)	0.2	0.1	
				G1-V-3 (剛性変化+側)	0.6	0.4	
				G1-V-3 (剛性変化-側)	0.2	0.2	
				G1-V-6 (剛性変化+側)	1.4	1.2	
			G1-V-6 (剛性変化-側)	0.2	0.2		
			不確かさ ケース(2)	G1-EW-1	0.4	0.3	
				G1-EW-2	0.5	0.5	
				G1-EW-3	0.4	0.6	
				G1-NS-1	0.2	0.2	
				G1-V-1	0.3	0.2	
				G1-V-2	0.4	0.3	
				G1-V-3	0.5	0.4	
				G2-NS-1	0.3	0.2	
				G2-V-1	0.3	0.2	
				G2-V-2	0.5	0.5	
				G2-V-3	0.4	0.4	
				G2-V-5	0.9	0.8	
			B-V-1	0.3	0.3		

8. 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。
- ・設置許可段階で実施したせん断特性試験結果に加えて、詳細設計段階で新たに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。解析モデルの設定及び評価ケースの設定に当たっては、引張剛性に関して、圧縮剛性と比較して異なる特性を示す結果（速度依存性を示す等）が得られたが、不確かさケースとして、試験結果を包含するようばらつきの範囲を幅広に考慮して影響確認する方針を示した。
- ・試験結果を踏まえたゴム支承の剛性の不確かさ及び衝突姿勢による不確かさも考慮し、衝突解析における評価ケースの設定の考え方について示した。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、また、設定した基本ケース及び不確かさケースに対する衝突解析の結果より、竜巻防護ネットの構造健全性が確保されることを確認した。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。

なお、詳細設計段階における対応事項について、別紙 6 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)

6 条(竜巻)－別添 1－添付 3.7－別紙 3－5

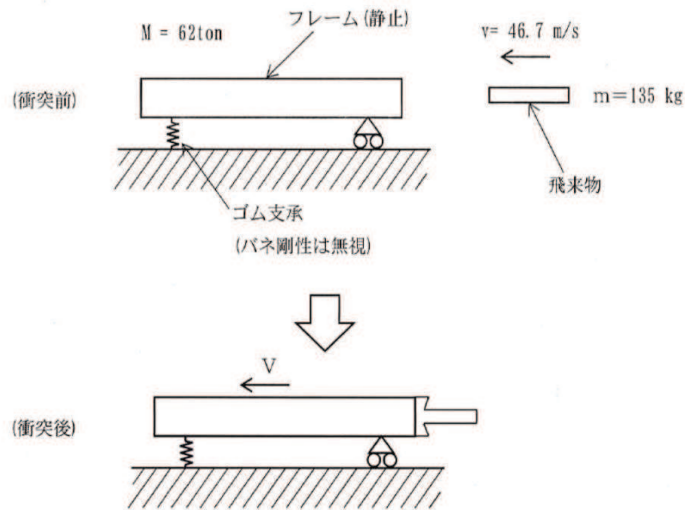


図1 飛来物衝突前後のイメージ

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)

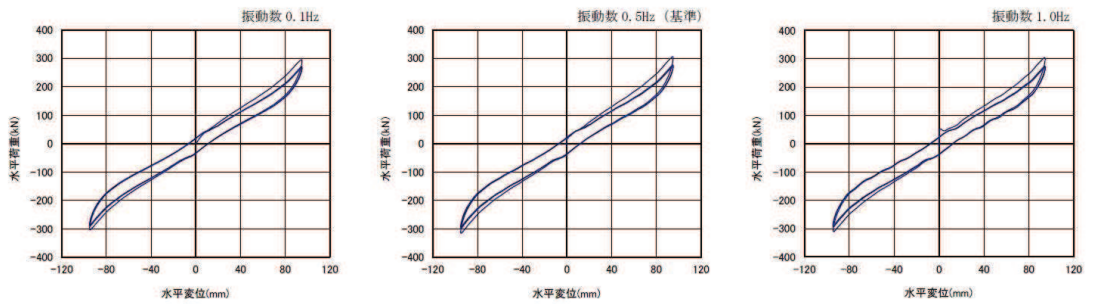
ここで、変位 $x = A \sin \omega t$ より ($A=95\text{mm}$, $\omega=2\pi f$, $f=0.1, 0.5, 1.0\text{Hz}$)

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。

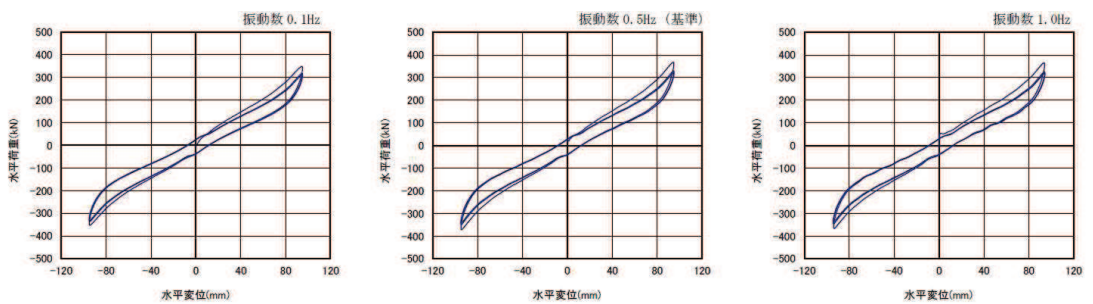
$$f = 0.1\text{Hzのとき}, A\omega = 95 \times 2\pi \times 0.1 \doteq 0.06\text{m/s}$$

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

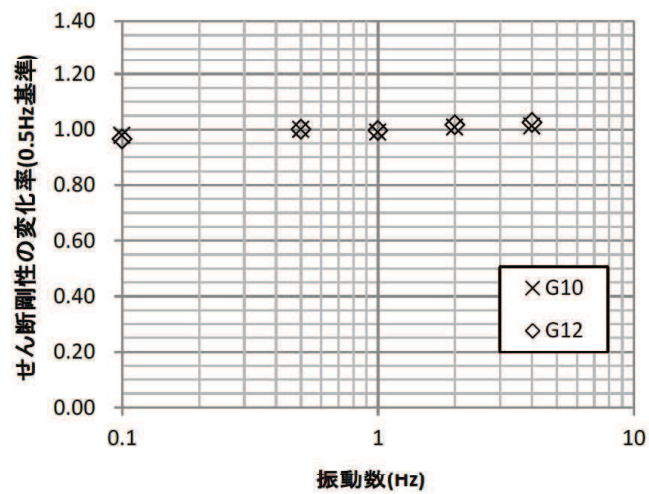
よって振動数依存性試験における変位速度の最大値は約0.06~0.60m/sの範囲となる。試験結果から、この速度範囲において、せん断剛性の変化は無視できるものであることを確認している。



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。

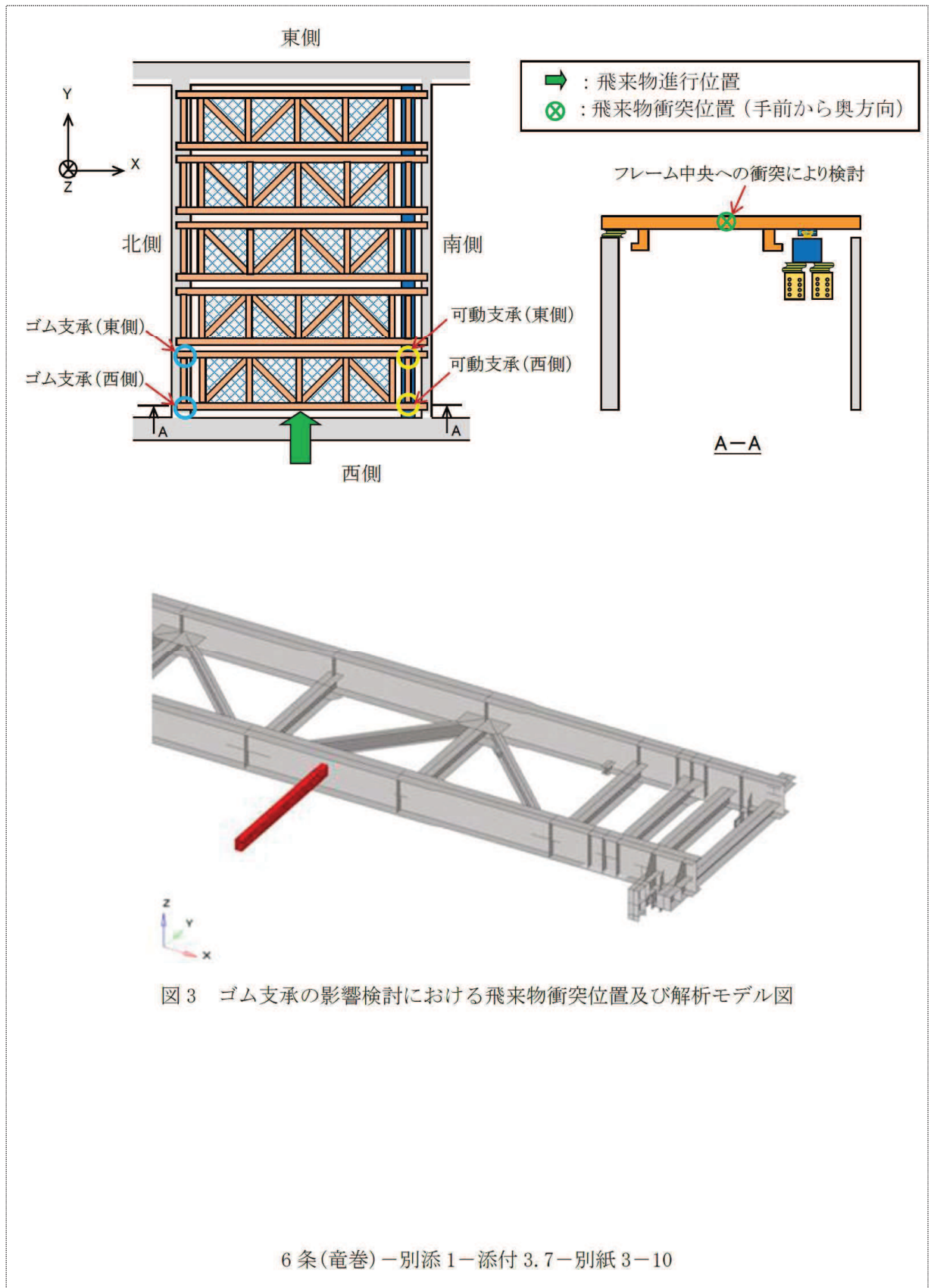
(2) 検討における解析条件

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のが想定される。

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。

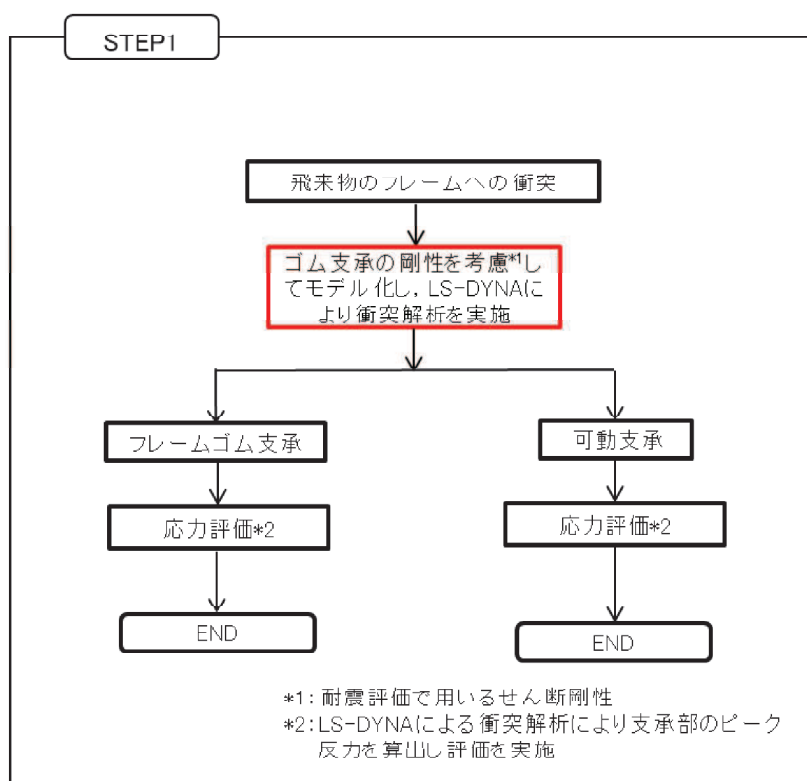


図1 STEP1 構造成立性確認フロー

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

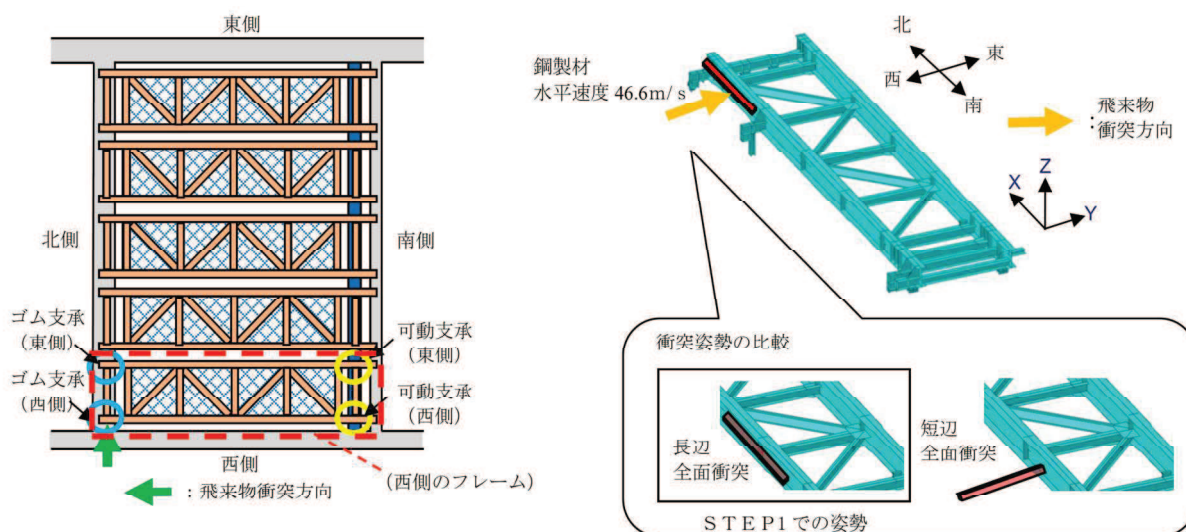


図 2 飛来物衝突位置及び解析モデル図 (STEP1)

6 条 (竜巻) - 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、可動支承のラ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。

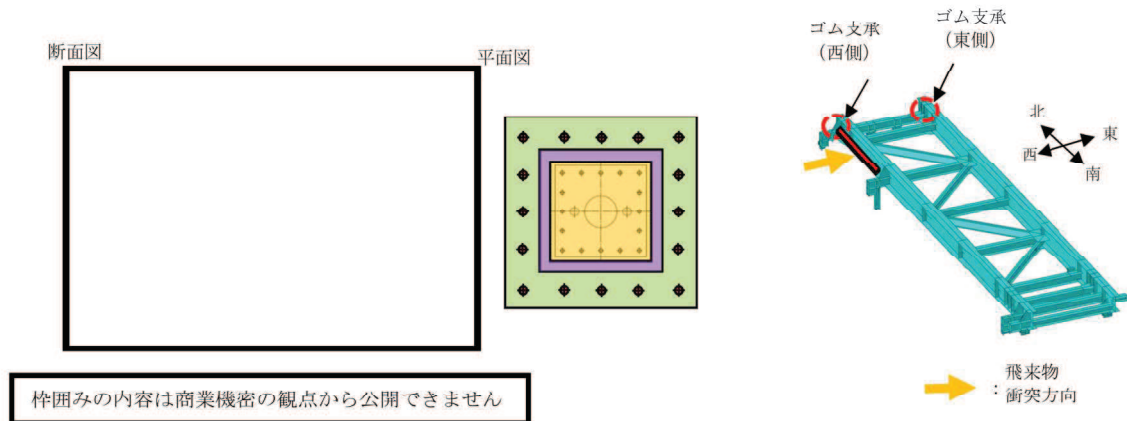


図 3 フレームゴム支承の構造図

6 条(竜巻)一別添 1-添付 3.7-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		
可動 支承	① ソールプレート	支圧応力	18	21	351	
	② オベリ材	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
			曲げ応力	33	32	258
		支圧部	支圧応力	67	66	351
	⑦ レール	曲げ応力	西側	400	390	343
			東側	390	400	343
		引張応力	8.8	8.7	343	
	⑧ レール取付ボルト	引張応力	600	600	525	
	⑨ エンドプレート接合ボルト	引張応力	450	450	420	
	⑩ 上部接合ボルト	せん断応力	220	220	323	
	⑪ 下部接合ボルト	組合せ	208 (211)	206 (212)	※2	
	⑫ ベースプレート	せん断応力	11	11	198	
		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。

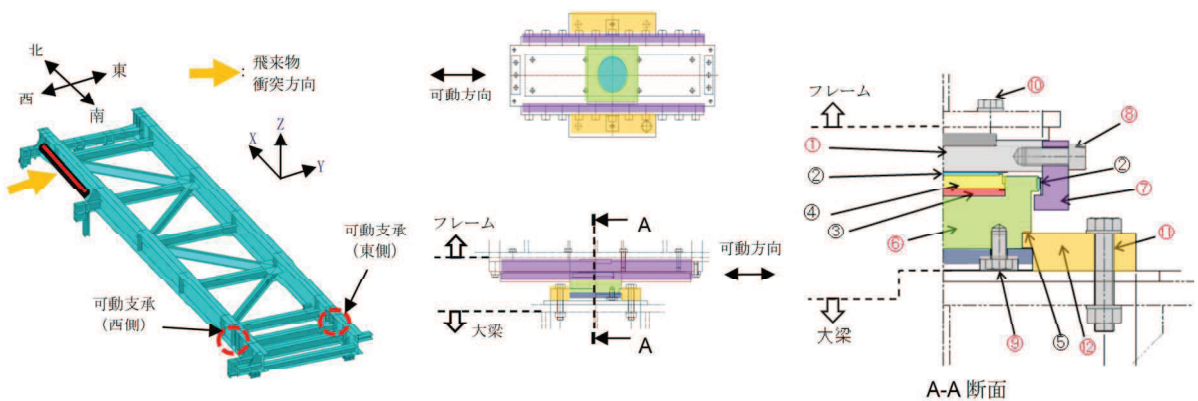


図4 可動支承の構造図

6条(竜巻)-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。

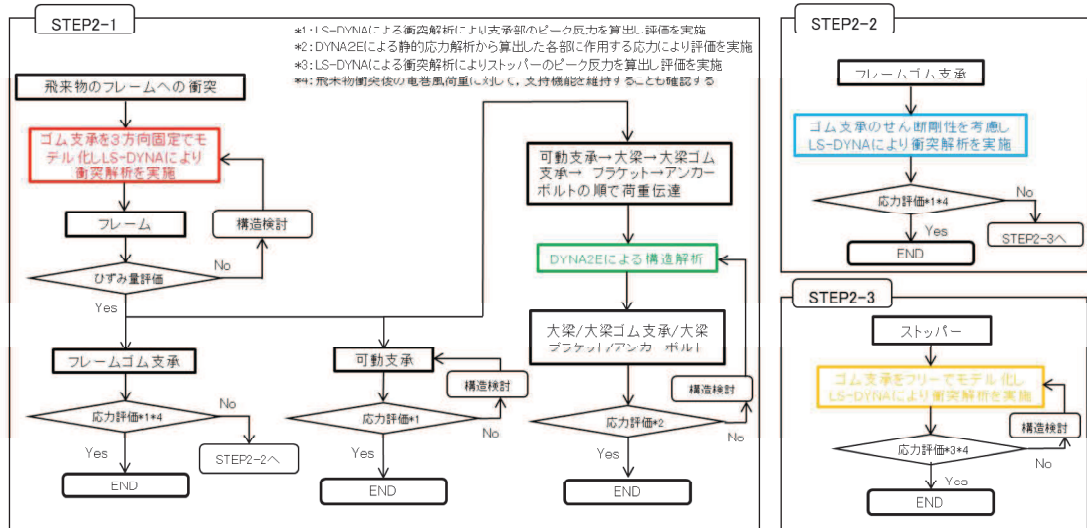


図1 STEP2 評価フロー

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

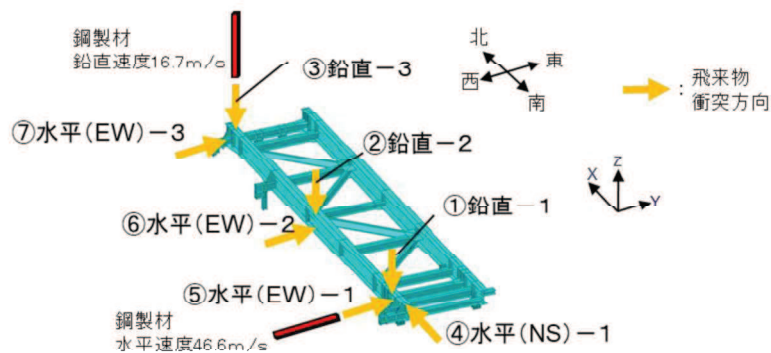


図2 飛来物衝突位置及び解析モデル図 (STEP2-1)

6条(竜巻)-別添1-添付3.7-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								
	アンカボルト	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
	アンカボルト	応力度(組合せ) (MPa)	40 (294)	38 (294)	170 (259)	160 (253)	370 (163)	93 (294)	130 (272)	110 (294)	100 (294)	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	3.0							
		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
	すべり材	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
	ヒストン	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
	ベアリング 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
	ベアリング 支柱部	応力(圧縮) (MPa)	93	82	62	68	51	52	61	63	160	230	95	110	54	56	351
		応力(曲げ) (MPa)	430	320	260	250	170	160	200	210	550	740	340	390	180	180	343
	レール	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
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	
ベアリング 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
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(EW)-1 フレーム 可動支承近傍	水平(EW)-2 フレーム 中央部	水平(EW)-3 フレーム ゴム支承近傍	
鉛直		鉛直	鉛直	水平(NS)	水平(EW)	水平(EW)	水平(EW)	
評価 結果	衝突方向 構造強度上の評価方針	位置						
		西側	○	許容値を超える部材 ・ゴム体 ・内部鋼板 ・取付ボルト ・アウター	○	○	○	許容値を超える部材 ・ゴム体 ・取付ボルト ・アウター
	東側	○	○	○	○	○	○	許容値を超える部材 ・ゴム体 ・アウター
	可動支承	西側	許容値を超える部材 *2 ・レール ・エンドフレート接合ボルト ・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 ・エンドフレート接合ボルト ・下部接合ボルト	○
東側		○	○	○	○	許容値を超える部材*2 ・レール ・レール取付ボルト ・エンドフレート接合ボルト ・上部接合ボルト ・下部接合ボルト	○	

*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

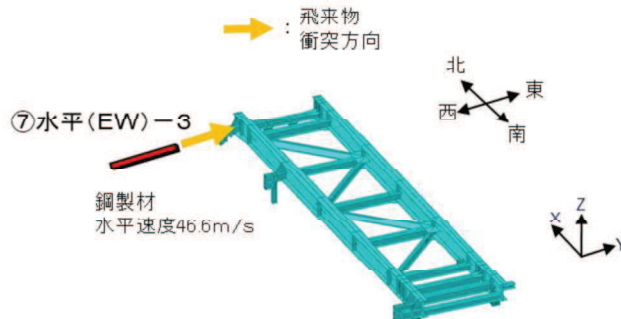


図3 飛来物衝突位置及び解析モデル図（STEP2-2）

(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

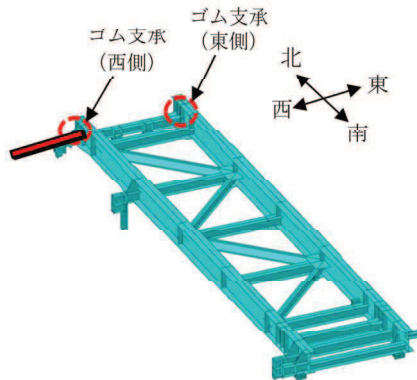


図4 飛来物衝突位置及び評価対象 (STEP2-2)

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

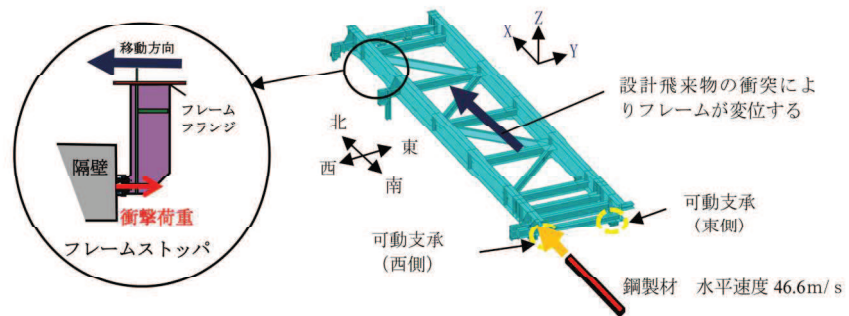


図 5 可動支承の挙動確認における飛来物衝突位置及び解析モデル図（STEP2-3）

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。

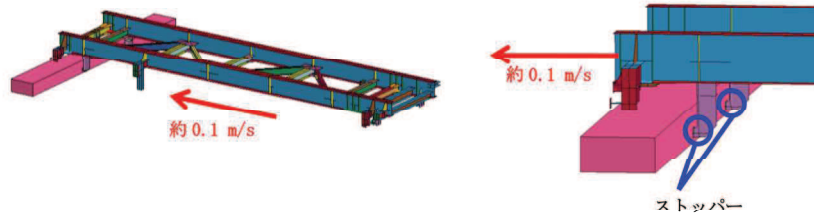


図 6 設計飛来物衝突時のフレーム変位イメージ

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

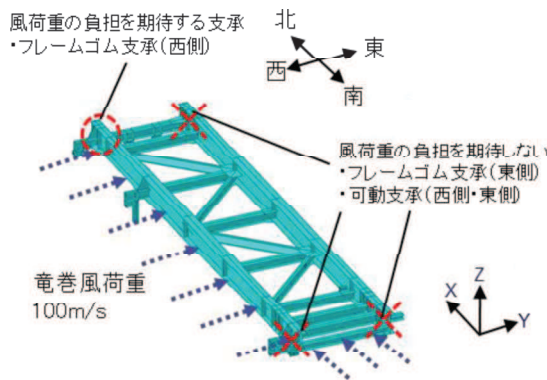


図7 竜巻風荷重に対する評価モデル図

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_ASの許容応力

5. STEP2における構造成立性見通し

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、構造成立性を見通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。

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。

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。

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直し確認において、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。

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。

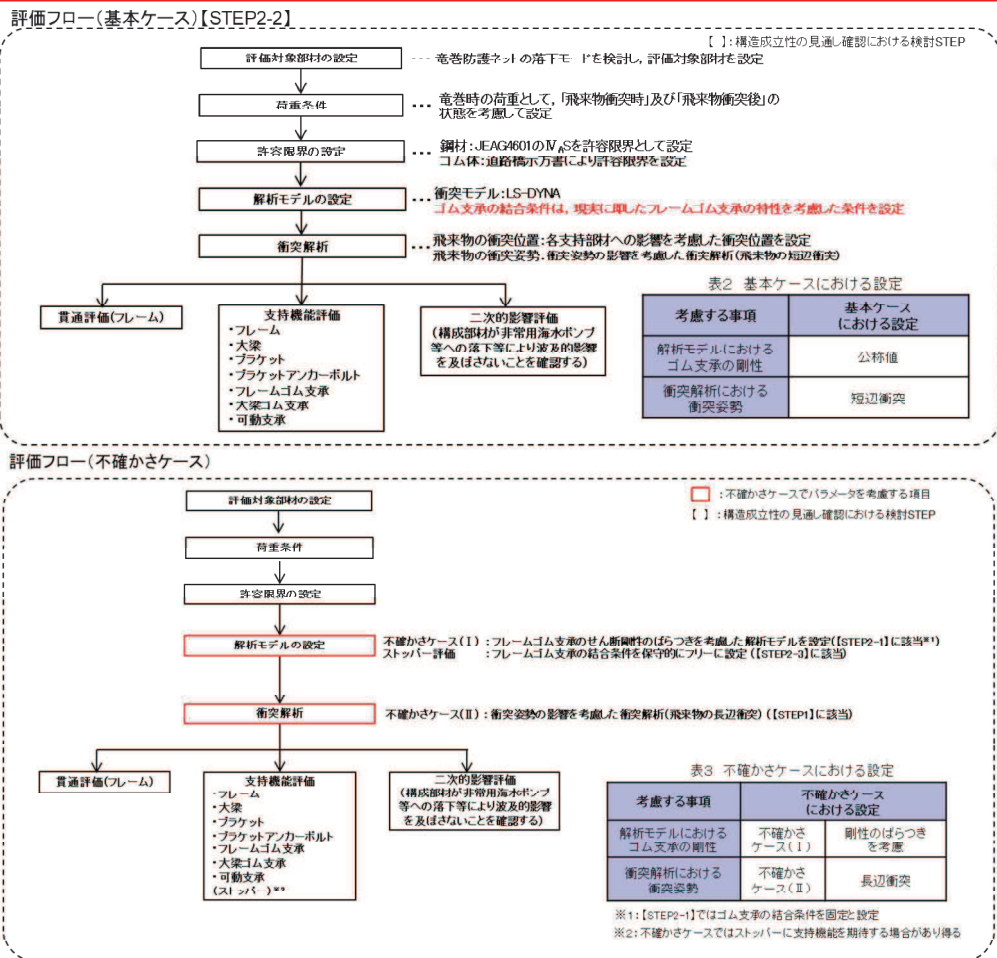


図1 詳細設計段階における評価フロー

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		許容限界	説明段階	
					作用荷重	限界状態		E P (構造成立性見直し)	C P
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て、飛来物が非常に強い衝撃を受け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】 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。	設計飛来物が支持部材に衝突した場合に、衝突箇所が発生する衝撃荷重によって貫通が生じないように、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 竜巻風荷重 衝撃荷重 	衝突面の全断面欠損	NE107-13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 により衝突解析によりひずみ量を算出)	○ (STEP2-1)	○ (基本ケース及び不備かきケース)
	【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て、飛来物が非常に強い衝撃を受け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。	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。	設計飛来物が支持部材に衝突した場合に、衝突箇所が発生する衝撃荷重によって貫通が生じないように、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。	大梁	<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 JEA-G 4601 の IV AS 以下	○ (STEP2-1)	○ (基本ケース及び不備かきケース)

※ 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 (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		説明段階※			
					作用荷重	限界状態	許容限界	EP (構造成立性見直し)	C P	
							STEP1	STEP2		
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、飛来物が非常用流水ポンプ等へ衝突することを防止する。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、飛来物が非常用流水ポンプ等へ衝突することを防止する。飛来物が支持部材を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載するネット及び防護板を支持する機能を維持可能な構造強度を有する。	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「道路橋示方書・巨観説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。	ゴム体 内部銅板 大梁ゴム支 承取付ボルト	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	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 JEAC 4601 のIV,S以下	-	○ (STEP2-1)	○ (基本ケース及び不備かきケース)

*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: 不備かき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、飛来物及び他の荷重に対して、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、非営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他の荷重に対して、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、上載するフレーム等を支持する機能を維持するため、作用する応力が許容応力を超えないことを確認する。	可動支承 ソールプレート ベースプレート レール レール取付ボルト エンドプレート 接合ボルト 上部接合ボルト 下部接合ボルト ベースプレート	<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 4501 の IV 以下	○ (STEP2-1)	○ (基本ケース及び不確かさケース)

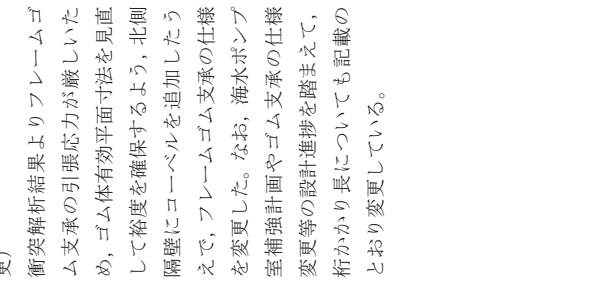
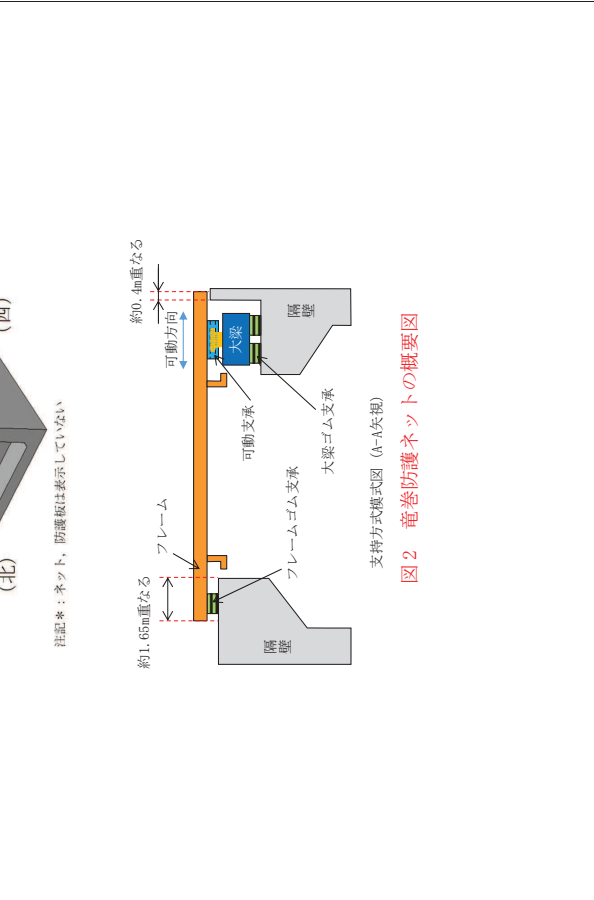
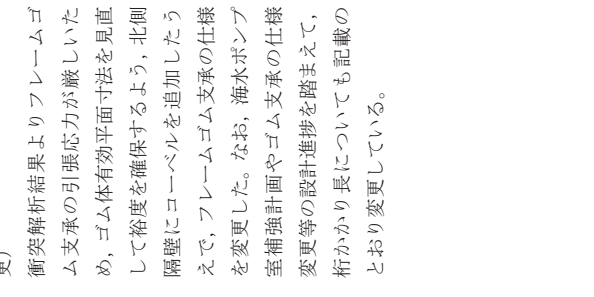
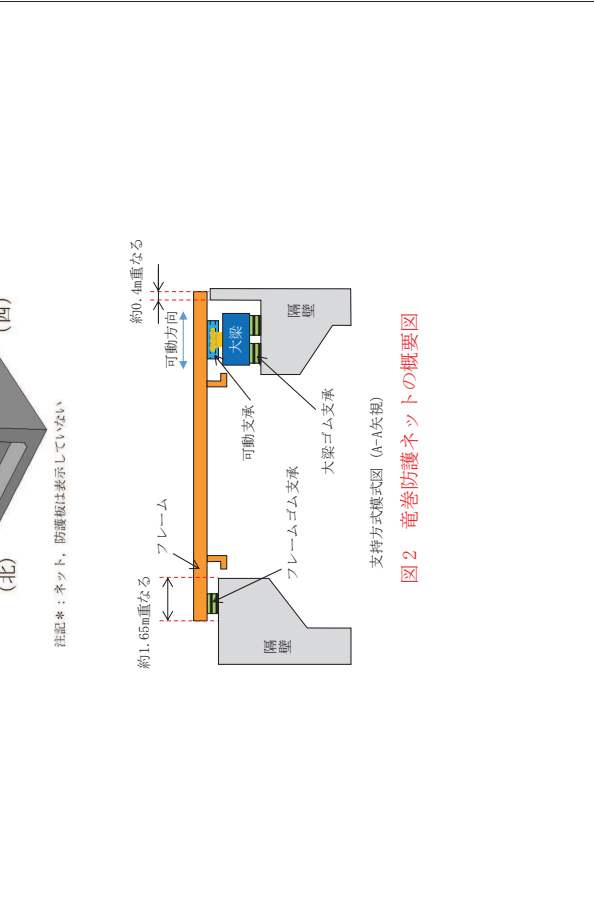
※ EP：設置許可段階 CP：詳細設計段階

(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。

6条(竜巻)－別添1－添付3.7－別紙6-4

以上

設置許可段階	詳細設計段階	備考
<p>まとめ資料からの設計進捗点の抽出</p> <p>(記載について)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・設置許可段階（まとめ資料）から設計進捗があった内容を抽出し、詳細設計段階における対応と対比した。 ・抽出結果を踏まえ、以下の3点に分類し備考欄に記載した。 <ul style="list-style-type: none"> ①海水ポンプ室の側壁及び隔壁の補強計画を踏まえた竜巻防護ネットの配置設計進捗 <ul style="list-style-type: none"> 【例】フレーム基数の変更（5基⇒4基） 大梁の支持位置変更（ブラケット廃止） ②設置許可段階での説明事項を踏まえた耐震及び強度計算方針の設定並びに方針に基づく設計進捗 <ul style="list-style-type: none"> 【例】構造強度評価フロー図の設定 ゴム支承に係る特性試験を踏まえた剛性の設定 ③記載適正化（内容に変更なし） 	<p>詳細設計段階における対応</p>	

