

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第6号機	設計及び工事計画審査資料
資料番号	KK6 添-3-013-11 改0
提出年月日	2023年12月21日

VI-3-別添 1-5 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書

2023年12月  
東京電力ホールディングス株式会社

VI-3-別添 1-5 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書

## 目 次

1.	概要	1
2.	基本方針	2
2.1	位置	2
2.2	構造概要	3
2.3	評価方針	6
2.4	適用規格	9
3.	強度評価方法	10
3.1	記号の定義	10
3.2	評価対象部位	13
3.3	荷重及び荷重の組合せ	15
3.4	許容限界	18
3.4.1	貫通評価	18
3.4.2	裏面剥離評価	19
3.4.3	変形評価	20
3.5	評価方法	20
3.5.1	貫通評価	21
3.5.2	裏面剥離評価	30
3.5.3	変形評価	31
4.	評価条件	40
4.1	貫通評価	40
4.1.1	式による評価	40
4.1.2	屋根スラブに対する衝突解析	40
4.2	裏面剥離評価	42
4.2.1	式による評価	42
4.2.2	屋根スラブに対する衝突解析	42
4.3	変形評価	42
4.3.1	耐震壁及び鉄骨架構	42
4.3.2	屋根スラブ	45
5.	強度評価結果	47
5.1	貫通評価	47
5.2	裏面剥離評価	50
5.3	変形評価	51

5.3.1	耐震壁及び鉄骨架構	51
5.3.2	屋根スラブ	52

## 1. 概要

本資料は、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、竜巻より防護すべき施設を内包する施設である原子炉建屋、タービン建屋海水熱交換器区域が、設計竜巻による設計飛来物の衝突に加え、風圧力による荷重及び気圧差による荷重に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても、竜巻より防護すべき施設の安全機能を損なわないよう、内包する竜巻より防護すべき施設に設計飛来物が衝突することを防止する機能を有すること及び竜巻より防護すべき施設に必要な機能を損なわないことを確認するものである。

コントロール建屋及び廃棄物処理建屋の強度に関する評価は、令和 2 年 10 月 14 日付け原規規発第 2010147 号にて認可された柏崎刈羽原子力発電所第 7 号機の設計及び工事の計画の V-3-別添 1-5「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」による。

## 2. 基本方針

VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」を踏まえ、各施設の「2.1 位置」、「2.2 構造概要」、「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

