

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 2-014-13
提出年月日	2023年2月6日

VI-2-11-2-6-2 建物開口部竜巻防護対策設備の耐震性についての計算書

2023年2月

中国電力株式会社

目 次

1. 概要	1
2. 一般事項	2
2.1 配置概要	2
2.2 構造計画	5
2.3 評価方針	9
2.4 適用規格・基準等	10
2.5 記号の説明	11
2.6 計算精度と数値の丸め方	14
3. 評価部位	15
4. 応力評価及び構造強度評価	16
4.1 応力評価及び構造強度評価方法	16
4.2 荷重の組合せ及び許容応力	17
4.2.1 荷重の組合せ	17
4.2.2 使用材料の許容応力	17
4.3 解析モデル	18
4.3.1 竜巻防護ネット対策設備	18
4.3.2 竜巻防護鋼板対策設備	19
4.4 固有周期	20
4.4.1 竜巻防護ネット対策設備	20
4.4.2 竜巻防護鋼板対策設備	20
4.5 設計用地震力	21
4.6 応力の計算方法	22
4.6.1 竜巻防護ネット対策設備	22
4.6.2 竜巻防護鋼板対策設備	24
4.7 計算条件	26
4.8 応力の評価	26
4.8.1 フレームの応力評価	26
4.8.2 アンカーボルトの評価	28
5. 評価結果	30

1. 概要

本計算書は、VI-2-11-1「波及的影響を及ぼすおそれのある下位クラス施設の耐震評価方針」にて設定している耐震評価方針に基づき、建物開口部竜巻防護対策設備が設計用地震力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、原子炉建物及び制御室建物等の上位クラス施設に対して、建物開口部竜巻防護対策設備の損傷及び脱落による波及的影響を及ぼさないことを説明するものである。

2. 一般事項

2.1 配置概要

建物開口部竜巻防護対策設備は、原子炉建物及び廃棄物処理建物に設置する。建物開口部竜巻防護対策設備は、竜巻防護ネット対策設備と竜巻防護鋼板対策設備に分類される。本資料では図 2-1 に示す建物開口部竜巻防護対策設備のうち、構造強度評価の評価部位であるフレームとアンカーボルトの裕度が最も厳しい竜巻防護ネット対策設備(2RB-BOP2, 3)及び竜巻防護鋼板対策設備(2RB-BOP1)を代表として、耐震性について示す。なお、その他の竜巻防護ネット対策設備の評価結果については「【竜巻防護ネット対策設備についての計算結果】1.4.3 代表機器の選定結果及び全機器の評価結果」にて示す。

対象とした設備は原子炉建物及び廃棄物処理建物上部に設置されているため、地震により破損・脱落した場合、原子炉建物及び制御室建物等の上位クラス施設に対して波及的影響を及ぼすおそれがある。

建物開口部竜巻防護対策設備の一覧を表 2-1 に、設置位置を図 2-1 に示す。

表 2-1 建物開口部竜巻防護対策設備一覧

据付場所及び 床面高さ (m)	設備 No.	タイプ
原子炉建物 EL 23.8*	2RB-AG1, 3, 4	竜巻防護ネット対策設備 (壁付けタイプ)
原子炉建物 EL 23.8*	2RB-AG2	竜巻防護ネット対策設備 (壁付けタイプ)
原子炉建物 EL 23.8*	2RB-AG5	竜巻防護ネット対策設備 (壁付けタイプ)
原子炉建物 EL 34.8*	2RB-3	竜巻防護ネット対策設備 (壁付けタイプ)
原子炉建物 EL 37.2*	2RB-M4	竜巻防護ネット対策設備 (壁付けタイプ)
原子炉建物 EL 51.7*	2RB-BOP1	竜巻防護鋼板対策設備
原子炉建物 EL 51.7*	2RB-BOP2, 3	竜巻防護ネット対策設備 (張出しタイプ)
廃棄物処理建物 EL 26.7*	2RwB-AG1	竜巻防護ネット対策設備 (壁付けタイプ)

注記*：基準床レベルを示す。

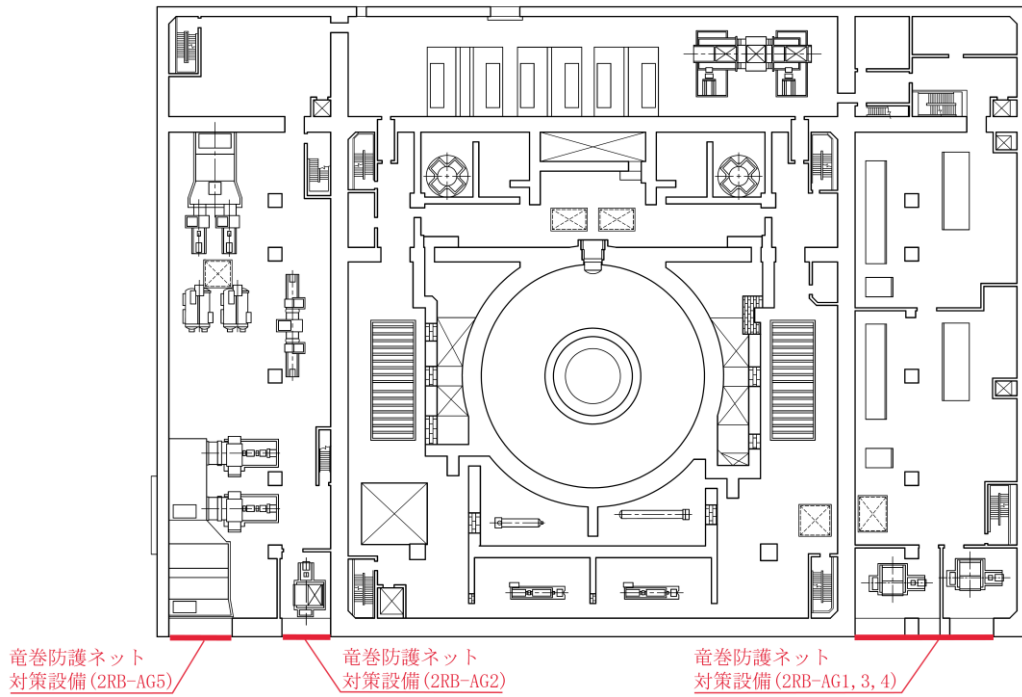


図 2-1(1) 建物開口部蛇巻防護対策設備の設置位置図
(原子炉建物, EL 23.8m)