設置許可段階	詳細設計段階	備考
<p>【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7ー3】 海水ポンプ室補機ポンプエリアの隔壁（南側）は壁厚が薄くフレームを支持できないため、フレーム支持用の大梁を設置し、この大梁と隔壁（北側）天面にてネット及び防護板を取り付けたフレームを支持する。 また、… フレームは海水ポンプ室補機ポンプエリアの北側隔壁（高さ1.5m）に対して約1.2m重なる構造とし、南側隔壁（厚さ0.6m）に対しても約0.55m重なる構造とし、海水ポンプ室補機ポンプエリアに落下しない構造とする。 竜巻防護ネットの構造概要を図2及び図3に示す。また、竜巻防護ネットの仕様を表1に示す。 なお、仕様は詳細設計により変更もあり得る。</p>	<p>海水ポンプ室補機ポンプエリアの南側隔壁を補強し設置したコーベル上にフレーム支持用の大梁を設置し、この大梁とコーベルを追加した隔壁（北側）天面にてネット及び防護板を取り付けたフレームを支持する。 また、… フレームは海水ポンプ室補機ポンプエリアの北側隔壁（厚さ4m）に対して約1.65m重なる構造とし、南側隔壁（厚さ0.5m）に対しても約0.4m重なる構造とし、海水ポンプ室補機ポンプエリアに落下しない構造とする。 竜巻防護ネットの構造概要を図2及び図3に示す。また、竜巻防護ネットの仕様を表1に示す。</p>	<p>分類① （ブラケットの廃止・支持壁変更） 海水ポンプ室補強計画を踏まえ、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。</p> <p>分類① （フレーム基数の変更） 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した。</p> <p>分類② （フレームゴム支承の仕様変更） 衝突解析結果よりフレームゴム支承の引張応力が厳しいため、ゴム体有効平面寸法を見直して裕度を確保するよう、北側隔壁にコーベルを追加したうえで、フレームゴム支承の仕様を変更した。なお、海水ポンプ室補強計画やゴム支承の仕様変更等の設計進捗を踏まえて、桁かかり長についても記載のとおり変更している。</p>
 <p>注：竜巻防護ネットの仕様については、今後の詳細設計により変更もあり得る。</p>	 <p>注記*：ネット、防護板は表示していない</p>	<p>支持方式模式図（A-A矢視）</p> <p>図2 竜巻防護ネットの概要図</p>
 <p>注：竜巻防護ネットの仕様については、今後の詳細設計により変更もあり得る。</p>	 <p>注記*：ネット、防護板は表示していない</p>	<p>支持方式模式図（A-A矢視）</p> <p>図2 竜巻防護ネットの概要図</p>

設置許可段階

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7ー4】

詳細設計段階

備考

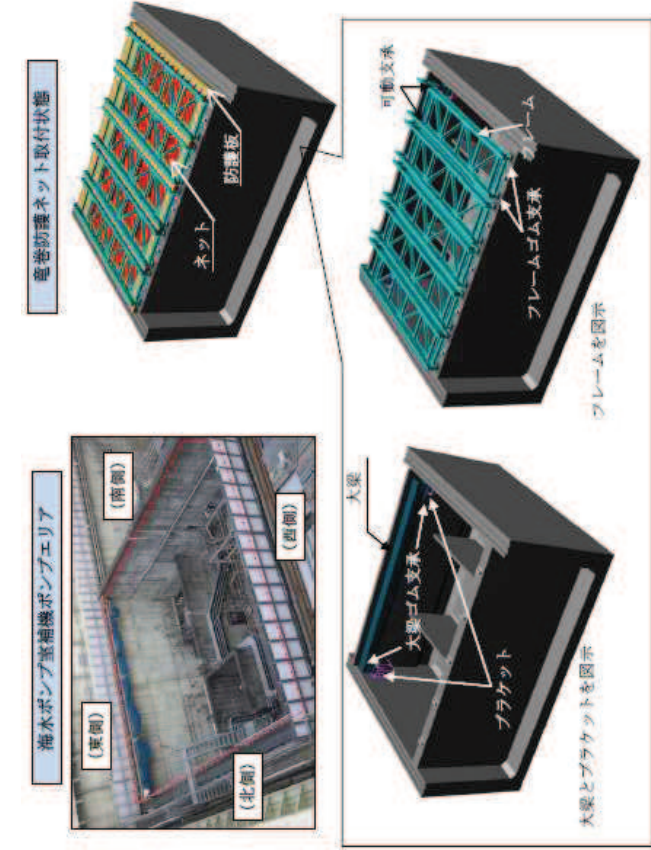
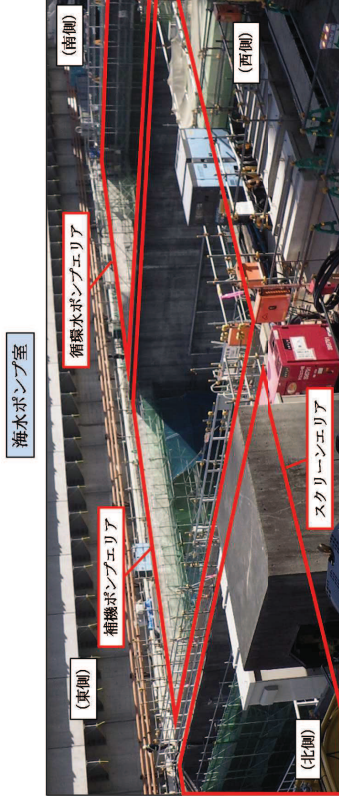


図3 竜巻防護ネットの概要図（北西側から見た場合）

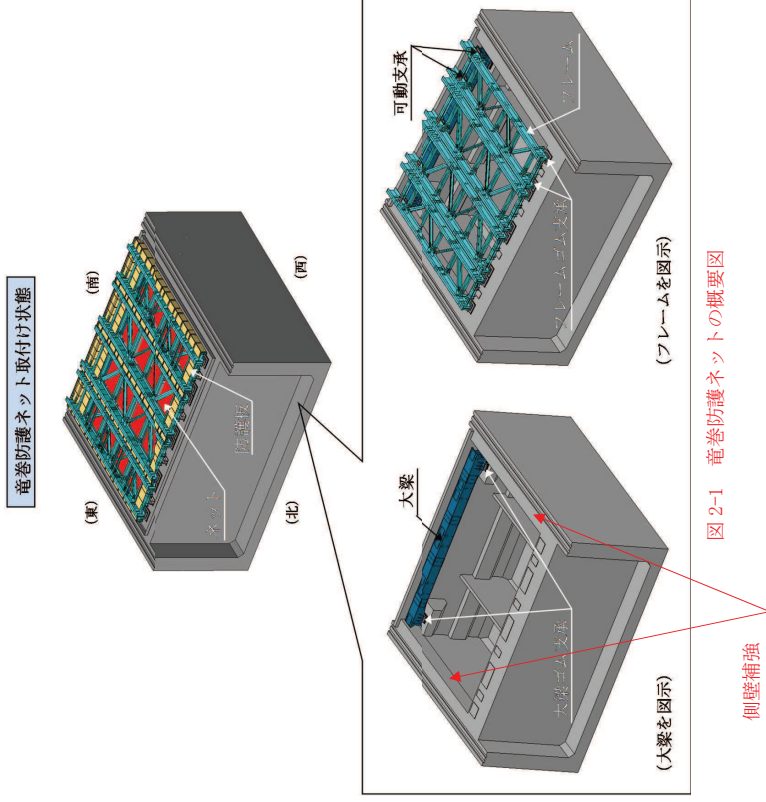


図2-1 竜巻防護ネットの概要図

分類①
（フレーム基数の変更）
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した。

分類②
（ブラケットの廃止・支持壁変更）
海水ポンプ室補強計画を踏まえ、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。

分類③
（フレーム支束の仕様変更。P4.1-別紙5-2と同様。）

設置許可段階

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7ー4】

表1 竜巻防護ネットの仕様

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

詳細設計段階

表 2-2 竜巻防護ネット主要仕様比較

総質量	約 358 ton	
全体形状	約 26m（東西方向）×約 23m（南北方向） 高さ 約 1m	
ネット（金網部）	構成	—（変更なし）
	寸法	—（変更なし）
フレーム	主要材料	—（変更なし）
	数量	4組
大梁	仕様	長さ×幅×高さ 主桁：約 23m×0.6m×1.0m 横補強材：約 5.4m×0.4m×0.4m 約 5.4m×0.5m×0.4m 約 4.3m×0.4m×0.4m 約 4.3m×0.5m×0.4m ブレース：約 5.9m×0.4m×0.4m 約 5.9m×0.2m×0.4m 約 6.8m×0.4m×0.4m 約 6.8m×0.2m×0.4m
	主要材料	SM490A，SM400A，SS400
ゴム支承	寸法	長さ×幅×高さ： 約 25m×1.6m×1.3m
	主要材料	SM490A
可動支承	仕様	—（変更なし）
	数量	大梁用：4個（2組（2個/組）） フレーム用：8個（4組（2個/組））
防護板	数量	8個（4組（2個/組））
耐震クラス	材料	SM400A
	—	C（S s）

備考

分類①
（フレーム基盤の変更）
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した。

分類②
（大梁断面サイズ変更及び材料変更，防護板の材料変更）
設計進捗を踏まえ，断面サイズ及び材料を変更した。

分類③
（記載適正化）

設置許可段階

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7ー6】

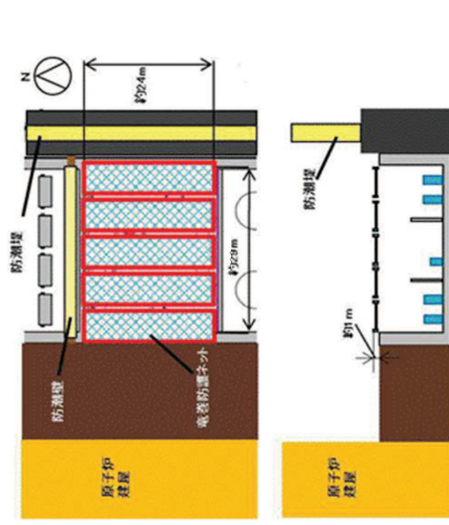


図4 竜巻防護ネットの配置（平面図）

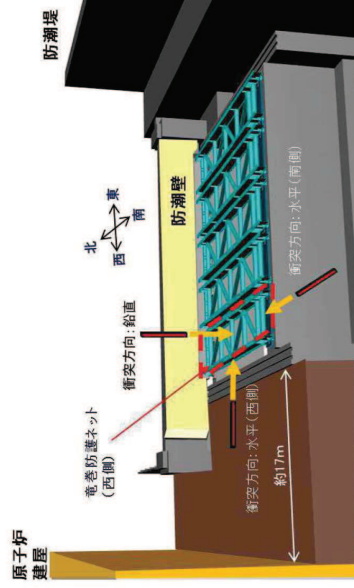


図5 竜巻防護ネットの配置（俯瞰図）

詳細設計段階

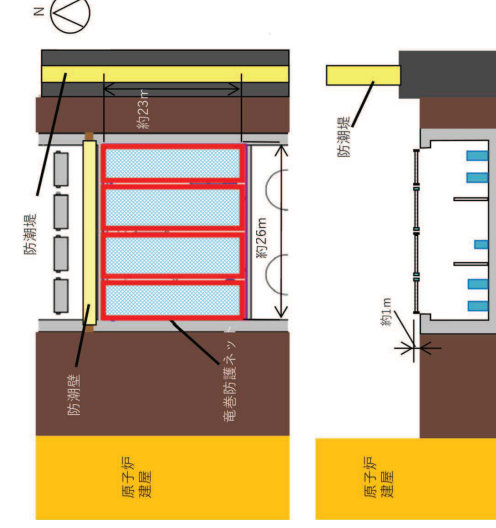


図4 竜巻防護ネットの配置（平面図）

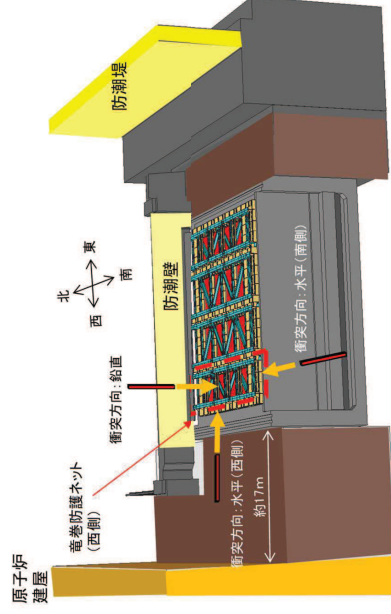


図5 竜巻防護ネットの配置（俯瞰図）

分類①
（フレーム基盤の変更）
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した。

備考

設置許可段階

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7ー9】

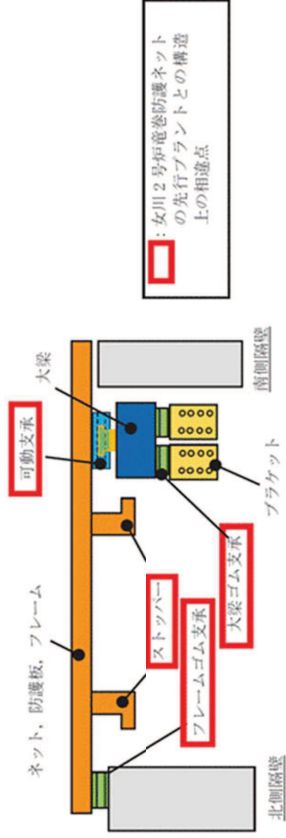


図7 竜巻防護ネットの構造（イメージ）

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7ー11】

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

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7ー13】

3.5.2 構造設計

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

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

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

詳細設計段階

分類①

（フレーム基数の変更）
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した。

分類①

（ブラケットの廃止・支持壁変更）
海水ポンプ室補強計画を踏まえ、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。

分類①

（フレーム基数の変更）
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した。

分類①

（ブラケットの廃止・支持壁変更）
海水ポンプ室補強計画を踏まえ、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。

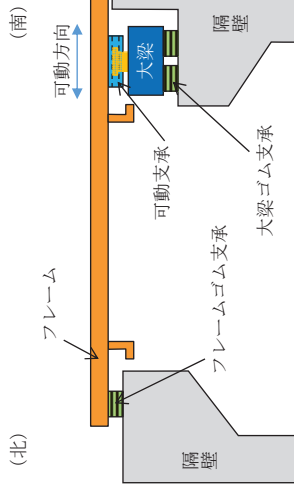


図7 竜巻防護ネットの構造（イメージ）

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

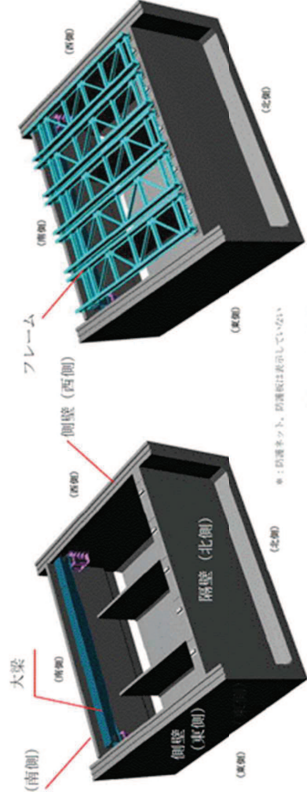
ネット（金網部）及びフレームで発生した荷重は、海水ポンプ室補機ポンプエリアの壁面に伝達する構造とする。

海水ポンプ室の**南側隔壁に大梁を設置することで、フレームに支持する。もう一方の支持の厚さ1.5mの北側隔壁にて実施する。**

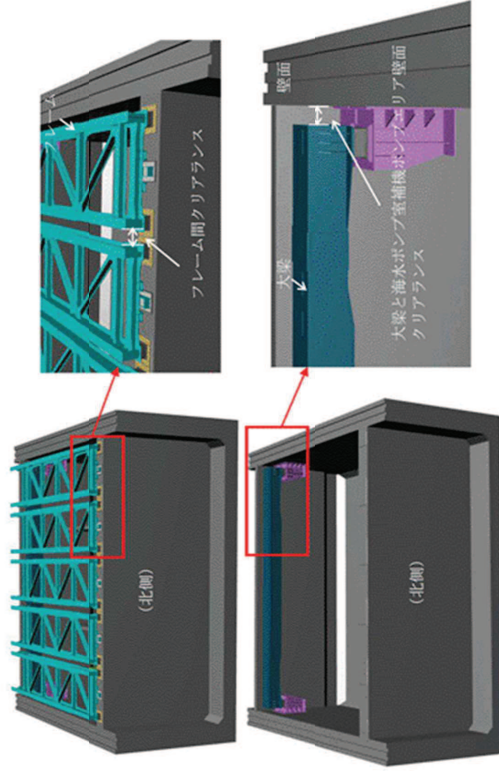
以上により、十分な厚みがあり強度が確保できる**北側隔壁と南側隔壁**で荷重を受ける構造とする。

設置許可段階

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7ー14】



フレーム、大梁の設置状況



フレーム、大梁のクリアランス例

図9 フレーム、大梁の設置状況

詳細設計段階

備考

分類①
（フレーム基数の変更）
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した。

分類①
（ブラケットの廃止・支持壁変更）
海水ポンプ室補強計画を踏まえ、既設東西側壁にブラケットを設置し大梁を支持する南側隔壁にて大梁を支持する構造とした。

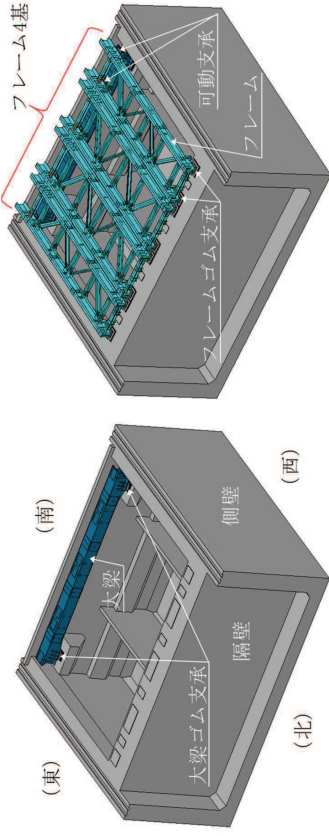


図2-4 フレーム及び大梁の配置概要図

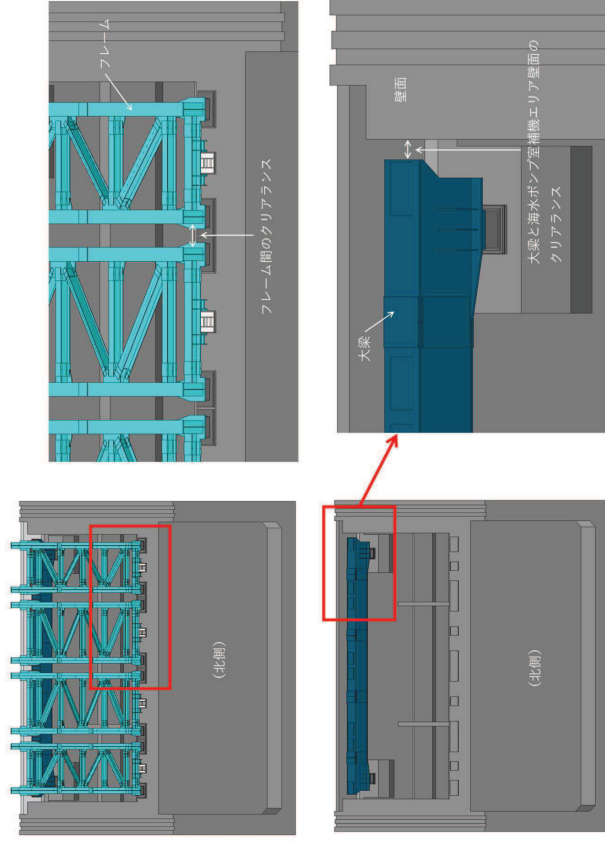


図9 フレーム、大梁の設置状況

設置許可段階

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7-15】

2.6.2 構造設計

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

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

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

大梁とフレームの接続部は可動支承を用いる。可動支承はフレーム1基に対して、2個の可動支承で支持する。（大梁には計10個の可動支承を設置）可動方向は南北方向のみである。

詳細設計段階

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、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。

備考

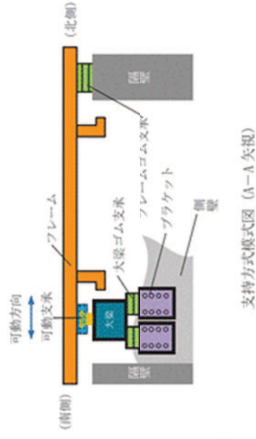
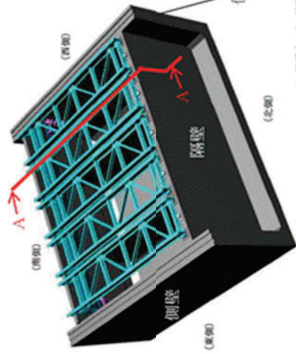
分類①
（フレーム基数の変更）

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した。

分類①
（ブラケットの廃止・支持壁変更）

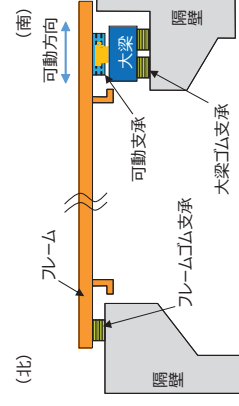
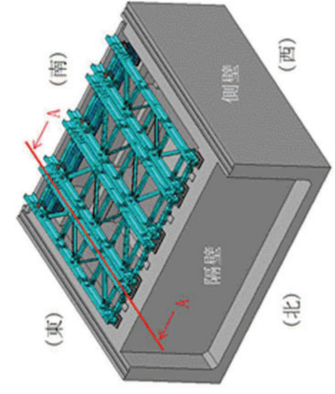
海水ポンプ室補強計画を踏まえ、既設東西側壁にブラケットを設置し大梁を支持するとしていた構造から、補強する南側隔壁にて大梁を支持する構造とした。

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7-15】



※：防護ネット、防護板は表示していない

図 10 支持構造模式図



※：防護ネット、防護板は表示していない

図 2-5 竜巻防護ネットの支持構造模式図

分類①
（フレーム基数の変更）

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）

分類①
（ブラケットの廃止・支持壁変更）

海水ポンプ室補強計画を踏まえ、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。

詳細設計段階における対応状況（竜巻防護ネット）

設置許可段階

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7-16】

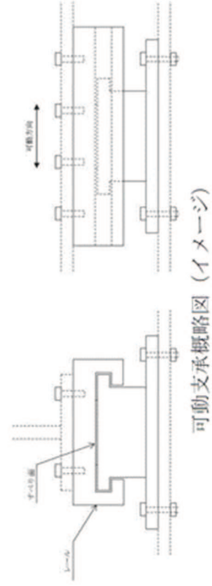
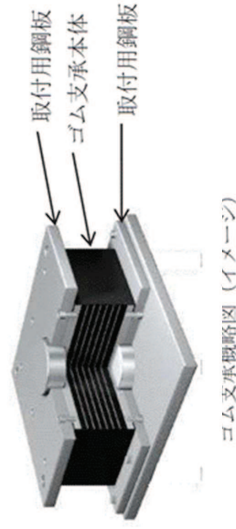
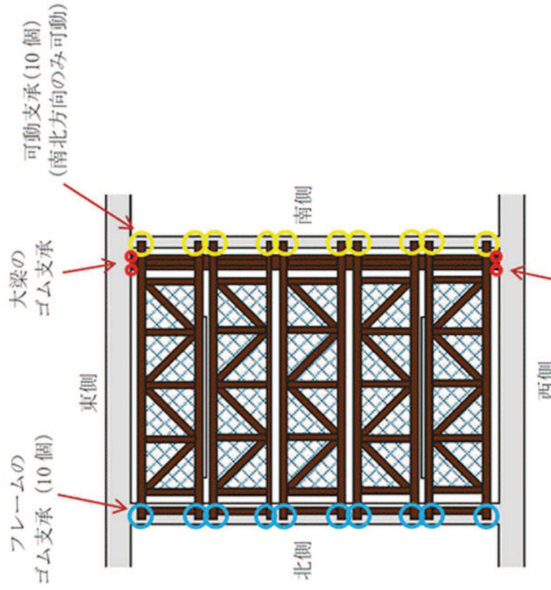


図 11 ゴム支承及び可動支承概略図

詳細設計段階

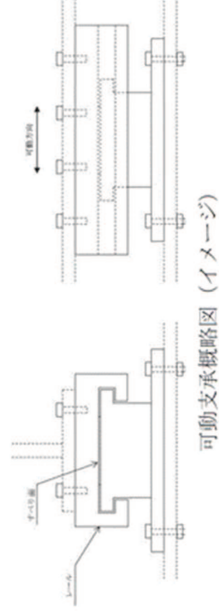
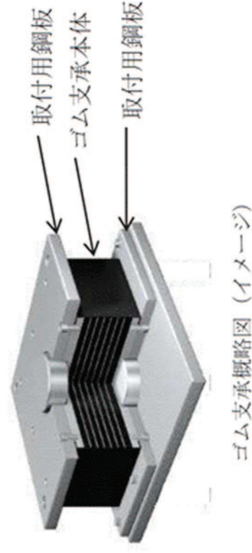
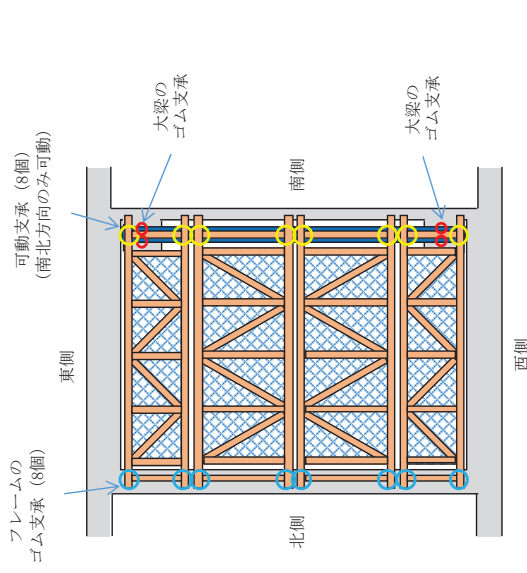


図 11 ゴム支承及び可動支承概略図

備考

分類①
（フレーム基数の変更）
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した。

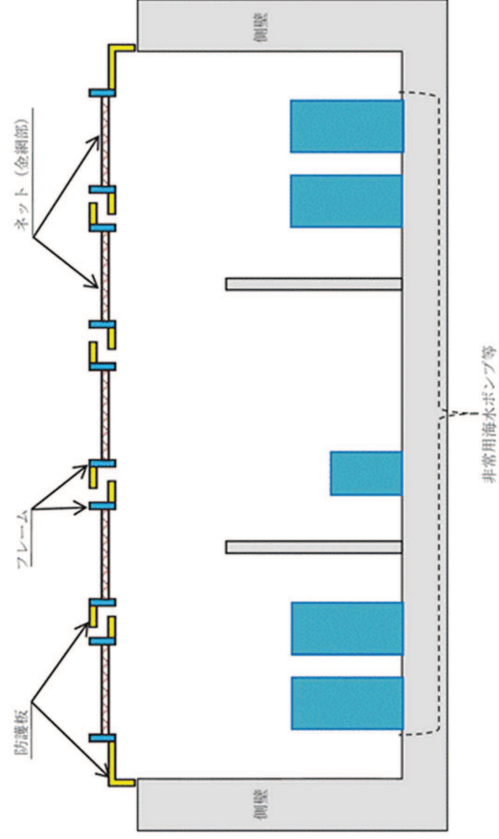
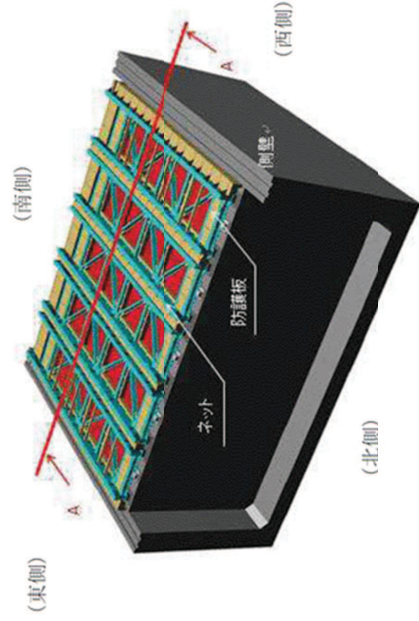
分類①
（ブラケットの廃止・支持壁変更）
海水ポンプ室補強計画を踏まえ、既設東西側壁にブラケットを設置し大梁を支持するとしていた構造から、補強する南側隔壁にて大梁を支持する構造とした。

分類②
（フレームゴム支承の仕様変更。P4.1-別紙5-2と同様。）

分類②
（可動支承の仕様変更）
部材のサイズアップや仕様変更を実施し、強度を向上させた。

設置許可段階

【6条（巻巻）一別添1ー添付3.7ー18】



海水ポンプ室補機ポンプエリア断面から見た防護板の配置（A-A 矢視）

図 12 フレーム、防護板等配置イメージ

詳細設計段階

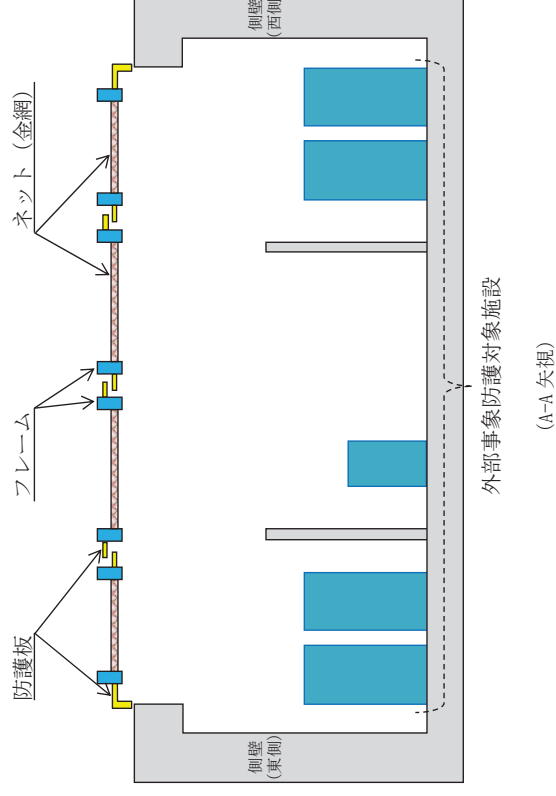
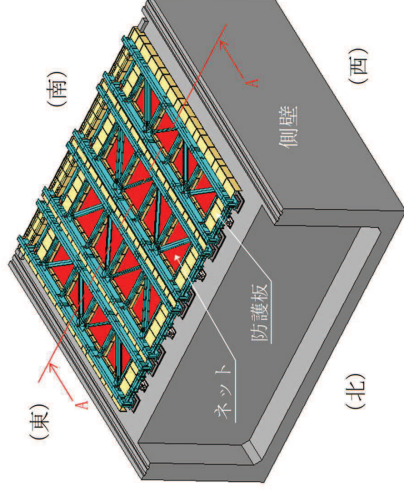


図 2-3 防護板の配置概要図

分類①
（フレーム基数の変更）
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した。

備考

設置許可段階

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7ー26】

表 10 竜巻防護ネットの損傷モード整理表 (6/6)

評価対象	作用荷重	損傷モード	評価項目	ゴム支承、可動支承採用による設計上の配慮又は対策
ブラケット 本体	構造物自重 風荷重 波浪荷重	縦断による大梁の落下	【支持機能評価】 せん断応力 曲げ応力 引張応力	(1) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響に配慮する必要はある
	構造物自重 風荷重 波浪荷重 ネット自重 フレーム自重 大梁自重 自重			
ブラケットア ンカーボルト				

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7ー26】

表 11 ゴム支承、可動支承の採用による設計上の配慮又は対策が必要な事項

評価部位	設計上の配慮又は対策が必要な事項			
	(1) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響	(2) ストッパーの設置	(3) 作用荷重による変位に対する影響	(4) 作用荷重により発生する振動の影響
ネット (金網部)	○	-	-	-
防護板	○	-	○	-
フレーム	○	○	○	○
大梁	○	-	○	-
ゴム支承	○	-	○	-
可動支承	○	-	○	-
ブラケット	○	-	-	-

凡例 ○：配慮又は対策が必要
-：対応不要

詳細設計段階

(なし)

表 11 ゴム支承、可動支承の採用による設計上の配慮又は対策が必要な事項

評価部位	設計上の配慮又は対策が必要な事項			
	(1) 衝撃荷重に対するゴム支承・可動支承の影響	(2) ストッパーの設置	(3) 作用荷重による変位に対する影響	(4) 作用荷重により発生する振動の影響
ネット (金網部)	○	-	-	-
防護板	○	-	○	-
フレーム	○	○	○	○
大梁	○	-	○	-
ゴム支承	○	-	○	-
可動支承	○	-	○	-

凡例 ○：配慮又は対策が必要
-：対応不要

備考

分類①
(ブラケットの廃止)
海水ポンプ室補強計画を踏まえ、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。

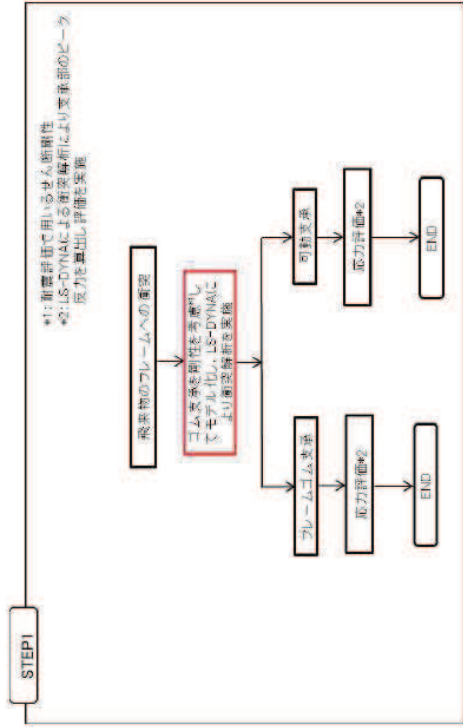
分類①
(ブラケットの廃止)
海水ポンプ室補強計画を踏まえ、既設東西側壁にブラケットを設置し大梁を支持するとしていた構造から、補強する南側隔壁にて大梁を支持する構造とした。

分類②
(ストッパーの位置付けの整理)
構造強度評価上は期待しないが、道路橋示方書における落橋防止装置の考え方を参考に、自主的にストッパーを設置する。なお、(3)及び(4)の設計上の配慮について検討した結果、現状の設計に影響を及ぼさないことを確認した。

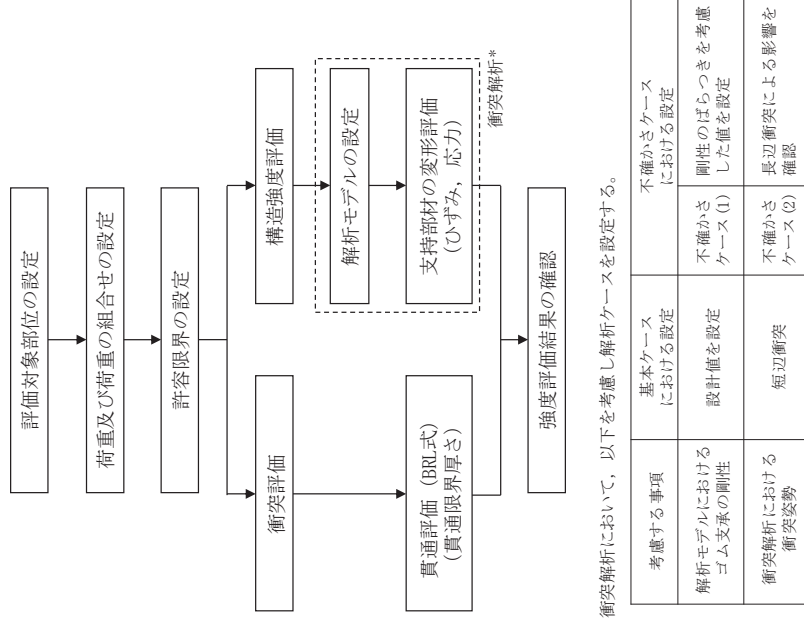
詳細設計段階における対応状況（竜巻防護ネット）

設置許可段階	詳細設計段階	備考
<p>【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7ー27】 これらの影響を踏まえて、構造成立性の見直しを確認するために、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実施する。評価は以下の2ステップで実施する。各STEPの評価フローを図14に示す。また、支持部材の評価方法については別紙2に幣理する。</p> <p>【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する。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。STEP1の評価結果について別紙3に幣理する。</p> <p>【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、以下の評価を実施する。STEP2の評価結果については別紙4に幣理する。</p> <p>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う。</p> <p>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する。</p> <p>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する。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う。</p>	<p>(1) 詳細設計段階における検討経緯 「3. 設置許可段階における主な説明事項」及び海水ポンプ室の耐震補強計画を踏まえて、竜巻防護ネットの詳細設計を実施した。検討の経緯及び概要について以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 海水ポンプ室の詳細設計における構造を、竜巻防護ネットの設計を反映した。具体的には、東西側壁上部への補強梁設置に伴い、海水ポンプ室東西方向開口幅が狭くなったことから、フレーム幅及びフレーム基数の見直しを実施することとした。また、南側隔壁補強を踏まえ、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。 ▶ 設置許可段階では保守的にゴム支承の拘束条件を3方向固定として支持部材の構造成立性を確認していたが、詳細設計段階では、ゴム支承剛性に係る特性試験を実施した上で、ゴム支承の拘束条件を3方向弾性とし、試験を踏まえた剛性のばらつきを不確かさケースとして影響確認することとした。このとき、竜巻防護ネットの機能維持の考え方として、設置許可段階では2つのフレームゴム支承のうち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としていたが、詳細設計段階においては、いずれのゴム支承も許容値を超えず構造強度上の評価方針を満足させる方針とした。 ▶ 可動支承についても、詳細設計段階においてはサイズアップやボルトの仕様変更等の対応を行い、許容値を満足させる方針とした。 ▶ いずれの支承部も許容値を満足させる方針としたことに伴い、構造強度評価において、ストッパーに対して竜巻防護ネットの支持機能を期待しない方針とした。 ▶ 飛来物の衝突姿勢（長辺衝突）による影響について、不確かさケースとして確認する方針とした。 <p>(4) 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を図4-1に示す。</p> <p>なお、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は、別紙5に示す。衝突解析の実施に当たり、現実には即したゴム支承の特性を考慮し、適切な解析モデルを設定するよう、ゴム支承の剛性の設定方針及び特性試験の実施について次章に示す。</p>	<p>分類② （強度評価フローの見直し） 設置許可段階における説明事項を踏まえ、構造成立性を確認した評価フローを組み替え、基本ケース及び不確かさケースの評価を実施する評価フローとした。詳細については「補足説明資料710-1 4.1 竜巻防護ネットの衝突解析について」に示す。</p>