### 2.1 位置

原子炉建屋、タービン建屋の設置位置を図 2-1 に示す。

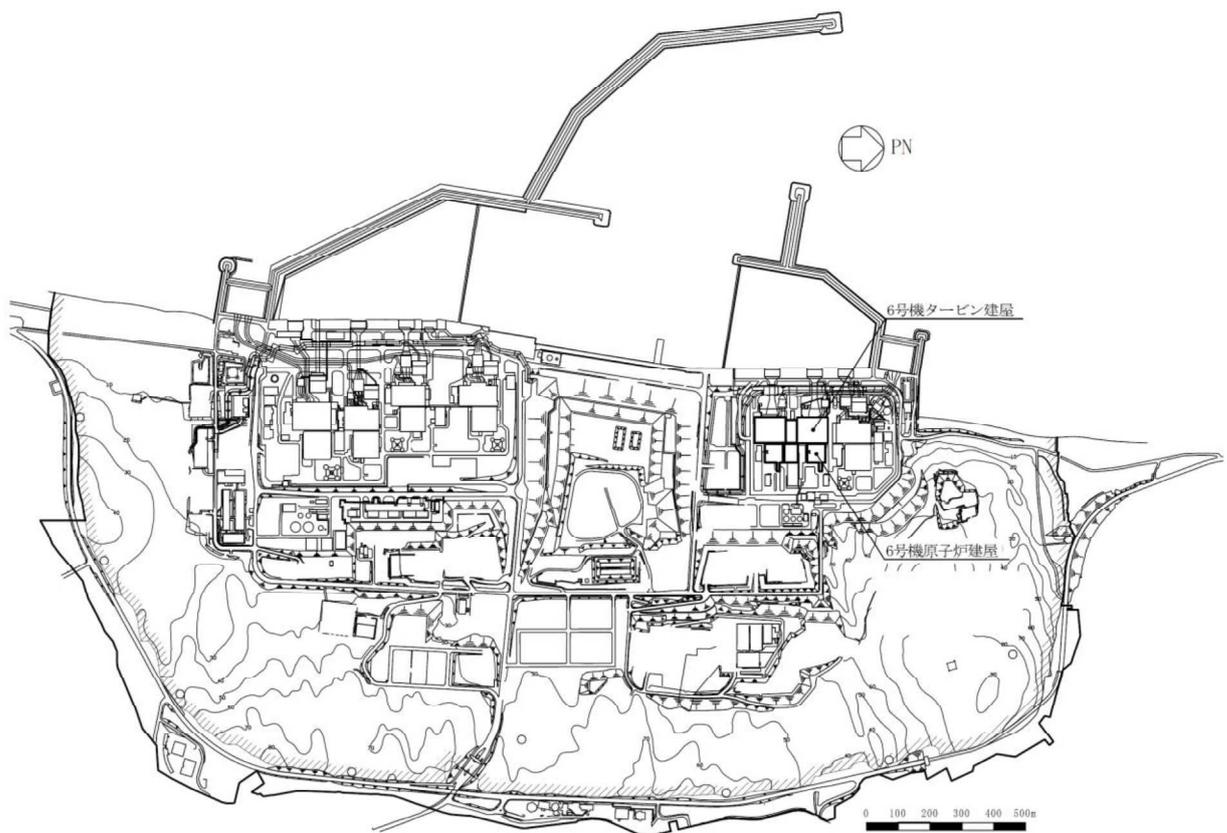


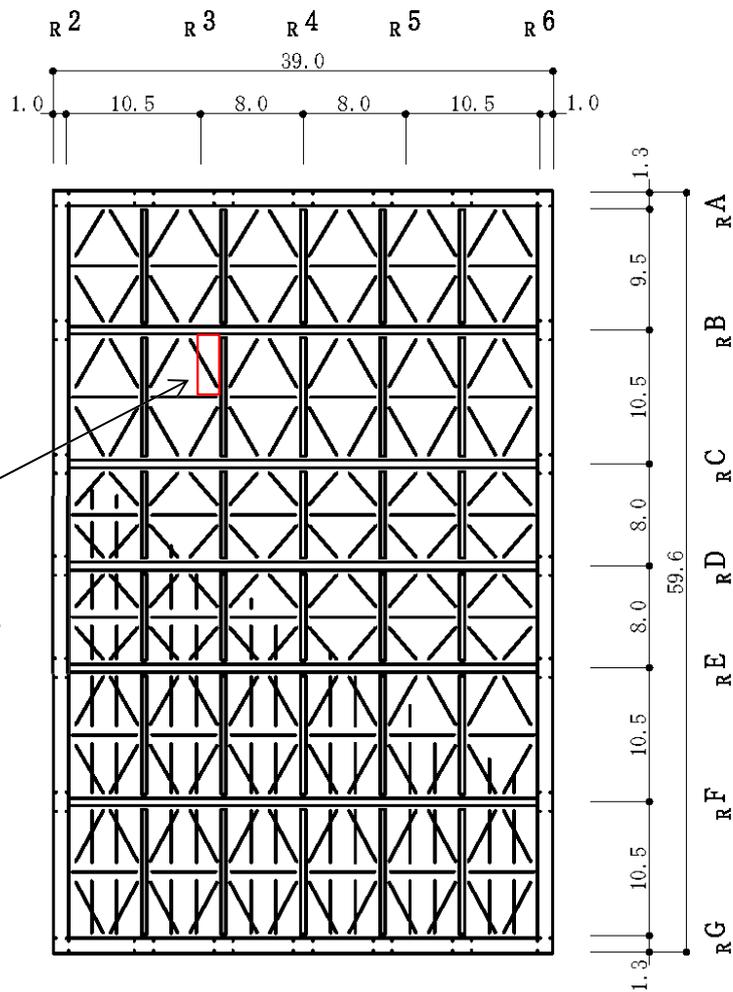
図 2-1 建屋の位置図

## 2.2 構造概要

各施設の構造は、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画とする。

各施設は、主体構造が鉄筋コンクリート造であり、一部鉄骨鉄筋コンクリート造、又は一部鉄骨造を有する構造である。

各施設の概略平面図を図 2-2～図 2-3 に示す。



原子炉建屋  
屋上屋根スラブ  
(幅：2070mm,  
奥行き：5250mm,  
厚さ：10cm)

□：評価対象部位（スラブ）

(単位：m)

図 2-2 原子炉建屋の概略平面図 (T. M. S. L. 49.7m) (1/2)

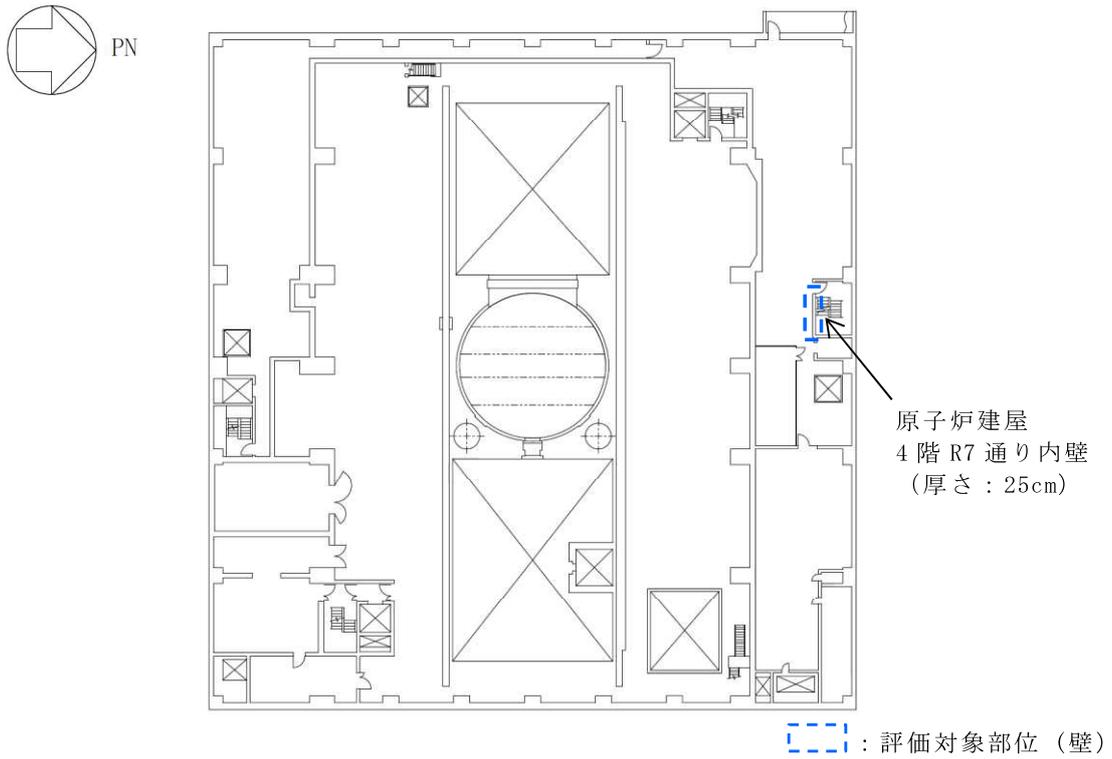


図 2-2 原子炉建屋の概略平面図 (T. M. S. L. 31.7m) (2/2)