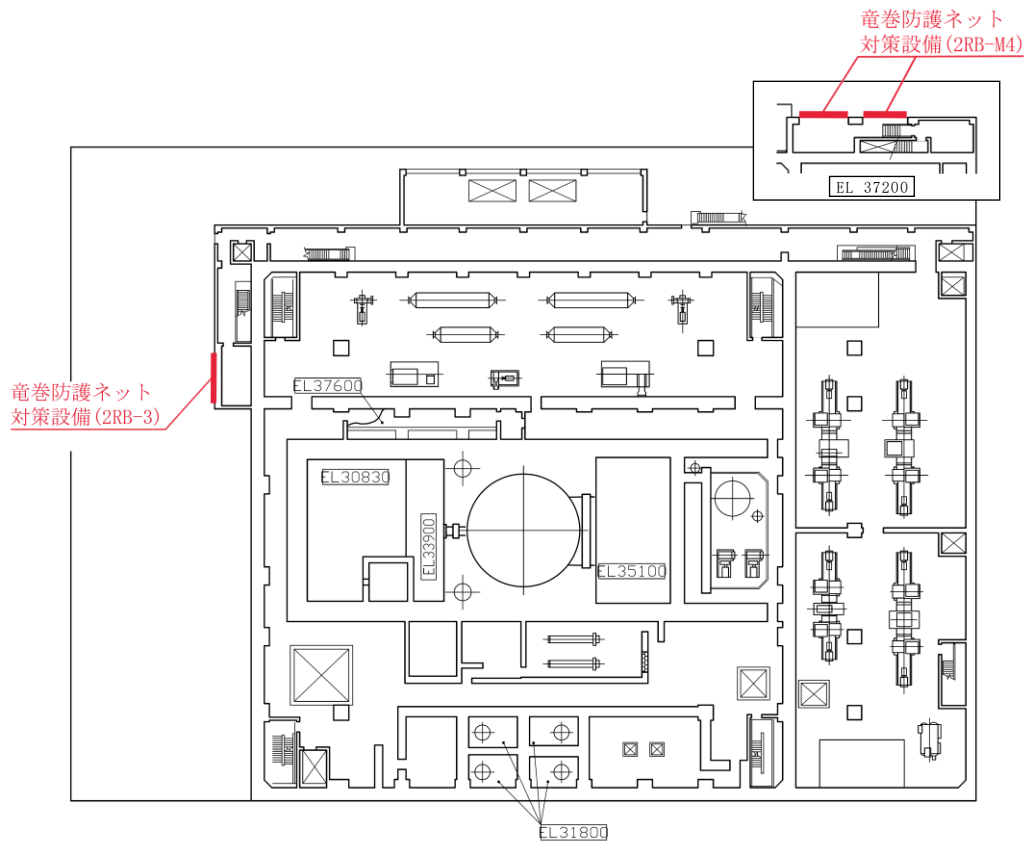


図 2-1(2) 建物開口部蛇巻防護対策設備の設置位置図
(原子炉建物, EL 34.8m)

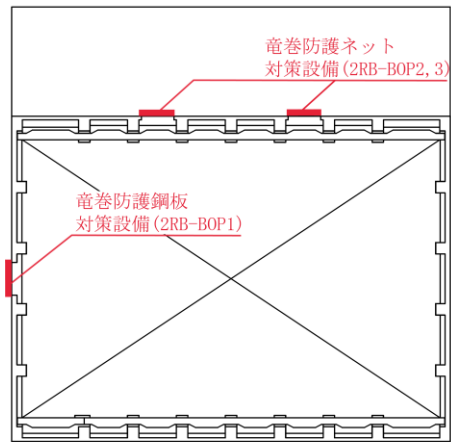


図 2-1(3) 建物開口部竜巻防護対策設備の設置位置図
(原子炉建物, EL 51.7m)

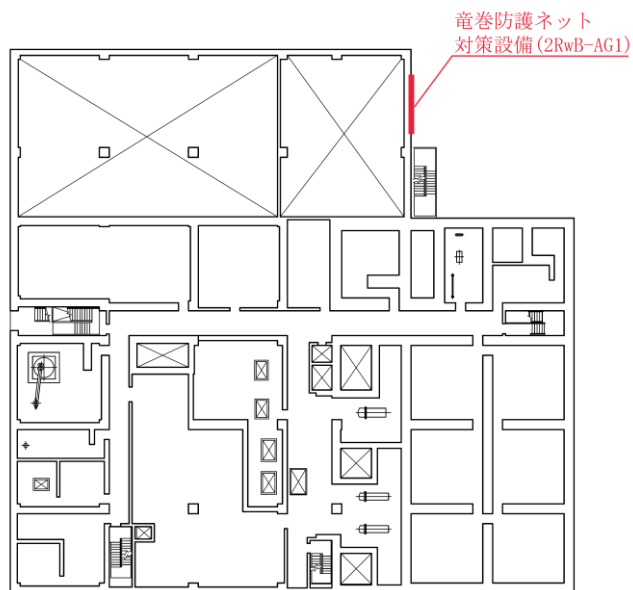


図 2-1(4) 建物開口部竜巻防護対策設備の設置位置図
(廃棄物処理建物, EL 26.7m)

2.2 構造計画

竜巻防護ネット対策設備及び竜巻防護鋼板対策設備の構造計画を表 2-2 及び表 2-3 に示す。

表 2-2(1) 構造計画 (竜巻防護ネット対策設備, 張出しタイプ)

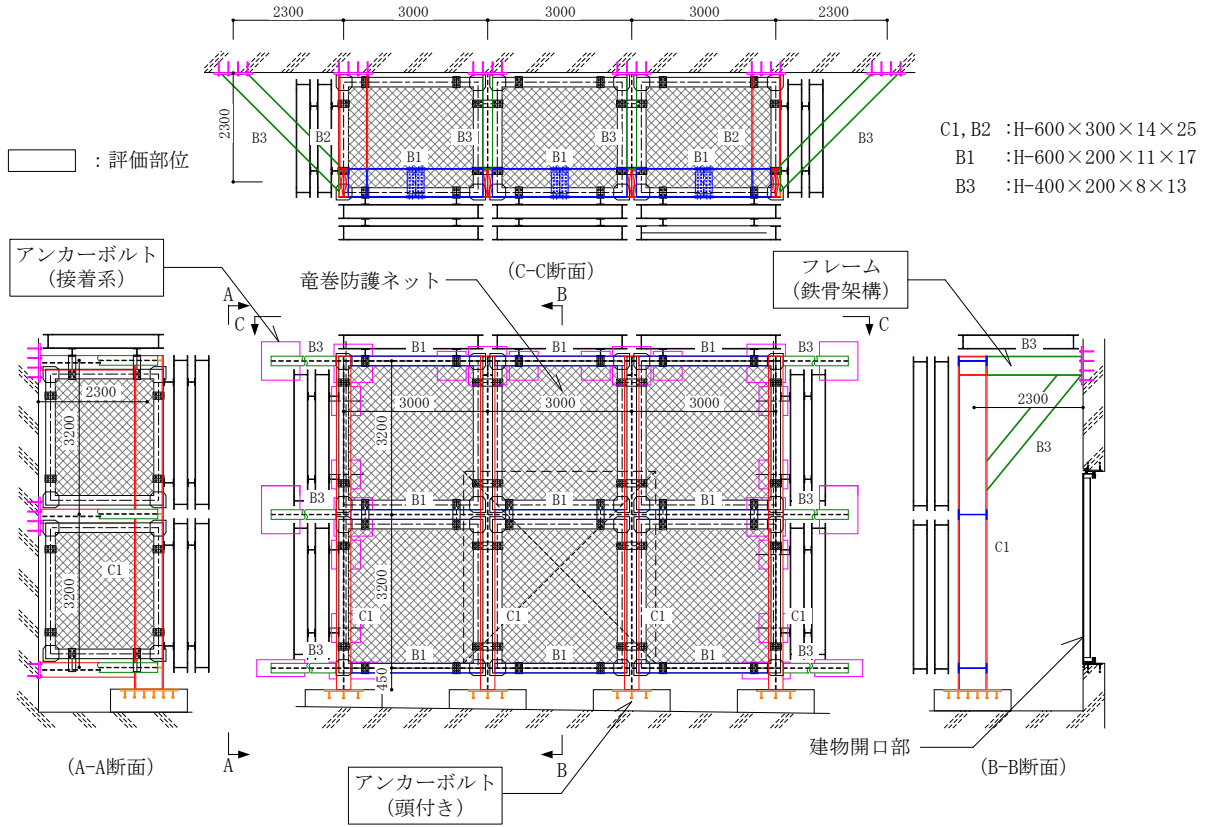
計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
アンカーボルトにより建物躯体である床及び壁に固定される。	竜巻防護ネットが取り付けられた鉄骨フレーム	 <p> C1, B2 :H-600×300×14×25 B1 :H-600×200×11×17 B3 :H-400×200×8×13 </p> <p>(単位 : mm)</p>