設置許可段階



詳細設計段階



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巻の剛性	設計値を設定	不確かさケース(1)とした値を設定
衝突解析における衝突姿勢	短辺衝突	不確かさケース(2)の確認

図 4-2 詳細設計における竜巻防護ネットの支持部材の評価フロー図

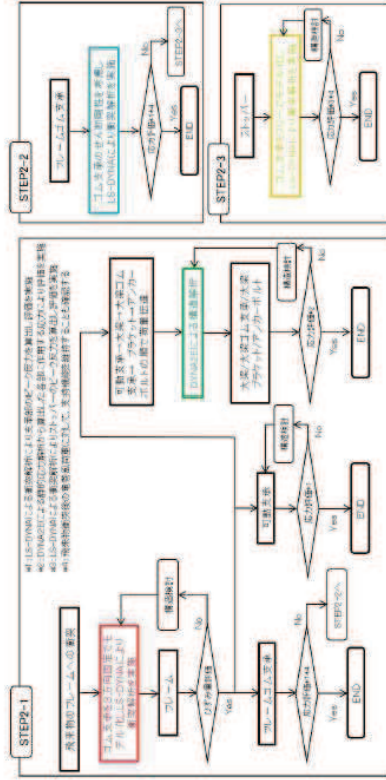


図 14 STEP1, STEP2 評価フロー

備考

分類②
 (強度評価フローの見直し)
 設置許可段階における説明事項を踏まえ、構造成立性を確認した評価フローを組み替え、基本ケース及び不確かさケースの評価を実施する評価フローとした。詳細については「補足説明資料 710-1 4.1 竜巻防護ネットの衝突解析について」に示す。

詳細設計段階における対応状況（竜巻防護ネット）

設置許可段階

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7ー31】

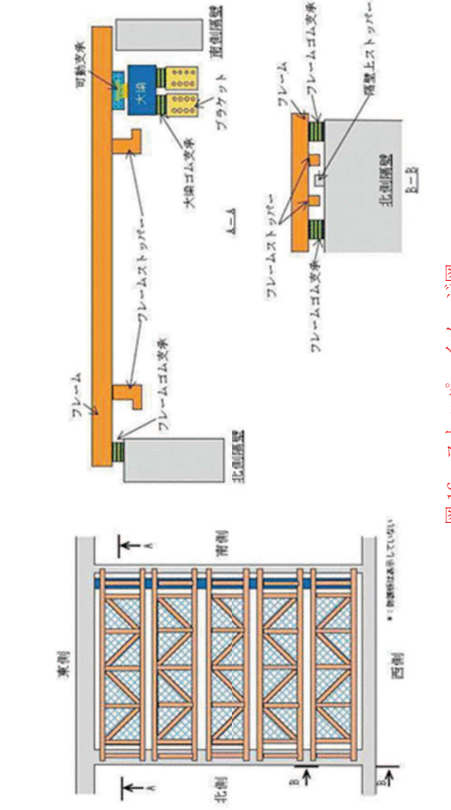


図 16 ストッパーイメージ図

表 16 衝突解析におけるゴム支承、可動支承の解析条件

解析条件	ゴム支承	可動支承
【STEP2-1】 （大梁、フレームゴム支承、大梁ゴム支承、可動支承、ブラケットの評価に適用）	ゴム支承の結合条件を3方向固定（下部構造に対し、支承部のピーク荷重がそのまま伝達される条件で評価を実施）	可動方向の結合条件をフリー
【STEP2-2】 （フレームゴム支承の評価に適用）	ゴム支承の結合条件を耐震評価で用いるせん断剛性（実現象に近いと考えられる条件で評価を行う観点から適用する）	可動方向、鉛直方向の結合条件を固定
【STEP2-3】 （ストッパーの評価に適用）	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で評価を実施）	

詳細設計段階

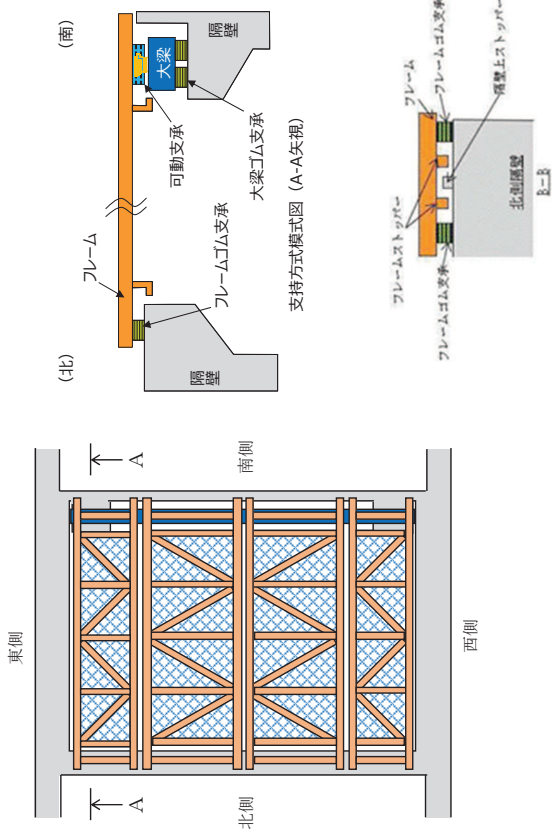


図 16 ストッパーイメージ図

表 16 衝突解析におけるゴム支承、可動支承の解析条件

解析条件	ゴム支承	可動支承
大梁、フレームゴム支承、大梁ゴム支承、可動支承の評価	ゴム支承の結合条件を3方向弾性（実現象に近いと考えられる条件で評価を行う観点から適用する）	可動方向の結合条件をフリー
ストッパーの評価*1	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で評価を実施）	可動方向、鉛直方向の結合条件を固定

注記*1: いずれの支承部も構造強度上の評価方針を満足する方針とすることから、竜巻防護ネットの支持機能を担う部材としてストッパーに期待しないこととした。ただし、道路橋示方書における落橋防止構造の考え方を参考に、自主的にストッパーを設置することとし、ストッパー設置により外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないことについて確認する。

備考

分類①
（フレーム基数の変更）
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した。

分類①
（ブラケットの廃止・支持壁変更）
海水ポンプ室補強計画を踏まえ、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。

分類②
（フレームゴム支承の仕様変更。P4.1-別紙5-2と同様。）

分類②
（ゴム支承の結合条件の設計進捗）
設置許可段階における説明事項及びゴム支承の特性試験結果を踏まえ、衝突解析におけるゴム支承の解析条件において、ばね支持による3方向弾性とした。

分類②
（ストッパーの位置付けの整理）
構造強度評価上は期待しないが、道路橋示方書における落橋防止装置を参考に、自主的にストッパーを設置することとした。

設置許可段階

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7ー38】

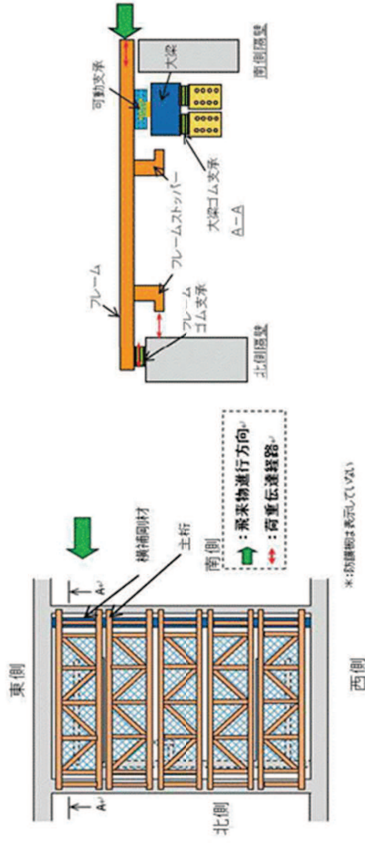


図 19 設計飛来物衝突時の荷重伝達例
(水平方向（南から北）から衝突した場合）

詳細設計段階

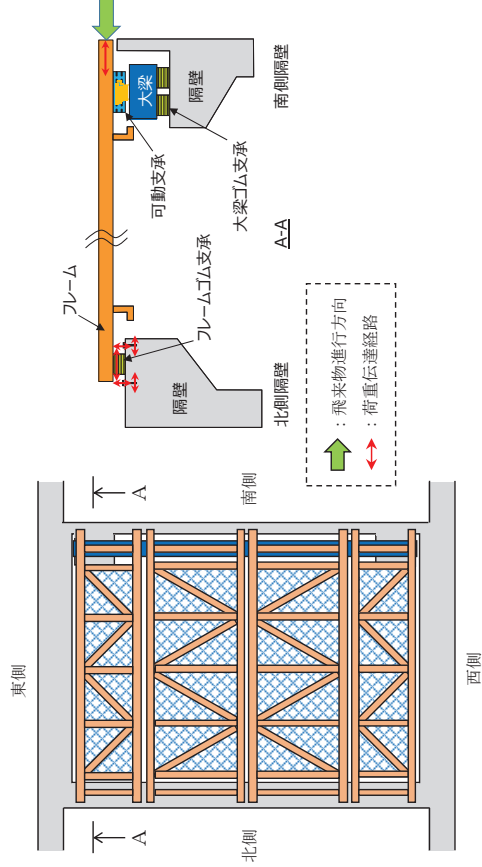


図 19 設計飛来物衝突時の荷重伝達例
(水平方向（南から北）から衝突した場合）

備考

分類①
(フレーム基数の変更)
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した。

分類①
(ブラケットの廃止・支持壁変更)
海水ポンプ室補強計画を踏まえ、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。

分類②
(フレームゴム支承の仕様変更。P4.1-別紙5-2と同様。)

分類②
(ストッパーの位置付けの整理)
構造強度評価上は期待しないが、道路橋示方書における落橋防止装置を参考に、自主的にストッパーを設置することとした。

詳細設計段階における対応状況（竜巻防護ネット）

設置許可段階

詳細設計段階

備考

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7ー38】

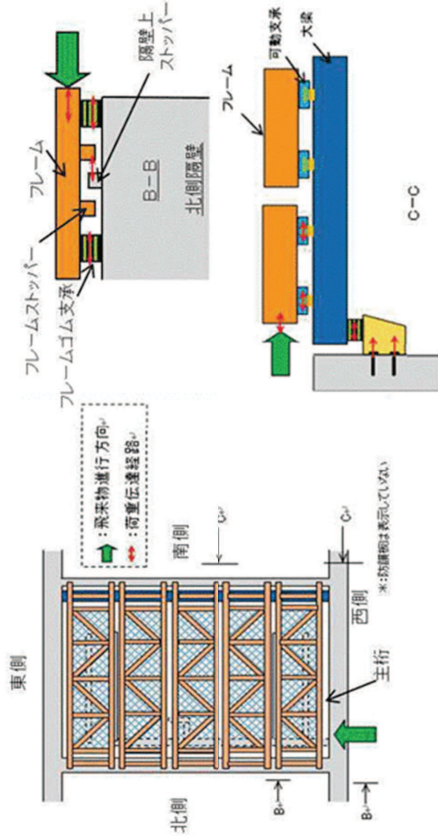


図 20 設計飛来物衝突時の荷重伝達例
(水平方向（西から東）から衝突した場合)

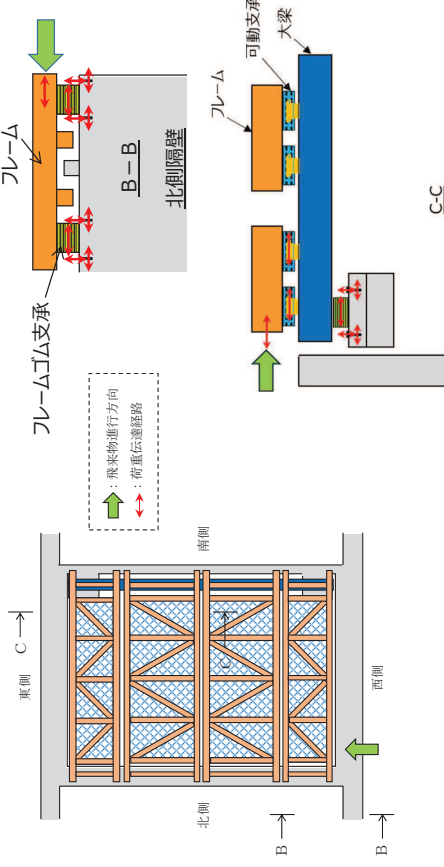


図 20 設計飛来物衝突時の荷重伝達例
(水平方向（西から東）から衝突した場合)

分類①
(フレーム基数の変更)
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した。

分類①
(ブラケットの廃止・支持壁変更)
海水ポンプ室補強計画を踏まえ、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。

分類②
(フレームゴム支承の仕様変更。P4.1-別紙5-2と同様。)

分類②
(ストッパーの位置付けの整理)
構造強度評価上は期待しないが、道路橋示方書における落橋防止装置を参考に、自主的にストッパーを設置することとした。

設置許可段階

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7ー39】

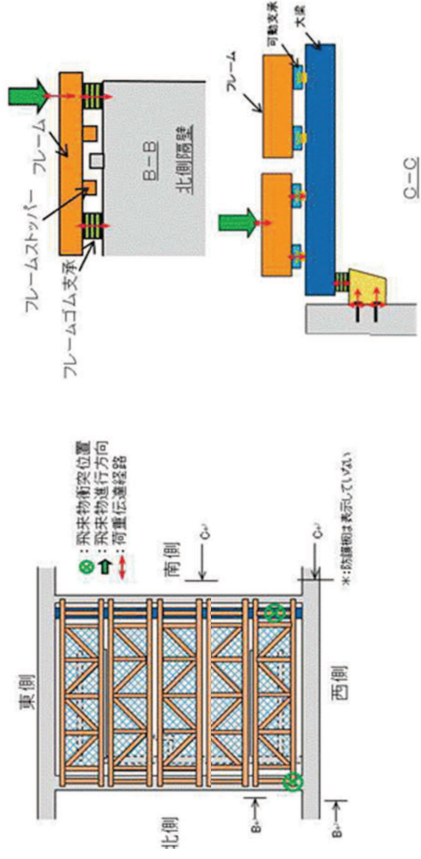


図 21 設計飛来物衝突時の荷重伝達例
(鉛直方向から衝突した場合)

詳細設計段階

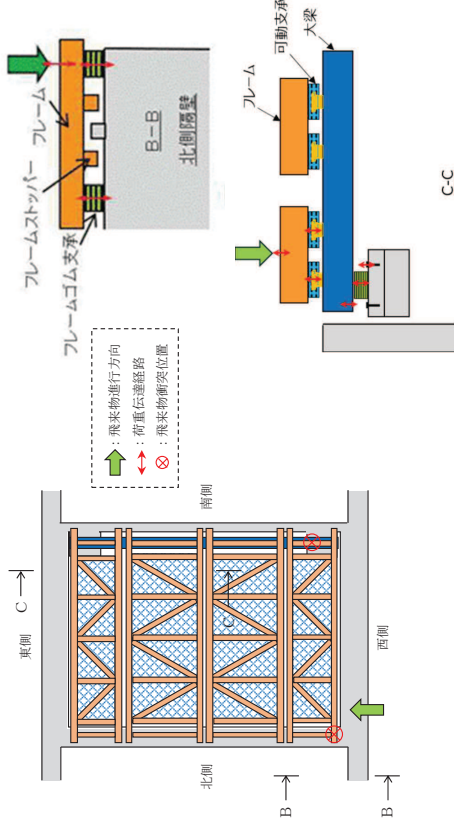


図 21 設計飛来物衝突時の荷重伝達例
(鉛直方向から衝突した場合)

備考

分類①
(フレーム基数の変更)
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した。

分類①
(ブラケットの廃止・支持壁変更)
海水ポンプ室補強計画を踏まえ、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。

分類②
(フレームゴム支承の仕様変更。P4.1-別紙5-2と同様。)

分類②
(ストップバーの位置付けの整理)
構造強度評価上は期待しないが、道路橋示方書における落橋防止装置を参考に、自主的にストップバーを設置することとした。

設置許可段階

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7ー40】

表 17 支持部材に対する構造強度上の性能目標と評価方針（2/2）

Table with 6 columns: 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, 主な機能阻害モード/阻害状態, 許容限界. Includes a red box around 'ブラケット' in the evaluation material column.

※：(M)05-13(No)Building for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs.

詳細設計段階

表 17 支持部材に対する構造強度上の性能目標と評価方針（2/2）

Table with 6 columns: 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, 主な機能阻害モード/阻害状態, 許容限界. Includes a red box around '対象外' in the evaluation material column.

※：(M)05-13(No)Building for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs.

備考

分類① (ブラケットの廃止) 海水ポンプ室補強計画を踏まえ、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た。...

【6条（竜巻）一別添1ー添付3.7ー41】

表 17 支持部材に対する構造強度上の性能目標と評価方針（2/2）

Table with 6 columns: 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, 主な機能阻害モード/阻害状態, 許容限界. Includes a red box around the entire table content.

※1：フレームゴム支取は、2つのうち1つ以上の支取が構造強度上の性能目標を満足しない場合は、二次的影響評価を実施する。

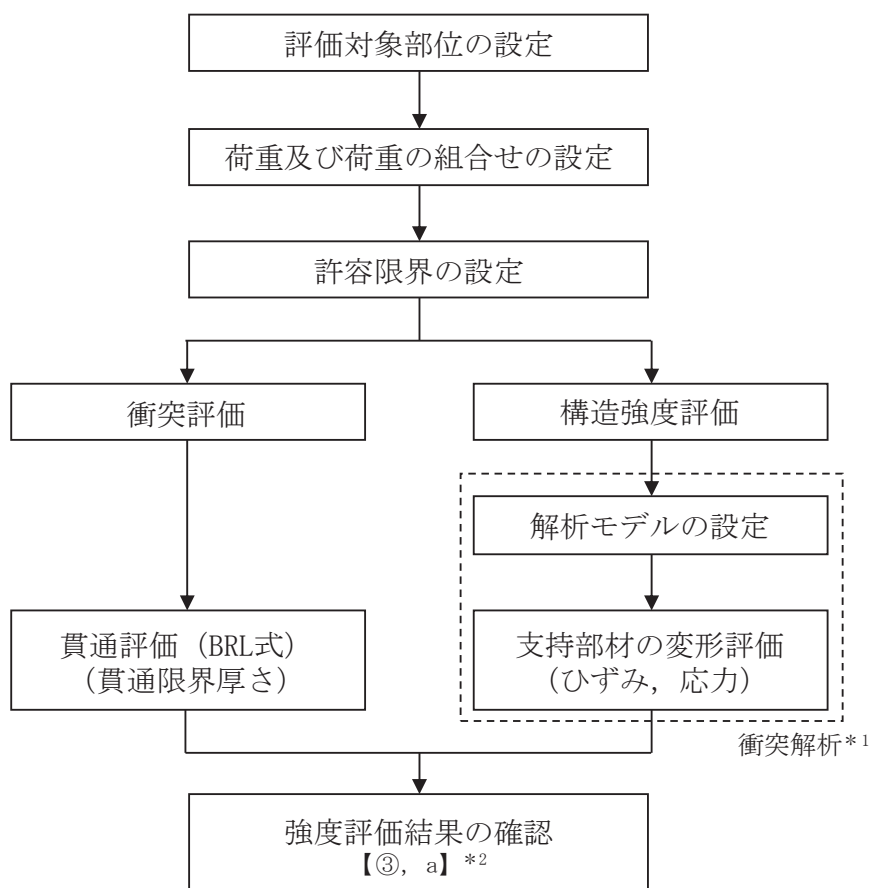
分類② (フレームゴム支取の判定方針変更) 2つの支取のうち1つ以上の支取が構造強度上の評価方針を満足することから、いずれの支取も構造強度上の評価方針を満足することに變更。

分類② (ストッパーの位置付けの整理) 構造強度評価上は期待しないが、道路橋示方書における落橋防止装置の考え方を参考に、自動的にストッパーを設置することとした。

※1：いずれの支取部も構造強度上の評価方針を満足することを確認する。

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」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」
	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. 衝突解析における解析モデルの設定」及び「7. 評価結果」にて、可動支承部に発生する荷重が許容限界を超えず、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. 衝突解析における解析モデルの設定」及び「補足-710-1 4.1 7. 評価結果」
	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」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について示した。また、「6. 衝突解析における解析モデルの設定」及び「7. 評価結果」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、基本ケース及び不確かさケースの評価結果より、支持部材に発生するひずみや応力等が許容限界を超えず、支持機能が維持されることを示した。	「補足-710-1 4.1 5. 衝突解析に係るゴム支承の剛性の設定」、 「補足-710-1 4.1 6. 衝突解析における解析モデルの設定」及び「補足-710-1 4.1 7. 評価結果」

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>	<p>a</p>	<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. 衝突解析における解析モデルの設定」及び「7. 評価結果」にて、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限界を超えず、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. 衝突解析における解析モデルの設定」及び「補足-710-1 4.1 7. 評価結果」</p>
	<p>b</p>	<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. 衝突解析における解析モデルの設定」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。また、「7. 評価結果」にて、衝突方向に対する影響を不確かさケースとして評価した結果より、支持部材に発生するひずみや応力等が許容限界を超えず、支持機能が維持されることを示した。</p>	<p>「補足-710-1 4.1 6. 衝突解析における解析モデルの設定」及び「補足-710-1 4.1 7. 評価結果」</p>
	<p>c</p>	<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」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」</p>

以上

4.2 飛来物のオフセット衝突の影響について

1. 概要

本資料は、竜巻飛来物防護を目的としたネットに関して、飛来物がオフセット衝突した場合の影響について説明するものである。

2. 展開方向オフセット衝突時吸収エネルギー

飛来物が、金網に対して展開方向オフセット位置で展開方向の金網交点列 1 列と衝突した場合の展開方向の金網交点列 1 列の吸収エネルギー算出方法を以下に示す。

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。)を参考に、飛来物が展開方向オフセット位置で展開方向の金網交点列 1 列と衝突した場合の飛来物と金網の挙動を以下のように仮定する。

- ① 金網展開方向の交点列の張力は常に均一である。
- ② 衝突後の飛来物と金網は衝突点で一体となって推移する。
- ③ 最大変形時の金網全長は破断時展開方向金網長さとする。

以上の仮定から、破断時の金網の全長は飛来物の衝突位置によらず、破断時展開方向金網長さで一定となり、最大変形時の衝突位置点 P' の軌跡は、図 2-1 のとおり楕円形状となる。

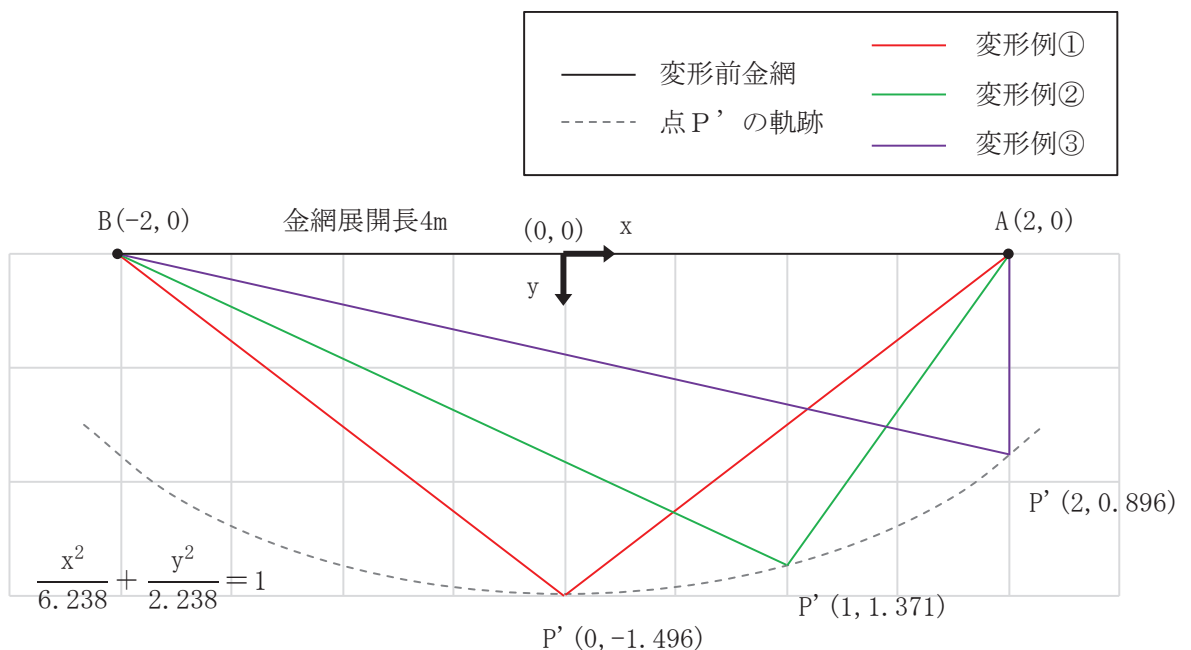


図 2-1 展開方向の金網交点列 1 列の衝突点 P' の軌跡

金網は変位制御により評価可能であることから、図 2-2 に示す交点列の伸び率 ε_j を 0 から破断伸び率 ε_{cr} まで微小変形の積み重ねとして、徐々に変化させ、衝突点の移動量と交点列の張力から吸収エネルギーを算出する。ここで、破断伸び率 ε_{cr} は、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」の「4. 評価条件」の金網 1 目合い対角寸法 a と金網 1 目合いの破断変位 a_s より、以下のとおり、求められる。

$$\varepsilon_{cr} = \frac{a_s}{a} = \frac{17.6}{70.7} \cong 0.25$$

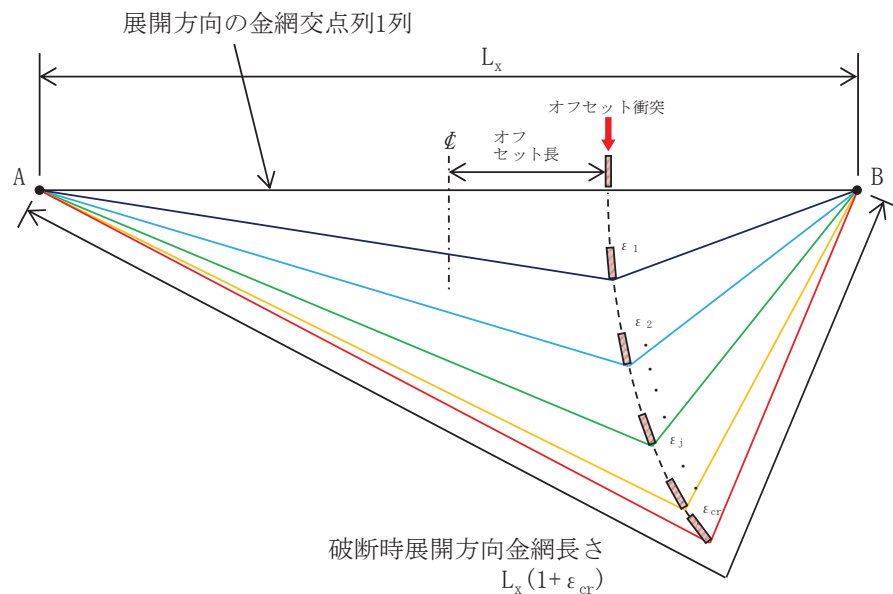


図 2-2 展開方向オフセット衝突時の展開方向の金網交点列 1 列の変位挙動図

また、図 2-3 に展開方向に展開方向オフセット衝突した場合を想定した伸び率 ε_j 時の金網交点列 1 列の変形状態の模式図を示す。

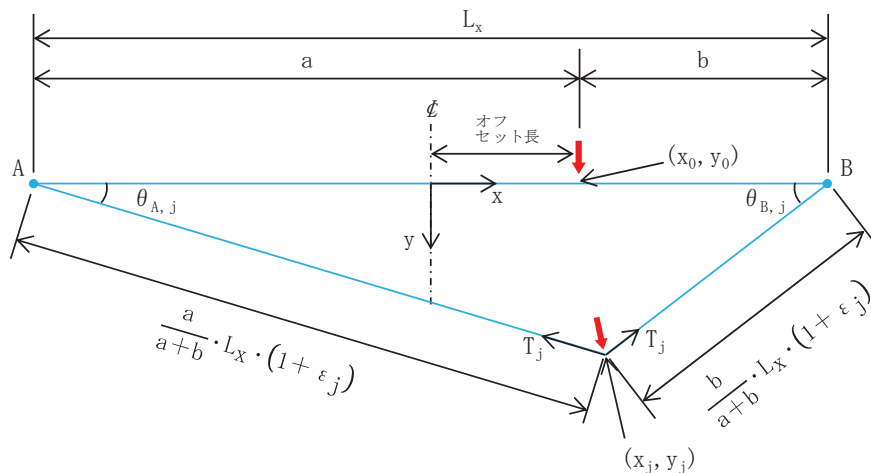


図 2-3 展開方向オフセット衝突の交点列 1 列の変形状態の模式図

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」の「4. 評価条件」の金網 1 目合い対角寸法 a ，金網 1 目合いの等価剛性 K とすると，展開方向の金網交点列 1 列の剛性 K_x ，展開方向の金網交点列 1 列の張力 T_j は以下のとおりとなる。

$$K_x = \frac{K}{L_x / a}$$

$$T_j = K_x \cdot L_x \cdot \varepsilon_j = \frac{K}{L_x / a} \cdot L_x \cdot \varepsilon_j$$

伸び率が $\varepsilon_{j-1} \sim \varepsilon_j$ 間で微小量だけ増加すると，衝突点の座標も (x_{j-1}, y_{j-1}) から (x_j, y_j) と微小量だけ移動し， x 方向変位 Δx_j ， y 方向変位 Δy_j はそれぞれ $\Delta x_j = x_j - x_{j-1}$ ， $\Delta y_j = y_j - y_{j-1}$ となる。このとき，展開長を $a : b$ で分割する点を衝突位置とし，伸び率 ε_j 時の衝突点の座標を (x_j, y_j) ， A 点， B 点のたわみ角を $\theta_{A,j}$ ， $\theta_{B,j}$ とすると，伸び率 ε_j 時の展開方向の金網交点列 1 列の張力 T_j を x 方向成分と y 方向成分に分割でき，それぞれ x 方向反力 H_j ， y 方向反力 V_j となる。よって，伸び率が $\varepsilon_{j-1} \sim \varepsilon_j$ 間で微小量だけ増加した際の吸収エネルギーの増分 ΔW_j は，以下のとおりとなる。

$$H_j = T_j \cos \theta_{A,j} - T_j \cos \theta_{B,j}$$

$$V_j = T_j \sin \theta_{A,j} + T_j \sin \theta_{B,j}$$

$$\Delta W_j = \frac{1}{2} (H_{j-1} + H_j) \times \Delta x_j + \frac{1}{2} (V_{j-1} + V_j) \times \Delta y_j$$

以上より，1 金網交点列の限界吸収エネルギーは下式となる。

$$W = \sum_j^{\varepsilon_{cr}} \Delta W_j$$

展開長 4m の 50mm 目合金網の交点列に，中央衝突，展開方向 1/4 オフセット衝突（展開方向オフセット長 1m）した場合の吸収エネルギーを比較する。図 2-4 に交点列の伸び率に対する吸収エネルギーを示す。

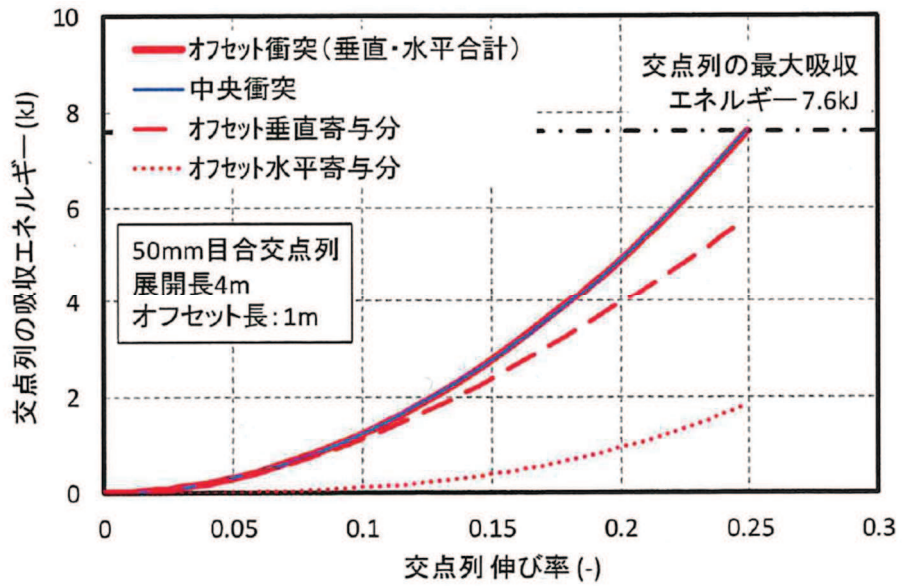


図 2-4 展開方向オフセット衝突と中央衝突のエネルギー比較

展開方向オフセット衝突では，垂直方向から飛来物が衝突することから，伸び率が小さな初期の段階では，垂直寄与分吸収エネルギーが支配的である。伸び率 0.1 程度になると，金網張力の分担から，衝突点は水平方向に移動し，徐々に水平寄与分の吸収エネルギーが増加していく。金網の張力の分担による衝突点の移動に飛来物が追従した場合，中央衝突時と展開方向オフセット衝突時（垂直寄与分と水平寄与分の合計）は，いずれも同等 (7.6kJ) となり，衝突点の違いによる吸収エネルギーへの影響はないと考えられる。

また，図 2-5 に展開方向オフセット衝突位置の違いによる 50mm 目合交点列最終変位形態及び飛来物が衝突後，停止するまでの軌跡を累積移動量として示す。

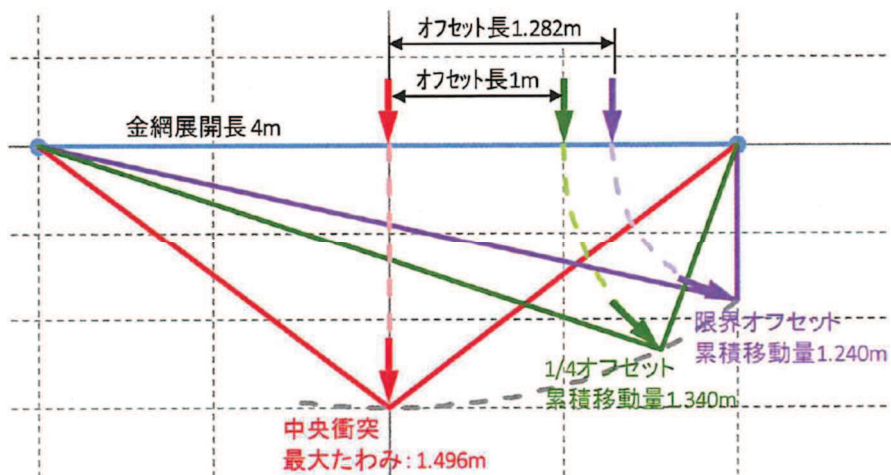


図 2-5 各衝突位置の 50mm 目合交点最終変位図

金網中央からの衝突点までの距離（以下，展開方向オフセット長）が大きくなると，交点列の最終形状は次第に直角三角形に近づき，さらに，展開方向オフセット長が大きくなると，衝突点の軌跡が支持部の外に飛び出すこと及び支持部材のフレームと衝突することが考えられるため，飛来物が防護対象施設に衝突することはないと考えられる。よって，展開方向オフセット評価では，交点列の最終形状が直角三角形となる衝突位置（限界オフセット）までを検討範囲とする。

表 2-1 に各展開方向オフセット長の 50mm 目合 1 交点列の最大吸収エネルギーと累積移動量を示す。

表 2-1 展開方向オフセット衝突時の応答値一覧（50mm 目合）

展開方向オフセット長 (m)	1 交点列最大吸収エネルギー (kJ)	累積移動量 (m)
0.000	7.6	1.496
1.000	7.6	1.340
1.282	7.6	1.240

以上より，飛来物の展開方向オフセット衝突時の最大吸収エネルギーは中央衝突時と同等となるため，展開方向オフセット衝突時の影響はないと判断している。

3. 展開直角方向オフセット衝突時吸収エネルギー

飛来物が，金網に対して展開直角方向オフセット位置で金網と衝突した場合の，金網の吸収エネルギー算出方法を以下に示す。

電中研報告書を参考に，飛来物の衝突位置を，中央衝突以外に展開直角方向オフセット衝突位置を以下のとおり設定し，金網（展開方向 4.808m×展開直角方向 3.473m）の吸収エネルギーを算出する。