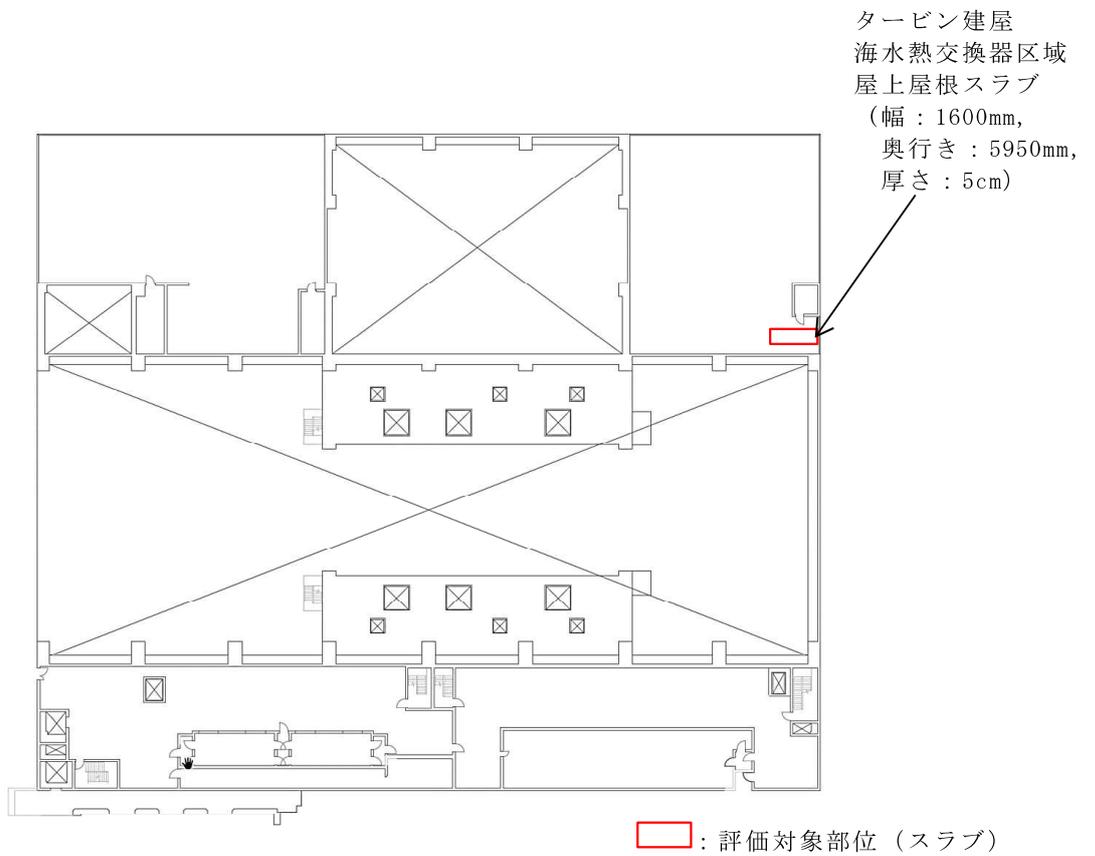
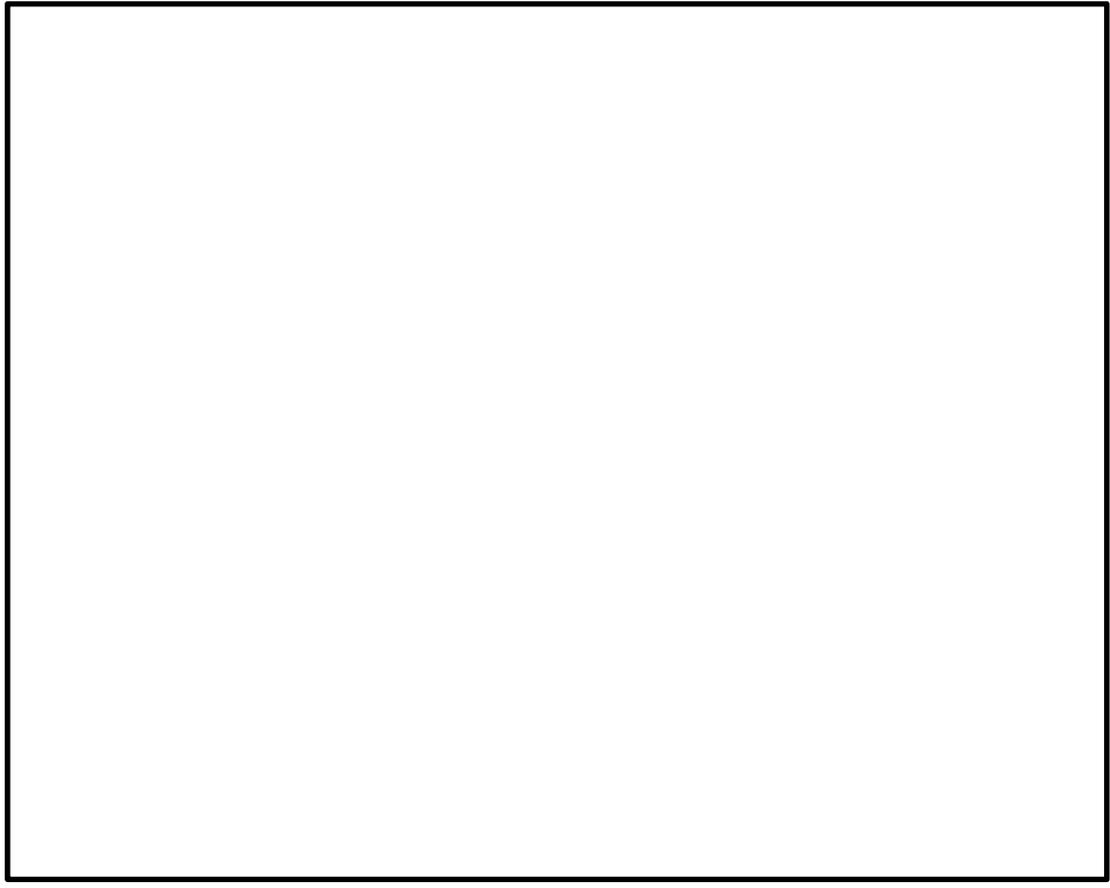


図 2-3 タービン建屋の概略平面図 (T. M. S. L. 30.9m) (1/2)



 : 評価対象部位 (壁)

図 2-3 タービン建屋の概略平面図 (T. M. S. L. 12.3m) (2/2)

## 2.3 評価方針

各施設の強度評価は、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」及び「4.2 許容限界」を踏まえ、竜巻より防護すべき施設が安全機能を損なわないことを、「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

各施設の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

具体的には、設計飛来物が竜巻より防護すべき施設に衝突する直接的な影響の評価として、施設の外殻を構成する部材に対する衝突評価を行う。また設計飛来物が竜巻より防護すべき施設に衝突もしくは接触する波及的な影響の構造強度評価として、施設の外殻を構成する部材の裏面剥離による飛散の影響評価及び施設の外殻を構成する部材の転倒及び脱落並びに施設の変形の影響評価を行う。

各施設の強度評価フローを図 2-4 に示す。

### (1) 衝突評価

設計荷重に対し、設計飛来物が施設の外殻を構成する部材を貫通しない設計とするために、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である建屋の外壁及び屋根スラブが、設計飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する。

評価には、「NEI07-13:Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」（以下「NEI07-13」という。）及び「タービンミサイル評価について（昭和 52 年 7 月 20 日原子炉安全専門審査会）」で用いられている式を準用し、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

なお、施設の外殻を構成する部材のうち、設計飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であることの確認が出来ない屋根スラブにおいては、当該部材に終局状態に至るようなひずみを生じないことを解析により確認する。（以下「貫通評価」という。）

