

平成30年5月7日
日本原子力発電(株)

竜巻評価の強度計算における施設の代表性について

1. 概要

V-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、「V-3-別添1-1-2 残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書」、「V-3-別添1-1-3 残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書」、「V-3-別添1-1-5 換気空調設備の強度計算書」、「V-3-別添1-1-6 ディーゼル発電機用海水ポンプの強度計算書」、「V-3-別添1-1-7 ディーゼル発電機用海水ストレーナの強度計算書」、「V-3-別添1-1-8 ディーゼル発電機吸気フィルタの強度計算書」、「V-3-別添1-1-9 配管及び弁の強度計算書」、「V-3-別添1-1-10-3 排気管、放出管及びベント管の強度計算書」において、同種類の計算対象施設が複数存在する場合にはその中から代表となる施設を選定して計算を行う。本資料は、選定された代表施設の代表性について説明するものである。

2. 代表性の説明

2.1 ディーゼル発電機吸気フィルタ

ディーゼル発電機吸気フィルタは6台設置されており、全てが同一設計となっている。

2.2 残留熱除去系海水系ポンプ

残留熱除去系海水系ポンプは4台設置されており、全てが同一設計となっている。

2.3 ディーゼル発電機用海水ポンプ

ディーゼル発電機用海水ポンプは3台設置されており、全てが同一設計となっている。

2.4 残留熱除去系海水系ストレーナ

残留熱除去系海水系ストレーナは2台設置されており、全てが同一設計となっている。

2.5 ディーゼル発電機用海水ストレーナ

ディーゼル発電機用海水ストレーナは3台設置されており、全てが同一設計となっている。

2.6 配管（「V-3-別添1-1-9 配管及び弁の強度計算書」及び「V-3-別添1-1-10-3 排気管、放出管及びベント管の強度計算書」における配管）

竜巻による風荷重下における配管の応力計算において、代表箇所を選定している。

代表の選定方法は、「V-3-別添1-1-9 配管及び弁の強度計算書」及び「V-3-別添1-1-10-3 排気管、放出管及びベント管の強度計算書」の「3.5 評価方法」に記載のとおり、評価に用いる支持間隔について管外径、材料ごとにサポートの支持間隔が最長となる箇所を選定し代表とする。

以下に、「V-3-別添 1-1-9 配管及び弁の強度計算書」及び「V-3-別添 1-1-10-3 排気管，放出管及びベント管の強度計算書」における各応力の算出式を示す。

風圧力及び自重により生じる応力は支持間隔（L）の 2 乗に比例するため，応力が大きくなる箇所として，管外径，材料ごとにサポートの支持間隔が最長となる箇所を選定する。

（両端支持形状）

$$\sigma_{ww} = \frac{W_w \cdot L^2}{8 \cdot Z}$$

$$\sigma_{自重} = \frac{w \cdot L^2}{8 \cdot Z}$$

σ_{ww} ：風圧力により生じる応力
 $\sigma_{自重}$ ：自重により生じる応力
 W_w ：設計竜巻の単位長さ当たりの風圧力による荷重
 w ：単位長さ当たりの自重による荷重
 L ：支持間隔
 Z ：断面係数

（片持ち支持形状）

$$\sigma_{ww} = \frac{W_w \cdot L^2}{2 \cdot Z}$$

$$\sigma_{自重} = \frac{w \cdot L^2}{2 \cdot Z}$$

配管の代表箇所の選定結果を表 2-1，表 2-2 に示す。

表 2-1 配管（V-3-別添 1-1-9 配管及び弁の強度計算書）の代表選定結果

系統		管外径 (mm)	材料	最長支持間隔 (m)	代表箇所
中央制御室換気系 冷凍機周り	冷凍機 WC2-1 周り	89.1	STPT410	3.25	○
	冷凍機 WC2-2 周り			2.46	
残留熱除去系海水 系ポンプ周り	A, C ポンプ周り	355.6	STPT410	9.05	○
	B, D ポンプ周り			14.20	
	A, C ポンプ周り	508.0	SM490B	9.05	
	B, D ポンプ周り			14.20	
ディーゼル発電機 海水ポンプ周り	2C ポンプ周り	267.4	STPT410	11.03	○
	2D ポンプ周り			5.61	
	H P C S ポンプ 周り			5.61	
非常用ガス処理系 排気配管	非常用ガス処理 系排気配管	457.2	SM41B	21.04	○