- ①：中央
- ②：展開直角方向 1/4 オフセット

金網展開直角方向のオフセット衝突位置図を図 3-1 に示す。

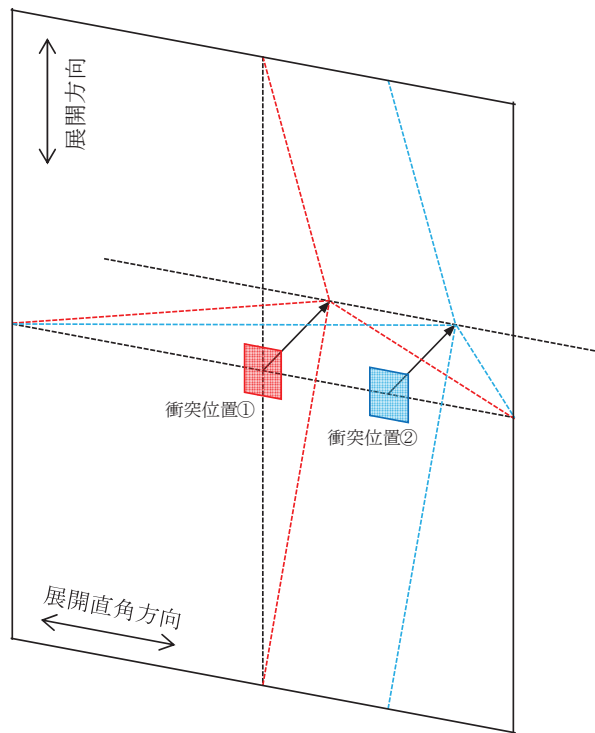


図 3-1 展開直角方向オフセット衝突位置図

図 3-1 に示すとおり，衝突位置で金網が最も大きく変形し，そこからネット端部までの間を段階的に減少していくとすると，目合い列 1 列ごとの吸収エネルギーは以下の式により求められる。

$$E_i = 2 \cdot K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \cdot \left(\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right)$$

ここで，

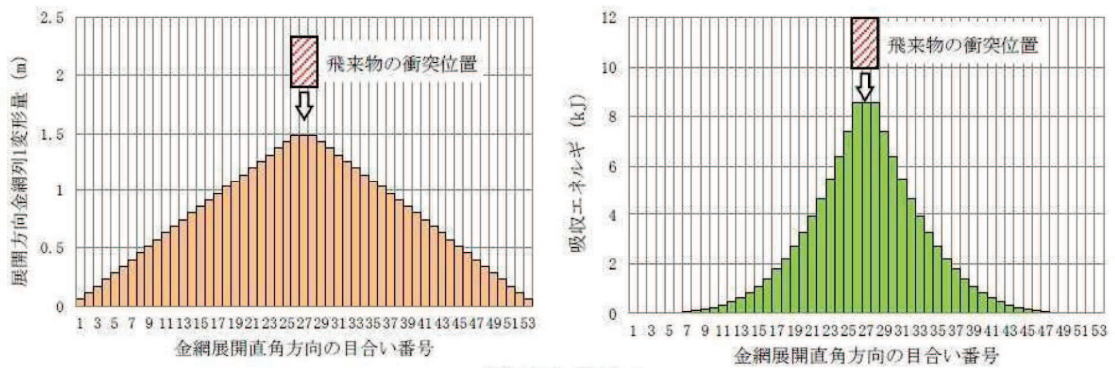
E_i : i 番目の列における金網の吸収可能エネルギー

K_x : 金網 1 目合いの展開方向の 1 列の等価剛性

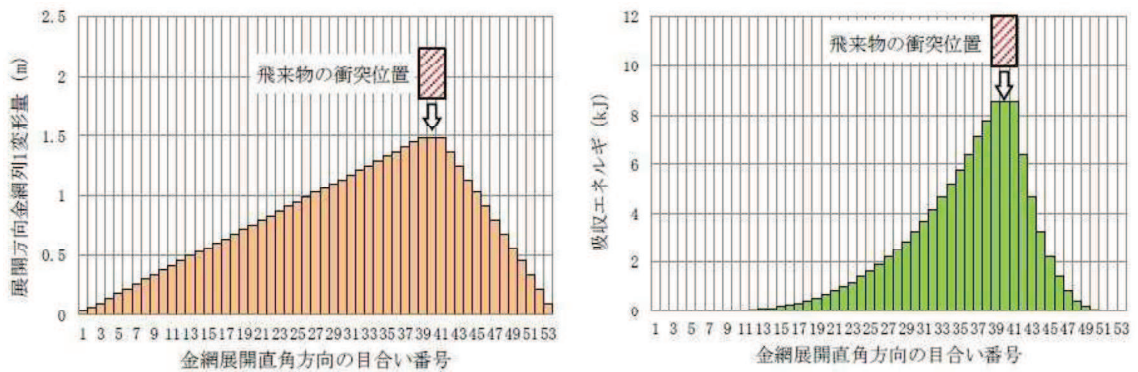
L_x : 金網展開方向寸法 (4.808m)

δ_i : i 番目の列における金網変形量

上式より，各衝突位置における金網変形量及び吸収エネルギー分布を図 3-2 に示す。また，金網 1 枚分の吸収エネルギーを表 3-1 に示す。



①中央衝突



②展開直角方向 1/4 オフセット衝突

図 3-2 たわみ量分布と吸収エネルギー分布

表 3-1 金網 1 枚分の吸収エネルギー

衝突位置	吸収エネルギー (kJ)
①中央	93.9
②展開直角方向 1/4 オフセット	92.7

図 3-2 及び表 3-1 のとおり，展開直角方向オフセット衝突時の最大吸収エネルギーは中央衝突時とほぼ同等となるため，展開直角方向オフセット衝突時の影響はないと判断している。

4. オフセット衝突時の衝撃荷重

衝撃荷重 F_a については，下式により算出している。

$$F_a = \frac{4 \cdot m \cdot V_1^2}{3 \cdot \delta}$$

上式より，衝撃荷重 F_a はネットのたわみ量 δ に反比例していることが分かる。

同じ飛来物の中央衝突とオフセット衝突を比較する場合，表 2-1 から，ネットの累積移動量（たわみ量）はオフセット衝突の方が短く衝撃荷重が大きくなることから，オフセット衝突における衝撃荷重の増加率は，下式により算出できる。

$$\begin{aligned} & \text{（衝撃荷重の増加率）} \\ & = \text{（中央衝突時の累積移動量）} / \text{（オフセット衝突時の累積移動量）} \\ & = 1.496 / 1.240 \\ & = 1.206 \end{aligned}$$

よって，上式により算出される荷重を 1.21 倍することで，オフセット衝突を考慮した補正を行う。

4.3 金網の設計裕度の考え方

1. 概要

本資料は、竜巻飛来物防護を目的とした高強度金網の設計裕度に関して、金網の耐衝撃性能評価に用いる機械的特性値の設定の考え方について説明するものである。

2. 金網の機械的特性値

高強度金網の耐衝撃性能評価に用いる機械的特性値は、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)にて報告されている金網の交点引張試験から算定している。金網(50 mm 目合い)の交点引張試験結果(全 20 データ)を図 2-1 に示す。

また、図 2-1 より算出した金網の等価剛性、破断伸び量、破断荷重を表 2-1 に示す。

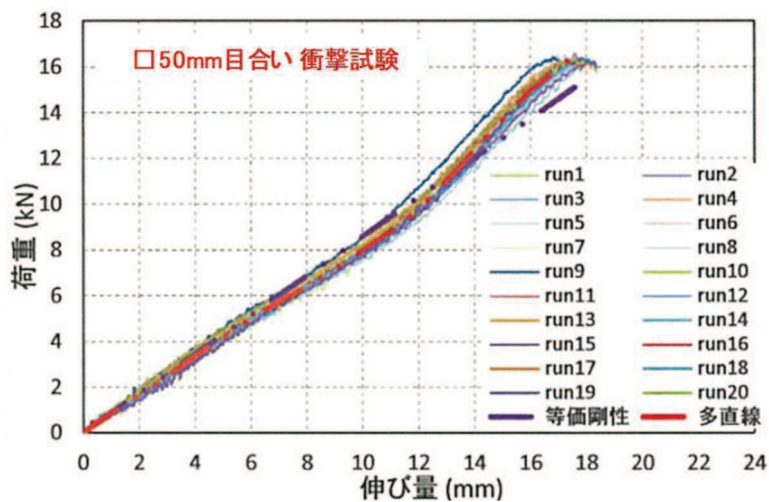


図 2-1 金網の交点引張試験結果

表 2-1 金網の交点引張試験結果の平均値

	等価剛性 (kN/m)	破断伸び量 (mm)	破断荷重 (kN)
平均値	858	17.6	15.1

3. ネットの強度評価における裕度の考慮

金網の等価剛性は表 2-1 に示す値を用いるが、交点引張試験結果のばらつきを考慮した裕度を確保することとする。ここで、表 2-1 に示す等価剛性とは別に、図 2-1 の金網の交点引張試験結果から多直線近似剛性を求め、金網の吸収エネルギーを算出した結果を図 3-1 に示す。等価剛性にて吸収エネルギーを評価した場合、多直線近似剛性より算出した吸収エネルギーよりも、最大で 5.6% 高くなることから、金網の許容吸収エネルギーについては、等価剛性より算出した吸収エネルギーを 1/1.056 倍することにより裕度を確保する。

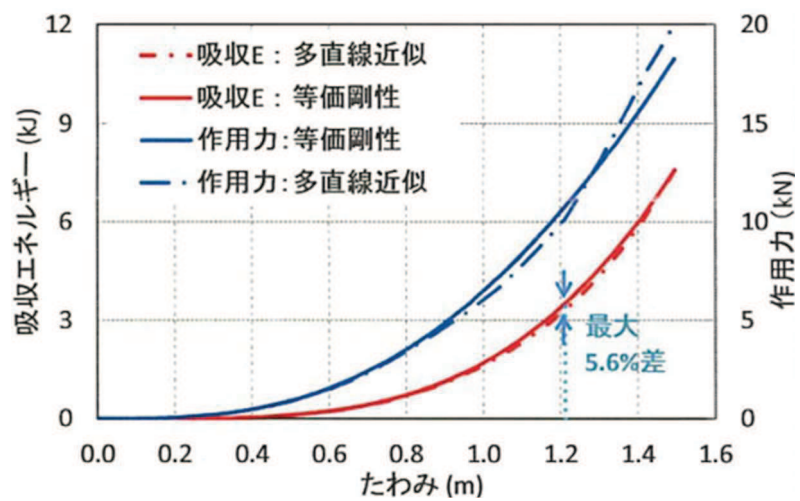


図 3-1 等価剛性と多直線近似の差異

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

1. 概要

ネットは金網の変形の外、ネット周辺を固定するワイヤロープの変形によってもたわみが生じる。そのためネットシステムのたわみ量の評価では、ワイヤロープのたわみ量を考慮した評価を行うこととしている。

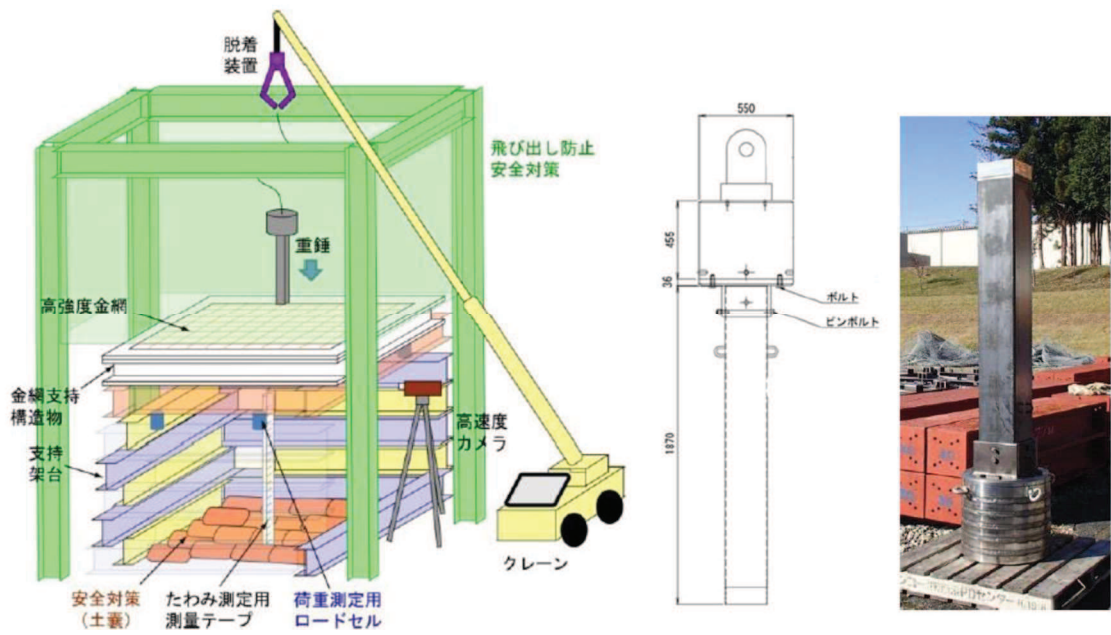
本資料は、電力中央研究所報告書「高強度金網を用いた竜巻飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法」（総合報告：O01）（以下「電中研報告書」という。）にて報告されている、評価手法及び試験結果との比較について説明するものである。

2. 評価手法の妥当性確認に用いる試験条件及び結果

ワイヤロープのたわみ量を考慮した評価手法が妥当であることを確認するため、比較対象とする試験条件及び結果を表 2-1 に、試験概要図を図 2-1 に示す。

表 2-1 試験条件及び結果一覧

	項目	条件及び結果
条件	ネット構成	展開方向長さ×展開直角方向長さ×目合寸法 4 m × 3 m × 50 mm : 1 枚目 4 m × 3 m × 50 mm : 2 枚目 3 m × 4 m × 40 mm : 補助
	ワイヤロープ全長 (有効長)	10.8 m (1 本当たり)
	落下物	角形鋼管 (先端形状 : 250 × 250 × t4.5 mm)
	落下物質量	1133 kg
	衝突位置	オフセット
	落下高さ	15.0 m
結果	ネット最大変位	1.39 m
	総吸収エネルギー	182 kJ



(a) 重錘落下試験概要

(b) 重錘構造図

図 2-1 試験概要図

表 2-1 及び図 2-1 に示す試験に対し，電中研報告書の評価手法を用いたネット本体のたわみ量に加え，ワイヤロープのたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量を算出し，試験結果との比較評価を行う。

3. ワイヤロープたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量
電中研報告書にて報告されている試験体サイズを図 3-1 に示す。

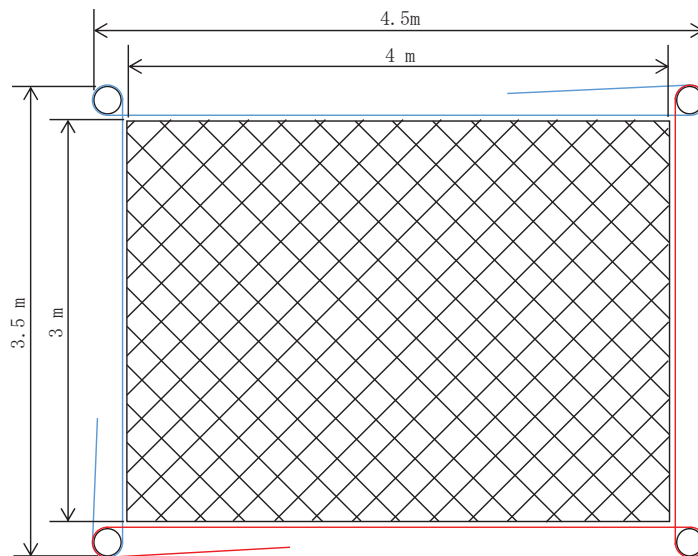


図 3-1 試験体サイズ

ワイヤロープのたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量は，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」（以下「VI-3-別添 1-2-1-1」という。）の「3.5(3) たわみ評価」に示す評価フローに基づき評価を実施する。たわみ評価のフローを図 3-2 に示す。

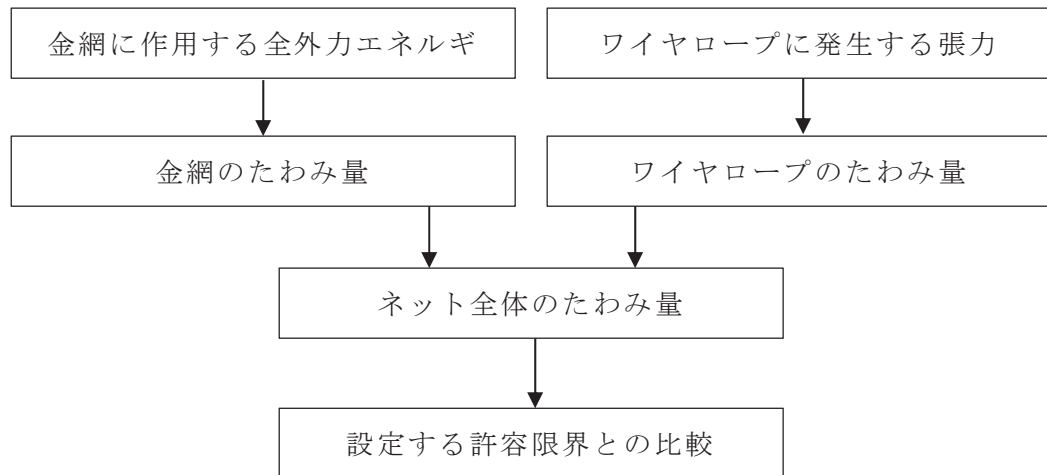


図 3-2 たわみ評価の評価フロー

たわみ評価においては，VI-3-別添 1-2-1-1 の「3.4(1) 吸収エネルギー評価」に示す吸収エネルギー算出モデルを用い，飛来物の運動エネルギー，風圧力による荷重，自重及び上載荷重によるエネルギーを吸収するために必要となる金網のたわみ量を導出する。また，ワイヤロープ張力に応じたワイヤロープのたわみ量についても導出する。

ワイヤロープのたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量を算出する上で以下の条件を仮定する。

- ① ワイヤロープのたわみ量は，飛来物の衝撃荷重並びに自重及び上載荷重による荷重によりワイヤロープに等分布荷重が発生する。
- ② ワイヤロープに発生する張力及びワイヤロープの引張試験結果（荷重－ひずみ曲線）から変形後のワイヤロープ長さを求める。
- ③ ワイヤロープは放物線状に変形する。

3.1 ネットシステムのたわみ量評価

電中研報告書に従い、まずは金網のたわみ量 δ を算出する。金網のたわみ量 δ については、VI-3-別添 1-2-1-1 の「3.5(3) たわみ評価」で示す以下の式より、金網の変位量と吸収エネルギーの関係から算出する。

$$E_i = 2 \cdot K_x \cdot \delta^2 - K_x \cdot L_x \cdot \left(\sqrt{4 \cdot \delta^2 + L_x^2} - L_x \right)$$

ここで、 K_x 及び L_x は定数であるため、

$$\sum_{i=1}^{N_y} E_i = E_t$$

とすることで、飛来物の運動エネルギーに応じたたわみ量 δ を算出することができ、表 2-1 に示す試験の運動エネルギー 182 kJ を吸収するための金網のたわみ量 δ の算出値は 1.303 m となる。

次に各ワイヤロープの張力を算出する。

金網が受ける衝撃荷重は、VI-3-別添 1-2-1-1 の「3.5(2) 破断評価」に示す以下の式より、金網のたわみ量と飛来物の運動エネルギーから算出する。

$$F_a = \frac{8 \cdot E_t}{3 \cdot \delta}$$

よって、運動エネルギー 182 kJ がネットに作用した際の衝撃荷重は 373 kN となる。金網展開方向にかかる張力は、V-3-別添 1-2-1-1 の「3.5(2) 破断評価」に示す以下の式より、金網のたわみ角と金網が受ける衝撃荷重から算出する。

$$T = \frac{F_a}{2 \cdot \sin \theta}$$

たわみ角 θ は以下の式で求められ、

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2 \cdot \delta}{L_x}$$

金網展開方向にかかる張力 T は、342 kN となる。

そこから、ワイヤロープは、金網展開方向 1 辺と金網展開直角方向 1 辺を 1 本のワイヤロープで L 字形に設置し、このワイヤロープと対称に設置したワイヤロープとの合計 2 本で金網を支持することにより、展開方向及び展開直角方向の各辺のワイヤロープが結合されていることから張力が一定となるため、ワイヤロープ 1 本が負担する張力は $T/2$ と設定する。また、表 2-1 で示す試験では金網を 2 枚と、補助金網を 1 枚重ねて設置しているため、補助金網を支持しているワイヤロープに発生する張力 T_1 は以下の式より、

$$T_1 = \frac{F_a}{4 \cdot \sin \theta} \cdot \left(\frac{1.5}{1.5+1} \right)$$

補助金網を支持しているワイヤロープ 1 本あたりの張力は 103 kN となる。

補助金網を支持しているワイヤロープ 1 本あたりの張力(103 kN)を用い，表 3-1 に諸元を示すワイヤロープに張力(103 kN)が負荷されたとき，図 3-2 の引張試験結果より，ひずみは 0.00631 と求められる。

表 3-1 ワイヤロープの諸元

	仕様	径	破断荷重 (kN)
ワイヤロープ	7×7	16	165*

注記 * : J I S G 3 5 4 9 の破断強度

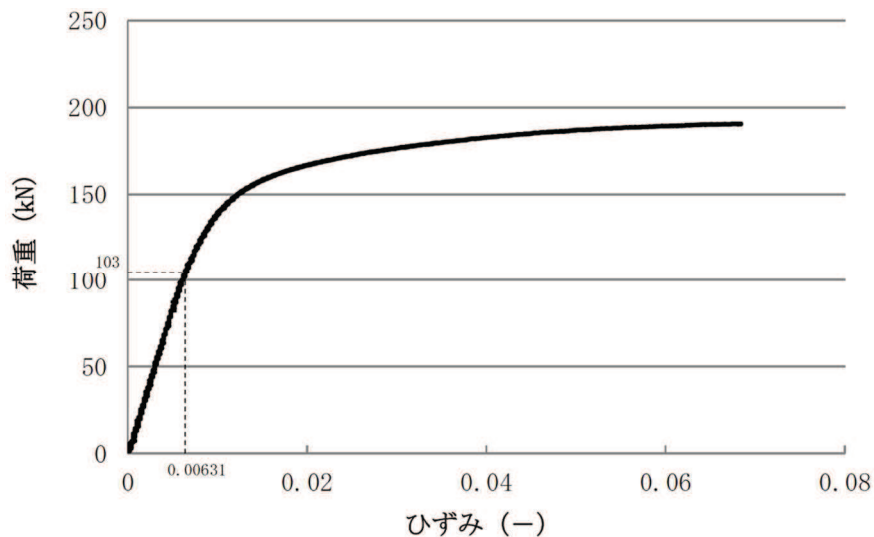
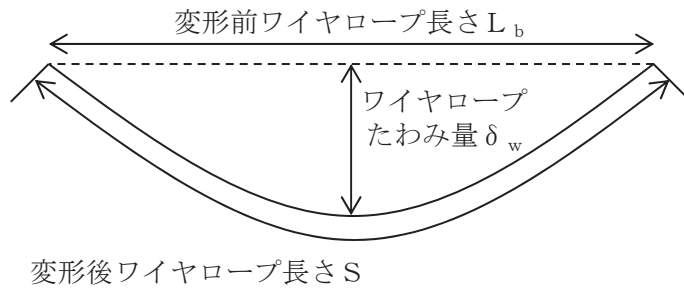


図 3-2 ワイヤロープ引張試験結果

ワイヤロープは金網長辺側と短辺側が結合されており，その発生張力は均一であると考えられる。したがって，変形後のワイヤロープ一本あたりの全長 S_t は，ワイヤロープの一本あたりの全長(10.8 m)が変形するものと考えられ，以下のとおり算出される。

$$\begin{aligned}
 S_t &= 10.8 \text{ (m)} \times 1.00631 \\
 &= 10.868 \text{ (m)}
 \end{aligned}$$

また，飛来物の衝突によりワイヤロープが放物線上に変形すると図 3-3 のとおりとなり，変形後のワイヤロープ長さ S は放物線の弦長の式を用いて以下のとおり表される。



$$S = \frac{1}{2} \sqrt{L_b^2 + 16 \cdot \delta_w^2} + \frac{L_b^2}{8 \cdot \delta_w} \ln \left(\frac{4 \cdot \delta_w + \sqrt{L_b^2 + 16 \cdot \delta_w^2}}{L_b} \right)$$

図 3-3 ワイヤロープ変形図

ここで、長さ L_x (4 m) のワイヤロープのたわみ量を δ_{wx} 、長さ L_y (3 m) のワイヤロープのたわみ量を δ_{wy} とすると、長さ L_x のワイヤロープの変形後の長さ S_x と長さ L_y のワイヤロープの変形後の長さ S_y の合計が S_t となることから、

$$S_t = \frac{1}{2} \sqrt{L_x^2 + 16 \cdot \delta_{wx}^2} + \frac{L_x^2}{8 \cdot \delta_{wx}} \ln \left(\frac{4 \cdot \delta_{wx} + \sqrt{L_x^2 + 16 \cdot \delta_{wx}^2}}{L_x} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{L_y^2 + 16 \cdot \delta_{wy}^2} + \frac{L_y^2}{8 \cdot \delta_{wy}} \ln \left(\frac{4 \cdot \delta_{wy} + \sqrt{L_y^2 + 16 \cdot \delta_{wy}^2}}{L_y} \right)$$

・・・①

と表される。

一方、ワイヤロープたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量は、図 3-4 のとおり表される。

ここで、金網のたわみ量 $\delta = 1.303\text{m}$ は決まっているため、三平方の定理より、長さ L_x のワイヤロープの変形後の長さ $S_x = 2.387\text{m}$ 、長さ L_y のワイヤロープの変形後の長さ $S_y = 1.987\text{m}$ と算出される。

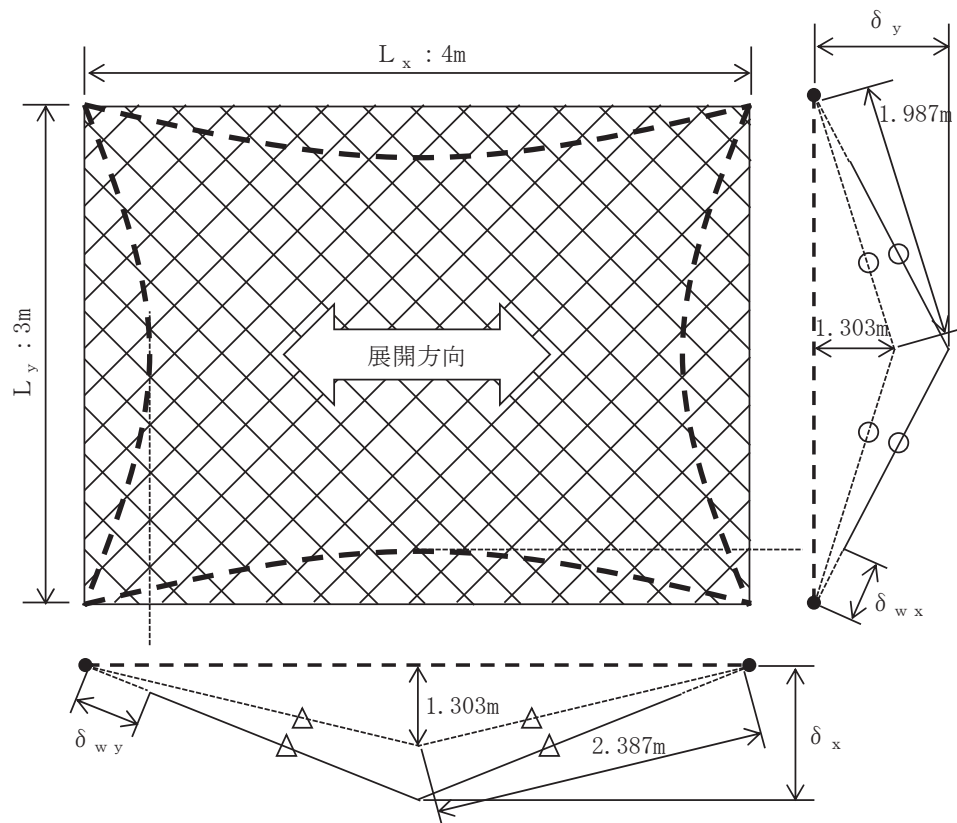


図 3-4 たわみ量の足し合わせ

図 3-4 より，金網のたわみ量とワイヤロープのたわみ量を足し合わせたネットシステムのたわみ量 δ_x 及び δ_y はそれぞれ

$$\begin{aligned} \delta_x &= \sqrt{(\delta_{wy} + 2.387)^2 - \left(\frac{L_x}{2}\right)^2} \\ &= \sqrt{(\delta_{wy} + 2.387)^2 - \left(\frac{4}{2}\right)^2} \quad \dots \textcircled{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_y &= \sqrt{(\delta_{wx} + 1.987)^2 - \left(\frac{L_y}{2}\right)^2} \\ &= \sqrt{(\delta_{wx} + 1.987)^2 - \left(\frac{3}{2}\right)^2} \quad \dots \textcircled{3} \end{aligned}$$

と算出され， δ_x 及び δ_y は双方とも同じネットシステムのたわみ量であり，等しいことから

$$\sqrt{(\delta_{wy} + 2.387)^2 - \left(\frac{4}{2}\right)^2} = \sqrt{(\delta_{wx} + 1.987)^2 - \left(\frac{3}{2}\right)^2} \quad \dots \textcircled{4}$$

と表される。

以上より、①式と④式を連立して解くことで δ_{wx} 及び δ_{wy} を導出することができ、それぞれの値は、

$$\delta_{wx} = 0.229 \text{ m}$$

$$\delta_{wy} = 0.194 \text{ m}$$

と算出される。よって、金網のたわみ量とワイヤロープのたわみ量を足し合わせたネットシステムのたわみ量は、②式及び③式を用い、

$$\delta_x = \sqrt{(0.194 + 2.387)^2 - \left(\frac{4}{2}\right)^2} = 1.631 \text{ m}$$

$$\delta_y = \sqrt{(0.229 + 1.987)^2 - \left(\frac{3}{2}\right)^2} = 1.631 \text{ m}$$

$$\delta_x = \delta_y = 1.631 \text{ m}$$

と算出される。

4. 試験における実測値との比較

ワイヤロープのたわみを含むネットシステムのたわみ量の試験における実測値と計測値との比較を以下に示す。

試験条件を表 4-1 に、また、実測値との比較を表 4-2 に示す。

表 4-1 電中研報告書にて報告されている試験条件

ケース	金網枚数	金網寸法* (m)	落下物	落下物質量 (kg)	衝突位置	落下高さ (m)	エネルギー (kJ)
1	2 枚 (補助 1 枚)	4×3 (3×4)	角形鋼管 (先端形状： 250×250×t4.5 mm)	1133	オフ セット	15.0	182

注記*：寸法については、(展開方向長さ) × (展開直角方向長さ) の順

表 4-2 電中研報告書におけるたわみ量の実測値と計算値の比較

ケース	ネットシステムのたわみ量	
	計算値 (m)	実測値 (m)
1	1.631	1.39

表 4-2 より、ワイヤロープのたわみを含むネットシステムのたわみ量は「実測値 < 計算値」であり、実測値には金網、ワイヤロープ及び緩衝装置の変形によるたわみ量が含まれている。

したがって、本評価によりネットシステムのたわみ量を安全側に評価可能であることが確認された。

5. 実機設備への展開

本評価は、電中研報告書に記載の 4 m×3 m の試験体に対して実施したものであるが、以下の観点から実機ネットに対しても適用可能と判断している。

5.1 金網寸法

本評価では、ネットシステムの仕様に応じて、飛来物捕捉時の衝撃荷重に基づくワイヤロープ張力が算定可能であり、それに応じたワイヤロープのたわみ量を算出できる。

以上より、本評価は金網寸法の影響が考慮されていると判断している。

5.2 ワイヤロープ張力

電中研報告書においては、試験時におけるワイヤロープの最大張力は約 103 kN であり、実機に適用するワイヤロープの張力の許容限界 132 kN より小さい値となっているが、図 5-1 に示されるとおり、本評価に用いる、電中研報告書に示される多項式による近似式が 132 kN 以下の範囲において実験値とよく一致していることから、103 kN を超える領域においても、算出される張力には信頼性があると判断している。

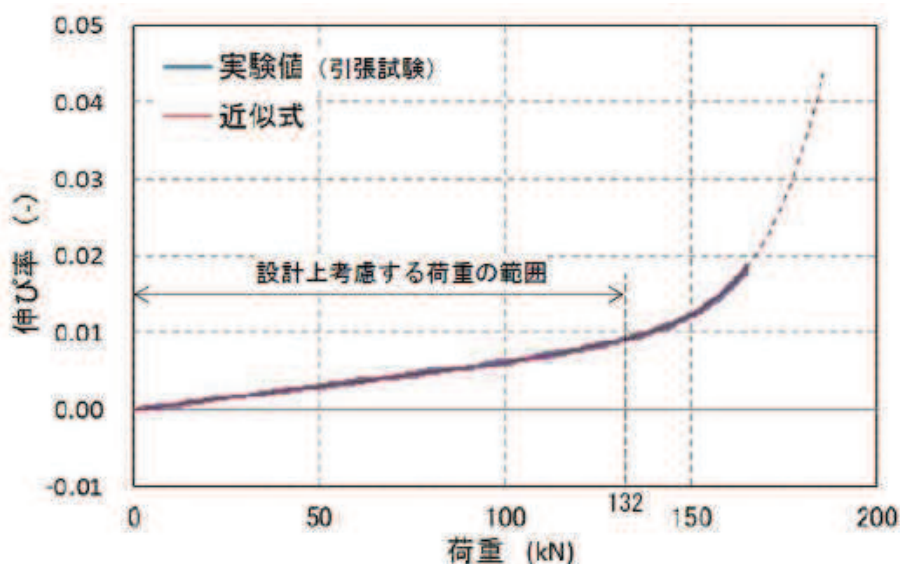


図 5-1 ワイヤロープ引張試験結果 (近似式との比較)

4.5 ワイヤロープの初期張力について

1. ネットの構造概要

ネットは、金網端部の網目を縫うように通したワイヤロープにより支持し、ワイヤロープは鋼製枠の四隅に設置した接続用の治具にて支持する。ワイヤロープ端部は、ターンバックル又はシャックルを鋼製枠に設置した取付けプレートに接続する。

ワイヤロープは、金網展開方向と平行に配置されるワイヤロープと、金網展開直角方向と平行に配置されるワイヤロープが接合されていることから、ワイヤロープの張力が均一に発生する構造となっており、ワイヤロープは金網の四隅の接続用の治具で支持される。また、ワイヤロープは、金網の自重による平常時のたわみが大きくなるように、初期張力をかけ、トルク管理を行う。

ネットの概要図を図 1-1 に示す。また、接続治具（緩衝材）の役割について別紙に示す。

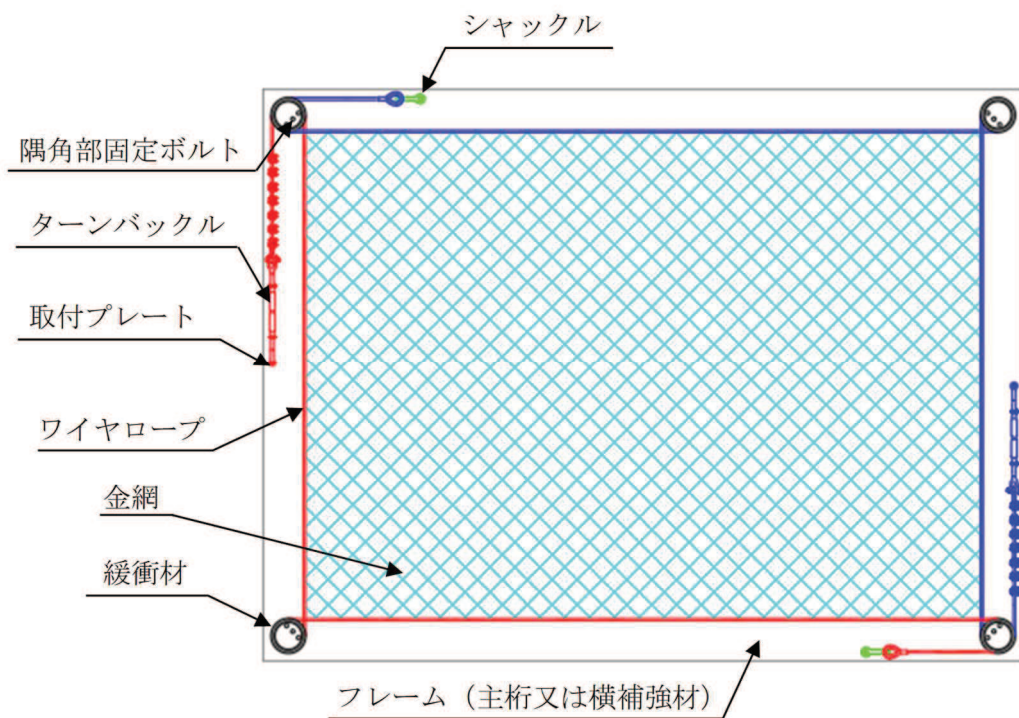


図 1-1 ネット概要図

2. ワイヤロープの初期張力について

ワイヤロープの初期張力については、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。）における試験時に測定しており、図 2-1 に示すワイヤロープ端部のターンバックルにひずみゲージを取り付けて、軸力を出力することでワイヤロープの初期張力を測定した。なお、ターンバックルの締め付けトルク値は $20\text{N}\cdot\text{m}$ である。