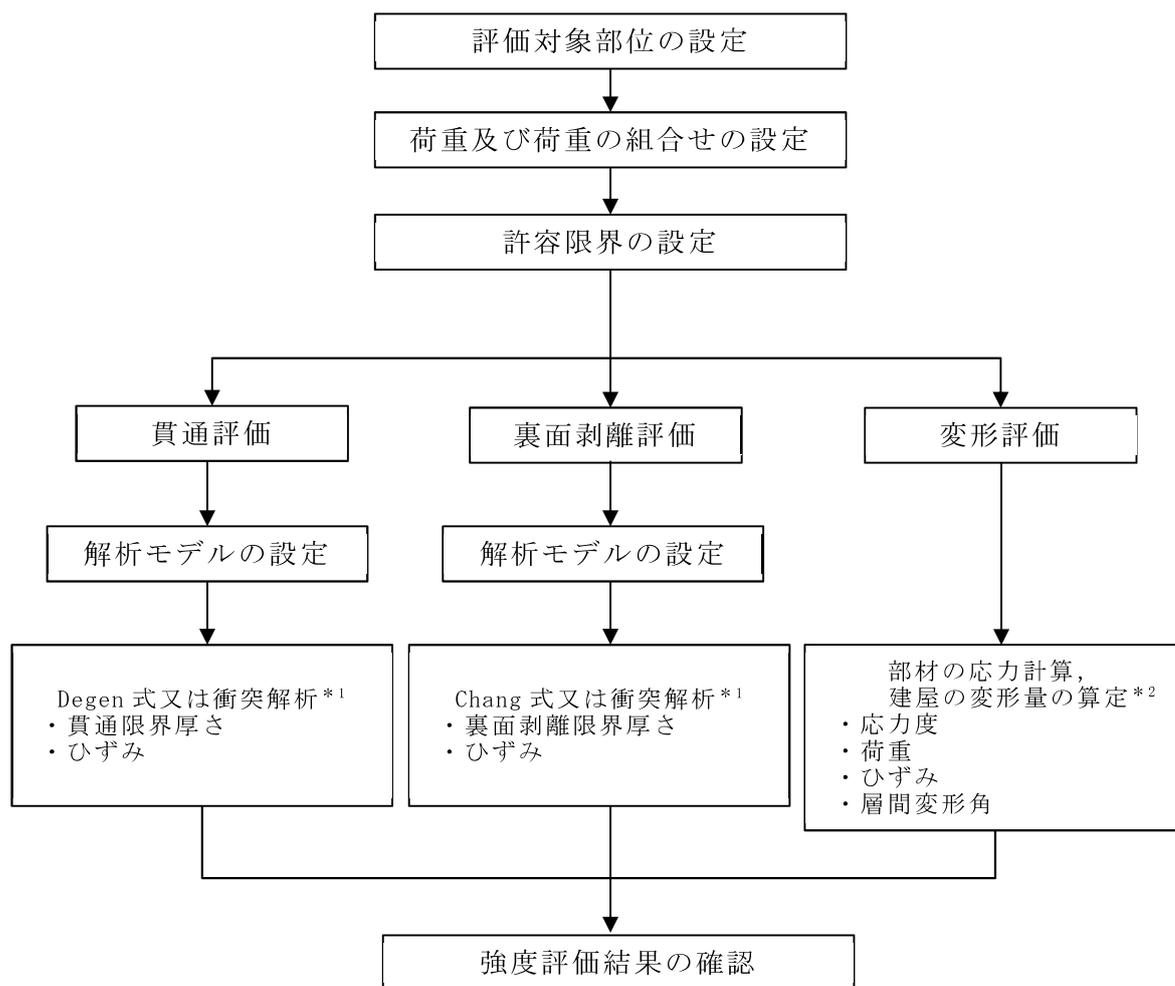
### (2) 構造強度評価

設計荷重に対し、施設の外殻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ために、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である建屋の外壁及び屋根スラブが、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する。

評価には、NEI07-13 にて示されている式を準用し、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す評価式を用いる。

なお、施設の外殻を構成する部材のうち、裏面剥離によるコンクリート片の飛散を生じない最小厚さ以上であることの確認が出来ない屋根スラブにおいては、当該部材が裏面剥離に至るようなひずみを生じないことを解析により確認する。(以下「裏面剥離評価」という。)

また、建屋の外殻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ために、設計竜巻荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、屋根スラブ、屋根スラブのスタッド(以下「スタッド」という。)及び外壁に終局状態に至るようなひずみ又は応力が生じないこと、加えて鉄骨架構に終局状態に至る変形を生じないことを計算及び解析により確認する。(以下「変形評価」という。)



注記\*1 : 衝突解析については、解析コード「ABAQUS」により、壁、スラブ及び鉄筋を 3次元 FEM モデルによりモデル化し評価を実施する。

\*2 : 地震応答解析モデルを用いた静的評価を実施する。

図 2-4 強度評価フロー

## 2.4 適用規格

適用する規格，規準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法及び同施行令
- ・ 「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」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 -1987」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」日本電気協会
- ・ ISE7607-3「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」（昭和51年10月高温構造安全技術研究組合）
- ・ タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会）
- ・ U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1, March 2007
- ・ Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NEI07-13))
- ・ 「建築物荷重指針・同解説」（日本建築学会，2004改定）
- ・ 「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－」（日本建築学会，2005改定）
- ・ 「各種合成構造設計指針・同解説」（日本建築学会，2010改定）
- ・ 「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」（日本建築学会，2010改定）
- ・ 「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説－許容応力度設計と保有水平耐力－」（日本建築学会，2001改定（第4次））
- ・ 日本産業規格（J I S）
- ・ 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）

### 3. 強度評価方法

#### 3.1 記号の定義

Degen 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号を表 3-1 に、Chang 式による裏面剥離限界厚さの算定に用いる記号を表 3-2 に、力学における標準式による屋根スラブ、スタッドの評価に用いる記号を表 3-3 に示す。

表 3-1 Degen 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義	
D	kgf/cm <sup>3</sup>	設計飛来物直径密度 ( $D = W / d^3$ )	
d	cm	設計飛来物直径	
e	cm	貫通限界厚さ	
F <sub>c</sub>	kgf/cm <sup>2</sup>	コンクリートの設計基準強度	
N	—	設計飛来物の形状係数	
V	m/s	壁面	設計飛来物の衝突速度 (水平)
		屋根	設計飛来物の衝突速度 (鉛直)
W	kgf	設計飛来物重量	
X	cm	貫入深さ	
α <sub>e</sub>	—	低減係数	

表 3-2 Chang 式による裏面剥離限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義	
d	cm	設計飛来物直径	
f <sub>c</sub> '	kgf/cm <sup>2</sup>	コンクリートの設計基準強度	
S	cm	裏面剥離限界厚さ	
V	m/s	壁面	設計飛来物の衝突速度 (水平)
		屋根	設計飛来物の衝突速度 (鉛直)
V <sub>0</sub>	m/s	飛来物基準速度	
W	kgf	設計飛来物重量	
α <sub>s</sub>	—	低減係数	

表 3-3 力学における標準式による荷重及び応力の算定に用いる記号 (1/3)  
(設計飛来物による衝撃荷重)

記号	単位	定義
$F_m$	N	設計飛来物による衝撃荷重
$L_1$	m	設計飛来物の最も短い辺の全長
$m$	kg	設計飛来物質量
$V$	m/s	設計飛来物の衝突速度 (水平)
$\tau$	s	設計飛来物と被衝突体の接触時間 ( $= L_1 / V$ )

表 3-3 力学における標準式による荷重及び応力の算定に用いる記号 (2/3)  
(屋根スラブのデッキプレート)

記号	単位	定義
$L$	m	デッキプレートの支持スパン
$M$	kN・m	設計竜巻による単位幅あたりの曲げモーメント ( $= \text{Max} \{M_1, M_2\}$ )
$M_1$	kN・m	支持スパン中央部における 単位幅あたりの曲げモーメント
$M_2$	kN・m	支持位置における単位幅あたりの曲げモーメント
$Q$	kN/m	デッキプレートに生じる単位幅のせん断力
$\omega_d$	kN/m	常時作用する荷重による単位幅あたりの荷重
$\omega_T$	kN/m	設計竜巻による単位幅あたりの荷重 ( $= \text{Max} \{ \omega_{T1}, \omega_{T2} \}$ )
$\omega_{T1}$	kN/m	複合荷重 $W_{T1}$ による単位幅あたりの荷重
$\omega_{T2}$	kN/m	複合荷重 $W_{T2}$ による単位幅あたりの荷重 (設計飛来物 による衝撃荷重 $W_M$ は考慮しない)
$t$	mm	デッキプレートの厚さ
$b$	mm	デッキプレートの単位幅

表 3-3 力学における標準式による荷重及び応力の算定に用いる記号 (3/3)  
(スタッド)