表 2-2(2) 構造計画 (竜巻防護ネット対策設備, 壁付けタイプ)

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
アンカーボルトにより建物躯体である壁に固定される。	竜巻防護ネットが取り付けられた鉄骨フレーム	<p> : 評価部位 アンカーボルト (接着系) フレーム (鉄骨架構) 竜巻防護ネット 建物開口部 </p> <p> C1, B1 : H-1000×300×19×32 C2, B2 : H-800×300×16×32 </p> <p>(単位 : mm)</p>

表 2-3 構造計画（竜巻防護鋼板対策設備）

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
アンカーボルトにより建物躯体である壁に固定される。	竜巻防護鋼板が取り付けられた鉄骨フレーム	<p>□ : 評価部位</p> <p>アンカーボルト (接着系)</p> <p>竜巻防護鋼板</p> <p>建物開口部</p> <p>(B-B断面)</p> <p>(A-A断面)</p> <p>C1 : H-800×300×14×26</p> <p>フレーム (鉄骨架構)</p> <p>(単位 : mm)</p>

2.3 評価方針

建物開口部竜巻防護対策設備の応力評価は、VI-2-11-1「波及的影響を及ぼすおそれのある下位クラス施設の耐震評価方針」に従い実施する。

評価については、「2.2 構造計画」にて示す建物開口部竜巻防護対策設備の部位を踏まえ、「3. 評価部位」にて設定する箇所において、「4.3 解析モデル」及び「4.4 固有周期」で算出した固有周期に基づく設計用地震力による応力等が許容限界内に収まることを、「4. 応力評価及び構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「5. 評価結果」に示す。

建物開口部竜巻防護対策設備の耐震評価フローを図2-2に示す。

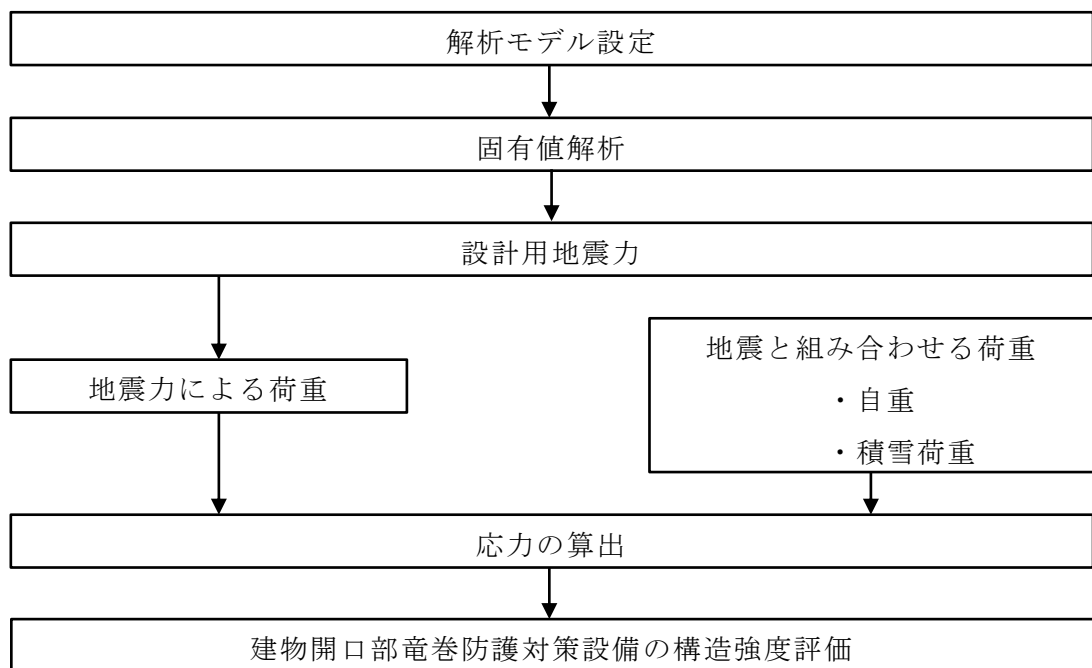


図2-2 建物開口部竜巻防護対策設備の耐震評価フロー

2.4 適用規格・基準等

本評価において適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 ((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984 ((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版 ((社) 日本電気協会)
- ・鋼構造設計規準 ー許容応力度設計法ー ((社) 日本建築学会, 2005 改定)
- ・各種合成構造設計指針・同解説 ((社) 日本建築学会 2010 年改定)

2.5 記号の説明

記号	記号の説明	単位
s_{ca}	アンカーボルトの断面積	mm^2
A	フレームの断面積	mm^2
A_0	アンカーボルト頭部の支圧面積	mm^2
A_c	引張力に対するコーン状破壊面の有効投影面積	mm^2
A_{qc}	せん断力に対するコーン状破壊面の有効投影面積	mm^2
A_{sy}	フレームのせん断断面積 (y 軸方向)	mm^2
A_{sz}	フレームのせん断断面積 (z 軸方向)	mm^2
C_{HX}	X 方向設計震度 (絶対座標系)	—
C_{HY}	Y 方向設計震度 (絶対座標系)	—
C_V	鉛直方向設計震度 (絶対座標系)	—
D	アンカーボルトの頭部直径	mm
d	アンカーボルトの径	mm
E	縦弾性係数	MPa
F	鋼材の許容応力を決定する場合の基準値	MPa
F_c	コンクリートの設計基準強度	MPa
f	1 次固有振動数	Hz
f_b	フレームの許容曲げ応力	MPa
f_c	フレームの許容圧縮応力	MPa
f_s	フレームの許容せん断応力	MPa
f_t	フレームの許容引張応力	MPa
f_n	アンカーボルト引張時の頭部支圧応力度に対するコンクリートの支圧強度	MPa
i	断面二次半径	mm
I	フレームの断面二次モーメント	mm^4
l	フレームの長さ	mm
l_k	座屈長さ	mm
L_{ce}	アンカーボルトの強度算定用埋込み長さ	mm
L_e	アンカーボルトの有効埋込み長さ	mm
M_e	弾性横座屈モーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_{y1}	降伏モーメント	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_x	フレームの曲げモーメント (x 軸周り)	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_y	フレームの曲げモーメント (y 軸周り)	$\text{N}\cdot\text{mm}$
M_z	フレームの曲げモーメント (z 軸周り)	$\text{N}\cdot\text{mm}$