図 2-1 ひずみゲージ付きターンバックルの設置状況

電中研報告書における 50mm 目合い金網を使用したネットのワイヤロープの初期張力の測定結果の平均値と最大値を表 2-1 に示す。

表 2-1 ワイヤロープ初期張力平均値及び最大値

測定箇所	初期張力 (kN)	
	平均値	最大値
ターンバックル	1.7	6.0

3. ワイヤロープに作用する張力と許容荷重との比較

ワイヤロープに作用する初期張力は最大でも 6kN であり, 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」に示すネットに飛来物が衝突した際にワイヤロープに発生する張力 T_1 と比べて十分に小さいことから, 評価結果に大きな影響を及ぼすものではない。表 3-1 にワイヤロープに作用する張力と許容荷重の比較を示す。

表 3-1 ワイヤロープに作用する張力と許容荷重との比較

ネットを使用する 防護対策施設	張力			許容荷重
	初期張力 (kN)	T_1 * (kN)	合計 (kN)	P (kN)
海水ポンプ室竜巻防護対策施設 (竜巻防護ネット)	6	38	44	132

注記* : 最大の T_1 を記載

接続治具（緩衝材）の役割について

接続治具は、電中研報告書における試験体と同様の構造を採用しており、緩衝材による隅角部の緩衝構造について考慮している事項を以下に示す。

接続治具は、ワイヤロープ端部にターンバックル又はシャックルを取り付け、ターンバックル又はシャックルを取付プレートに取り付けることで、ワイヤロープをフレームに接続する。ここで、ワイヤロープは、金網の展開方向と展開直角方向の異方性を考慮し、ワイヤロープを金網に対して2本をL字に設置することで、ワイヤロープに作用する荷重が均一となるような構造としており、このとき飛来物衝突時に金網から伝達される衝撃荷重が隅角部に集中することから、急激な大荷重が作用するのを抑制するために、緩衝材を金網の四隅に設置する設計としている。

緩衝材は、肉厚の外形保持管の内部に、フレームに固定された隅角部固定ボルトと、隅角部固定ボルトに支持された抑え板及び緩衝鋼管で構成される。緩衝鋼管は、大径の鋼管の中に7本の小径の鋼管が内包されており、緩衝鋼管の配置を維持する構造としている。

金網に飛来物が衝突し、ワイヤロープに張力が作用すると、外形保持管の側面に金網中央方向の荷重が作用し、抑え板と外形保持管の間で緩衝構造が圧縮変形することで、ワイヤロープに作用する張力の急激な増加及びワイヤロープの破断を防止する。緩衝材による緩衝構造がない場合には、ワイヤロープに作用する張力の急激な増加（動的応答倍率）を考慮する必要があるが、緩衝構造を組み込むことにより動的応答倍率を考慮しない評価としている。緩衝構造の概要を図1に示す。

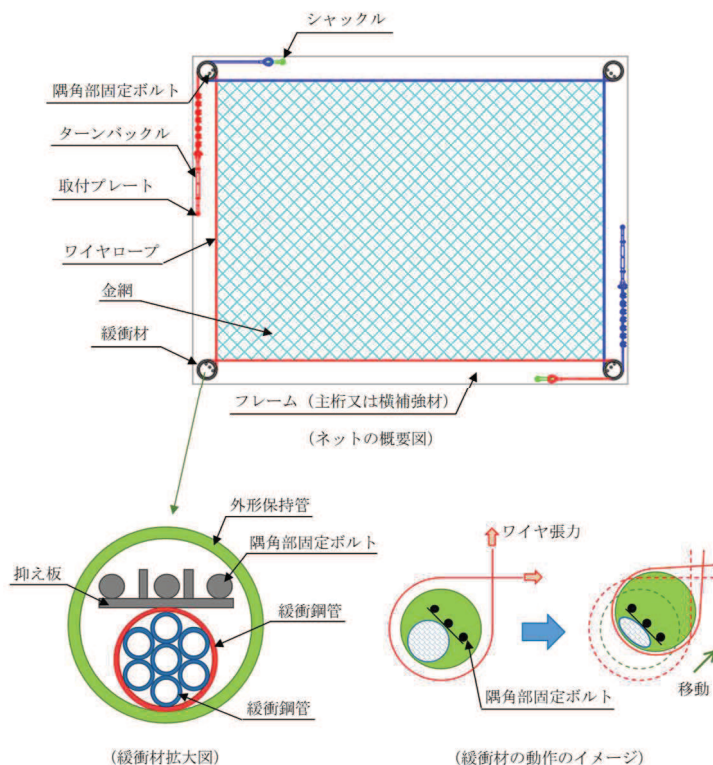


図1 緩衝構造の概要

4.6 補助金網の影響について

1. 概要

金網は、50mm 目合いの主金網 2 枚及び 40mm 目合いの補助金網 1 枚の計 3 枚で構成することを基本構造としている。

補助金網は、金網の耐衝撃性能向上を目的に設置しているが、飛来物がネットに衝突した際には、飛来物の受け止めに寄与することが予想されているため、その影響について検討した。

2. ネットについて

補助金網の取付方法を図 2-1 に示す。

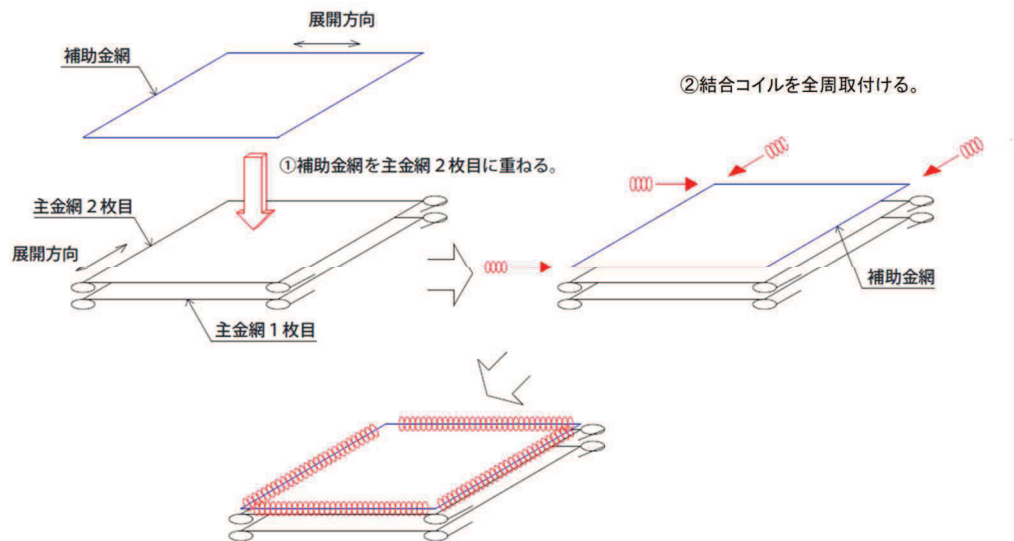


図 2-1 ネットの構造図

図 2-1 のとおり、上段のワイヤロープには主金網と補助金網の 2 枚の金網を支持しており、下段のワイヤロープは主金網 1 枚を支持している。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)では、上記のネットに対し飛来物の落下試験を実施し、2 本のワイヤロープに発生する張力を計測している。ワイヤ張力時刻歴の試験結果を図 2-2 に示す。

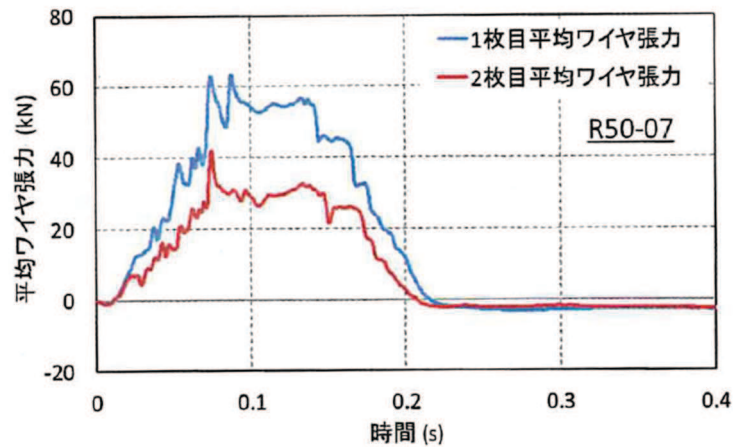


図 2-2 ワイヤ張力時刻歴の試験結果

図 2-2 より，上段のワイヤロープは下段のワイヤロープと比較すると約 1.5 倍の張力が発生していることがわかる。

このことから，補助金網がある場合となしの場合のネットにおけるたわみ量を一定とした場合，それぞれの補助金網ワイヤロープに発生する張力の関係は表 2-1 のようになる。

表 2-1 ワイヤロープ張力

	補助金網あり	補助金網なし
上段のワイヤロープ	1.5 T	1.0 T
下段のワイヤロープ	1.0 T	1.0 T

また，張力 T と吸収エネルギー E の関係は，次式から比例関係であることが分かる。

$$T = \frac{F}{2 \cdot \sin \theta} \quad \dots\dots\dots \text{①}$$

$$F = \frac{8}{3 \cdot \delta} E \quad \dots\dots\dots \text{②}$$

①及び②から

$$T = \frac{1}{2 \cdot \sin \theta} \cdot \frac{8}{3 \cdot \delta} \cdot E = \alpha E$$

ここで，

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot \sin \theta} \cdot \frac{8}{3 \cdot \delta}$$

とする。

以上から，補助金網の有無による吸収エネルギー量を表 2-2 に示す。

表 2-2 補助金網の有無による吸収エネルギー量

	補助金網あり	補助金網なし
主金網+補助金網	1.5E	1.0E
主金網のみ	1.0E	1.0E

表 2-2 から、上段の主金網と補助金網の組み合わせは、下段の主金網に比べ 1.5 倍のエネルギーを吸収していることとなり、主金網は 1.0 枚分以上のエネルギーを吸収できないことから、補助金網は主金網 0.5 枚分のエネルギーを吸収していることとなる。

3. ネット評価における補助金網の考慮

補助金網がネットの評価に与える影響について検討した。電中研での試験結果から、補助金網を支持しているワイヤロープには補助金網が設置されていないワイヤロープに比べ約 1.5 倍の張力が発生している。ワイヤロープの張力は金網張力が伝達した荷重であり、金網のたわみ量に変化がないとすると、一枚目の主金網と補助金網の合計の吸収エネルギーは二枚目の主金網の 1.5 倍生じていると考えられる。このことから、補助金網は主金網 0.5 枚分として評価に考慮することとする。

具体的には、ネットの剛性を算出する際に、主金網の枚数に 0.5 を加えることで、補助金網を考慮した評価とする。

4.7 防護板の貫通評価について

1. はじめに

竜巻防護ネットの防護板は、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している。防護板の衝突評価においては、以下に示すBRL式により、飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であることを確認している。

$$T^{\frac{3}{2}} = \frac{0.5 \cdot M \cdot v^2}{1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^{\frac{3}{2}}}$$

ここで、

d：評価において考慮する飛来物が衝突する衝突断面の等価直径(m)

K：鋼板の材質に関する係数(-)

M：評価において考慮する飛来物の質量(kg)

T：鋼板の貫通限界厚さ(m)

v：評価において考慮する飛来物の飛来速度(m/s)

2. 防護板の構造

防護板の取り付け概要を図 2-1 に示す。

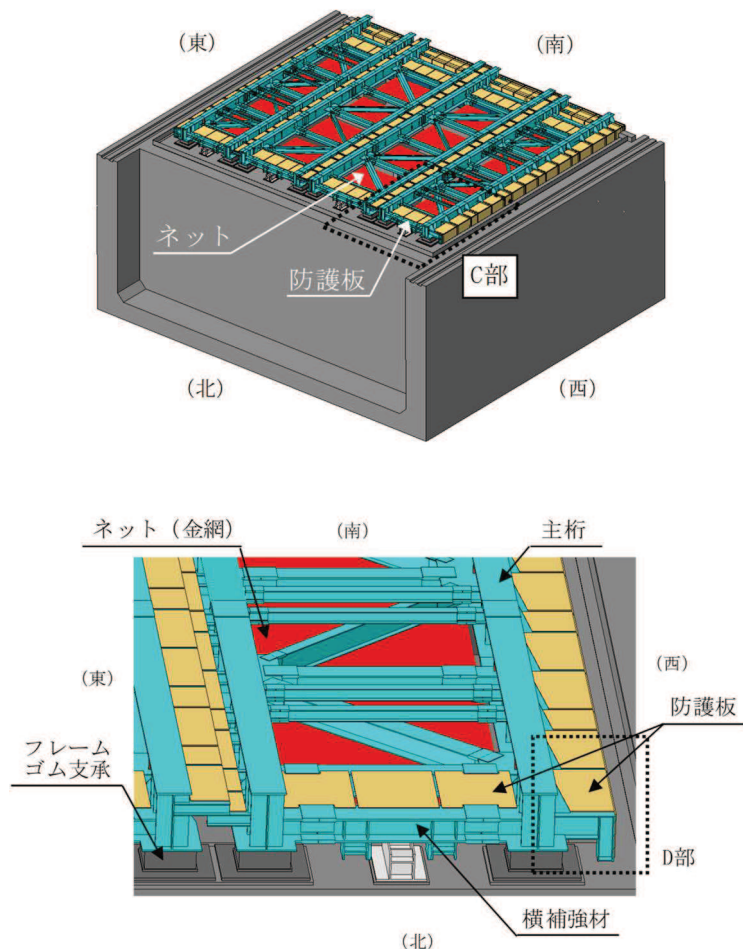


図 2-1 防護板概要図 (1/2)

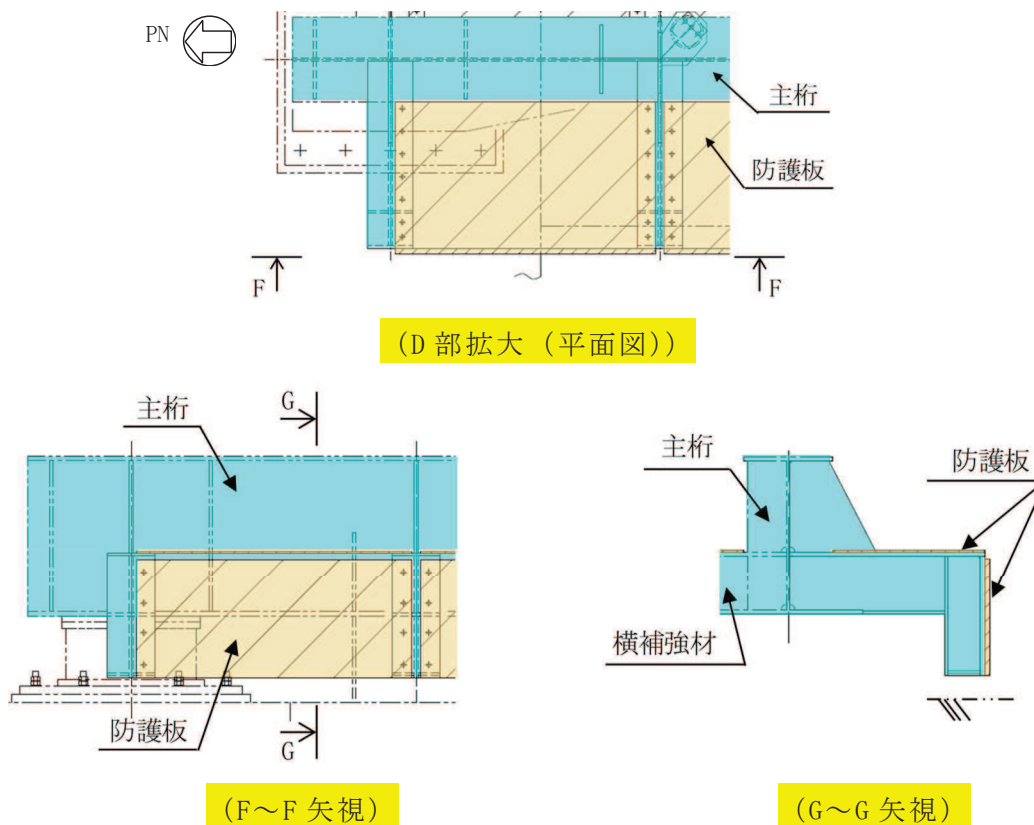


図 2-1 防護板概要図 (2/2)

3. BRL 式の適用性

BRL 式では飛来物の運動エネルギー，等価直径，及び鋼板（被衝突体）の材質に関する係数をパラメータとし，下記に示す既往文献においては，上記パラメータを変化させた試験による BRL 式の適用性の検討，また，竜巻飛来物を模擬した角管による鋼板貫通試験と BRL 式の比較による BRL 式のパラメータ設定方法の検討を実施している。

既往文献の報告内容と竜巻防護ネットの防護板の衝突評価内容の比較により，評価の妥当性及び保守性を確認した。確認結果を表 3-1 に示す。

- [1] 竜巻飛来物を模擬した角管の落下衝突による鋼板の貫通評価，日本機械学会論文集，Vol.83，No.851，2017 年
- [2] 竜巻飛来物を模擬した重錘の鋼板上への自由落下衝突試験による鋼板貫通評価手法の提案 研究報告：N15004，2015 年
- [3] 竜巻飛来物衝突を受ける鋼板の耐貫通性能に関する研究-BRL 式の適用性に関する基礎研究- 研究報告：019003，2019 年

表 3-1 確認結果 (1/2)

BRL 式パラメータ	既往文献	女川	備考
質量 M	1300kg	135kg	<p>< 既往文献 > 「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」の飛来物例（鋼製材（質量 135kg，最大水平速度 51m/s）と運動エネルギーを一致させるために質量，速度（落下高さ）を設定している。^[1]</p>
速度 v	16.5～17.1m/s	46.6m/s	<p>< 女川 > 「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」の飛来物例を踏まえ，フジタモデルの風速場を適用した場合における飛散評価を実施し，飛来物条件（鋼製材（質量 135kg，最大水平速度 46.6m/s））を設定している。</p>
飛来物 等価直径 d	周長が等価となるように設定	接触面積が等価となるように設定	<p>< 既往文献 > BRL 式を角管飛来物の衝突・貫通に適用する場合，BRL 式の等価直径 d は，「周長」が等しい円柱の直径とすることが妥当であることを確認している。^[1]</p> <p>< 女川 > 等価直径 d を，「周長」や「投影面積」よりも更に小さい「接触面積」と等しい値としており，保守的な設定としている。</p> <div data-bbox="759 241 1243 651" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">図 飛来物直径の換算方法^[2]</p> </div>

表 3-1 確認結果 (2/2)

BRL 式パラメータ	既往文献	女川	備考
材料係数 K	K=1 (SS400)	K=1 (SM400)	<p><既往文献> BRL 式で K=1 とした限界板厚曲線は、SS400 の鋼板に対する試験結果の貫通／不貫通の間に入る (試験結果と一致する) ことを確認している。[1] また、SM490 や SM520 においても K は 1.14 未満と推定している。[3] <女川> 竜巻防護ネットの防護板は SM400 の鋼板を使用している。既往文献の結果から、SM400 でも材料定数 K を 1 程度とすることは妥当と考えられる。</p>
その他 (支持条件)	四辺固定 (二辺固定についても実施)	二辺固定	<p><既往文献> 四辺固定の試験を実施し、BRL 式により保守的に評価できることを確認している。[1] また、二辺固定による試験も実施し、試験後の残留変形量を比較した結果、二辺固定とした場合、鋼板が全体で変形する傾向にあり、一方で、四辺固定の方が、飛来物衝突部に局所的な変形が卓越し、鋼板に比べてより厳しい条件となることを確認している。[3] <女川> 竜巻防護ネットの防護板は二辺固定であるため、適用可能と判断している。</p>
貫通限界 厚さ T	9mm (試験結果)	29.60mm (BRL 式)	<p><既往文献> 上記の条件にて試験を実施した結果、鋼板の貫通限界厚さ T は 9mm であることを確認している。[1] <女川> 上記女川の条件にて BRL 式により評価した結果、鋼板の貫通限界厚さ T は既往文献の試験値 (9mm) を大きく上回っており、保守的な評価となっている。</p>

4. 防護板への飛来物衝突時における防護板の構造強度に関する補足説明

防護板はフレーム間やフレームと海水ポンプ室躯体の間隙から飛来物が海水ポンプ室内に侵入することを防止するために設置しており、支持部材に取り付けているため、防護板に作用する荷重は支持部材に伝達する構造である。

本項では、飛来物が防護板に衝突した際に生じる荷重が、支持部材（フレーム）に衝突した際の荷重に含まれることで、竜巻防護ネットの支持機能に影響を及ぼさないことを確認する。また、防護板に飛来物が衝突した際に、防護板取付部が健全であることを確認する。

4.1 荷重条件

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」の「3.3.3 荷重及び荷重の組合せ」と同様に、風圧力による荷重，飛来物による衝撃荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる。荷重の組合せを表 4-1 に示す。

表 4-1 荷重の組合せ

評価内容	風圧力による荷重 (W_w)	飛来物による衝撃荷重 (W_M)	常時作用する荷重 (F_d)	荷重の組合せ
支持機能評価	○	○	○	$W_w + W_M + F_d$

4.2 評価方法

飛来物が防護板に衝突した際に生じるひずみや応力等は、解析モデル及び材料の非線形特性を用いた衝突解析により評価する。

(1) 評価対象及び解析ケース

防護板の構造強度評価が支持部材の構造強度評価に包絡されることの確認及び防護板の支持機能の確認として、以下を考慮して評価対象及び解析ケースを設定する。

- 確認対象とする防護板構造は、剛性の低い、片持ち構造の支持金物に取り付けている防護板とし、その中でも主桁から張り出す長さが長い外側（側壁側）を対象に検討する（図 4-1 参照）。
- 飛来物が防護板に衝突した場合における、竜巻防護ネットの構造及び荷重伝達経路の検討を踏まえて、評価対象を設定する。防護板自体への影響については、BRL 式による貫通限界板厚以上であることを確認する方針としているため評価対象外とし、防護板が取り付けている防護板取付ボルト及び支持金物を評価対象とする。
- 飛来物が防護板に衝突した場合の支持部材（フレーム、大梁、ゴム支承及び

可動支承) への影響について、フレーム及び大梁については、それぞれに直接飛来物が衝突したケースに包含されると考えられるため評価対象外とする。支持部材のうち支承部(ゴム支承及び可動支承)について、支承部に作用する荷重が大きくなるよう、飛来物が支承部近傍の防護板に衝突することを考慮する。

- 支承部近傍の防護板への飛来物衝突を評価するに当たり、「4.1 竜巻防護ネットの衝突解析について」に記載のとおり、支承部近傍の主桁に衝突させた評価結果(図 4-2 及び表 4-2 参照)のうち解析ケース G1-EW-1 が、裕度が小さいことを確認していることから、可動支承近傍の防護板への飛来物衝突を代表して評価する。
- 防護板に対する飛来物の衝突方向は、水平、鉛直それぞれ評価する。また、支持金物に対する影響を確認するよう、支持金物端部への飛来物衝突についても考慮する。

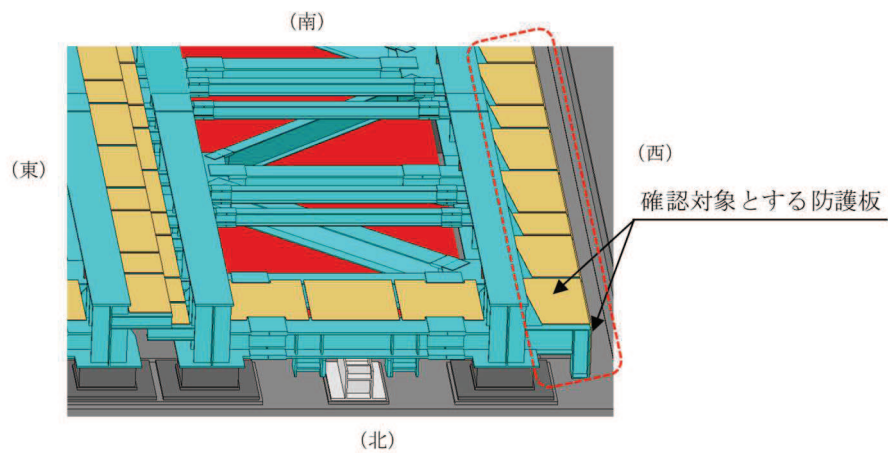


図 4-1 確認対象とする防護板

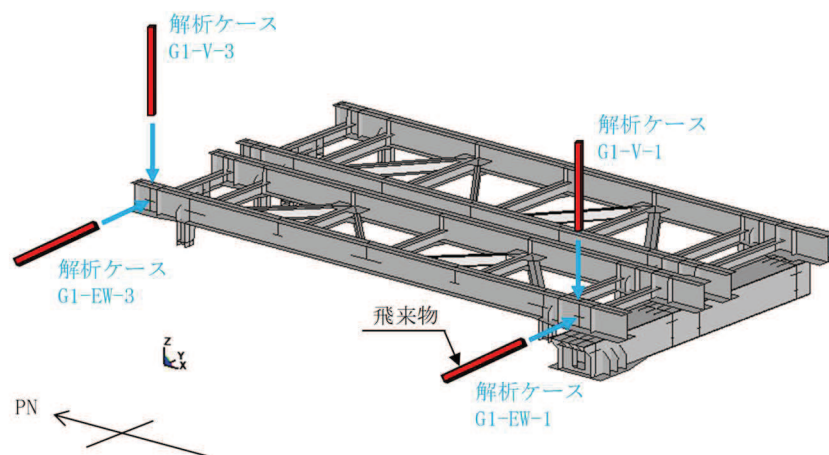


図 4-2 支承部近傍の衝突解析ケース

表 4-2 支承部近傍の衝突解析結果

評価対象部位		評価項目	G1-EW-1		G1-EW-3		G1-V-1		G1-V-3		許容値
			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	引張応力	0.2	0.1	0.4	0.3	0.3	0.2	0.7	0.5	2.0 MPa
		せん断ひずみ	60	66	65	70	60	66	60	66	250 %
		圧縮応力	1	1	1	1	1	1	2	1	23 MPa
	内部鋼板	引張応力	11	11	11	11	11	11	22	11	280 MPa
	取付ボルト	組合せ応力	72	72	88	88	80	75	72	94	420 MPa
	基礎ボルト	組合せ応力	47	48	54	56	49	49	59	55	257 MPa
大梁ゴム 支承	ゴム本体	引張応力	0		0		0.2		0		2.0 MPa
		せん断ひずみ	68		65		64		64		250 %
		圧縮応力	1		1		1		1		23 MPa
	内部鋼板	引張応力	11		11		11		11		280 MPa
	取付ボルト	組合せ応力	64		62		72		61		420 MPa
	基礎ボルト	組合せ応力	33		32		36		32		257 MPa
可動支承		水平荷重	1275*	726	509	325	596	378	433	191	2900 kN
		鉛直荷重（圧縮）	364	269	225	209	629	110	139	70	5600 kN
		鉛直荷重（引張）	442	420	244	244	319	198	167	146	1800 kN

注記 *：裕度最小の評価結果。

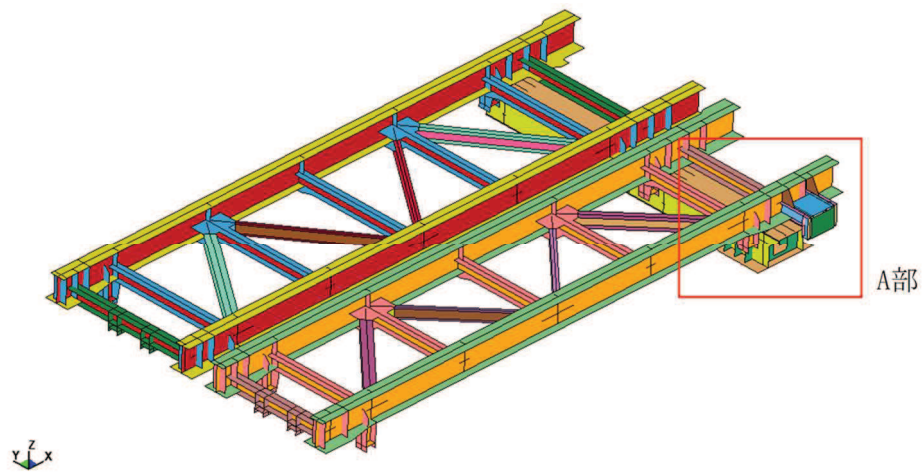
以上より、防護板取付ボルト及び防護板の支持金物並びに可動支承を評価対象とし、可動支承部近傍の防護板中央及び支持金物端部に飛来物が衝突した場合の衝突解析を実施する。評価対象及び解析ケースについて表 4-3 に示す。

表 4-3 評価対象及び解析ケース

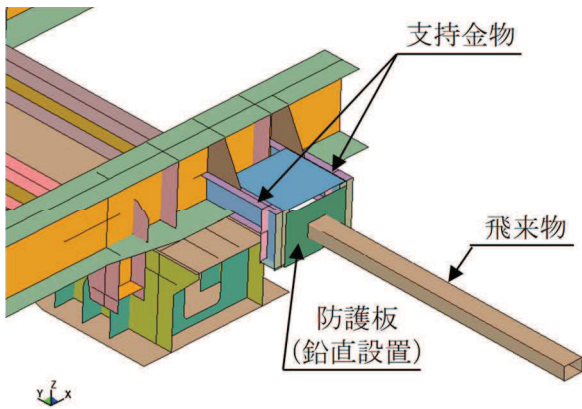
飛来物 衝突部材	評価対象	評価に対する考え方	解析 ケース	衝突 位置	衝突 方向
防護板	防護板 取付ボルト	飛来物が防護板に衝突した場合に、防護板取付ボルトに発生する荷重を評価する	P-EW-1	中央	水平
			P-V-1	中央	鉛直
	支持金物	飛来物が防護板に衝突した場合に、支持金物に発生するひずみを評価する。	P-EW-1	中央	水平
			P-V-1	中央	鉛直
			S-EW-1	端部	水平
			S-V-1	端部	鉛直
	可動支承	支承部に作用する荷重が大きくなるよう、飛来物が支承部近傍の防護板に衝突した際に、可動支承に作用する荷重を評価する。	P-EW-1	中央	水平
			P-V-1	中央	鉛直

(2) 解析モデル及び諸元

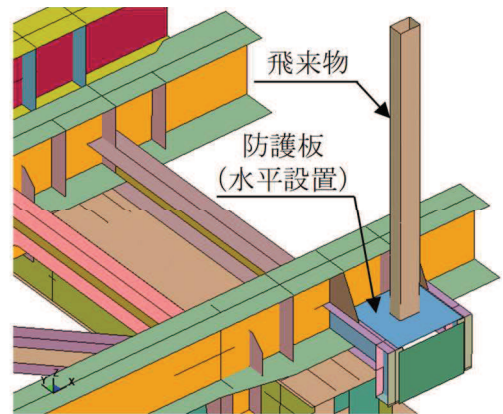
添付書類「VI-3-別添 1-2-1-1 竜巻防護ネットの強度計算書」の「3.3.5(2) a. 解析モデル及び諸元」を基に、防護板、防護板取付ボルト及び支持金物をモデル化する。モデル化範囲については、衝突ケースに対応した箇所をモデル化することとする。また、防護板及び支持金物はシェル要素でモデル化し、防護板取付ボルトはビーム要素でモデル化する。図 4-3 及び図 4-4 に解析モデル図を示す。



(竜巻防護ネットモデル図)

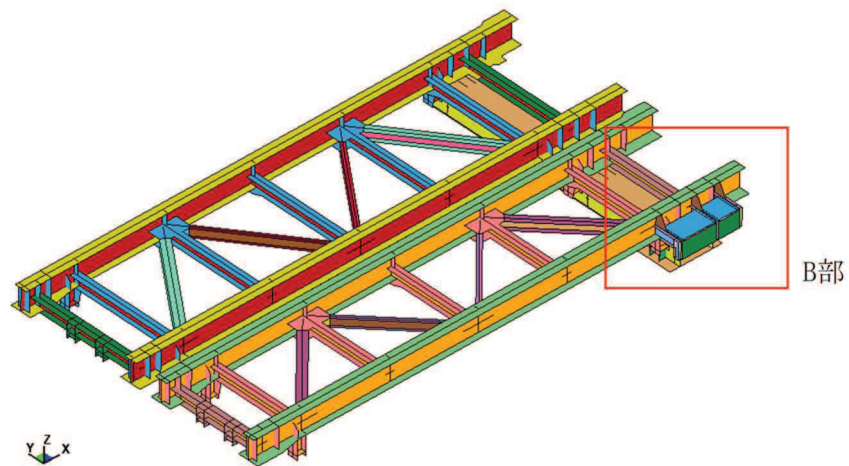


(A部拡大)
(解析ケース：P-EW-1)

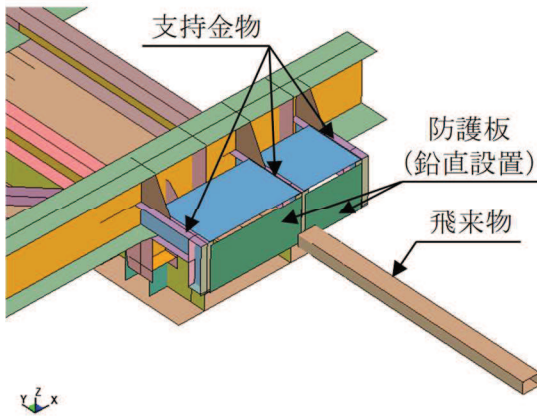


(A部拡大)
(解析ケース：P-V-1)

図 4-3 解析モデル図

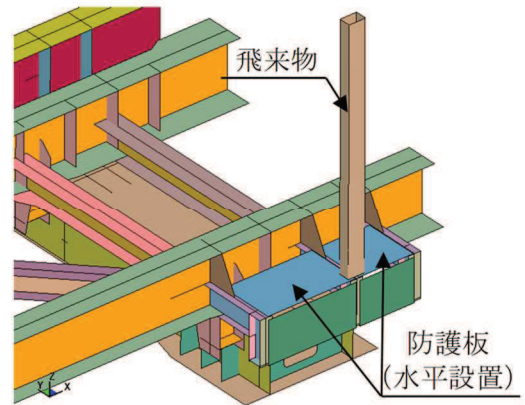


(竜巻防護ネットモデル図)



(B部拡大)

(解析ケース：S-EW-1)



(B部拡大)

(解析ケース：S-V-1)

図 4-4 解析モデル図 (防護板の支持金物に対する影響確認)

また、解析モデルの境界条件及び支承部の結合条件は、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」の「3.3.5(2) a. 解析モデル及び諸元」と同様に、それぞれ表 4-4 及び表 4-5 のとおりとする。

表 4-4 解析モデルの境界条件

項目	境界条件
竜巻防護ネットと 海水ポンプ室躯体	X, Y, Z 方向並進拘束

表 4-5 支承部の結合条件

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

(3) 解析コード

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」の「3.3.5(2) b. 解析コード」と同様に「LS-DYNA」を用いる。

(4) 使用材料及び材料定数

竜巻防護ネットの使用材料及び材料定数については、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」の「3.3.5(2) c. 使用材料」及び「3.3.5(2) d. 材料定数」と同様に設定する。防護板の材料仕様を表 4-6 に示す。

表 4-6 材料仕様

分類	材質	降伏応力 σ_y (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	塑性硬化係数 E' (MPa)
防護板 (水平設置)	SM400A ($t \leq 16$)	245	202000	2670
防護板 (鉛直設置)	SM400A ($16 < t \leq 40$)	235	202000	2450
防護板取付ボルト	J I S 強度区 分 10.9	—	202000	—
支持金物	SM490A ($t \leq 16$)	325	202000	3100
	SM490A ($16 < t \leq 40$)	315	202000	2830

(5) 材料の非線形特性

竜巻防護ネットの衝突解析における材料の非線形特性については、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」の「3.3.5(2) e. 材料の非線形特性」と同様とする。防護板及び支持金物のひずみ速度依存性パラメータ及び破断ひずみを表 4-7 及び表 4-8 に示す。

表 4-7 ひずみ速度依存性パラメータ

	防護板	支持金物
材質	SM400A	SM490A
C (1/s)		
p		

表 4-8 材料モデルにおける破断ひずみ

部材	材質	厚さ	J I S 規格値 (下限値)	TF	破断ひずみ*
防護板 (水平設置)	SM400A	12mm	0.18		
防護板 (鉛直設置)		32mm	0.22		
支持金物	SM490A	16mm	0.17		
		22mm	0.21		
		25mm	0.21		
		28mm	0.21		

注記 * : 真ひずみ換算値

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4.3 許容限界

(1) 防護板取付ボルトの許容限界

防護板取付ボルトの許容限界は、鋼構造接合部設計指針に基づき、次式により算出する。

a. 許容引張荷重

$$p_a = S_u \times A_b$$

ここで、

p_a : 引張耐力

S_u : ボルトの引張強さ (=1000 MPa)