記号	単位	定義
$A_c$	$\text{mm}^2$	コーン状破壊面の有効投影面積
$A_0$	$\text{mm}^2$	スタッド頭部の支圧面積
$a_c a$	$\text{mm}^2$	スタッドの断面積で、軸部断面積とねじ部有効断面積の小さな方の値
$D$	$\text{mm}$	スタッドの頭部直径
$d$	$\text{mm}$	スタッドの軸部直径
$F_c$	$\text{N}/\text{mm}^2$	コンクリートの設計基準強度
$f_n$	$\text{N}/\text{mm}^2$	コンクリートの支圧強度
$l_{c e}$	$\text{mm}$	スタッドの強度計算用埋込み長さ ( $l_{c e} = l_e$ )
$l_e$	$\text{mm}$	スタッドのコンクリート内への有効埋込み長さ
$p_a$	$\text{N}$	スタッド1本あたりの許容引張力
$p_{a1}$	$\text{N}$	スタッド鋼材の降伏により定まる場合のスタッド1本あたりの許容引張力
$p_{a2}$	$\text{N}$	定着したコンクリート躯体のコーン状破壊により定まる場合のスタッド1本あたりの許容引張力
$p_{a3}$	$\text{N}$	コンクリートの支圧破壊により定まるスタッド1本あたりの許容引張力
$\pi$	—	円周率
$c \sigma_t$	$\text{N}/\text{mm}^2$	コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度
$s \sigma_{p a}$	$\text{N}/\text{mm}^2$	スタッドの引張強度
$s \sigma_y$	$\text{N}/\text{mm}^2$	スタッドの規格降伏点強度
$\Phi_1$	—	低減係数
$\Phi_2$	—	低減係数
$L$	$\text{m}$	デッキプレートの支持スパン
$p$	$\text{mm}$	スタッドの間隔 (鉄骨梁の長さ方向)
$p'$	$\text{mm}$	スタッドの間隔 (鉄骨梁のフランジ幅方向)
$Q$	$\text{kN}/\text{m}$	デッキプレートに生じる単位幅のせん断力
$T$	$\text{kN}$	スタッドに生じる引張力
$\omega_T$	$\text{kN}/\text{m}$	設計竜巻による単位幅あたりの荷重 ( $=\text{Max} \{ \omega_{T1}, \omega_{T2} \}$ )
$\omega_{T1}$	$\text{kN}/\text{m}$	複合荷重 $W_{T1}$ による単位幅あたりの荷重
$\omega_{T2}$	$\text{kN}/\text{m}$	複合荷重 $W_{T2}$ による単位幅あたりの荷重(設計飛来物による衝撃荷重 $W_M$ は考慮しない)

### 3.2 評価対象部位

各施設の評価対象部位は、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す評価対象部位を踏まえ、設定する。

評価対象部位は図 2-2～図 2-4 の通り。

#### (1) 貫通評価

設計荷重に対し、設計飛来物が施設の外殻を構成する部材を貫通しない設計とするために、外部事象防護対象施設を内包する区画のうち外殻を構成する部材及び、施設屋外からの設計飛来物の侵入を考慮した各施設の屋内の床スラブ、内壁の中から最も厚みが薄い箇所を評価対象部位として設定することとし、原子炉建屋については屋上屋根スラブ及び 4 階 R7 通り内壁を、タービン建屋については海水熱交換器区域屋上屋根スラブ及び 1 階非常用電気品室南側内壁を評価対象部位として設定する。

評価においては、各施設の評価対象部位の最小厚さが、設計飛来物の貫通を生じない貫通限界厚さを上回ることを計算により確認する。

なお、評価対象部位のうち、設計飛来物の貫通を生じない貫通限界厚さを上回る旨を計算で確認出来ない原子炉建屋屋上屋根スラブ及びタービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブについては、衝突解析により評価を行う。

#### (2) 裏面剥離評価

設計荷重に対し、施設の外殻を構成する部材自体が、脱落により竜巻より防護すべき施設に波及的影響を与えない設計とするために、外殻を構成する部材及び、施設屋外からの設計飛来物の侵入を考慮した各施設の屋内の床スラブ、内壁のうち最も厚みが薄い箇所を評価対象部位として設定することとし、原子炉建屋については屋上屋根スラブ及び 4 階 R7 通り内壁を、タービン建屋については海水熱交換器区域屋上屋根スラブ及び 1 階非常用電気品室南側内壁を評価対象部位として設定する。

評価においては、各施設の評価対象部位の最小厚さが、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない裏面剥離限界厚さを上回ることを計算により確認する。

なお、評価対象部位のうち、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない裏面剥離限界厚さを上回る旨を計算で確認出来ない原子炉建屋屋上屋根スラブ及びタービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブについては、衝突解析により評価を行う。

(3) 変形評価

設計荷重に対して、外殻を構成する部材自体が外部事象防護対象施設へ衝突等の影響を与える変形に至らないことの確認において、設計荷重が直接作用し、防護すべき施設の外殻となる屋根スラブ及び外壁を評価することとし、屋根スラブについては、屋根スラブに生じる設計荷重は屋根スラブの自重と逆向きであることから、屋根スラブの自重が最小となる部位を代表とすることとし、タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブを評価対象部位として設定する。

ここで、屋根スラブの自重を表 3-4 に示す。

評価においては、保守的にコンクリートの剛性は考慮せず、デッキプレートのみを評価対象とし断面算定を行う。

また、気圧差による荷重は屋根スラブに作用し、スタッドに伝達されることから、スタッドを評価対象部位として設定するものとし、屋根スラブの支持にスタッドを用いる構造である原子炉建屋屋上屋根スラブについて評価を行う。

外壁については、原子炉建屋、タービン建屋の耐震壁を評価対象部位として設定し、タービン建屋については施設の外殻を構成する鉄骨架構も評価対象部位とする。

表 3-4 屋根スラブの自重

評価対象部位	スラブの厚さ (cm)	スラブの自重 (kN/m <sup>2</sup> )
原子炉建屋 屋上屋根スラブ		6.7
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ		3.5

### 3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」を踏まえて設定する。

#### (1) 荷重の設定

強度評価に用いる荷重は以下の荷重を用いる。荷重の算定に用いる竜巻の特性値を表 3-5 に示す。

表 3-5 荷重の算定に用いる竜巻の特性値

最大風速 $V_D$ (m/s)	移動速度 $V_T$ (m/s)	最大接線風速 $V_{Rm}$ (m/s)	最大気圧低下量 $\Delta P_{max}$ (N/m <sup>2</sup> )
92	14	78	6400

#### a. 常時作用する荷重 ( $F_d$ )

常時作用する荷重 ( $F_d$ ) は、部材の自重とする。

#### b. 風圧力による荷重 ( $W_w$ )

風圧力による荷重は、「建築基準法施行令」及び「建築物荷重指針・同解説」(日本建築学会)に準拠して、次式のとおり算出する。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

$$\text{ここで, } q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_D^2$$

#### c. 気圧差による荷重 ( $W_p$ )

気圧差による荷重は、次式のとおり算出する。

$$W_p = \Delta P_{max} \cdot A$$

#### d. 設計飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ )

設計飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ ) は、表 3-6 に諸元を示す設計飛来物の衝突に伴う荷重とする。また、設計飛来物の材料定数を表 3-7 に示す。

貫通評価及び裏面剥離評価においては、考慮する設計飛来物として衝突断面あたりの運動エネルギーが最大となるよう、水平方向の衝突として鋼製足場板を、鉛直方向の衝突として足場パイプを設定し、各設計飛来物の衝撃荷重を考慮する。また、評価対象部位に各設計飛来物が衝突した際に跳ね返らず、貫入する物として評価する。