記号	記号の説明	単位
m	質量分布	kg/m
w	評価用荷重	N/m
n	フレームと壁及び床の取付部 1 箇所当たりのアンカーボルトの本数	—
X, Y, Z	絶対（節点）座標軸	—
x, y, z	局所（要素）座標軸	—
Z_y	フレームの断面係数（y 軸周り）	mm ³
Z_z	フレームの断面係数（z 軸周り）	mm ³
Λ	フレームの限界細長比	—
λ	フレームの有効細長比	—
λ_b	降伏モーメントに対する曲げ材の基準化細長比	—
$e \lambda_b$	弾性限界細長比	—
$p \lambda_b$	塑性限界細長比	—
ν_c	圧縮座屈に対する安全率	—
ν_b	曲げ座屈に対する安全率	—
π	円周率	—
N_c	フレームの軸力（圧縮）	N
N_t	フレームの軸力（引張り）	N
R_x	ベースプレート部の荷重（x 軸方向）	N
R_y	ベースプレート部の荷重（y 軸方向）	N
R_z	ベースプレート部の荷重（z 軸方向）	N
p	アンカーボルト 1 本当たりの引張力	N
p_a	アンカーボルト 1 本当たりの許容引張力	N
p_{a1}	アンカーボルトの降伏により決まる場合のアンカーボルト 1 本当たりの許容引張応力	N
p_{a2}	定着した躯体のコーン状破壊により決まる場合のアンカーボルト 1 本当たりの許容引張応力	N
p_{a3}	アンカーボルトの付着力により決まる場合のアンカーボルト 1 本当たりの許容引張応力	N
q	アンカーボルト 1 本当たりのせん断力	N
q_a	アンカーボルト 1 本当たりの許容せん断力	N
q_{a1}	アンカーボルトのせん断強度により決まる場合のアンカーボルト 1 本当たりの許容せん断力	N

記号	記号の説明	単位
q_{a2}	定着した躯体の支圧強度により決まる場合のアンカーボルト 1 本当たりの許容せん断力	N
q_{a3}	定着した躯体のコーン状破壊により決まる場合のアンカーボルト 1 本当たりの許容せん断力	N
Q_y	フレームのせん断力 (y 軸方向)	N
Q_z	フレームのせん断力 (z 軸方向)	N
ϕ_1	低減係数 長期 : 2/3 短期 : 1.0	—
ϕ_2	低減係数 長期 : 1/3 短期 : 2/3	—
ϕ_3	低減係数 長期 : 1/3 短期 : 2/3	—
α_n	へりあき及びアンカーボルトピッチによる付着強度の低減係数 (n = 1, 2, 3)	—
c_n	へりあき及びアンカーボルトピッチの 1/2 (n = 1, 2, 3)	mm
$c\sigma_{qa}$	コンクリートの支圧強度	MPa
$c\sigma_t$	コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度	MPa
$s\sigma_{pa}$	アンカーボルトの引張強度	MPa
$s\sigma_{qa}$	アンカーボルトのせん断強度	MPa
σ_{by}	フレームに生じる曲げ応力 (y 軸周り)	MPa
σ_{bz}	フレームに生じる曲げ応力 (z 軸周り)	MPa
σ_c	フレームに生じる圧縮応力	MPa
σ_t	フレームに生じる引張応力	MPa
τ_a	へりあき及びアンカーボルトのピッチを考慮したアンカーボルトの引張力に対する付着力	MPa
τ_{bavg}	アンカーボルトの基本平均付着強度	MPa
τ_y	フレームに生じるせん断応力 (y 軸方向)	MPa
τ_z	フレームに生じるせん断応力 (z 軸方向)	MPa

2.6 計算精度と数値の丸め方

表示する数値の丸め方は表 2-4 に示すとおりとする。

表 2-4 表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
固有周期	s	小数点以下第 4 位	四捨五入	小数点以下第 3 位
震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
質量	kg	—	—	整数位 ^{*1}
長さ	mm	—	—	整数位 ^{*1}
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁 ^{*2}
モーメント	N・mm	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁 ^{*2}
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁 ^{*2}
縦弾性係数	MPa	有効数字 4 桁目	四捨五入	有効数字 3 桁
算出応力	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
許容応力	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位

注記*1：設計上定める値が小数点以下第 1 位の場合は，小数点以下第 1 位表示とする。

*2：絶対値が 1000 以上のときはべき数表示とする。

3. 評価部位

建物開口部竜巻防護対策設備の耐震評価は、建物開口部竜巻防護対策設備が脱落することにより波及的影響を及ぼさないことを確認する観点から、「4.1 応力評価及び構造強度評価方法」に示す条件に基づき、耐震評価上厳しくなるフレーム及びアンカーボルトについて実施する。なお、建物開口部竜巻防護対策設備は、構造物として十分な剛性を有しており、支持構造物であるフレーム及びアンカーボルトが健全であれば脱落による損傷を防止できるため、フレーム及びアンカーボルトを評価対象とする。建物開口部竜巻防護対策設備の耐震評価部位については、表 2-2 及び表 2-3 の概略構造図に示す。

4. 応力評価及び構造強度評価

4.1 応力評価及び構造強度評価方法

- (1) 建物開口部竜巻防護対策設備のフレームは、アンカーボルトにより建物躯体である床及び壁に固定されるものとする。
- (2) 建物開口部竜巻防護対策設備の応力評価には、はり要素を用いたフレームモデルにより行う。
- (3) 建物開口部竜巻防護対策設備の質量には、フレーム自身の質量のほか、竜巻防護ネット、竜巻防護鋼板の質量を考慮する。
- (4) 地震力は、建物開口部竜巻防護対策設備に対して水平方向及び鉛直方向に作用するものとし、組合せ係数法を用いて設定する。
- (5) 地震力は、固有値解析結果を踏まえて設定するものとする。
- (6) 積雪による荷重は、評価対象設備に対して鉛直方向に作用するものとする。

4.2 荷重の組合せ及び許容応力

4.2.1 荷重の組合せ

建物開口部竜巻防護対策設備の荷重の組合せを表 4-1 に示す。

表 4-1 荷重の組合せ

名称	荷重の組合せ
建物開口部竜巻防護対策設備	$D + S_s + P_s$

D : 自重

S_s : 地震荷重

P_s : 積雪荷重

4.2.2 使用材料の許容応力

フレーム及びアンカーボルトの許容応力を表 4-2 に示す。

表 4-2 使用材料の許容応力*¹

(単位 : MPa)

評価部材	材料	材料強度		
		引張り	圧縮 曲げ	せん断
フレーム	SN490B (厚さ ≤ 40mm)	325	325* ²	187
アンカーボルト	SS400	235	235* ²	135

注記*1 : 鋼構造設計規準 — 許容応力度設計法 — ((社) 日本建築学会, 2005 改定) による。

注記*2 : 上限値であり, 座屈長さ等を勘案して設定する。

4.3 解析モデル

4.3.1 竜巻防護ネット対策設備

竜巻防護ネット対策設備の解析モデルを図 4-1 に、解析モデルの概要を以下に示す。

- (1) 解析モデルは、フレームについてはり要素を用いてモデル化する。
- (2) 拘束条件は、フレームと原子炉建物床面及び壁面をアンカーボルトで固定する。なお、固定箇所はピン接合とする。
- (3) 解析コードは「KANSAS 2」を使用する。なお、評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