A_b : ボルトの有効断面積 (=561 mm²)

b. 許容せん断荷重

$$q_a = 0.6 \cdot S_u \times A_{b e}$$

ここで、

q_a : せん断耐力

$A_{b e}$: ボルトの軸部断面積 (=706.9 mm²)

c. 組合せ評価

引張力 p 及びせん断力 q を同時に受ける場合、以下の式を満たすことを確認する。

$$\left(\frac{p}{p_a}\right)^2 + \left(\frac{q}{q_a}\right)^2 \leq 1$$

ここで、

p : 衝突解析より得られる防護板取付ボルトに生じる引張荷重

q : 衝突解析より得られる防護板取付ボルトに生じるせん断荷重

防護板取付ボルトの許容限界を表 4-9 に示す。

表 4-9 防護板取付ボルトの許容限界

評価対象部位	評価項目	許容限界 (kN)
防護板取付ボルト	引張荷重	561
	せん断荷重	424
	組合せ*	$\left(\frac{p}{p_a}\right)^2 + \left(\frac{q}{q_a}\right)^2 \leq 1$

注記 * : 許容限界は無次元

(2) 支持金物の許容限界

支持金物の許容限界については、破断ひずみを許容限界とし、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」の「3.3.4(2) d. 支持機能評価における許容限界」と同様に設定する。支持金物の許容限界（破断ひずみ）を表 4-10 に示す。

表 4-10 支持金物の許容限界（ひずみ）

評価対象部位	材質	破断ひずみ*1, *2
支持金物	SM490A	

注記 *1：真ひずみ換算値

*2：破断ひずみを超えるようなひずみが確認される場合は、破断個所を確認し、全断面の破断に至らないことを確認する。

(3) 可動支承の許容限界

飛来物が防護板に衝突した際に支承部に生じる荷重が、支持部材（フレーム）に衝突した際の荷重に包含されることの確認として、「4.1 竜巻防護ネットの衝突解析について」において、支承部近傍の主桁に衝突させた場合の、可動支承に生じた荷重発生値を許容限界とする。可動支承の許容限界を表 4-11 に示す。

表 4-11 可動支承の許容限界

評価対象部位	評価項目	許容限界 (kN)	備考
可動支承	水平荷重	1275	G1-EW-1
	鉛直荷重（圧縮）	629	G1-V-1
	鉛直荷重（引張）	442	G1-EW-1

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4.4 評価結果

(1) 防護板取付ボルトの評価結果

防護板取付ボルトの評価結果を表 4-12 に示す。防護板取付ボルトに作用する荷重は、許容限界を超えないことを確認した。

表 4-12 防護板取付ボルトの評価結果

評価対象部位	評価項目	発生値 (kN)	許容限界 (kN)	備考
防護板取付ボルト	引張荷重	170	561	P-EW-1
	せん断荷重	274	424	P-V-1
	組合せ*	0.44	1.0	P-V-1

注記 *1：発生値及び許容限界は無次元

(2) 支持金物の評価結果

支持金物の評価結果を表 4-13 に示す。支持金物に発生するひずみは、許容限界を超えないことを確認した。

表 4-13 支持金物の評価結果

評価対象部位	評価項目	発生値 (-)	許容限界 (-)	備考
支持金物	ひずみ			P-EW-1
				S-EW-1

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(3) 可動支承の評価結果

可動支承の評価結果を表 4-14 に示す。可動支承に生じる荷重を比較し、飛来物が防護板に衝突した際に支承部に生じる荷重が、支持部材（フレーム）に衝突した際の荷重に包含されることを確認した。

表 4-14 可動支承の評価結果

評価対象部位	評価項目	発生値 (kN)	許容限界* (kN)	備考
可動支承	水平荷重	1215	1275	P-EW-1
	鉛直荷重 (圧縮)	490	629	P-V-1
	鉛直荷重 (引張)	346	442	P-V-1

注記 *：飛来物が支持部材（フレーム）に衝突した際、可動支承に生じる荷重の発生値を許容限界として設定したものの。

4.8 ストッパーの評価について

1. はじめに

竜巻防護ネットは、外部事象防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物が外部事象防護対象施設に衝突することを防止するために、支持部材について、飛来物が支持部材を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載するネット及び防護板を支持し、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、支持部材に破断が生じないよう十分な余裕を持った強度が確保されていることを確認することで、外部事象防護対象施設に波及的影響を及ぼさないこととしている。また、基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有していることを確認することで、下部に設置された上位クラス施設に対して波及的影響を及ぼさないこととしている。

ここで、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」及び「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、竜巻防護ネットの支承部が想定する荷重に対して許容限界を超えず、十分な構造強度を有していることを確認しているが、「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、フレーム落下防止のためのストッパーを自主的に設置することとしている。

本書では、竜巻防護ネットにストッパーを設置することにより外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないことを確認する。

2. ストッパーの構造

ストッパーの設置位置及び構造概要について図 2-1 に示す。図 2-1 に示すとおり、ストッパーは設置位置及び移動制限方向によって表 2-1 のとおり分類される。

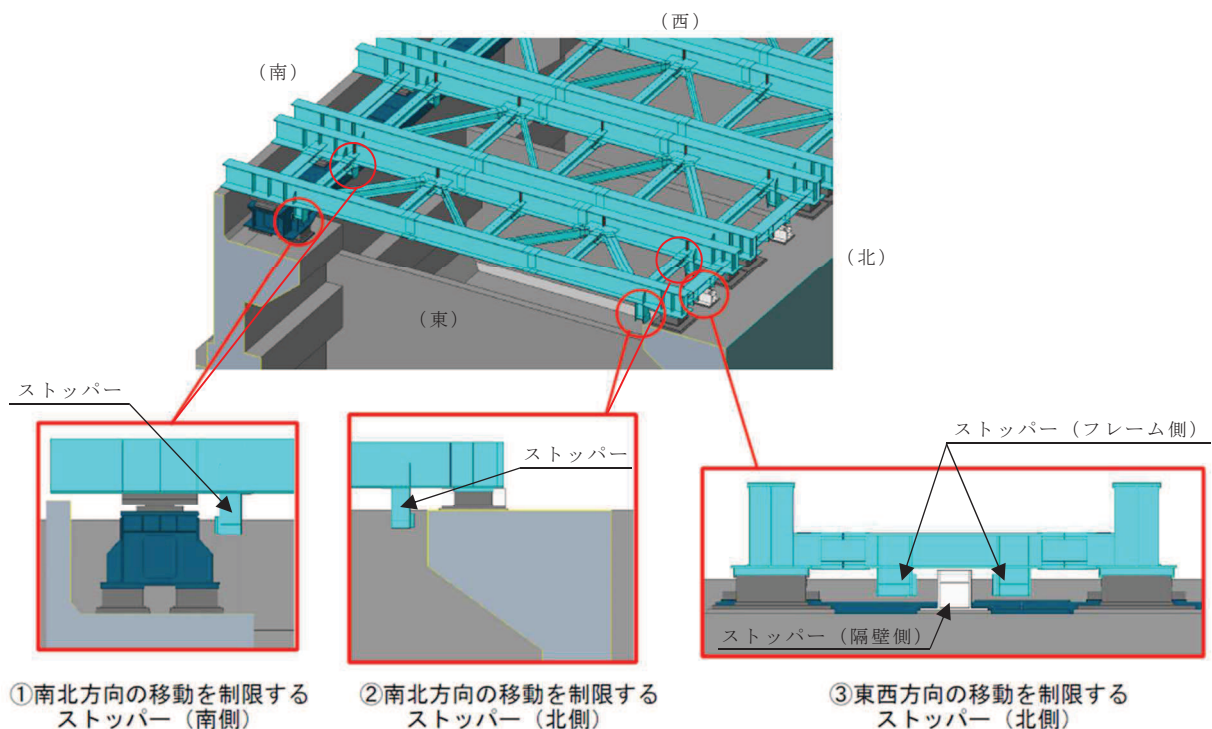


図 2-1 ストッパーの設置位置及び構造概要

表 2-1 ストッパーの種類

	ストッパー①	ストッパー②	ストッパー③	
設置位置	南側	北側	北側	
取付場所	フレーム側	フレーム側	隔壁側	フレーム側
移動制限方向	南北	南北	東西	

3. ストッパーの波及的影響評価

3.1 想定する事象及び評価方法

「1. はじめに」のとおり，竜巻防護ネットの支承部は想定する荷重（地震や竜巻等の自然現象）に対して支持機能を維持することを確認しているが，ポンプ点検等に伴うフレームの取り付け・取り外しによって，1基のフレームに取り付くフレームゴム支承（2基）がいずれも機能喪失した場合を仮定し，道路橋示方書・同解説 V耐震設計編における落橋防止構造に対する設計の考え方を参考に，竜巻防護ネットに設置するストッパーの応力評価を実施する。

ストッパーに作用する水平荷重は，道路橋示方書・同解説 V耐震設計編に基づき，次式により算出する。参考とした落橋防止構造に関する規定について別紙1に示す。

$$H_F = 1.5 \cdot R_d$$

ここで，

H_F ：ストッパーに作用する水平荷重

R_d ：支承部に作用する鉛直反力

なお，ストッパーの波及的影響評価における事象想定に関して，フレームの取り付け・取り外し作業概要及びゴム支承の保全の概要を別紙2に示す。

3.2 応力の算出方法

ストッパーに生じる応力は，設計・建設規格に基づき，次式により算出する。また，ストッパーに作用する水平荷重の模式図について図 3-1 に示す。

(1) せん断応力

$$\tau = \frac{|H_F|}{A}$$

ここで，

A：有効せん断断面積

(2) 曲げ応力

$$\sigma = \frac{|M|}{Z}$$

ここで，

M：次式により算出する曲げモーメント

$$M = H_F \times h$$

h : 荷重作用点から支持点間距離

Z : 断面係数

- (3) 組合せ応力 (曲げ+せん断)

$$\sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

また, 組合せ応力の評価は, 次式を満たすことを確認する。

$$\frac{\sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}}{1.5 \cdot f_t^*} \leq 1$$

- (4) ストッパー (隔壁側) のボルトに作用する引張応力

$$\sigma_b = \frac{F}{A_b}$$

ここで,

F : 次式により算出する, 水平荷重によりボルトに作用する引張力

$$F = \frac{|H_F| \times h}{Z_b}$$

$$Z_b = \frac{\sum (n_j \cdot \ell_j^2)}{\max(\ell_j)}$$

h : 荷重作用点から支持点間距離

Z_b : ボルト群の断面係数

ℓ_j : 中心からのボルト距離 (j = 1, 2)

n_j : 各位置でのボルト数 (j = 1, 2)

A_b : ボルトの呼び径断面積

- (5) ストッパー (隔壁側) のボルトに作用するせん断応力

$$\tau_b = \frac{|H_F|}{n \cdot A_b}$$

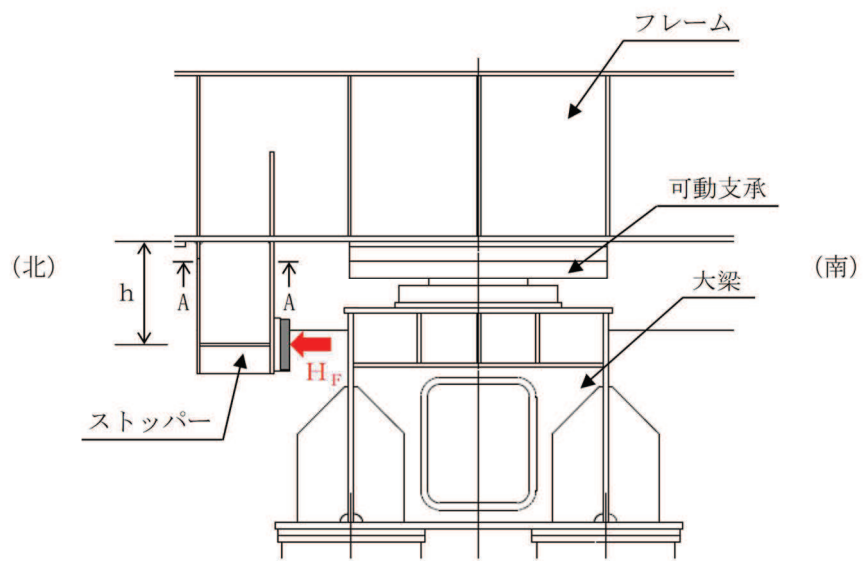
ここで,

n : ボルト本数

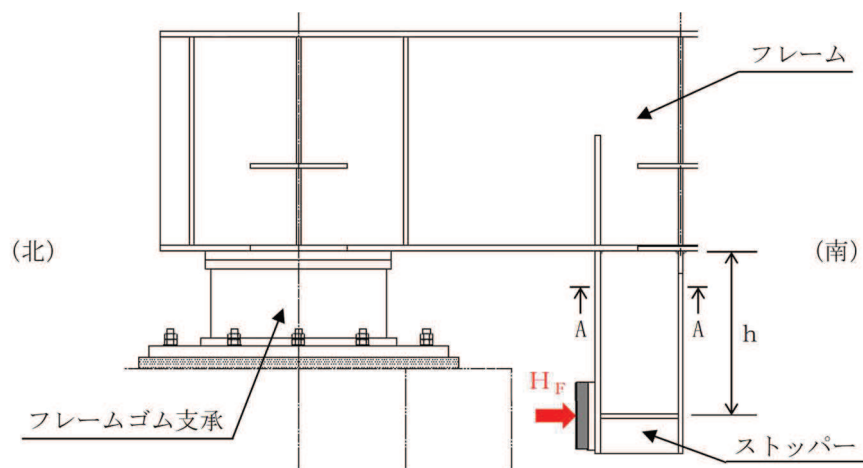
A_b : ボルトの呼び径断面積

- (6) ストッパー (隔壁側) のボルトに作用する組合せ応力

3.2(4)で算出した応力を用いる。

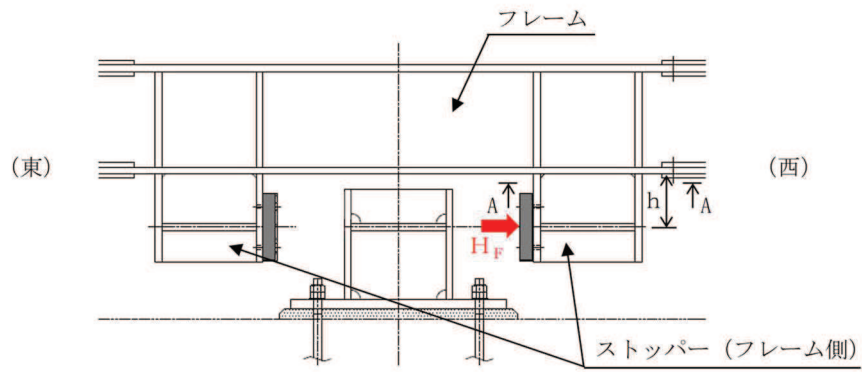


ストッパー①（南北方向の移動を制限するストッパー（南側））

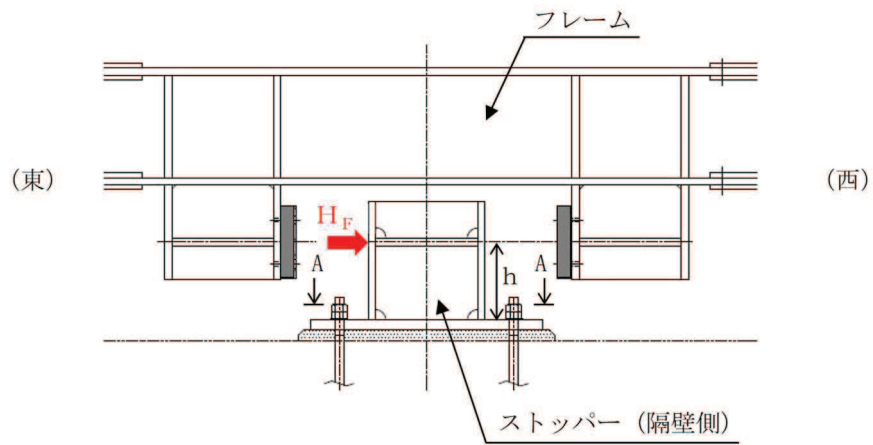


ストッパー②（南北方向の移動を制限するストッパー（北側））

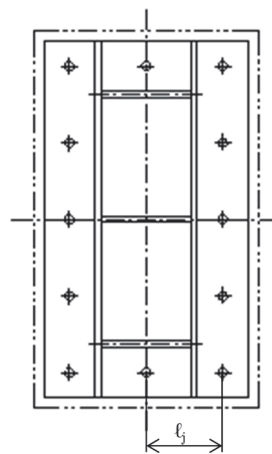
図 3-1 ストッパーに作用する水平荷重の模式図（1/2）



ストッパー③ (東西方向の移動を制限するストッパー (隔壁側))



ストッパー③ (東西方向の移動を制限するストッパー (フレーム側))



ストッパー (隔壁側) のボルト配置

図 3-1 ストッパーに作用する水平荷重の模式図 (2/2)

3.3 許容限界

許容限界は J E A G 4 6 0 1 の許容応力状態 IV_AS に基づく許容値を適用する。許容限界を表 3-1 に示す。

表 3-1 許容限界

許容応力状態	許容限界* ¹ (ボルト等以外)			許容限界* ¹ , * ² (ボルト等)	
	引張	曲げ	せん断	引張	せん断
IV _A S	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_b^*$	$1.5 \cdot f_s^*$	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$

注記 *1: 応力の組合せに対しても評価を行う。

2: 引張応力とせん断応力を同時に受けるボルトの許容引張応力 $1.5 \cdot f_{ts}^$ は以下により算出する。

$$1.5 \cdot f_{ts}^* = \min (1.4 \cdot 1.5 \cdot f_t^* - 1.6 \cdot \tau_b, 1.5 \cdot f_t^*)$$

4. 評価条件

材料仕様及び評価条件を表 4-1～表 4-3 に示す。

表 4-1 材料仕様

評価対象部位	材料	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F* (MPa)
ストッパー① (フレーム側)	SM490A	315	490	343
ストッパー② (フレーム側)	SM490A	315	490	343
ストッパー③ (隔壁側)	SM490A	315	490	343
ストッパー③ (隔壁側) ボルト	SNR490B	325	490	343
ストッパー③ (フレーム側)	SM490A	315	490	343

表 4-2 ストッパーの評価条件

評価対象部位	有効せん断 断面積 A* (mm ²)	断面係数 Z* (mm ³)	荷重作用点から 支持点間の距離 h (mm)
ストッパー① (フレーム側)	7.809×10^3	4.170×10^6	620
ストッパー② (フレーム側)	6.973×10^3	3.670×10^6	750
ストッパー③ (隔壁側)	7.000×10^3	6.100×10^6	267
ストッパー③ (フレーム側)	8.750×10^3	4.140×10^6	195

注記*: 断面積及び断面係数は図 3-1 の断面 A-A の位置で算出。

表 4-3 ストッパー（隔壁側）のボルトの評価条件

評価対象部位	呼び径 (-)	呼び径 断面積 A_b (mm^2)	本数 n (本)	断面係数 Z_b (mm)	荷重作用点から 支持点間の距離 h (mm)
ボルト	M30	706.8	12	3.00×10^3	339

5. 評価結果

5.1 荷重算出

ストッパーに作用する水平荷重を表 5-1 に示す。鉛直反力については、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」に示している竜巻防護ネットの耐震評価フローを基に、固定荷重及び積雪荷重によって支持部に作用する反力を算出した。

表 5-1 ストッパーに作用する水平荷重

(単位：kN)

	ストッパー①	ストッパー②	ストッパー③
鉛直反力 R_d * ¹	248	183	366 * ²
水平荷重 H_F	380	280	550

注記 *1：自重及び積雪荷重を考慮する。

*2：ストッパー①及び②はそれぞれ 2 基のストッパーで荷重を負担するが、ストッパー③は 1 基で荷重を負担することから、ストッパー近傍のフレームゴム支承 2 基分の支承反力を考慮する。

5.2 応力評価

ストッパーの応力評価結果を表 5-2 に示す。また、ストッパー（隔壁側）のボルトの応力評価結果を表 5-3 に示す。発生する応力は許容限界以下である。

表 5-2 ストッパーの応力評価結果

(単位：MPa)

	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
せん断応力	49	41	79	63	198
組合せ応力*	0.30	0.27	0.41	0.33	1.0

注記 *：発生値，許容限界の単位は無次元

表 5-3 ストッパー（隔壁側）のボルトの応力評価結果
 （単位：MPa）

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

16.3 落橋防止構造

- (1) 落橋防止構造の耐力は、式(16.3.1)により算出する設計地震力を下回ってはならない。ここで、落橋防止構造の耐力は、割増し係数1.5を考慮した許容応力度から算出してよい。また、落橋防止構造の設計遊間量は、式(16.3.2)による値を超えない範囲で可能な限り大きい値とするのがよい。

$$H_F = 1.5 R_d \quad \dots\dots\dots (16.3.1)$$

$$S_F = c_F S_E \quad \dots\dots\dots (16.3.2)$$

ここに、

H_F ：落橋防止構造の設計地震力 (kN)

R_d ：死荷重反力 (kN)。ただし、2連のけたを相互に連結する構造を用いる場合には、いずれか大きい方の鉛直反力の値をとるものとする。

S_F ：落橋防止構造の設計最大遊間量 (m)

S_E ：けたかかり長 (m) で、16.2の規定による。

c_F ：落橋防止構造の設計変位係数で、0.75を標準とする。

- (2) 落橋防止構造は、支承の移動、回転等の機能を損なわない構造とするものとする。
- (3) 落橋防止構造は、橋軸直角方向への移動にも追随し、また、衝撃的な地震力を緩和できる構造とするものとする。
- (4) 落橋防止構造の取り付け部は、落橋防止構造の設計地震力を確実に上下部構造に伝達できる構造とするものとする。
- (5) 落橋防止構造は、支承部の維持管理の障害とならない構造とするものとする。

ストッパーの波及的影響評価における事象想定に関する補足

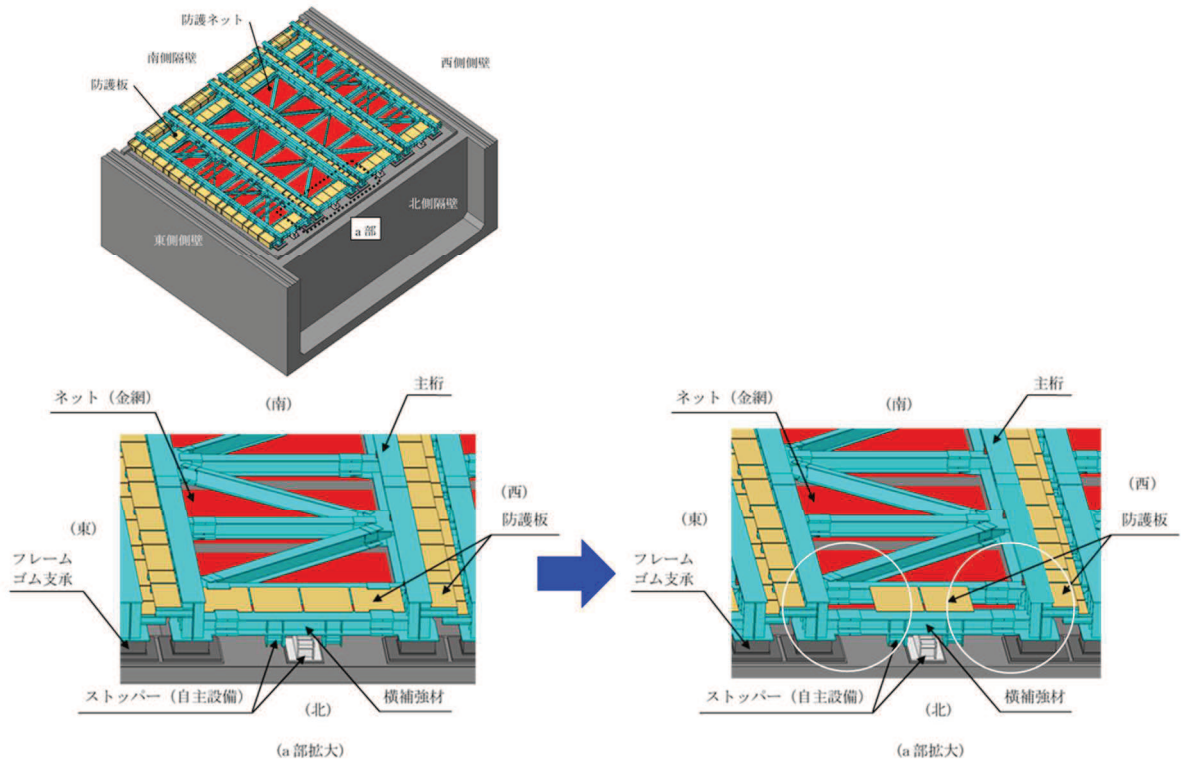
竜巻防護ネットの構造評価においては、いずれの支承部も構造強度上の評価方針を満足する方針とし、竜巻防護ネットの支持機能を担う部材としてストッパーに期待しないこととしているが、「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」の落橋防止構造の考え方を参考に、フレーム落下防止のためのストッパーを自主的に設置することとしている。

ストッパーの波及的影響評価において、ポンプ点検等に伴うフレームの取り付け・取り外しによって、保守的に1基のフレームに取り付くフレームゴム支承(2基)がいずれも機能喪失した場合を仮定して評価していることについて、フレーム取り付け・取り外し作業及びゴム支承の保全の観点を踏まえて補足する。

(1) フレームの取り付け・取り外し作業

竜巻防護ネットのフレームは、ポンプ点検等に応じて取り外す必要がある。現状計画している、フレーム1基を取り外す際の作業概要を図1に示す。図1に示すとおり、ゴム支承の機能を損なうおそれのある作業はなく、フレームの取り付け・取り外し作業によって支承部の機能が喪失する可能性は十分低いと考えている。

【STEP-1】 ゴム支承及び可動支承近傍の防護板取り外し



【STEP-2】 門型クレーンによるフレーム吊り上げ準備

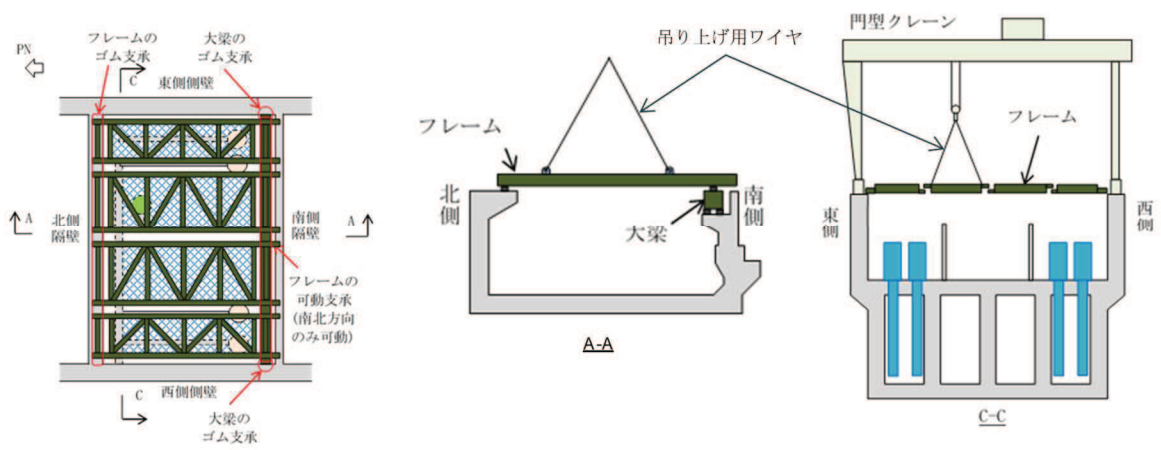


図1 フレームの取り外し作業概要(1/2)*

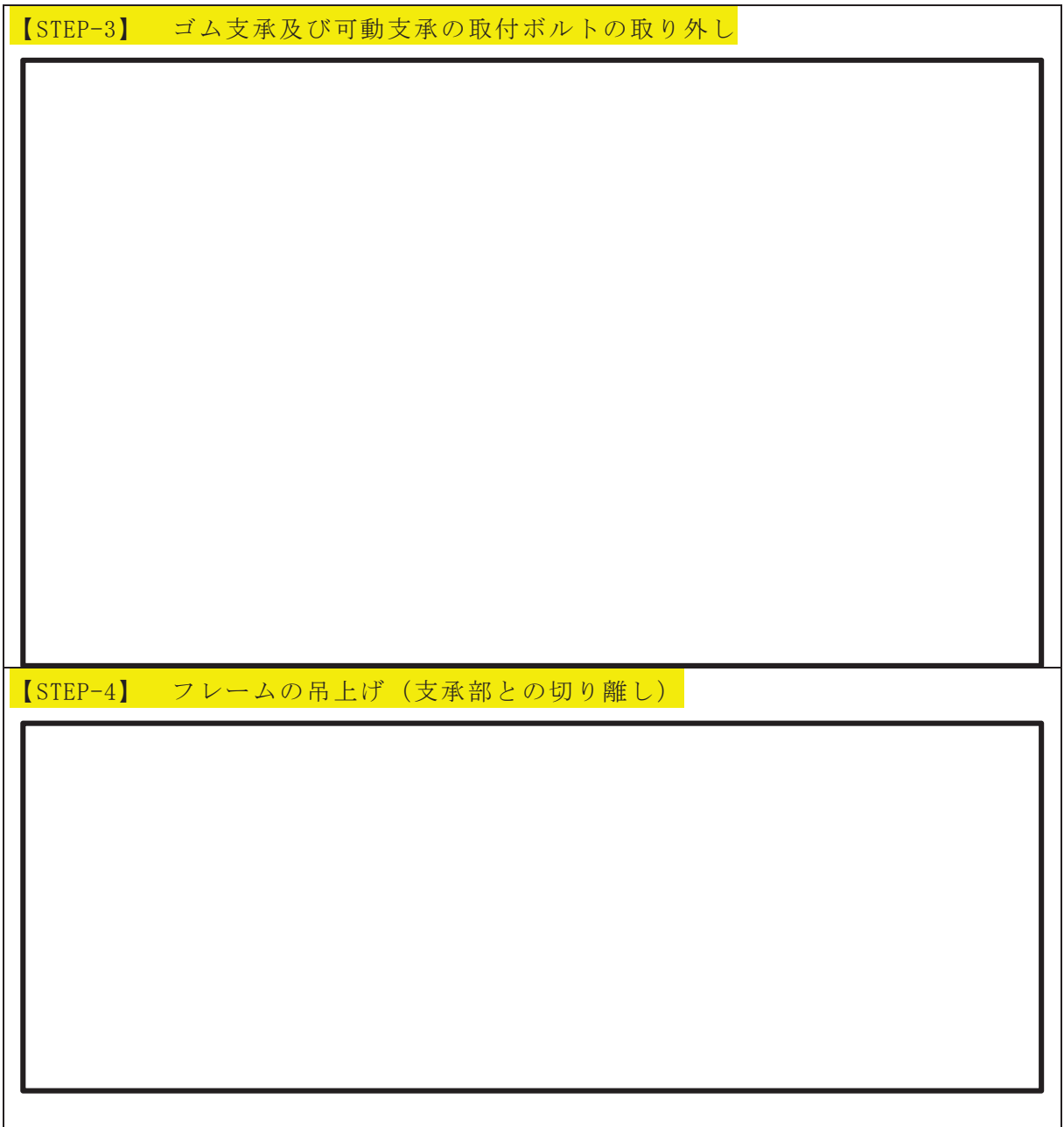


図1 フレームの取り外し作業概要(2/2)*

注記* : 他のフレーム取り外しは, 【STEP-1】から【STEP-4】を繰り返して実施する。また, フレームの取り付けは逆の手順により実施する。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(2) ゴム支承の保全について

ゴム支承は外側に厚さ 10mm の被覆ゴムを設置し、紫外線によりゴム支承内部のゴム材料の劣化及び性能低下を防止する構造としているが、「道路橋支承便覧」等を基に、ゴム支承の健全性の確認として、ゴム支承は外観点検を行う計画としている。点検内容について表 1 に示す。また、ゴム支承の損傷イメージを図 2 に示す。

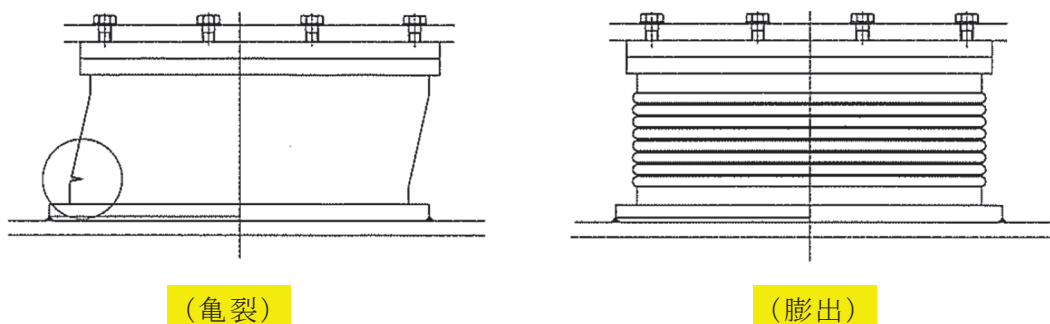
表 1 ゴム支承の点検内容*1

点検項目	方法	箇所	管理値	頻度
亀裂	目視	全数	亀裂がないこと	1 回/年程度
側面の異常な膨出	目視	全数	異常がないこと	1 回/年程度

注記*1：本表に記載している内容は暫定であり、点検内容及び点検頻度は発電所の点検計画に別途定めて管理する。



(ゴム支承断面図)



(亀裂)

(膨出)

図 2 ゴム支承の損傷イメージ (亀裂及び膨出)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(3) ストッパーの波及的影響評価における想定事象

竜巻防護ネットの構造評価においては、いずれの支承部も構造強度上の評価方針を満足する方針としており、竜巻防護ネットの支持機能を担う部材としてストッパーに期待しないこととしている。

また、前項までの内容より、フレームの取り付け・取り外し作業によってフレームゴム支承が損傷する可能性は十分低く、さらに、定期的な点検によってゴム支承の機能が損なわれないことの確認により、設計条件（解析に入力しているゴム支承の剛性値等の評価条件）に影響がないよう管理することとしている。

上記のとおり、設計において十分な考慮は実施しているものの、ストッパーの波及的影響評価においては、落橋防止構造の考え方を参考に、フレーム 1 基に取り付くゴム支承が 2 基とも損傷したと仮定し、ストッパー設置により外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないことについて確認する。なお、図 3 に示すとおり、フレーム間のクリアランスに対して、フレーム及びストッパー間のクリアランスの方が小さいことから、ストッパーの波及的影響評価において、隣接するフレームからの影響はない。

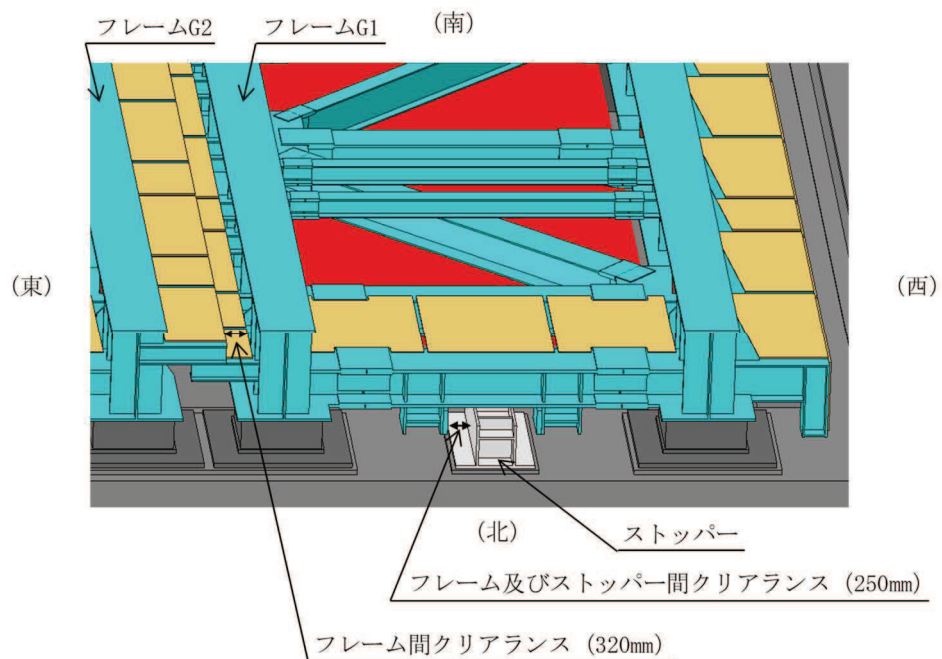


図 3 フレーム間並びにフレーム及びストッパー間のクリアランス

4.9 竜巻防護鋼板からの荷重に対する原子炉建屋外壁の 強度評価について

1. 概要

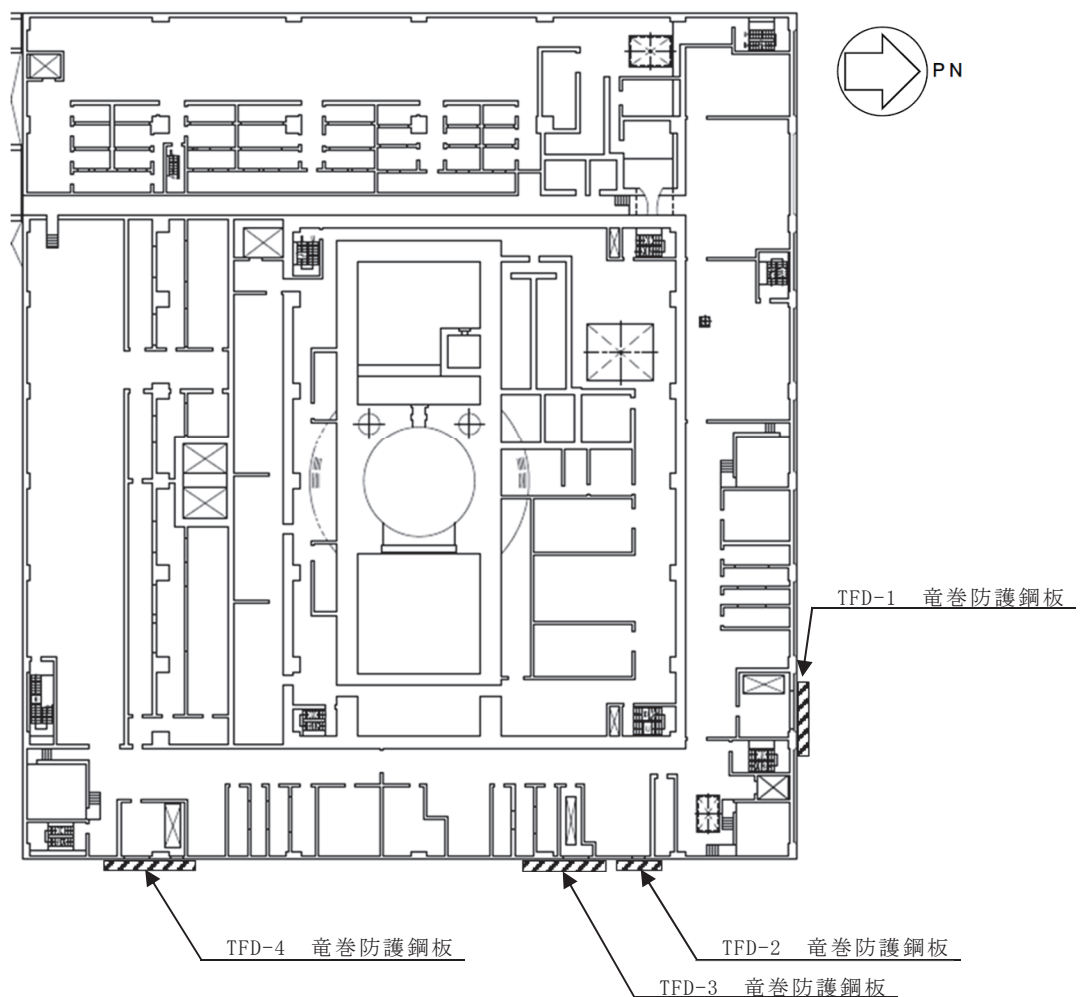
添付書類「VI-3-別添 1-2-1-2 竜巻防護鋼板の強度計算書」において、防護対策施設のうち、竜巻防護鋼板が、設計竜巻による設計飛来物の衝突に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても、外部事象防護対象施設に設計飛来物を衝突させず、また、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないために、竜巻防護鋼板を構成する防護鋼板及び架構が構造健全性を有することを確認している。