表 3-6 設計飛来物の諸元

設計飛来物	寸法 長さ×幅×奥行き (m)	質量 (kg)	水平方向の 飛来速度 (m/s)	鉛直方向の 飛来速度 (m/s)	運動エネルギー (kJ)	
					水平方向	鉛直方向
足場パイプ	4×0.05×0.05	11	42	38	10	8
鋼製足場板	4×0.25×0.04	14	55	18	21	3

表 3-7 設計飛来物の材料定数

設計飛来物	降伏応力 $\sigma_y$ (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	塑性硬化係数 E' (MPa)	ポアソン比
足場パイプ	355	201667	2470	0.3
鋼製足場板	245	201667	1270	0.3

(2) 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せについては、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」のとおり、設計飛来物による衝撃荷重，風圧力による荷重，気圧差による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 3-8 に示す。

表 3-8 荷重の組合せ

評価内容	評価対象部位		設計飛来物の衝突方向	荷重の組合せ
貫通評価	Degen 式による評価			
	原子炉建屋	4 階 R7 通り内壁	水平	$W_M$
	タービン建屋	1 階非常用電気品室 南側内壁	水平	
	解析による評価			
	原子炉建屋	屋上屋根スラブ	鉛直	$W_M$
	タービン建屋	海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	鉛直	
裏面剥離評価	Chang 式による評価			
	原子炉建屋	4 階 R7 通り内壁	水平	$W_M$
	タービン建屋	1 階非常用電気品室 南側内壁	水平	
	解析による評価			
	原子炉建屋	屋上屋根スラブ	鉛直	$W_M$
	タービン建屋	海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	鉛直	
変形評価	力学における標準式による評価			
	原子炉建屋	屋上屋根スラブの スタッド	—	$W_P + F_d$
	タービン建屋	海水熱交換器区域 屋上屋根スラブの デッキプレート	—	
	地震応答解析モデルを用いた静的解析			
	原子炉建屋	耐震壁	水平	$W_w + 0.5W_P + W_M + F_d$
	タービン建屋	耐震壁	水平	
		鉄骨架構	水平	

注： $W_w$ ：風圧力による荷重

$W_P$ ：気圧差による荷重

$W_M$ ：設計飛来物による衝撃荷重

$F_d$ ：常時作用する荷重

### 3.4 許容限界

竜巻より防護すべき施設を内包する施設の許容限界は、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえて、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位の機能損傷モードを考慮して設定する。

#### 3.4.1 貫通評価

貫通評価のうち、式による評価の許容限界は評価対象部位の最小厚さとした。表 3-9 に設定した許容限界を示す。

表 3-9 貫通評価の許容限界（式による評価）

評価対象部位		許容限界 (cm)
原子炉建屋	4階 R7 通り内壁	25
タービン建屋	1階非常用電気品室南側内壁	30

貫通評価のうち、式により算定する貫通限界厚さが最小部材厚さを上回る場合における、解析による評価の許容限界を表 3-10 に示す。

表 3-10 貫通評価の許容限界（解析による評価）

評価対象部位		材質	許容限界
			鋼材の破断ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )
原子炉建屋 屋上屋根スラブ	鉄筋	SD345	□
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	デッキプレート	SDP2	

設計飛来物が屋根スラブへ直接衝突する場合の貫通評価における許容限界は、鋼材の破断ひずみを基本として設定する。破断ひずみについては、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2.1(1) 許容限界の設定」に示すとおり、J I Sに規定されている伸びの下限値を基に設定するが、NEI07-13においてTF(多軸性係数)を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮して設定する。

### 3.4.2 裏面剥離評価

裏面剥離評価の許容限界のうち、式による評価の許容限界は貫通評価の許容限界と同じであり、表 3-9 の通り。

式により算定する裏面剥離限界厚さが最小部材厚さを上回る場合における、解析による評価の許容限界を表 3-11 に示す。

表 3-11 裏面剥離評価の許容限界（解析による評価）

評価対象部位		材質	許容限界
			鋼材の破断ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )
原子炉建屋 屋上屋根スラブ	デッキプレート	SDP2	□
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	デッキプレート	SDP2	

設計飛来物が屋根スラブへ直接衝突する場合の裏面剥離評価における許容限界は、鋼材の破断ひずみを基本として設定する。破断ひずみについては、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2.1(1) 許容限界の設定」に示すとおり、J I Sに規定されている伸びの下限値を基に設定するが、NEI07-13においてTF(多軸性係数)を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮して設定する。

### 3.4.3 変形評価

変形評価の許容限界を表 3-12 に示す。

表 3-12 変形評価の許容限界

評価対象部位		許容限界	
		項目	数値
原子炉建屋 屋上屋根スラブ	スタッド	各種合成構造設計指針 に基づく許容耐力	19.0 (kN)
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	デッキプレート	J I S 及び鋼構造設計 規準に基づく 短期許容応力度	曲げ : 235 (N/mm <sup>2</sup> ) せん断 : 135 (N/mm <sup>2</sup> )
原子炉建屋	耐震壁	最大せん断ひずみ	$2.0 \times 10^{-3}$
タービン建屋	耐震壁	最大せん断ひずみ	$2.0 \times 10^{-3}$
	鉄骨架構	最大層間変形角	1/120*

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) (以下「技術基準解説書」という。) により設定。

### 3.5 評価方法

竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度評価は、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」を踏まえて、衝突評価として貫通評価を実施し、構造強度評価として裏面剥離評価、変形評価を実施する。

### 3.5.1 貫通評価

#### (1) 式による評価

設計飛来物が各施設に衝突する場合の貫通限界厚さを、NEI07-13 に示されている Degen 式を用いて算定する。Degen 式における貫入深さは、「タービンミサイル評価について（昭和 52 年 7 月 20 日原子炉安全専門審査会）」で用いられている修正 NDRC 式を用いて算定する。

Degen 式を以下に示す。

$1.52 \leq X/d \leq 13.42$  の場合

$$e = \alpha_e \cdot \{0.69 + 1.29 (X/d)\} \cdot d$$

$X/d \leq 1.52$  の場合

$$e = \alpha_e \cdot \{2.2 (X/d) - 0.3 (X/d)^2\} \cdot d$$

修正 NDRC 式を以下に示す。

$X/d \leq 2.0$  の場合

$$X/d = 2 \left\{ \left( 12145 / \sqrt{F_c} \right) \cdot N \cdot d^{0.2} \cdot D \cdot (V/1000)^{1.8} \right\}^{0.5}$$

$X/d \geq 2.0$  の場合

$$X/d = \left( 12145 / \sqrt{F_c} \right) \cdot N \cdot d^{0.2} \cdot D \cdot (V/1000)^{1.8} + 1$$

#### (2) 屋根スラブに対する衝突解析

設計飛来物に対して、Degen 式による貫通限界厚さを満足しない原子炉建屋屋上屋根スラブ、タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブについては、設計飛来物による衝撃荷重  $W_M$  を考慮し、3次元 FEM モデルを用いた衝突解析により屋根スラブの鉄筋に生じるひずみを算出し、許容限界を超えないことを確認する。鉄筋が敷設されていないタービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブについては、デッキプレートに生じるひずみを算出し、許容限界を超えないことを確認する。