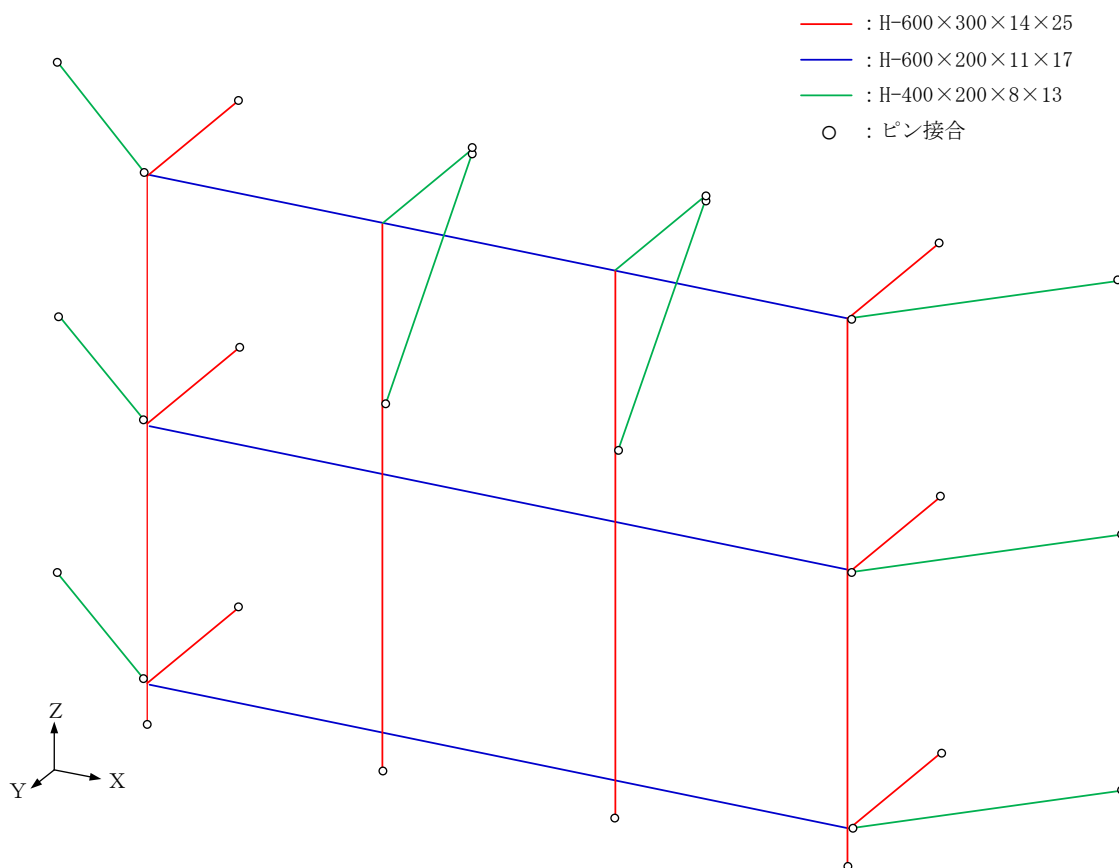


図 4-1 竜巻防護ネット対策設備の解析モデル

4.3.2 竜巻防護鋼板対策設備

竜巻防護鋼板対策設備の解析モデルを図 4-2 に、解析モデルの概要を以下に示す。

- (1) 解析モデルは、フレームを単純はりとしてモデル化する。
- (2) 拘束条件は、フレームと原子炉建物壁面をアンカーボルトで固定する。なお、固定箇所はピン接合とする。

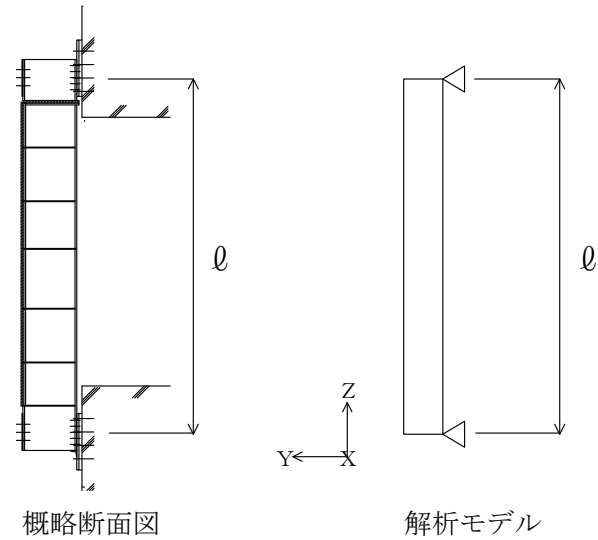


図 4-2 竜巻防護鋼板対策設備の解析モデル

4.4 固有周期

4.4.1 竜巻防護ネット対策設備

竜巻防護ネット対策設備の固有周期は、「4.3.1 竜巻防護ネット対策設備」で示した解析モデルを用いて、解析コード「KANSAS2」を使用し算出する。固有値解析の結果を表4-3に示す。固有周期は、0.05秒以下であり、剛構造であることを確認した。

表4-3 固有値解析結果（竜巻防護ネット対策設備）

方向	固有周期 (s)	刺激係数		
		水平方向		鉛直方向 Z方向 (UD方向)
		X方向 (EW方向)	Y方向 (NS方向)	
X方向 (EW方向)	0.0363	5.043	0.000	0.000
Z方向 (UD方向)	0.0329	0.000	0.011	1.761
Y方向 (NS方向)	0.0295	0.000	-1.457	-0.378

4.4.2 竜巻防護鋼板対策設備

竜巻防護鋼板対策設備の固有周期は、「4.3.2 竜巻防護鋼板対策設備」で示した解析モデルを用いて、「土木学会構造力学公式集」に基づき下式より算出する。

$$f = \frac{\pi^2}{2\pi l} \sqrt{\frac{EI}{m}}$$

固有値解析の結果を表4-4に示す。固有周期は、0.05秒以下であり、剛構造であることを確認した。

表4-4 固有値解析結果（竜巻防護鋼板対策設備）

方向	固有周期 (s)
X方向 (NS方向)	0.0324
Y方向 (EW方向)	0.0156

4.5 設計用地震力

「基準地震動 S s」による地震力は、VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に基づき設定する。

建物開口部竜巻防護対策設備は剛構造であることから、建物の地震応答解析に基づいて算定された最大応答加速度又はこれを上回る設計震度を設定する。設計震度を表 4-5 及び表 4-6 に示す。

表 4-5 設計用地震力（竜巻防護ネット対策設備）

据付場所 及び 床面高さ (m)	固有周期 (s)			基準地震動 S s		
	水平方向		鉛直方向 Z 方向 (UD 方向)	水平方向		鉛直方向 Z 方向 (UD 方向) 設計震度
	X 方向 (EW 方向)	Y 方向 (NS 方向)		X 方向 (EW 方向) 設計震度	Y 方向 (NS 方向) 設計震度	
原子炉建物 EL 52.4 (EL 51.7*1)	0.0363	0.0295	0.0329	$C_{HX} =$ 7.02*2	$C_{HY} =$ 5.54*2	$C_V =$ 7.43*2

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：設計用震度Ⅱ（基準地震動 S s）又はこれを上回る設計震度

表 4-6 設計用地震力（竜巻防護鋼板対策設備）

据付場所 及び 床面高さ (m)	固有周期 (s)			基準地震動 S s		
	水平方向		鉛直方向 Z 方向 (UD 方向)	水平方向		鉛直方向 Z 方向 (UD 方向) 設計震度
	X 方向 (NS 方向)	Y 方向 (EW 方向)		X 方向 (NS 方向) 設計震度	Y 方向 (EW 方向) 設計震度	
原子炉建物 EL 51.9 (EL 51.7*1)	0.0324	0.0156	*2	$C_{HX} =$ 4.43*3	$C_{HY} =$ 9.54*3	$C_V =$ 2.66*3

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：0.05 秒以下

*3：設計用震度Ⅱ（基準地震動 S s）又はこれを上回る設計震度

4.6 応力の計算方法

4.6.1 竜巻防護ネット対策設備

(1) フレームの応力

フレームの応力は、解析による計算で得られる各要素端での軸力 N_t 、 N_c 、せん断力 Q_y 、 Q_z 及び曲げモーメント M_y 、 M_z により各応力を次のように求める。

a. 引張応力又は圧縮応力

$$\sigma_t = \frac{N_t}{A}, \quad \sigma_c = \frac{N_c}{A}$$

b. せん断応力

$$\tau_y = \frac{Q_y}{A_{s_y}}, \quad \tau_z = \frac{Q_z}{A_{s_z}}$$

c. 曲げ応力

$$\sigma_{b_y} = \frac{M_y}{Z_y}, \quad \sigma_{b_z} = \frac{M_z}{Z_z}$$

d. 組合せ応力

(a) 圧縮又は引張り＋曲げ

$$\max \left(\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_{b_y} + \sigma_{b_z}}{f_b}, \frac{\sigma_{b_y} + \sigma_{b_z} + \sigma_t}{f_t} \right)$$