※太枠内は代表選定グループを示す。

表 2-2 配管 (V-3-別添 1-1-10-3 排気管, 放出管及びベント管の強度計算書) の
代表選定結果

系統		支持	管外径 (mm)	材料	最長支持間隔 (m)	代表	
ディーゼル発 電機附属排気 配管及びベン ト配管	排気配管	2C	両端支持	863.6	SM400	9.362	○
		2D				9.206	
		2C	片持ち	863.6	SM400	6.070	
		2D				7.251	○
		HPCS	両端支持	660.4	SM400	8.500	○
		HPCS	片持ち	660.4	SM400	5.570	○
	ベント配管	2C	両端支持	42.7	STPT370	2.100	
		2D				2.440	○
		HPCS				2.125	
		2C	片持ち	42.7	STPT370	0.750	
		2D				0.950	○
		HPCS				0.925	
		2C	両端支持	165.2	STPT370	2.700	
		2D				2.800	○
		HPCS				2.660	
		2C	片持ち	165.2	STPT370	1.293	
		2D				1.378	○
		HPCS				1.333	
		2C	両端支持	216.3	STPT370	2.440	
		2D				2.900	○
		HPCS				2.500	
		2C	片持ち	216.3	STPT370	1.473	
		2D				1.578	○
		HPCS				1.538	
残留熱除去系海水配管 (放出側)	A系	両端支持	508.0	SB410	12.00		
	B系				13.35	○	
ディーゼル発電機海水配管 (放出側)	2C	両端支持	267.4	STPT410	10.00	○	
	2D				8.500		
	HPCS				7.362		

※太枠内は代表選定グループを示す。

2.7 換気空調設備

(1) 角ダクト

角ダクトにおいて、気圧差による発生応力が最も大きくなるものは面外荷重である。面外荷重により発生する応力は主に式中のダクト幅 a 、補強ピッチ c 及び板厚 t の兼ね合いにより変化することから、その発生応力比が最も厳しくなる角ダクトを代表ダクトとする。

以下に、「V-3-別添 1-1-5 換気空調設備の強度計算書」における各応力の算出式を示す。

➤ 面外荷重

$$\sigma_{\max} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \delta_{\max}}{8(1-\nu^2)} \left\{ \frac{(2-\nu^2)\delta_{\max} + 4t}{a^2} + \frac{\nu(\delta_{\max} + 4t)}{c^2} \right\} \dots \textcircled{1}$$

$$\frac{256(1-\nu^2)}{\pi^6 \cdot E \cdot t^4} (P + g \cdot D_p) = \frac{4}{3} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{c^2} \right)^2 \frac{\delta_{\max}}{t}$$

$$+ \left\{ \frac{4\nu}{a^2 \cdot c^2} + (3-\nu^2) \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{c^4} \right) \right\} \left(\frac{\delta_{\max}}{t} \right)^3 \dots \textcircled{2}$$

式②より得られる δ_{\max} の値を式①へ代入し、 σ_{\max} を算出する。

➤ 面内荷重

- ・外圧による発生応力

$$\sigma_{p1} = \frac{a \cdot b \cdot \Delta P}{8 \cdot \pi \cdot t^2} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)b_y}{E}}$$

- ・自重による曲げモーメント

$$M_p = \frac{g \cdot \mu \cdot L^2}{8}$$

σ_{\max} : 中心に生じる面外荷重による最大応力 E : ヤング率 δ_{\max} : 面外荷重によるダクト鋼板の最大変位量 ν : ポアソン比 t : ダクト板厚 a : ダクト幅 b : ダクト高さ c : 補強ピッチ ΔP : 設計竜巻の気圧低下量 σ_y : 許容応力 M_p : 自重により作用する曲げモーメント g : 重力加速度 L : ダクトサポートの支持間隔 μ : ダクトの単位長さ当たりの質量 π : 円周率 P : ダクトにかかる外圧 D_p : 単位面積当たりのダクト鋼板の質量
--

角ダクトの代表箇所の選定結果を表 2-3 に示す。

表 2-3 角ダクトの代表選定結果

系統	材料 ダクトサイズ(mm) 長辺×短辺×板厚	材料	面外荷重 (MPa)			外圧による発生応力 (MPa)			自重(長期)+設計竜巻(短期) による面内荷重 (kN・mm)			代表
			発生 応力	許容 応力	発生 応力 比	発生 応力	許容 応力	発生 応力比	発生曲げ モーメン ト	許容値	裕度	
中央制御室 換気系	900×670×2.3	SPHC	76	189	0.41	5	189	0.03	1324	50983	0.03	
	1000×880×2.3	SPHC	81	189	0.43	6	189	0.04	1585	68873	0.03	
	900×450×2.3	SPHC	76	189	0.41	3	189	0.02	1139	32470	0.04	
	600×450×2.3	SPHC	81	189	0.43	2	189	0.02	887	35017	0.03	
	400×400×2.3	SPHC	83	189	0.44	2	189	0.02	677	33299	0.03	
	3200×2000×2.0	SUS304	125	205	0.61	61	205	0.30	678	81597	0.01	○
	2200×1000×2.0	SUS304	103	205	0.51	21	205	0.11	1799	164629	0.02	
ディーゼル 発電機室 換気系	1365×1365×1.0	SGCC	109	205	0.54	70	205	0.35	345	14667	0.03	
	1245×1245×1.0	SGCC	108	205	0.53	58	205	0.29	314	14750	0.03	
	965×610×0.8	SGCC	113	205	0.56	35	205	0.18	161	9578	0.02	