なお、風圧力による荷重  $W_w$  及び気圧差による荷重  $W_p$  については、衝撃荷重と逆方向に作用するため、保守的に考慮せず、設計飛来物の衝突により発生する応力に対して、部材の自重による応力は極めて小さいことから常時作用する荷重  $F_d$  は考慮しない。

衝突解析には、解析コード「ABAQUS」を用いる。

a. 解析モデル及び諸元

(a). 原子炉建屋屋上屋根スラブ

原子炉建屋屋上屋根スラブの解析モデル化の範囲は、想定する荷重の伝達を考慮し、スラブを構成するコンクリート、鉄筋及びデッキプレートとする。コンクリートはソリッド要素でモデル化し、鉄筋を棒要素、デッキプレートをシェル要素でモデル化する。なお、デッキプレートはコンクリートと固着とする。原子炉建屋屋上屋根スラブの解析モデルの境界条件を表 3-13 に、解析モデル図を図 3-1 に示す。

表 3-13 解析モデルの境界条件（原子炉建屋屋上屋根スラブ）

項目		境界条件
原子炉建屋屋上屋根スラブ	屋根スラブ 端部	X, Y, Z 方向並進拘束

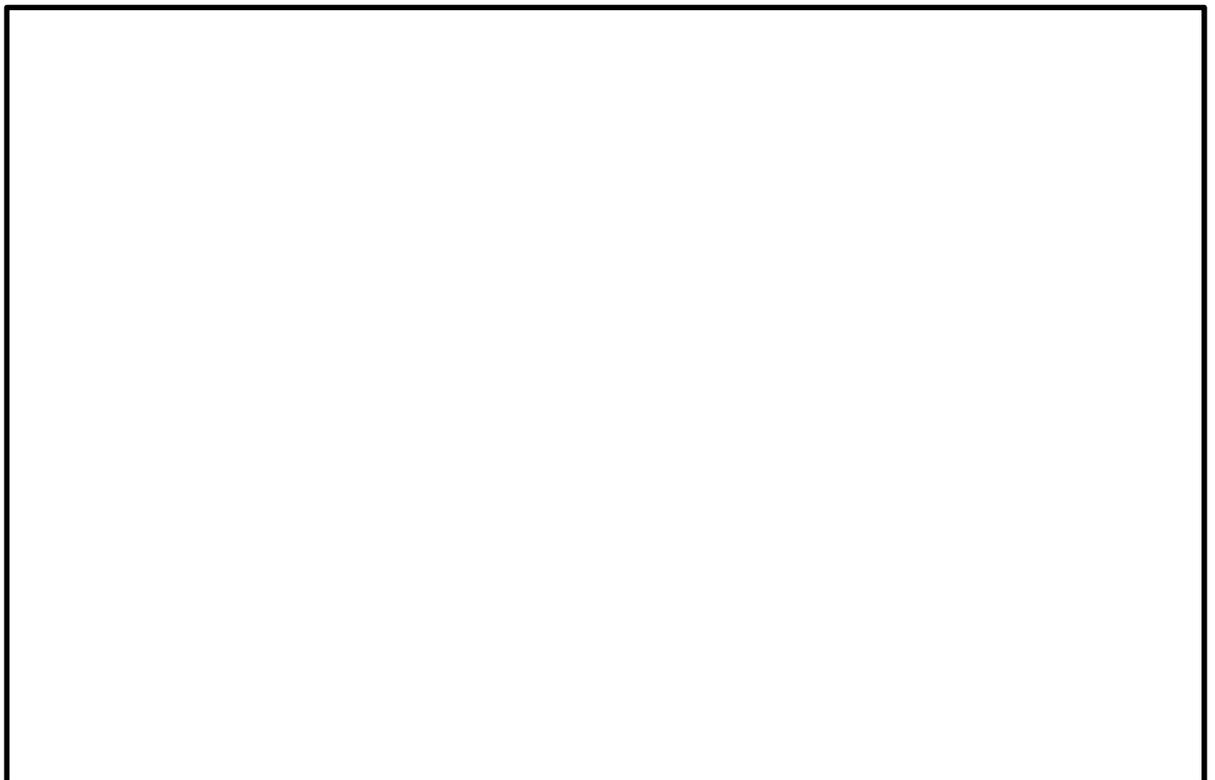


図 3-1 原子炉建屋屋上屋根スラブの解析モデル図

(b). タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブ

タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブの解析モデル化の範囲は、想定する荷重の伝達を考慮し、スラブを構成するコンクリート及びデッキプレートとする。鉄筋は敷設されていないため考慮しない。コンクリートはソリッド要素でモデル化し、デッキプレートはシェル要素でモデル化の上、コンクリートと固着とする。タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブの解析モデルの境界条件を表 3-14 に、解析モデル図を図 3-2 に示す。

表 3-14 解析モデルの境界条件（タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブ）

項目		境界条件
タービン建屋海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	屋根スラブ 端部	X, Y, Z 方向並進拘束