(b) 圧縮又は引張り＋曲げ＋せん断

$$\max \left(\sqrt{(\sigma_c + \sigma_{b_y} + \sigma_{b_z})^2 + 3\tau_y^2}, \sqrt{(\sigma_c + \sigma_{b_y} + \sigma_{b_z})^2 + 3\tau_z^2} \right)$$

引張軸力の場合は σ_c を σ_t とする。

注：添字 y 、 z は要素に与えられた座標軸（ y ：弱軸方向、 z ：強軸方向）

(2) アンカーボルトの荷重

アンカーボルトの荷重は、解析による計算で得られるベースプレート部の各要素端に生じる荷重 R_x 、 R_y 、 R_z により各荷重を次のように求める。

a. 引張荷重

$$p = R_x / n$$

b. せん断荷重

$$q = \sqrt{R_y^2 + R_z^2} / n$$

注：添字 x 、 y 、 z は要素に与えられた座標軸（ x ：引張方向、 y 及び z ：せん断方向）

4.6.2 竜巻防護鋼板対策設備

(1) フレームの荷重及び応力

フレームの荷重及び応力は、単純はりとして下式により求める。

a. せん断荷重

$$Q_y = \frac{w \cdot C_{HX} \cdot \ell}{2}, \quad Q_z = \frac{w \cdot C_{HY} \cdot \ell}{2}$$

b. 曲げモーメント

$$M_y = \frac{w \cdot C_{HY} \cdot \ell^2}{8}, \quad M_z = \frac{w \cdot C_{HX} \cdot \ell^2}{8}$$

c. せん断応力

$$\tau_y = \frac{Q_y}{A_{s y}}, \quad \tau_z = \frac{Q_z}{A_{s z}}$$

d. 曲げ応力

$$\sigma_{b y} = \frac{M_y}{Z_y}, \quad \sigma_{b z} = \frac{M_z}{Z_z}$$

e. 組合せ応力

(a) 曲げ+せん断

$$\max \left(\sqrt{(\sigma_{b y} + \sigma_{b z})^2 + 3 \tau_y^2}, \quad \sqrt{(\sigma_{b y} + \sigma_{b z})^2 + 3 \tau_z^2} \right)$$

注：添字 y, z は要素に与えられた座標軸 (y : 弱軸方向, z : 強軸方向)

(2) アンカーボルトの荷重

アンカーボルトの荷重は、はりモデルを用いて計算した引張荷重及びせん断荷重により、次のように求める。

a. 引張荷重

$$R_x = \frac{w \cdot C_{HY} \cdot \ell}{2}$$

$$p = R_x / n$$

b. せん断荷重

$$R_y = \frac{w \cdot C_{HX} \cdot \ell}{2}$$

$$R_z = \frac{w \cdot C_V \cdot \ell}{2}$$

$$q = \sqrt{R_y^2 + R_z^2} / n$$

注：添字 x, y, z は要素に与えられた座標軸（x：引張方向, y 及び z：せん断方向）

4.7 計算条件

応力解析に用いる自重及び荷重（地震荷重）は、本計算書の【竜巻防護ネット対策設備の耐震性についての計算結果】及び【竜巻防護鋼板対策設備の耐震性についての計算結果】の設計条件及び機器要目に示す。

4.8 応力の評価

4.8.1 フレームの応力評価

4.6.1(1)項及び4.6.2(1)項で求めた各応力が許容応力以下であること。ただし、組合せ応力は f_t 以下、又は、応力比の場合は1以下であることを確認する。

	基準地震動 S_s による荷重との組合せの場合
許容引張応力 f_t	$\frac{F}{1.5} \cdot 1.5$
許容圧縮応力 f_c	$\lambda \leq \Lambda$ のとき $\left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu_c} \cdot 1.5$ $\lambda > \Lambda$ のとき $\frac{0.277}{\left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2} \cdot F \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_s	$\frac{F}{1.5\sqrt{3}} \cdot 1.5$
許容曲げ応力 f_b	$\lambda_b \leq_p \lambda_b$ のとき $\frac{F}{\nu_b} \cdot 1.5$ $_p \lambda_b < \lambda_b \leq_e \lambda_b$ のとき $\left\{ 1 - 0.4 \frac{\lambda_b -_p \lambda_b}{_e \lambda_b -_p \lambda_b} \right\} \frac{F}{\nu_b} \cdot 1.5$ $_e \lambda_b < \lambda_b$ のとき $\frac{1}{\lambda_b^2} \cdot \frac{F}{2.17} \cdot 1.5$

ここで,

$$\lambda = \frac{\ell_k}{i}$$

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6 F}}$$

$$\nu_c = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

$$\nu_b = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda_b}{e \lambda_b} \right)^2$$

$$\lambda_b = \sqrt{\frac{M_{y1}}{M_e}}$$

$$p \lambda_b = 0.3$$

$$e \lambda_b = \frac{1}{\sqrt{0.6}}$$

4.8.2 アンカーボルトの評価

4.6.1(2)項及び4.6.2(2)項で求めたアンカーボルトの引張荷重 p 及びせん断荷重 q が許容値以下であること。また、引張応力比とせん断応力比の二乗和が1以下であることを確認する。

(1) 頭付きタイプ

	基準地震動 S_s による荷重との組合せの場合
許容引張力 p_a	$\min [p_{a1}, p_{a2}]$
許容せん断力 q_a	$\min [q_{a1}, q_{a2}, q_{a3}]$
組合せ	$\left(\frac{p}{p_a}\right)^2 + \left(\frac{q}{q_a}\right)^2 \leq 1$

ただし、

$$p_{a1} = \phi_1 \cdot s \sigma_{pa} \cdot s c a$$

$$p_{a2} = \phi_2 \cdot c \sigma_t \cdot A_c$$

$$q_{a1} = \phi_1 \cdot s \sigma_{qa} \cdot s c a$$

$$q_{a2} = \phi_2 \cdot c \sigma_{qa} \cdot s c a$$

$$q_{a3} = \phi_2 \cdot c \sigma_t \cdot A_{qc}$$

ここで、

低減係数 ϕ_1 , ϕ_2 は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」より、以下の表のとおり。

	ϕ_1	ϕ_2
短期荷重用	1.0	2/3

頭付きアンカーボルトの許容引張時の頭部支圧応力度は、コンクリートの支圧強度以下となるようにする。

$$\frac{p_a}{A_0} \leq f_n$$

短期許容せん断力を確保するためのアンカーボルトの有効埋込み長さ L_e は以下の式を満たすように算定するものとする。

$$s \sigma_{pa} \cdot s c a \leq c \sigma_t \cdot A_c$$

$$A_c = \pi \cdot L_e (L_e + D)$$

(2) 接着系タイプ

	基準地震動 S_s による荷重との組合せの場合
許容引張力 p_a	$\min [p_{a1}, p_{a3}]$
許容せん断力 q_a	$\min [q_{a1}, q_{a2}, q_{a3}]$
組合せ	$\left(\frac{p}{p_a}\right)^2 + \left(\frac{q}{q_a}\right)^2 \leq 1$