竜巻防護鋼板からの荷重は、左右の鉄骨架構のフランジ面を介して原子炉建屋外壁に伝達される構造となっていることから、竜巻防護鋼板からの荷重に対する原子炉建屋外壁の強度評価を行う。

2. 配置図

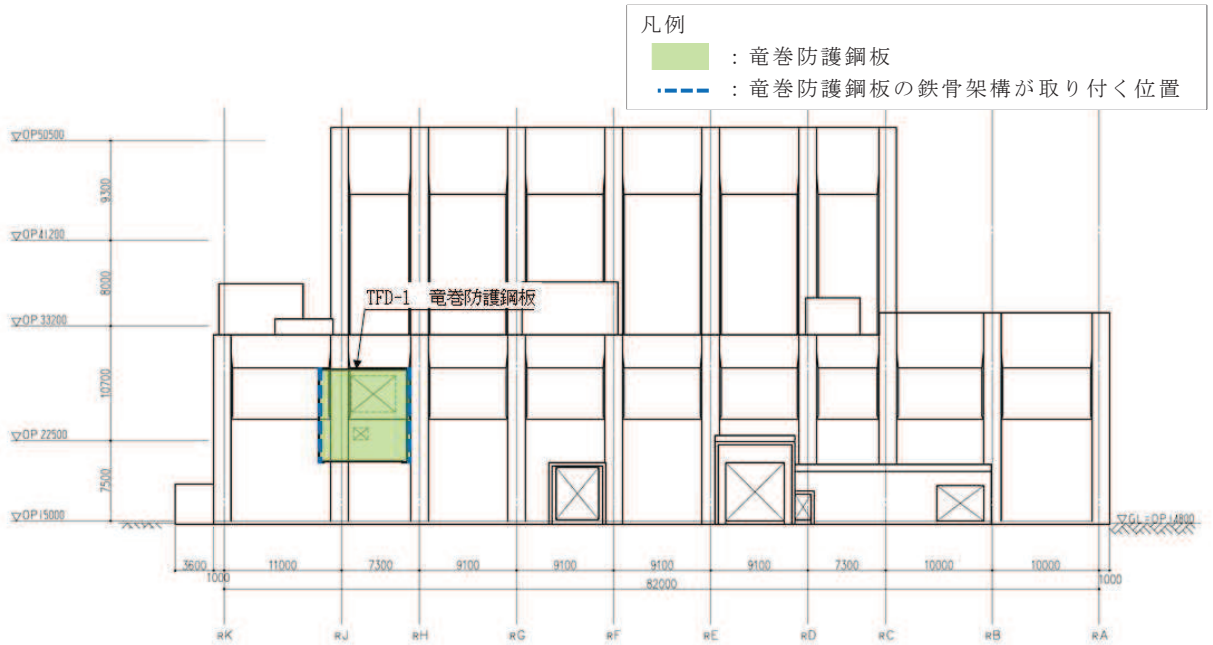
竜巻防護鋼板は、原子炉建屋の開口部に設置する。

竜巻防護鋼板の設置位置を図 2-1 に示す。

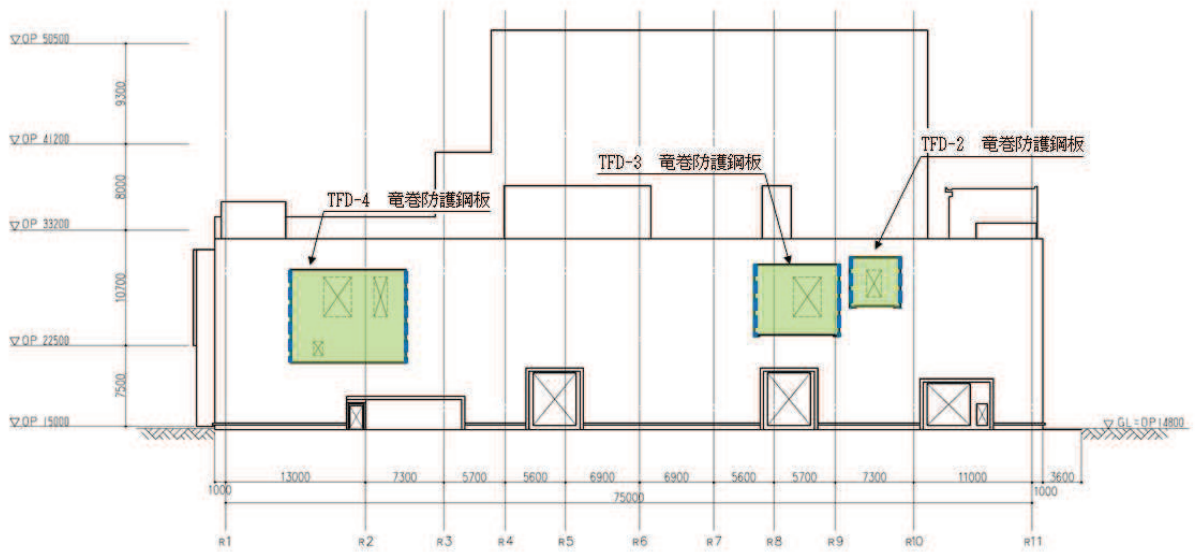


原子炉建屋 地上 2 階 (0. P. 22. 50m) 平面図

図 2-1 竜巻防護鋼板の設置位置図 (1/2)



原子炉建屋北側立面図（単位：mm）

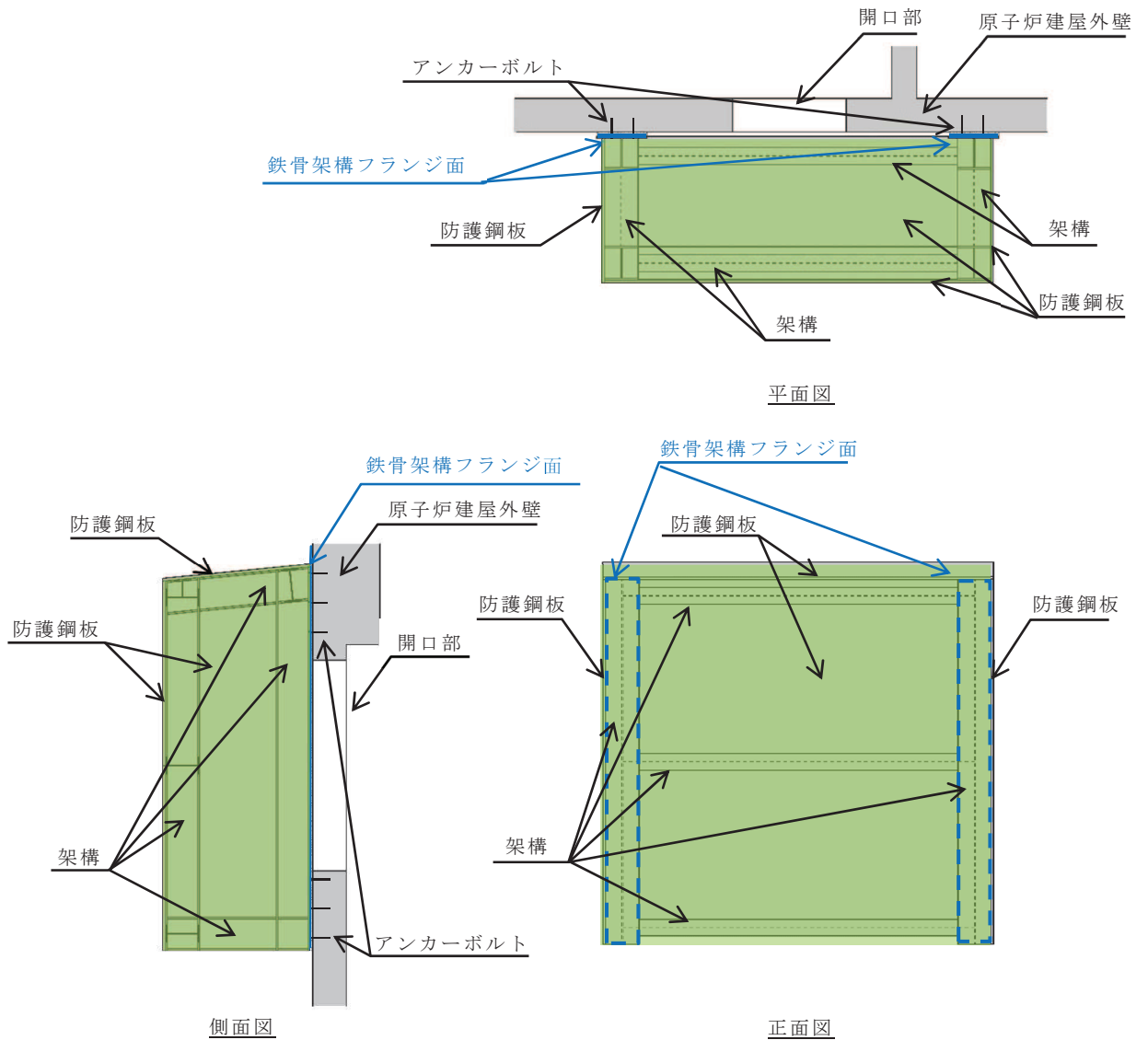


原子炉建屋東側立面図（単位：mm）

図 2-1 竜巻防護鋼板の設置位置図（2/2）

3. 構造概要

竜巻防護鋼板の構造は、鋼板等で構成する鋼製構造物であり、飛来物が衝突した際には、左右の鉄骨架構のフランジ面を介して原子炉建屋外壁に力が伝達される構造となっている。竜巻防護鋼板の概略構造図を図 3-1 に示す。



4. 評価方針

添付書類「VI-3-別添 1-2-1-2 竜巻防護鋼板の強度計算書」において実施している竜巻防護鋼板の変形評価から得られる左右の鉄骨架構のフランジ面の反力を用いて原子炉建屋外壁の評価を行う。

原子炉建屋の外壁は竜巻より防護すべき施設を内包する施設の外殻を構成する部材となっていることから、部材自体の転倒及び脱落を生じないように、終局状態に至るような応力が生じないことを確認する。

原子炉建屋外壁の強度評価フローを図 4-1 に示す。

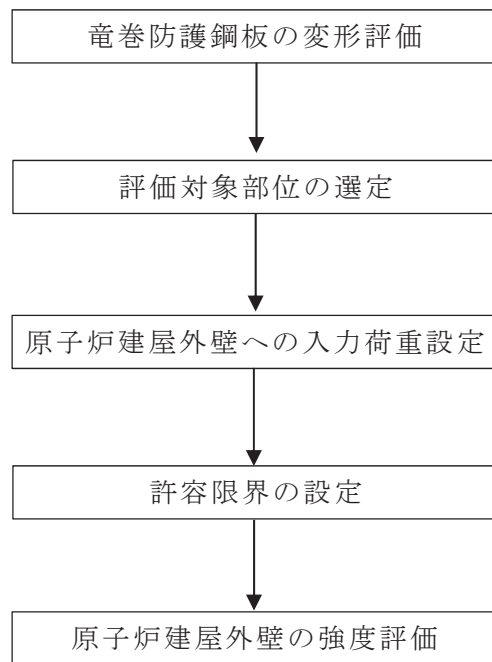


図 4-1 原子炉建屋外壁の強度評価フロー

5. 評価対象部位

竜巻防護鋼板の鉄骨架構のフランジ面が取り付く原子炉建屋外壁（壁厚：400mm，配筋：2-D22@200）を評価対象部位として設定する。評価対象部位を図5-1に示す。

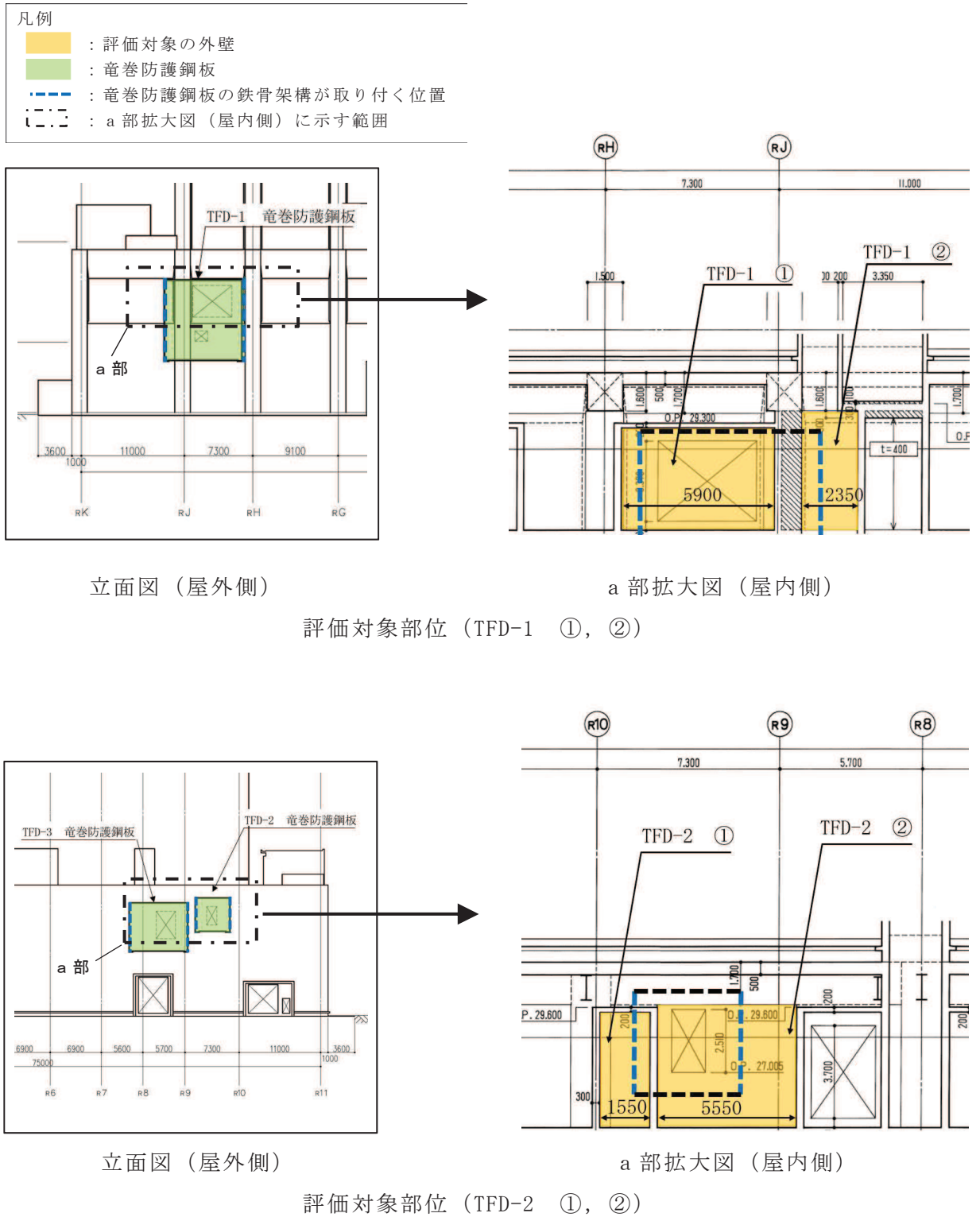
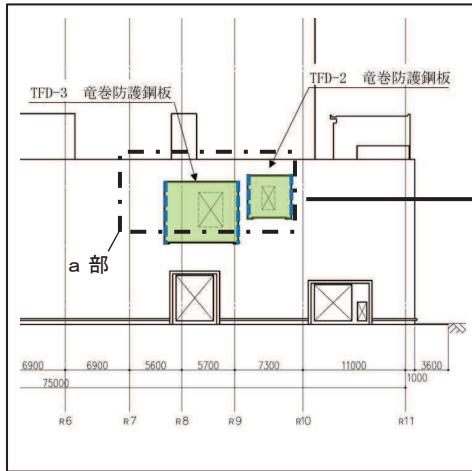
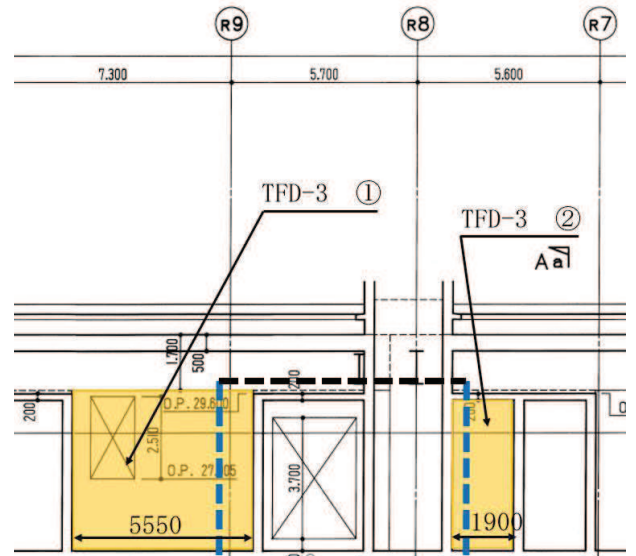


図5-1 評価対象部位（1/2）（単位：mm）

- 凡例
- : 評価対象の外壁
 - : 竜巻防護鋼板
 - : 竜巻防護鋼板の鉄骨架構が取り付く位置
 - : a部拡大図(屋内側)に示す範囲

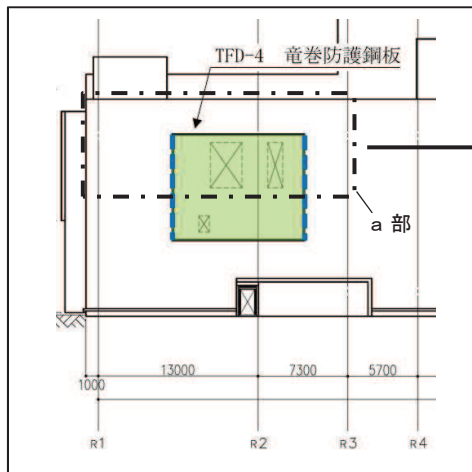


立面図 (屋外側)

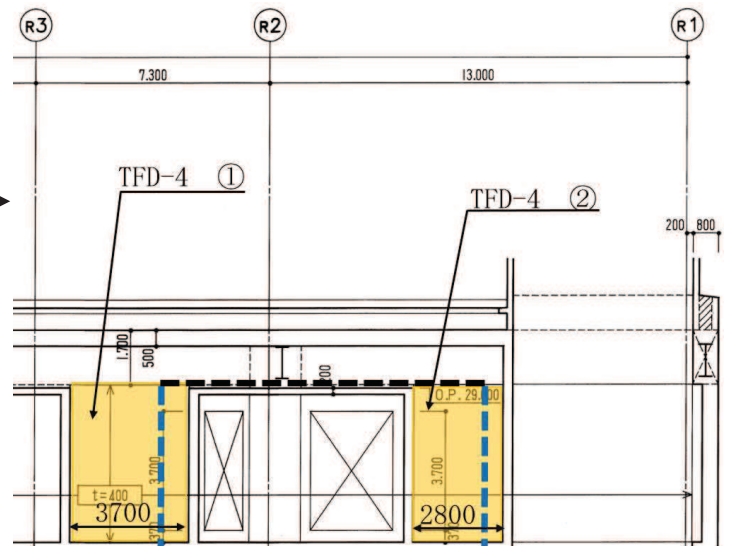


a部拡大図 (屋内側)

評価対象部位 (TFD-3 ①, ②)



立面図 (屋外側)



a部拡大図 (内壁側)

評価対象部位 (TFD-4 ①, ②)

図 5-1 評価対象部位 (2/2) (単位: mm)

6. 入力荷重の設定

竜巻防護鋼板に飛来物が衝突した際の荷重は、左右の鉄骨架構のフランジ面を介して原子炉建屋外壁に力が伝達される構造となっていることから、添付書類「VI-3-別添 1-2-1-2 竜巻防護鋼板の強度計算書」での変形評価から得られる左右の鉄骨架構のフランジ面の固定節点反力をそれぞれ合計し、その時刻歴上の最大値を鉄骨架構の高さで除したものを入力荷重とする。

入力荷重の一覧表を表 6-1 に示す。

表 6-1 入力荷重一覧

評価対象部位	入力荷重 (kN/m)
TFD-1 ①	161
TFD-1 ②	78
TFD-2 ①	117
TFD-2 ②	113
TFD-3 ①	293
TFD-3 ②	85
TFD-4 ①	76
TFD-4 ②	54

7. 許容限界

コンクリート及び鉄筋の許容限界は、終局耐力であるが、本資料においては保守的に「日本建築学会 1999 年鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説-許容応力度設計法-」の短期許容応力度を用いる。また、許容応力度の算定においては、終局耐力に対する評価であることを考慮し、鉄筋の基準強度を「2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書（国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所）」に基づき1.1倍した値を用いる。表7-1及び表7-2にコンクリート及び鉄筋の短期許容応力度を示す。

表 7-1 コンクリートの短期許容応力度（単位：N/mm²）

設計基準強度 $F_c = 32.4$
せん断
1.21

表 7-2 鉄筋の短期許容応力度（単位：N/mm²）

SD35（SD345 相当）
引張
379*

注記*：「2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書（国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所）」に基づき鉄筋の基準強度を 1.1 倍した値。

8. 評価方法

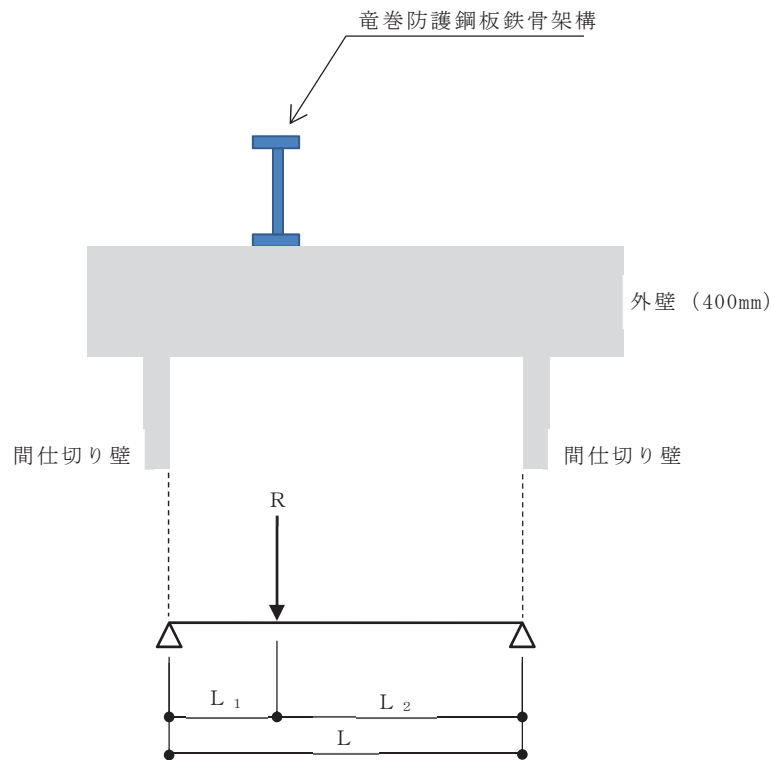
「6. 入力荷重の設定」で設定した入力荷重により「5. 評価対象部位」で設定した原子炉建屋外壁に生じる曲げモーメント及びせん断力が、「7. 許容限界」で設定した許容応力度を用いて算定した許容応力を超えないことを確認する。

8.1 評価モデル

原子炉建屋外壁を水平方向への両端支持の一方向版としてモデル化し、水平方向のスパンは外壁を支持する間仕切り壁の内法寸法とする。

入力荷重は、「6. 入力荷重の設定」で設定した値を竜巻防護鋼板の鉄骨架構のフランジ面の位置に集中荷重として与える。

評価モデル図を図 8-1 に示す。



- R : 入力荷重 (kN/m)
 L_1 : 荷重入力位置から間仕切り壁までの短スパン側の距離 (m)
 L_2 : 荷重入力位置から間仕切り壁までの長スパン側の距離 (m)
 L : スパン長さ (m)

図 8-1 評価モデル図

8.2 曲げモーメント及びせん断力に対する評価

原子炉建屋外壁に発生する曲げモーメント及びせん断力は次式により算定する。

$$M = R \cdot L_1 \cdot L_2 / L$$

$$Q = R \cdot L_2 / L$$

M : 原子炉建屋外壁に発生する単位幅当たりの曲げモーメント (kN・m/m)

Q : 原子炉建屋外壁に発生する単位幅当たりのせん断力 (kN/m)

R : 入力荷重 (kN/m)

L₁ : 荷重入力位置から間仕切り壁までの短スパン側の距離 (m)

L₂ : 荷重入力位置から間仕切り壁までの長スパン側の距離 (m)

L : スパン長さ (m)

また、許容応力は次式により算定し、外壁の有効せいは、壁厚 (400mm) から設計かぶり厚さ (60mm) および鉄筋の最外径の 1/2 (12.5mm) を差し引いた値とする。応力中心間距離はその 7/8 倍とする。

入力値一覧を表 8-1 に示す。

$$M_a = a_t \cdot f_t \cdot j \cdot 10^{-6}$$

$$Q_a = f_s \cdot j$$

M_a : 許容曲げモーメント (kN・m/m)

Q_a : 許容せん断力 (kN/m)

a_t : 単位幅当たりの鉄筋断面積 (mm²/m)

f_t : 鉄筋の短期許容応力度 (N/mm²)

j : 応力中心間距離 (mm)

f_s : コンクリートの短期許容応力度 (N/mm²)

表 8-1 入力値一覧

評価対象部位	鉄筋断面積 a_t (mm^2/m)	応力中心間 距離 j (mm)	スパン長さ L (m)	荷重入力位置から 壁までの距離	
				L_1 (m)	L_2 (m)
TFD-1 ①	1935	286.6	5.900	0.600	5.300
TFD-1 ②	1935	286.6	2.350	0.750	1.600
TFD-2 ①	1935	286.6	1.550	0.750	0.800
TFD-2 ②	1935	286.6	5.550	2.300	3.250
TFD-3 ①	1935	286.6	5.550	0.800	4.750
TFD-3 ②	1935	286.6	1.900	0.500	1.400
TFD-4 ①	1935	286.6	3.700	1.000	2.700
TFD-4 ②	1935	286.6	2.800	0.600	2.200

9. 評価結果

原子炉建屋外壁の評価結果を表 9-1 及び表 9-2 に示す。原子炉建屋外壁に発生する曲げモーメント及びせん断力は許容応力を超えないことを確認した。

表 9-1 評価結果（曲げモーメント）

評価対象部位	発生応力 (kN・m/m)	許容応力 (kN・m/m)
TFD-1 ①	87	210
TFD-1 ②	40	210
TFD-2 ①	46	210
TFD-2 ②	153	210
TFD-3 ①	201	210
TFD-3 ②	32	210
TFD-4 ①	56	210
TFD-4 ②	26	210

表 9-2 評価結果（せん断力）

評価対象部位	発生応力 (kN/m)	許容応力 (kN/m)
TFD-1 ①	145	346
TFD-1 ②	54	346
TFD-2 ①	61	346
TFD-2 ②	67	346
TFD-3 ①	251	346
TFD-3 ②	63	346
TFD-4 ①	56	346
TFD-4 ②	43	346

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

1. 概要

添付書類「VI-3-別添 1-1-7 排気筒の強度計算書」で実施する第 2 号機及び第 3 号機排気筒（以下「排気筒」という。）の強度評価において、設計飛来物による影響は鉄塔部材を損傷させることで考慮することとしている。本資料は、添付書類「VI-3-別添 1-1-7 排気筒の強度計算書」において、「衝突を評価する部材としては、鉄塔基礎部に直接荷重を伝達する最下層支柱材のうち、健全時において風圧力を作用させた際に、最も厳しい評価結果となる部材とする。」としていることに関し、その詳細について説明するものである。

2. 構造

排気筒の構造を図 2-1 及び図 2-2 に示す。

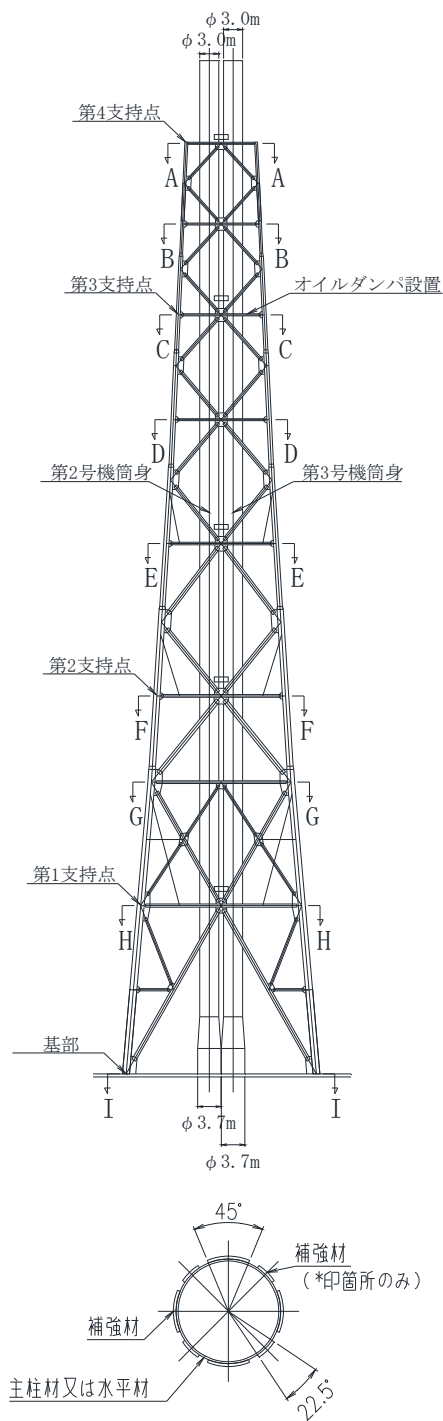
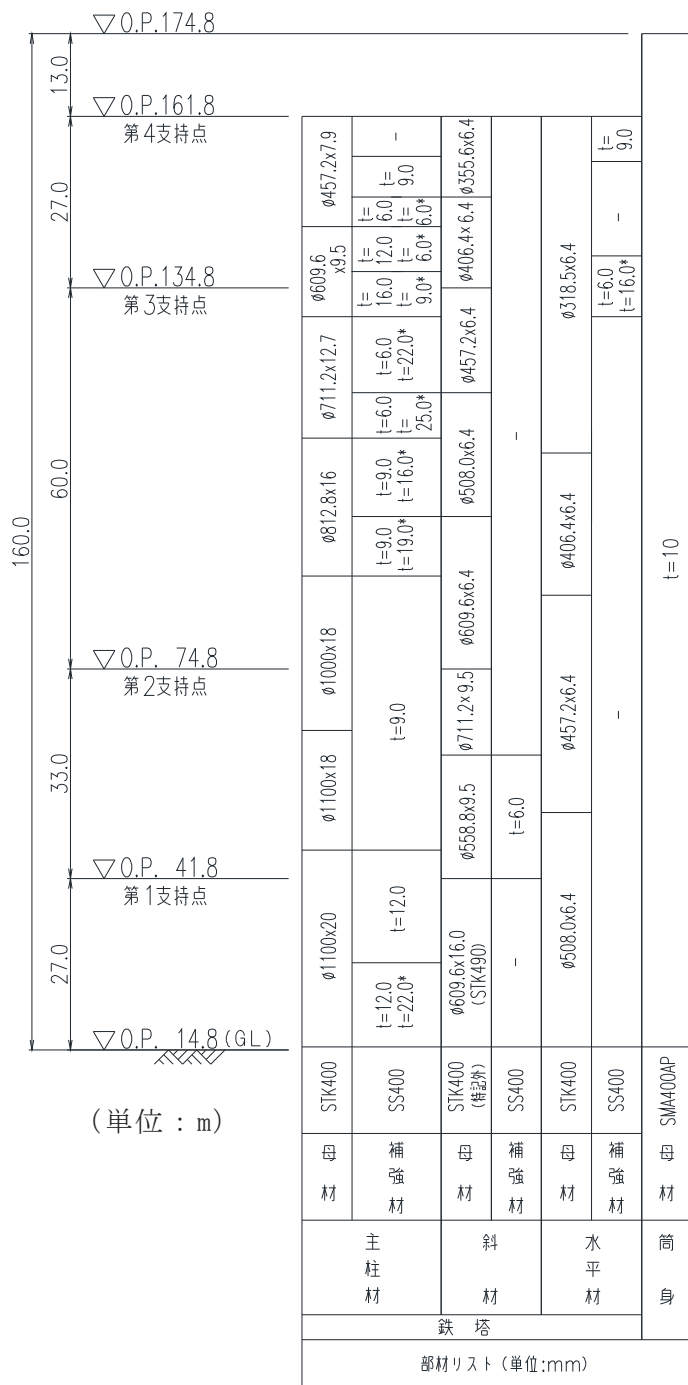


図 2-1 排気筒の構造

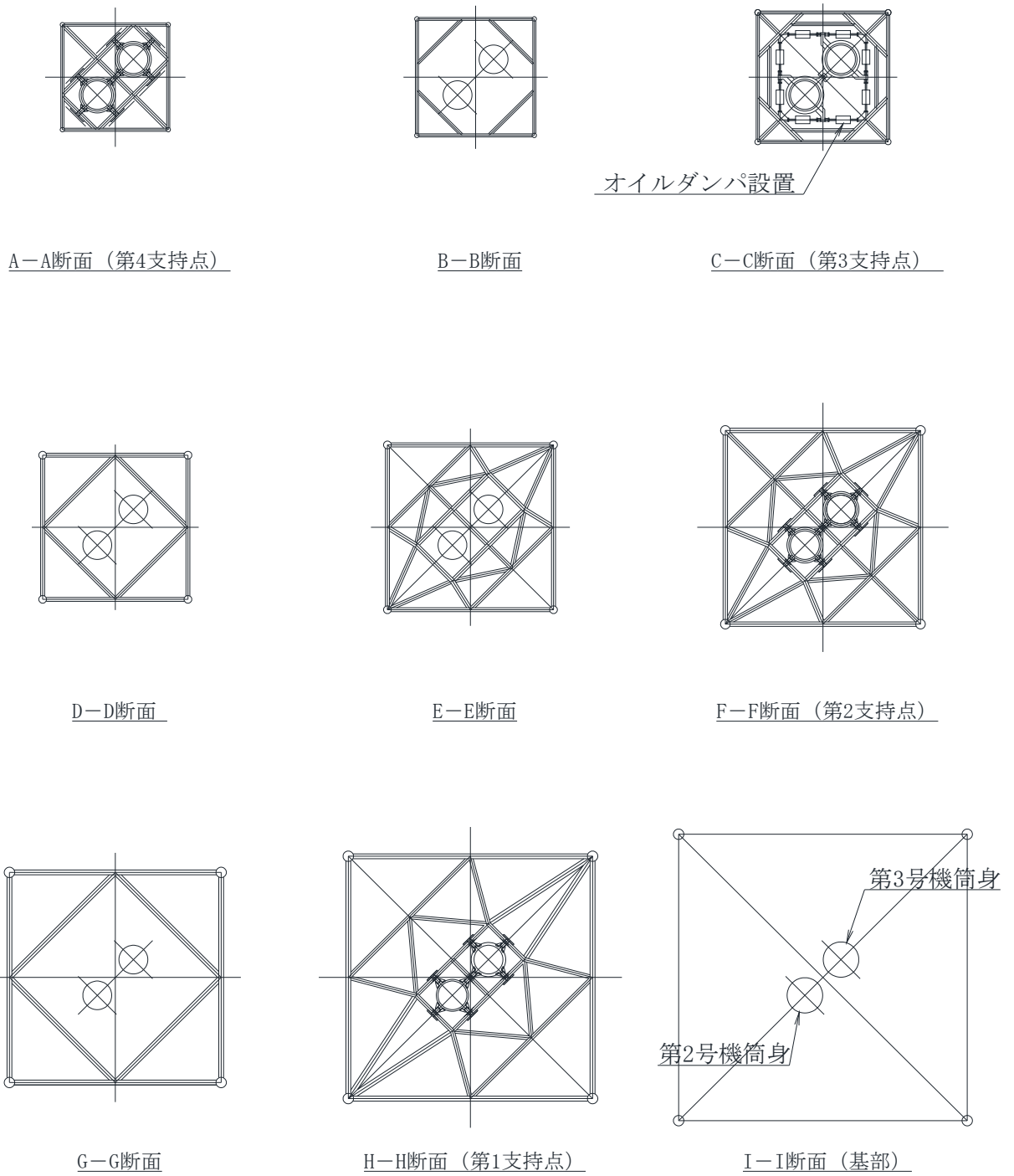


図 2-2 排気筒の構造 (平面図)