※太枠内は代表選定グループを示す。

(2) 丸ダクト

式①において算出した、外圧により生じる周方向応力 σ_{cripl} を座屈応力 σ_{crip} と比較し、 σ_{cripl} が σ_{crip} を超えないことを確認する。

座屈応力 σ_{crip} は半径 r 、補強ピッチ c 及び板厚 t の兼ね合いによって変化するため、その発生応力比が最も厳しくなる丸ダクトを代表ダクトとする。

以下に、「V-3-別添 1-1-5 換気空調設備の強度計算書」における各応力の算出式を示す。

➤ 外圧により生じる周方向応力

$$\sigma_{cripl} = \frac{\Delta P \cdot r}{t} \dots \textcircled{1}$$

$$\sigma_{crip} = \frac{k_p \cdot \pi^2 \cdot E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{c}\right)^2 \dots \textcircled{2}$$

$$k_p = \frac{(1 + \beta^2)^2}{0.5 + \beta^2} + \frac{12 \cdot Z_c^2}{\pi^4 (1 + \beta^2)^2 (0.5 + \beta^2)}$$

$$\beta = \frac{c \cdot n}{\pi \cdot r}$$

$$Z_c = \frac{c^2}{r \cdot t} \sqrt{1 - \nu^2}$$

➤ 自重による曲げモーメント

$$M_p = \frac{g \cdot \mu \cdot L^2}{8}$$

ΔP : 設計竜巻の気圧低下量
 σ_{cripl} : 外圧により生じる周方向応力
 r : 丸ダクトのダクト半径
 t : ダクト板厚
 M_p : 自重により作用する曲げモーメント
 g : 重力加速度
 L : ダクトサポートの支持間隔
 μ : ダクトの単位長さ当たりの質量
 σ_{crip} : 座屈応力
 c : 補強ピッチ
 ν : ポアソン比
 K_p : 座屈係数
 β, Z_c : 円筒かくの座屈応力の式における係数
 n : 座屈モード次数
 π : 円周率

丸ダクトの代表箇所を選定結果を表 2-4 に示す。

表 2-4 丸ダクトの代表選定結果

系統	ダクトサイズ (mm) 内径×板厚	補強ピッチ (mm)	材料	気圧差による周方向応力 (MPa)			自重(長期)+設計竜巻(短期)による制限値			代表
				許容 応力	発生 応力	発生 応力比	許容値	発生値	裕度	
中央 制御室 換気系	φ 450×6.0	359	SS400	540	0.3	0.01	0.9	0.01	0.01	
	φ 450×6.0	818	SS400	248	0.3	0.01	0.9	0.01	0.01	
	φ 450×6.0	185	SS400	1129	0.3	0.01	0.9	0.01	0.01	
	φ 450×0.8	675	SUS304	13	3.0	0.24	0.9	0.2	0.22	
	φ 450×0.8	400	SUS304	21	3.0	0.15	0.9	0.1	0.11	
	φ 450×0.8	960	SUS304	9	3.0	0.34	0.9	0.3	0.33	○
	φ 450×6.0	300	SS400	676	0.3	0.01	0.9	0.01	0.01	
	φ 450×0.8	762	SGCC	11	3.0	0.28	0.9	0.2	0.22	
原子 炉建屋 換気系	φ 2300×6.0	4199	SPHC	19	1.7	0.09	0.9	0.1	0.11	
	φ 2300×6.0	2400	SPHC	34	1.7	0.05	0.9	0.05	0.06	
	φ 2300×6.0	600	SPHC	146	1.7	0.02	0.9	0.01	0.01	
	φ 2300×6.0	450	SPHC	202	1.7	0.01	0.9	0.01	0.01	
	φ 2300×6.0	1800	SPHC	45	1.7	0.04	0.9	0.04	0.04	
	φ 2300×6.0	1220	SPHC	69	1.7	0.03	0.9	0.02	0.02	
	φ 2300×6.0	2250	SPHC	36	1.7	0.05	0.9	0.05	0.06	
	φ 2300×6.0	1400	SPHC	59	1.7	0.03	0.9	0.03	0.03	
	φ 2300×6.0	1394	SPHC	59	1.7	0.03	0.9	0.03	0.03	

※太枠内は代表選定グループを示す。

(3) 隔離弁

- 原子炉建屋換気系隔離弁 (SB2-1A, 1B, 1C, 1D, 2A, 2B, 2C, 2D)
原子炉建屋換気系隔離弁 (SB2-1A, 1B, 1C, 1D, 2A, 2B, 2C, 2D) は、全てが同一設計となっている。
- 原子炉建屋換気系隔離弁 (SB2-11A, 11B)
原子炉建屋換気系隔離弁 (SB2-11A, 11B) は、全てが同一設計となっている。
- 中央制御室換気系隔離弁 (SB2-18A, 18B, 19A, 19B, 20A, 20B)
中央制御室換気系隔離弁 (SB2-18A, 18B, 19A, 19B, 20A, 20B) は、全てが同一設計となっている。