ただし,

$$p_{a1} = \phi_1 \cdot s \cdot \sigma_{pa} \cdot s_{ca}$$

$$p_{a3} = \phi_3 \cdot \tau_a \cdot \pi \cdot d \cdot L_{ce}$$

$$q_{a1} = \phi_1 \cdot s \cdot \sigma_{qa} \cdot s_{ca}$$

$$q_{a2} = \phi_2 \cdot c \cdot \sigma_{qa} \cdot s_{ca}$$

$$q_{a3} = \phi_2 \cdot c \cdot \sigma_t \cdot A_{qc}$$

ここで,

低減係数 ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 は, VI-2-1-9「機能維持の基本方針」より, 以下の表のとおり。

	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3
短期荷重用	1.0	2/3	2/3

$$\tau_a = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \tau_{bavg}$$

$$\alpha_n = 0.5 \left(\frac{c_n}{L_e} \right) + 0.5 \quad (n=1, 2, 3)$$

なお, $(c_n/L_e) \geq 1.0$ の場合は, $(c_n/L_e) = 1.0$, $L_e \geq 10d$ の場合は, $L_e = 10d$ とする。

ボルトの基本平均付着強度 τ_{bavg} は, VI-2-1-9「機能維持の基本方針」より, カプセル方式・有機系の $10\sqrt{F_c/21}$ とする。

短期許容せん断力を確保するためのアンカーボルトの有効埋込み長さ L_e は以下の式を満たすように算定するものとする。

$$L_e \geq \frac{s \cdot \sigma_{pa} \cdot d}{4 \cdot \tau_a}$$

5. 評価結果

建物開口部竜巻防護対策設備の設計条件及び評価結果を以下に示す。発生値は許容限界を満足しており、設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることにより波及的影響を及ぼさないことを確認した。

(1) 構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次頁以降の表に示す。

【竜巻防護ネット対策設備の耐震性についての計算結果】

1. 設計基準対象施設及び重大事故等対処設備

1.1 設計条件

機器名称	据付場所及び 床面高さ (m)	基準地震動 S_s		
		X方向 (EW方向) 設計震度	Y方向 (NS方向) 設計震度	鉛直方向 (UD方向) 設計震度
竜巻防護ネット 対策設備	原子炉建物 EL52.4 (EL51.7*)	$C_{HX} = 7.02$	$C_{HY} = 5.54$	$C_V = 7.43$

注記*：基準床レベルを示す。

1.2 機器要目

部材	材質	E (MPa)	F (MPa)	p_a (N)	q_a (N)
H-600×300×14×25	SN490B	2.05×10^5	325	—	—
H-600×200×11×17	SN490B	2.05×10^5	325	—	—
H-400×200×8×13	SN490B	2.05×10^5	325	—	—
φ 22 (頭付き)	SS400	2.05×10^5	235	6.021×10^4	6.252×10^4
M20 (接着系)	SS400	2.05×10^5	235	4.110×10^4	4.030×10^4

部材	m^* (kg/m)	A (mm ²)	Z_y (mm ³)	Z_z (mm ³)	$A_{s y}$ (mm ²)	$A_{s z}$ (mm ²)
H-600×300×14×25	231.7	2.285×10^4	4.820×10^6	7.510×10^5	1.500×10^4	7.700×10^3
H-600×200×11×17	133.0	1.317×10^4	2.520×10^6	2.270×10^5	6.800×10^3	6.226×10^3
H-400×200×8×13	83.6	8.337×10^3	1.170×10^6	1.740×10^5	5.200×10^3	2.992×10^3

注記*：フレームの他，リブプレート等の重量を含む。

部材	d (mm)	$s c a$ (mm ²)	n
φ22 (頭付き)	22	380.1	18
M20 (接着系)	20	245.0	16

1.3 計算数値

1.3.1 フレームの荷重

(単位：N)

部材	N_t	N_c	Q_y	Q_z
H-600×300×14×25	4.366×10^5	5.443×10^5	7.690×10^4	4.723×10^4
H-600×200×11×17	3.398×10^5	3.398×10^5	6.648×10^4	8.317×10^4
H-400×200×8×13	7.230×10^5	7.231×10^5	2.249×10^3	1.742×10^3

注：添字 y, z は要素に与えられた座標軸 (Q_y ：弱軸方向, Q_z ：強軸方向)

1.3.2 フレームのモーメント (単位：N・mm)

部材	M_y	M_z
H-600×300×14×25	1.103×10^8	3.337×10^7
H-600×200×11×17	1.140×10^8	2.626×10^7
H-400×200×8×13	7.083×10^6	9.142×10^6

注：添字 y, z は要素に与えられた座標軸 (M_y ：強軸周り, M_z ：弱軸周り)

1.3.3 アンカーボルトの荷重 (単位：N)

部材	R_x	R_y	R_z
$\phi 22$ (頭付き)	6.278×10^5	6.284×10^4	1.266×10^5
M20 (接着系)	5.832×10^5	1.072×10^5	5.580×10^4

注：添字 x, y, z は要素に与えられた座標軸 (R_x ：引張方向, R_y 及び R_z ：せん断方向)

1.3.4 アンカーボルトに作用する力 (単位：N)

部材	p	q
$\phi 22$ (頭付き)	3.488×10^4	7.853×10^3
M20 (接着系)	3.645×10^4	7.554×10^3

1.4 結論

1.4.1 固有周期 (単位 : s)

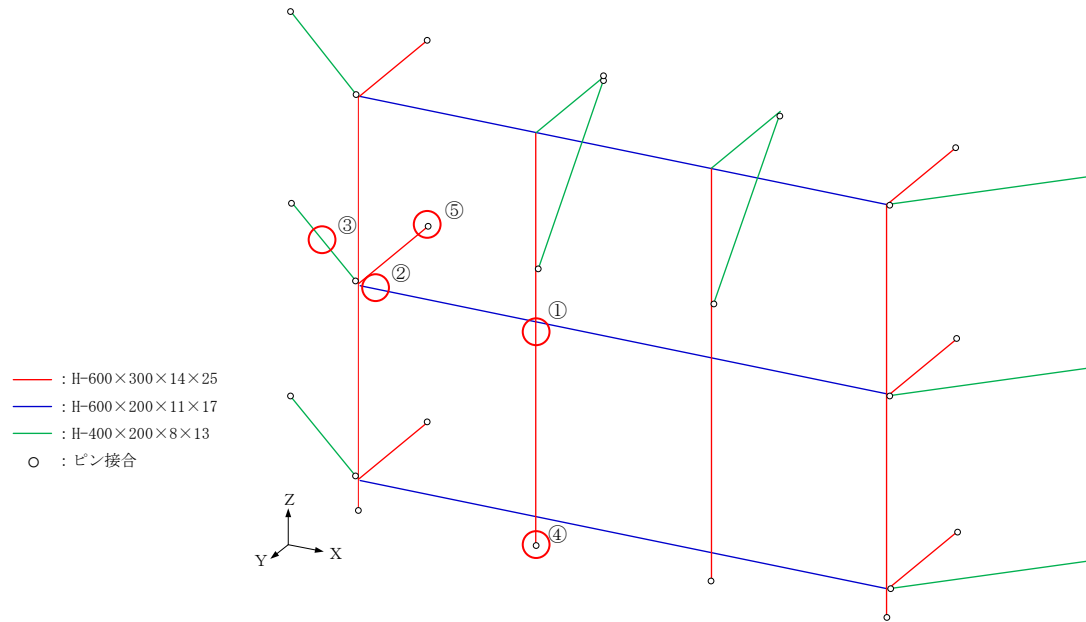
方向	固有周期
X方向 (E W方向)	0.0363
Z方向 (U D方向)	0.0329
Y方向 (N S方向)	0.0295