3. 健全時の主柱材の評価結果

健全時に、風圧力による荷重を受ける際の鉄塔最下層の主柱材の評価結果を表 3-1 に示す。

なお、評価対象は鉄塔基礎部に直接荷重を伝達している鉄塔最下層の主柱材とし、健全時に風圧力による荷重を受ける際に飛来物が衝突する可能性のある部材のうち、最も厳しい評価結果となる主柱材を選定し、飛来物を衝突させる部材として考慮するものとする。

主柱材の部材名称は図 3-1 に、飛来物が衝突する可能性のある部材は図 3-2 に示すとおりとする。

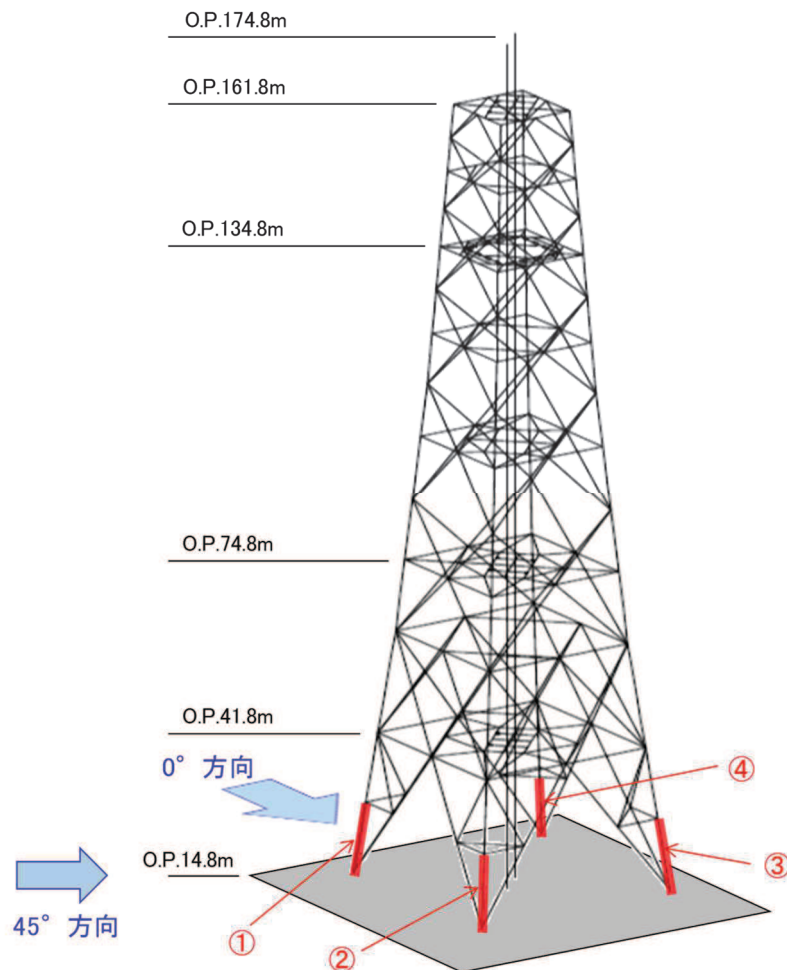


図 3-1 主柱材の部材名称

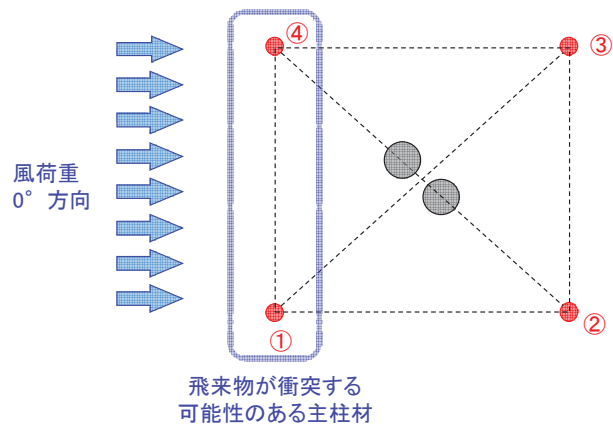


図 3-2(1) 飛来物が衝突する可能性のある部材 (0° 方向)

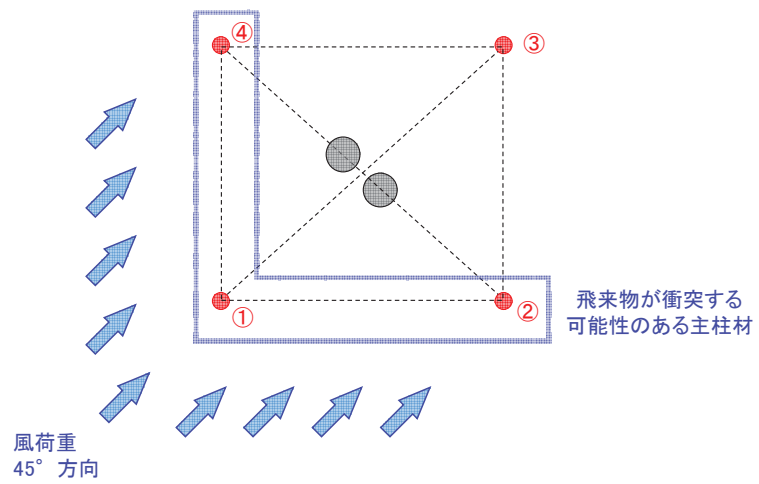


図 3-2(2) 飛来物が衝突する可能性のある部材 (45° 方向)

表 3-1(1) 主柱材の評価結果 (0° 方向)

部材名称	検討応力		使用部材 (STK400) (mm)	断面性能			座屈長さ ℓ_k (mm)	細長比 $\lambda = \ell_k / i$	応力度		許容応力度		応力評価 $\sigma_c / f_c + \sigma_b / f_b$
	軸力 N (kN)	曲げ モーメント M (kN・m)		断面積 A ($\times 10^2$ mm ²)	断面係数 Z ($\times 10^3$ mm ³)	断面2次 半径 i (mm)			圧縮 $\sigma_c = N / A$ (N/mm ²)	曲げ $\sigma_b = M / Z$ (N/mm ²)	圧縮 f_c (N/mm ²)	曲げ f_b (N/mm ²)	
①	4023.06	1429.10	1100.0φ×20.0 (補強材 t = 12.0, 22.0)	1082	28300	386	13350	34.6	37.2	50.5	248.9	258.5	0.35
④	12075.99	850.17	1100.0φ×20.0 (補強材 t = 12.0, 22.0)	1082	28300	386	13350	34.6	111.6	30.0	248.9	258.5	0.57

表 3-1(2) 主柱材の評価結果 (45° 方向)

部材名称	検討応力		使用部材 (STK400) (mm)	断面性能			座屈長さ ℓ_k (mm)	細長比 $\lambda = \ell_k / i$	応力度		許容応力度		応力評価 $\sigma_c / f_c + \sigma_b / f_b$
	軸力 N (kN)	曲げ モーメント M (kN・m)		断面積 A ($\times 10^2$ mm ²)	断面係数 Z ($\times 10^3$ mm ³)	断面2次 半径 i (mm)			圧縮 $\sigma_c = N / A$ (N/mm ²)	曲げ $\sigma_b = M / Z$ (N/mm ²)	圧縮 f_c (N/mm ²)	曲げ f_b (N/mm ²)	
①	13235.99	433.22	1100.0φ×20.0 (補強材 t = 12.0, 22.0)	1082	28300	386	13350	34.6	122.3	15.3	248.9	258.5	0.56
②	1488.88	1564.24	1100.0φ×20.0 (補強材 t = 12.0, 22.0)	1082	28300	386	13350	34.6	13.8	55.3	248.9	258.5	0.27
④	1489.29	1564.24	1100.0φ×20.0 (補強材 t = 12.0, 22.0)	1082	28300	386	13350	34.6	13.8	55.3	248.9	258.5	0.27

4. 飛来物の衝突を考慮する部材の選定

「3. 健全時の支柱材の評価結果」を踏まえ、飛来物の衝突を考慮する部材として、健全時に風圧力による荷重を受ける際に最も厳しい評価結果となる最下層の支柱材を選定した。

表 4-1 飛来物の衝突を考慮する部材の選定結果

風圧力による荷重の作用方向	飛来物の衝突を考慮する部材
0°	④
45°	①

5.2 腐食代の考慮について

1. 概要

添付書類「VI-3-別添 1-1-7 排気筒の強度計算書」で実施する第2号機及び第3号機排気筒（以下「排気筒」という。）の強度評価において、腐食による影響はないとしている。そのため、本資料は筒身及び筒身を支持している鉄塔には劣化がなく健全性が維持されていることを説明するものである。

2. 排気筒の構造概要

排気筒は、地上からの高さ160.0m、基部内径3.7m、頂部内径3.0mの鋼板製筒身2本を鋼管四角形鉄塔（制震装置付）で支えた四角鉄塔支持形鋼管構造であり、第2号機排気筒と第3号機排気筒で支持構造物を共有する集合方式である。

筒身と鉄塔は4箇所の支持点で接続される。O.P. 41.8m, O.P. 74.8m, O.P. 161.8mの3箇所は、水平方向固定・鉛直方向フリーの支持点構造で接続され、O.P. 134.8mの支持点は制震装置（オイルダンパ）で接続されている。

排気筒の概要図を図2-1に示す。

構造概要

・ 構造形式	四角鉄塔支持形鋼管構造（制震装置付）
・ 排気筒高さ	160.0m（O.P. 174.8m）
・ 鉄塔高さ	147.0m（O.P. 161.8m）
・ 筒身内径	頂部 3.0m 基部 3.7m
・ 鉄塔幅	頂部 11.0m 根開き 30.0m
・ 支持点位置	O.P. 41.8m, O.P. 74.8m, O.P. 134.8m, O.P. 161.8m
・ 基礎	鉄筋コンクリート造フーチング基礎

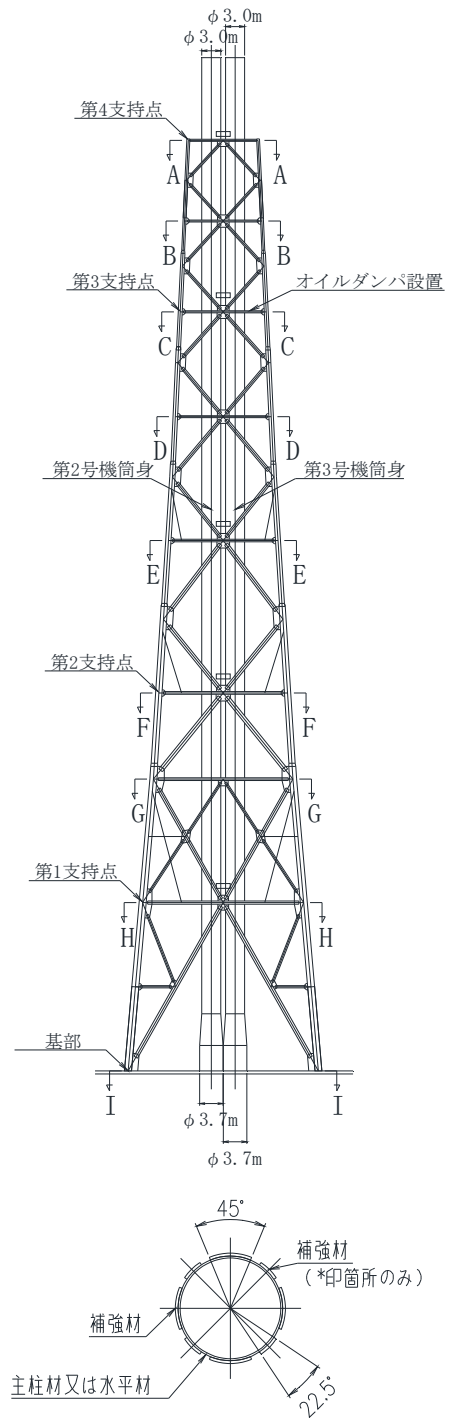
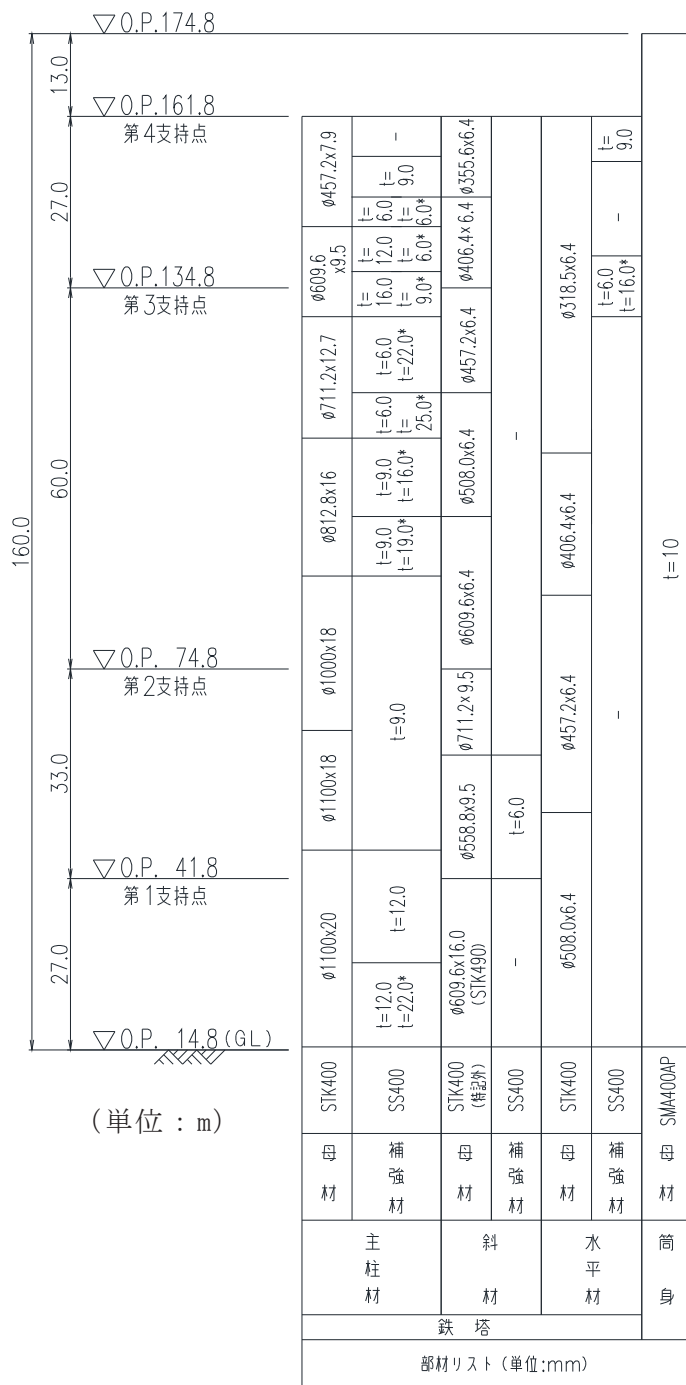


図 2-1 排気筒の概要図

3. 排気筒の健全性

筒身及び鉄塔の性能に係る経年的な劣化として、鋼材の腐食が挙げられる。

そのため、表 3-1 のとおり防食性に優れたエポキシ樹脂系の塗装を施しており、保安規定及び個別文書に基づき、表 3-2 に示す点検・検査を定期的の実施し、異常が確認された場合には速やかに補修することを定めている。また、筒身の内側については点検することが困難であることを踏まえ、腐食が進行しないように配慮した耐候性鋼材（SMA400AP）を使用している。

以上のことから、筒身及び鉄塔の健全性は保たれ、腐食による排気筒の強度評価への影響はない。

表 3-1 排気筒の塗装仕様

名称		塗装工程	塗装系（膜厚）
筒身	内側	下塗	タールエポキシ樹脂系塗料（70 μ ）
		中塗	タールエポキシ樹脂系塗料（70 μ ）
		上塗	タールエポキシ樹脂系塗料（70 μ ）
	外側	下塗 1	厚膜形有機ジンクリッチペイント（75 μ ）
		下塗 2	エポキシ樹脂系 MIO 塗料（50 μ ）
		下塗 3	弱溶剤系変性エポキシ樹脂塗料（50 μ ）
		中・上塗	弱溶剤系厚膜形シリコン変性エポキシ樹脂系下上塗兼用塗料（70 μ ）
鉄塔	補強箇所	下塗 1	弱溶剤系変性エポキシ樹脂塗料（50 μ ）
		下塗 2	弱溶剤系変性エポキシ樹脂塗料（50 μ ）
		中・上塗	弱溶剤系厚膜形シリコン変性エポキシ樹脂系下上塗兼用塗料（70 μ ）
	補強箇所 以外	下塗 1	エポキシ樹脂系塗料（95 μ ）
		下塗 2	弱溶剤系変性エポキシ樹脂塗料（50 μ ）
		中・上塗	弱溶剤系厚膜形シリコン変性エポキシ樹脂系下上塗兼用塗料（70 μ ）

表 3-2 排気筒の点検頻度および点検内容

分類		点検頻度	点検内容
点検*	定期巡視	1回／月	塗装の膨れ，剥れ，変退色，発錆状況を目視で確認する。
	外部点検	1回／年	専門性を有する技術員（社員以外）が塗装の膨れ，剥れ，変退色，発錆状況を確認する。
非破壊検査		1回／10年	超音波板厚計による板厚測定により，所定の板厚が確保されていることを確認する。

注記 *：筒身の内側については点検が困難であることを踏まえ，腐食が進行しないように配慮した耐候性鋼材（SMA400AP）を使用するとともに，非破壊検査による板厚測定で所定の板厚が確保されていることを確認することで健全性を把握する。

6. 衝突評価に関する補足説明資料

6.1 衝突解析の解析手法の保守性について

1. 概要

本資料は、添付書類「VI-3-別添 1 竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書」のうち、「VI-3-別添 1-1-1 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」、「VI-3-別添 1-5 復水貯蔵タンクの強度計算書」、「VI-3-別添 1-7 排気筒の強度計算書」及び「VI-3-別添 1-2-1 防護対策施設の強度計算書」（以下「竜巻衝突解析の強度計算書」という。）に関する補足説明資料である。

鋼製部材については、それぞれ竜巻衝突解析の強度計算書において 3 次元 F E M モデルを用いた飛来物衝突評価を実施しており、これらの評価における鋼材の動的物性値の設定は、電力中央研究所報告「竜巻飛来物を模擬した重錘の鋼板上への自由落下衝突試験による鋼板貫通評価手法の提案（研究報告：N15004）」（以下、「電中研報告」という。）において実施している重錘の自由落下衝突試験のための事前解析の解析手法を参考に実施している。

本資料においては、上述の動的物性値の設定手法について示すとともに、参照した電中研報告における解析手法（以下「電中研解析手法」という。）が重錘の自由落下衝突試験結果と整合していること、及び当社の設定条件が電中研報告の試験結果に対し保守性を有していることについて記載する。

なお、上記の比較検討は防護鋼板を対象にしたものであるが、衝突評価は部材の局部的影響に着目した解析であることから、形状が異なる部材についても適用可能である。

設定条件の保守性に係る評価フローを図 1-1 に示す。

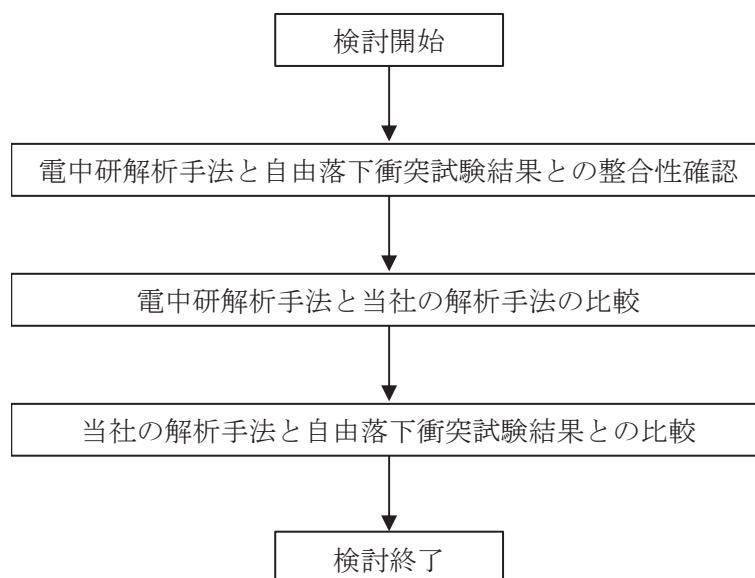


図 1-1 設定条件の保守性に係る評価フロー

2. 動的物性値の選定手法

飛来物の衝突に対する解析は、変形速度が大きいいためひずみ速度効果を考慮することとし、以下に示す Cowper-Symonds の式を適用している。

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

ここで、 σ_D はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 時の降伏応力、 σ_S は初期降伏応力、 $\dot{\epsilon}$ 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を表す。これらのパラメータは、日本溶接協会の動的物性の推定式（以下「WES 式」という。）にフィッティングする様に選定した。

以下に、竜巻防護鋼板の防護鋼板を例として、選定したパラメータ（表 2-1 参照）とその選定方法を示す。

表 2-1 Cowper-Symonds 式へ入力するパラメータ（防護鋼板）

	防護鋼板
材料	SS400
C (s ⁻¹)	
p	

降伏応力及び引張強さに関する WES 式は以下のとおり。

$$\sigma_Y = \sigma_{Y0}(T_0) \cdot \exp \left[8 \times 10^{-4} \cdot T_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{Y0}(T_0)}{E} \right)^{-1.5} \cdot \left\{ \frac{1}{T \cdot \ln(10^8 / \dot{\epsilon})} - \frac{1}{T_0 \cdot \ln(10^8 / \dot{\epsilon}_0)} \right\} \right]$$

$$\sigma_T = \sigma_{T0}(T_0) \cdot \exp \left[8 \times 10^{-4} \cdot T_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{T0}(T_0)}{E} \right)^{-1.5} \cdot \left\{ \frac{1}{T \cdot \ln(10^9 / \dot{\epsilon})} - \frac{1}{T_0 \cdot \ln(10^9 / \dot{\epsilon}_0)} \right\} \right]$$

ここで、 σ_Y 、 σ_{Y0} は降伏応力、 σ_T 、 σ_{T0} は引張強さ、 T 、 T_0 は温度、 $\dot{\epsilon}$ 、 $\dot{\epsilon}_0$ はひずみ速度、 E はヤング係数を示す。

鋼製部材の動的物性値を選定するにあたり、以下の項目を考慮した。

- (1) 被衝突物について、貫通評価における許容値は破断ひずみとしていることから、Cowper-Symonds 式により算出した引張強さが WES 式で算出した値にフィッティングする様、パラメータを適切に設定した。
- (2) 飛来物については、Cowper-Symonds 式により算出した降伏応力が WES 式で算出した値にフィッティングする様、パラメータを適切に設定した。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

- (3) (1)及び(2)と併せて、電中研報告書では、ひずみ速度 $10(s^{-1})$ 近傍において、Cowper-Symonds 式で算出した引張強さが WES 式で算出したものよりも小さくなるように設定し、貫通評価に対して保守的になるように配慮していることを参考に、ここではひずみ速度 $0.01\sim 100(s^{-1})$ の範囲において WES 式で算出した値よりも小さくなるように設定した。

表 2-1 に示すパラメータを適用したときの動的物性値について、WES 式による値と合わせ図 2-1 に示す。

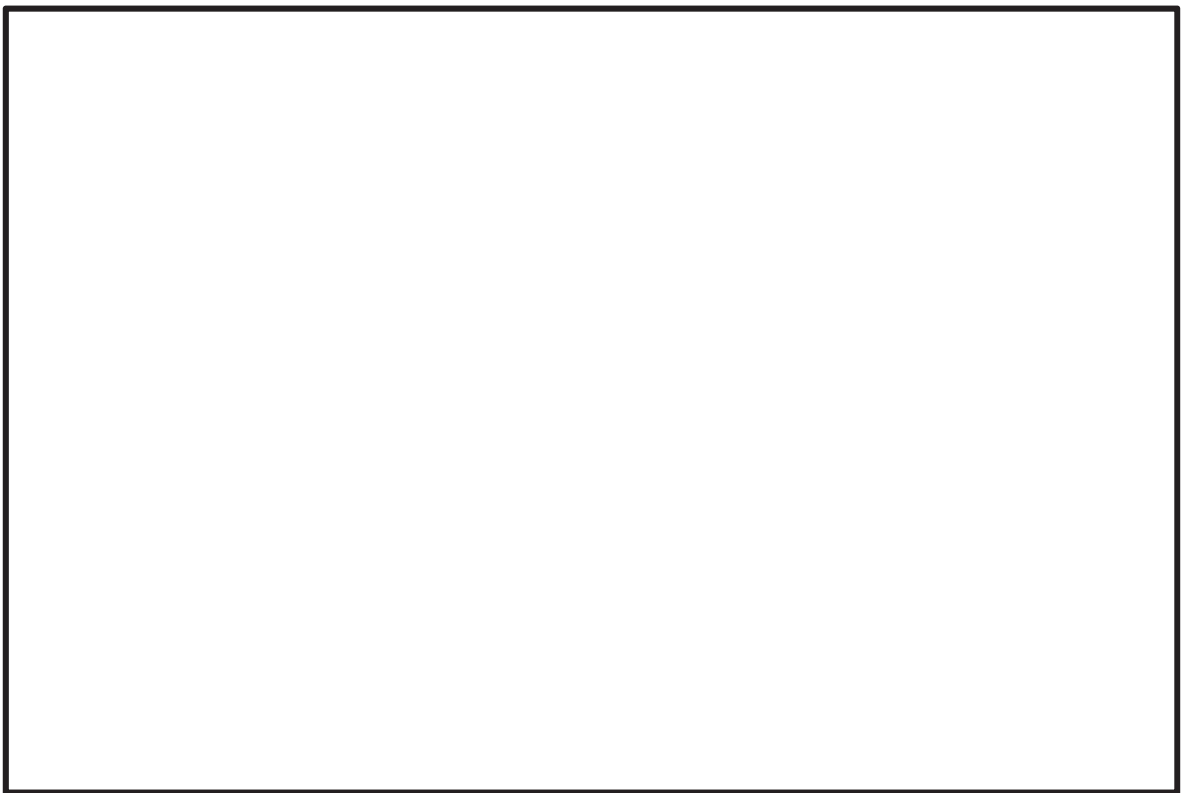


図 2-1 防護鋼板におけるひずみ速度-真応力曲線

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

3. 電中研解析手法と自由落下衝突試験結果との整合性について

上記の動的物性値設定手法の設定に際し参照した、電中研解析手法の妥当性について以下に示す。

3.1 事前解析における塑性ひずみ及び試験結果における貫通有無について

電中研報告においては、事前解析にて得られた衝突エネルギーと鋼板に発生する相当塑性ひずみの関係を求め、試験の重錘落下高さに反映を行っている。その際に得られた事前解析結果による相当塑性ひずみと自由落下衝突試験における貫通有無の関係を表 3-1 に示す。

表 3-1 事前解析結果による相当塑性ひずみと自由落下衝突試験における貫通有無

試験(解析) ケース	試験条件			試験結果による貫通有無	事前解析で得られた相当塑性ひずみ(%)
	飛来物	被衝突体*	落下高さ(m)		
SS-1	剛パイプ重錘	SS400	17.0	有	17.4
SS-2	剛パイプ重錘	SS400	12.5	有	14.9
SS-4	剛パイプ重錘	SS400	11	無	14.1
SS-3	剛パイプ重錘	SS400	9.5	無	13.0

注記*：有効開口部サイズ 1.4m×1.4m×t9mm，接続部 2 辺固定

上記の試験結果及び事前解析結果より、試験ケース SS-2 においては、貫通が発生しており、事前解析により得られた相当塑性ひずみは 14.9%である。また、試験ケース SS-4 においては、貫通が発生しておらず、事前解析により得られた相当塑性ひずみは 14.1%である。したがって、試験結果及び事前解析結果より、SS400 鋼板については、相当塑性ひずみが 14.1%~14.9%の間で貫通が発生することが考えられる。

3.2 SS400 鋼板の引張試験における塑性ひずみについて

表 3-2 に自由落下衝突試験に用いた SS400 鋼板の引張試験で得られた材料特性値を示す。ここで、試験に使用した被衝突体である SS400 鋼板の材料試験値から得られた引張ひずみに相当する塑性ひずみが 14.9%であることから、被衝突体である SS400 鋼板の塑性ひずみが 14.9%付近に達した場合に飛来物が貫通することが考えられる。

表 3-2 自由落下衝突試験に用いた SS400 鋼板の材料試験値他

部材	材料試験結果(平均値)				引張ひずみを真ひずみに換算した値(-)	塑性ひずみ(左記から弾性ひずみを差し引いた値)
	降伏応力(MPa)	引張強さ(MPa)	引張ひずみ(-)	ヤング率(GPa)		
鋼板(SS400)	322.3	474.4	0.1624	209.7	0.150	0.148

3.3 電中研解析手法及び自由落下衝突試験結果と材料試験値の整合性

3.1 の事前解析における相当塑性ひずみと自由落下衝突試験における貫通有無より、飛来物衝突により発生する SS400 鋼板の相当塑性ひずみが 14.1~14.9%に達した場合に貫通することが考えられること、3.2 の SS400 鋼板の引張試験における材料試験値より SS400 鋼板の塑性ひずみが 14.8%であることから、電中研報告における事前解析及び自由落下衝突試験結果は材料試験結果とよく整合していることが確認できる。

したがって、電中研解析手法は自由落下衝突試験結果とよく整合している解析手法であるといえる。表 3-3 に、電中研報告における事前解析及び自由落下衝突試験から得られた結果並びに材料試験から得られた結果を示す。

表 3-3 電中研報告書における事前解析，自由落下衝突試験及び材料試験から得られた結果

事前解析及び自由落下衝突試験から得られた結果	材料試験から得られた結果	結論
SS400 鋼板については、飛来物衝突により相当塑性ひずみが 14.1%~14.9%に達した場合に貫通する。	自由落下衝突試験に使用した SS400 鋼板の引張ひずみに相当する塑性ひずみが 14.8%	左記より電中研解析手法は自由落下衝突試験結果とよく整合しているといえる。

4. 電中研解析手法と当社の解析手法の比較について

電中研解析手法と当社の解析手法の比較を表 4-1 に示す。本比較表より、当社の解析手法については、「静的な物性値の出典」及び「破断ひずみ(破断条件)」において保守性を有しており、その他については差異がないことから、当社の解析手法は電中研解析手法に比べ保守性を有しているといえる。

表 4-1 電中研解析方法と当社の解析手法の差異

比較項目		電中研解析手法	当社の解析手法	備考
解析コード		AUTODYN	LS-DYNA	「原子力安全基盤機構：原子力発電施設等に係る構造物の爆発衝撃荷重挙動解析 (JNES/SSD08-014, 平成 20 年 11 月)」において、AUTODYN と LS-DYNA との間でコードに依存する特性は少ないことが確認されていることから、解析コードに有意な差はないといえる。
材料 物性値	静的な物性値 の出典	材料試験値	JIS 及び JSME 規格値	<u>電中研解析手法については、引張試験において得られた材料試験値を使用しており、JIS 及び JSME 規格値を使用している当社の解析手法に保守性有</u> (例. SS400 鋼板の材料試験値の降伏応力 322MPa に対して JIS 値は 245MPa)
	動的な物性値 の出典	WES 式*1	同左	*1：(社)日本溶接協会「動的繰返し大変形を受ける溶接鋼構造物の脆性破壊性能評価方法，WES2808:2003」による推定式
	応力-ひずみ 関係	Cowper Symonds モデル*2	同左	*2：「原子力安全基盤機構：原子力発電施設等に係る構造物の爆発衝撃荷重挙動解析 (JNES/SSD08-014, 平成 20 年 11 月)」において使用しているひずみ速度を考慮したモデル
	破断ひずみ (破断条件)	相当塑性ひずみ が JSME 規格*3 の限界 3 軸ひず み ϵ_L における TF=2 の値に達し た場合を提案 (例. SS400 の場 合：12.8%)		<u>破断ひずみについて電中研提案の値に対し、小さな値を採用していることから破断しやすい設定となっており、保守性を有している。</u> *3：「日本機械学会：発電用原子力設備規格シビアアクシデント時の構造健全性評価ガイドライン〈BWR 鋼製格納容器編〉(2014 年 7 月)」

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

5. 当社の解析手法と自由落下衝突試験結果との比較について

当社の解析手法の保守性を確認することを目的として、表 4-1 に記載している当社の解析手法における設定値を用いて、電中研報告における重錘の鋼板上への自由落下衝突試験（以下、電中研試験という）の追解析を行った。その結果を表 5-1 に、解析モデルを図 5-1 に示す。解析モデルは電中研試験と同様 2 辺固定とし、重錘部については、密度を大きくした要素を採用することで重錘の重量を模擬している。また、本検討においては、解析ソフトとして LS-DYNA を用いた。

表 5-1 の追解析結果より、自由落下衝突試験において貫通が発生しなかったケースにおいても、当社の解析手法による解析結果においては貫通が発生していること、また貫通が発生したケースにおける残留速度が自由落下衝突試験結果の残留速度よりも大きいことから、当社の解析手法は保守性を有しているといえる。

表 5-1 当社の解析手法による自由落下衝突試験の追解析

試験ケース	試験条件			試験結果による貫通有無(残留速度(m/s))	当社の解析手法を用いた追解析による貫通有無(残留速度(m/s))
	飛来物	被衝突体	落下高さ(m)		
SS-1	剛パイプ重錘	SS400	17.0	有(8.5m/s)	
SS-2	剛パイプ重錘	SS400	12.5	有(2.9m/s)	
SS-4	剛パイプ重錘	SS400	11	無	
SS-3	剛パイプ重錘	SS400	9.5	無	

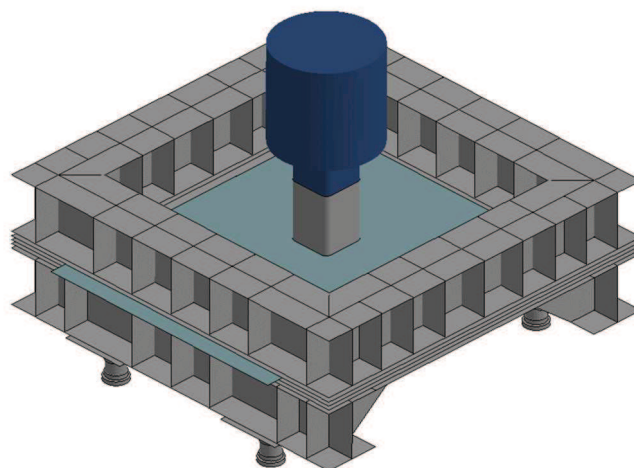


図 5-1 解析モデル

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

ひずみ評価に用いる多軸性係数の考え方について

電中研報告より、ひずみ制限による破壊基準に関する既往知見として、入力エネルギーの大きい竜巻による飛来物と、局所的な大変形を伴う鋼製構造物との衝突問題を解析により評価する場合の評価基準については、一般にひずみ制限を考慮した破壊基準が採用されている。ひずみ制限を適用した破壊基準として、NEI07-13の原子力発電所に対する航空機衝突評価手法が知られている。鋼板衝突部に局所的に発生する相当塑性ひずみの上限値として、局所延性相当ひずみを被衝突体に生じる多軸性係数で除した値が与えられている。なお、TFは次式で表される。

$$TF = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e}$$

ここで、

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 主応力

σ_e : ミーゼス相当応力

また、TFの物理的意味合いを表1に示す。TFは多軸応力場での延性低下の影響を示す係数であり、等二軸引張では2、平面ひずみ引張では $\sqrt{3}$ 、単軸引張では1となる。

表1 TFの物理的意味合い

変形モード	単軸引張	単軸引張側面拘束 (平面ひずみ引張)	等二軸引張
応力比 σ_2/σ_1	0	0.5	1
ひずみ比 $\varepsilon_2/\varepsilon_1$	-0.5	0	1
TF	1	$\sqrt{3}$	2