1.4.2 応力

項目	部材	部位	応力	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度
フレーム	H-600×300×14×25	①	引張り	20	325	0.07
			圧縮	24	273	0.09
			せん断	7	187	0.04
			曲げ	45	325	0.14
			組合せ（圧縮又は引張り＋曲げ）	—	—	0.32
			組合せ（圧縮又は引張り＋曲げ＋せん断）	—	—	0.29
	H-600×200×11×17	②	引張り	26	325	0.08
			圧縮	26	211	0.13
			せん断	14	187	0.08
			曲げ	116	325	0.36
			組合せ（圧縮又は引張り＋曲げ）	—	—	0.69
			組合せ（圧縮又は引張り＋曲げ＋せん断）	—	—	0.59
	H-400×200×8×13	③	引張り	87	325	0.27
			圧縮	87	211	0.42
			せん断	1	187	0.01
			曲げ	53	325	0.17
			組合せ（圧縮又は引張り＋曲げ）	—	—	0.63
			組合せ（圧縮又は引張り＋曲げ＋せん断）	—	—	0.46

項目	部材	部位	応力	算出応力 (N)	許容応力 (N)	裕度
アンカー ボルト	φ22 (頭付き)	④	引張り	3.488×10^4	6.021×10^4	0.58
			せん断	7.853×10^3	6.252×10^4	0.13
			組合せ (引張り+せん断)	—	—	0.36
	M20 (接着系)	⑤	引張り	3.645×10^4	4.110×10^4	0.89
			せん断	7.554×10^3	4.030×10^4	0.19
			組合せ (引張り+せん断)	—	—	0.83

すべて許容応力以下である。



各部位ごとの最大応力発生部位

1.4.3 代表機器の選定結果及び全機器の評価結果

機器名称	据付場所及び 床面高さ (m)	対象	応力	算出応力 (N)	許容応力 (N)	裕度	代表
竜巻防護ネット対策設備 (2RB-AG1, 3, 4)	原子炉建物 EL 23.8*	フレーム	組合せ (圧縮又は引張り+曲げ)	—	—	0.12	
		アンカーボルト	引張り	1.482×10^4	3.686×10^4	0.41	
竜巻防護ネット対策設備 (2RB-AG2)	原子炉建物 EL 23.8*	フレーム	組合せ (圧縮又は引張り+曲げ)	—	—	0.11	
		アンカーボルト	引張り	1.392×10^4	3.686×10^4	0.38	
竜巻防護ネット対策設備 (2RB-AG5)	原子炉建物 EL 23.8*	フレーム	組合せ (圧縮又は引張り+曲げ)	—	—	0.13	
		アンカーボルト	引張り	1.989×10^4	3.686×10^4	0.54	
竜巻防護ネット対策設備 (2RB-3)	原子炉建物 EL 34.8*	フレーム	組合せ (圧縮又は引張り+曲げ)	—	—	0.11	
		アンカーボルト	引張り	1.363×10^4	3.686×10^4	0.37	
竜巻防護ネット対策設備 (2RB-M4)	原子炉建物 EL 37.2*	フレーム	組合せ (圧縮又は引張り+曲げ)	—	—	0.12	
		アンカーボルト	引張り	1.026×10^4	3.686×10^4	0.28	
竜巻防護ネット対策設備 (2RB-BOP2, 3)	原子炉建物 EL 51.7*	フレーム	組合せ (圧縮又は引張り+曲げ)	—	—	0.69	○
		アンカーボルト	引張り	3.645×10^4	4.110×10^4	0.89	○
竜巻防護ネット対策設備 (2RwB-AG1)	廃棄物処理建物 EL 26.7*	フレーム	組合せ (圧縮又は引張り+曲げ)	—	—	0.06	
		アンカーボルト	引張り	4.430×10^3	3.898×10^4	0.12	

すべて許容応力以下である。

注記*：基準床レベルを示す。

【竜巻防護鋼板対策設備の耐震性についての計算結果】

1. 設計基準対象施設及び重大事故等対処設備

1.1 設計条件

機器名称	据付場所及び 床面高さ (m)	基準地震動 S_s		
		X方向 (NS方向) 設計震度	Y方向 (EW方向) 設計震度	鉛直方向 (UD方向) 設計震度
竜巻防護鋼板 対策設備	原子炉建物 EL 51.9 (EL 51.7*)	$C_{HX} = 4.43$	$C_{HY} = 9.54$	$C_V = 2.66$

注記*：基準床レベルを示す。

38

1.2 機器要目

部材	材質	E (MPa)	F (MPa)	p_a (N)	q_a (N)
H-800×300×14×26	SN490B	2.050×10^5	325	—	—
M20 (接着系)	SS400	2.050×10^5	235	3.488×10^4	4.030×10^4

部材	m^* (kg/m)	\varnothing (mm)	A (mm ²)	Z_y (mm ³)	Z_z (mm ³)	A_{s_y} (mm ²)	A_{s_z} (mm ²)
H-800×300×14×26	758.3	5280	2.635×10^4	7.160×10^6	7.810×10^5	1.560×10^4	1.047×10^4

注記*：フレームの他、リブプレート及び竜巻防護鋼板等の重量を含む。

部材	d (mm)	s c a (mm ²)	n
M20 (接着系)	20	245.0	9

1.3 計算数値

1.3.1 フレームの荷重 (単位：N)

部材	Q_y	Q_z
H-800×300×14×26	3.538×10^4	1.904×10^5

注：添字 y, z は要素に与えられた座標軸 (Q_y ：弱軸方向, Q_z ：強軸方向)

39

1.3.2 フレームのモーメント (単位：N・mm)

部材	M_y	M_z
H-800×300×14×26	2.513×10^8	4.670×10^7

注：添字 y, z は要素に与えられた座標軸 (M_y ：強軸周り, M_z ：弱軸周り)

1.3.3 アンカーボルトの荷重 (単位：N)

部材	R_x	R_y	R_z
M20 (接着系)	1.904×10^5	3.538×10^4	4.118×10^4

注：添字 x, y, z は要素に与えられた座標軸 (R_x ：引張方向, R_y 及び R_z ：せん断方向)

1.3.4 アンカーボルトに作用する力 (単位：N)

部材	p	q
M20 (接着系)	2.116×10^4	6.032×10^3

1.4 結論

1.4.1 固有周期 (単位：s)

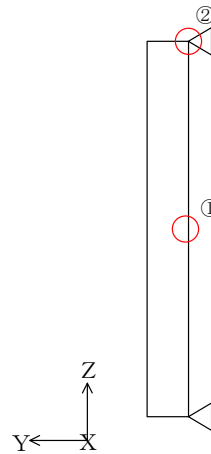
方向	固有周期
X方向 (NS方向)	0.0324
Y方向 (EW方向)	0.0156

1.4.2 応力

項目	部材	部位	応力	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度
フレーム	H-800×300×14×26	①	せん断	19	187	0.11
			曲げ	60	325	0.19
			組合せ (曲げ+せん断)	—	—	0.32

項目	部材	部位	応力	算出応力 (N)	許容応力 (N)	裕度
アンカー ボルト	M20 (接着系)	②	引張り	2.116×10^4	3.488×10^4	0.61
			せん断	6.032×10^3	4.030×10^4	0.15
			組合せ (引張り+せん断)	—	—	0.40

すべて許容応力以下である。



各部位ごとの最大応力発生部位