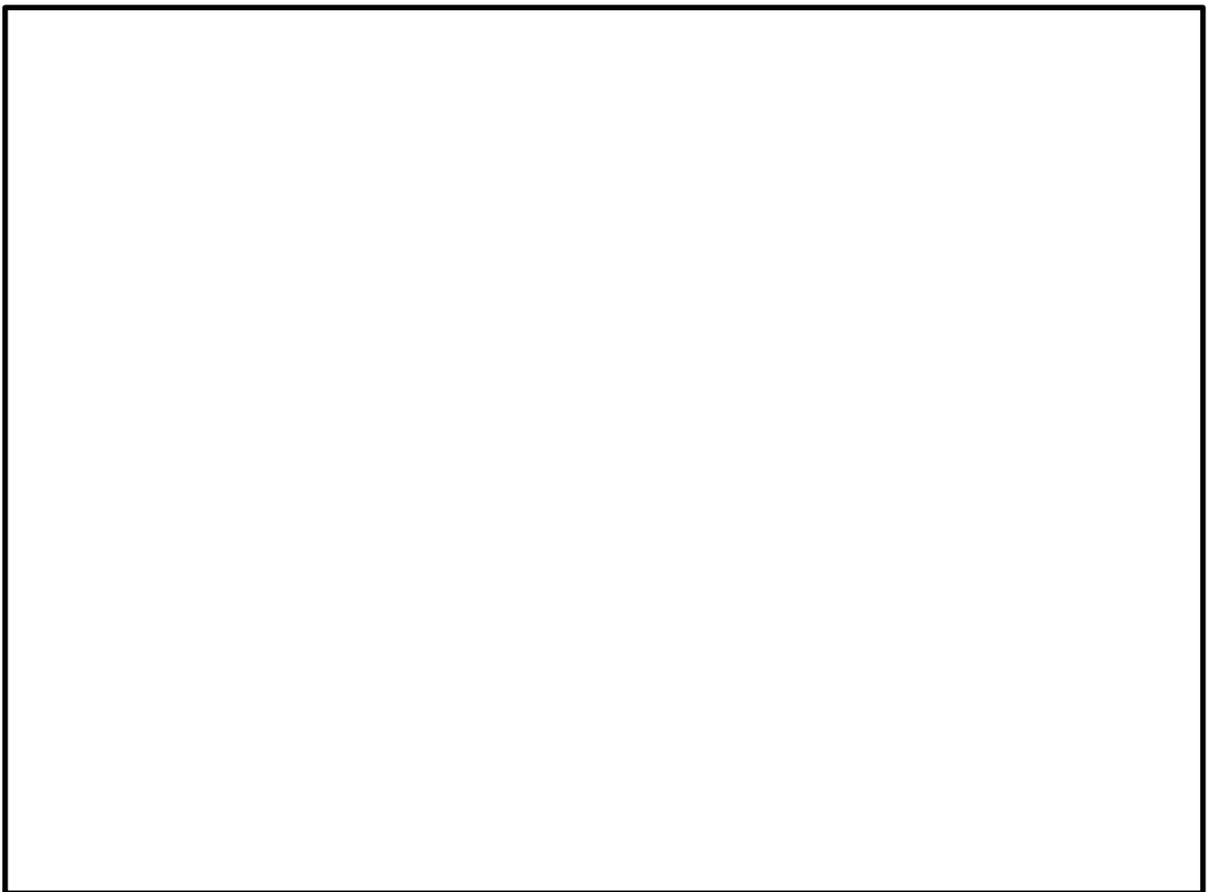


図 3-2 タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブの解析モデル図

(c) 設計飛来物

設計飛来物である足場パイプは、シェル要素でモデル化し、要素サイズ 10mm を基本とし分割する。衝突面から近い部分の要素サイズを細かくし、衝突面から離れた部分の要素サイズを順次粗くする。

設計飛来物の解析モデル図を図 3-3 に示す。

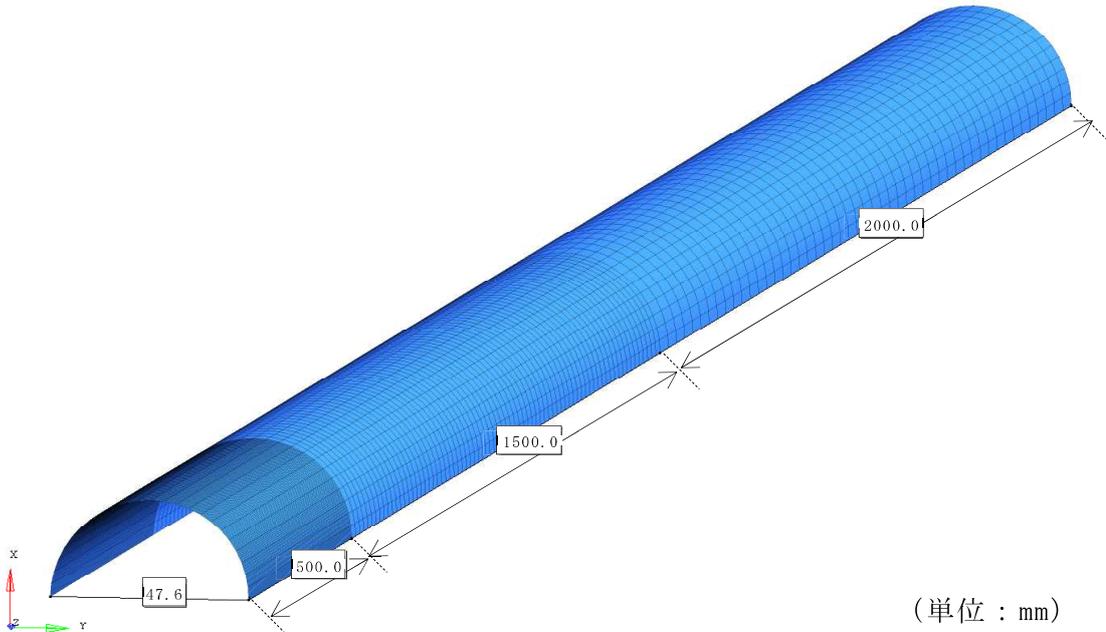


図 3-3 設計飛来物の解析モデル図 (足場パイプ 1/2 モデル)

b. 材料定数

コンクリート、鉄筋、デッキプレート の材料定数をそれぞれ表 3-15～表 3-17 に示す。設計飛来物の材料定数については、「3.3 荷重及び荷重の組合せ」の表 3-7 に示すとおり設定する。

表 3-15 コンクリートの材料定数

種類	評価対象部位	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (MPa)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )
軽量 コンクリート	原子炉建屋 屋上屋根スラブ	22.0	13600	0.2	16.67
	タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	13.2	9800	0.2	16.67

表 3-16 鉄筋の材料定数

種類	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (MPa)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )
SD345	345	205000	0.3	77.0

表 3-17 デッキプレートの材料定数

種類	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (MPa)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )
SDP2	235	205000	0.3	77.0

c. 材料の非線形特性

コンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮強度到達後に普通コンクリートと比較して脆性的な破壊性状を示す軽量コンクリートの特性を踏まえ、圧縮強度以降はヤング係数と同等の負勾配によって線形に軟化をする 2 折れ線近似とする。なお、圧縮強度に動的増加率は考慮しない。

鋼製部材である鉄筋の応力-ひずみ関係は、第 1 折れ点を「降伏応力-降伏ひずみ」、第 2 折れ点を「破断相当応力-破断相当ひずみ」とするトリリニア型とする。鉄筋の降伏応力は、降伏応力に動的増加率を乗じた値、破断相当応力は、動的増加率を乗じた降伏応力及び引張強さを結ぶ線のうち、規格値の伸びを「3.4 許容限界」にて示した T F (多軸性係数) で除したひずみ (破断相当ひずみ) 時に相当する応力とする。鉄筋の動的増加率は、NEI07-13 に基づく値 (降伏応力：, 引張強度：) とする。なお、デッキプレートについては保守的にひずみ速度効果による耐力上昇は考慮しない。

鉄筋、デッキプレートの破断ひずみは、J I S に規定されている伸びの下限值を基に設定する。また、NEI07-13 において T F (多軸性係数) を  とすることが推奨されていることを踏まえ、鉄筋、デッキプレートの破断相当ひずみは  $T F = \text{$  とする。なお、設計飛来物の破断相当ひずみは、設計飛来物が破断することなく継続的に荷重が掛かるように配慮し、 $T F = \text{$  とする。

コンクリート、鉄筋、デッキプレート及び設計飛来物の強度をそれぞれ表 3-18 及び表 3-19 に示す。

表 3-18 コンクリートの圧縮及び引張強度

評価対象部位	設計基準強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	材料モデル	
		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
原子炉建屋 屋上屋根スラブ	225		
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	135		

表 3-19 鉄筋，デッキプレート，設計飛来物の降伏及び破断強度

種別	材質	規格値（公称応力）		材料モデル（真応力，真ひずみ）		
		降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	破断応力 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	破断 相当応力 (N/mm <sup>2</sup> )	破断相当 塑性ひずみ (-)
鉄筋	SD345					
デッキ プレート	SDP2					
足場パイプ	STK500					

コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係，引張応力-ひび割れ幅関係，鉄筋，デッキプレート及び設計飛来物（足場パイプ）の応力-ひずみ関係をそれぞれ図 3-4～図 3-8 に示す。

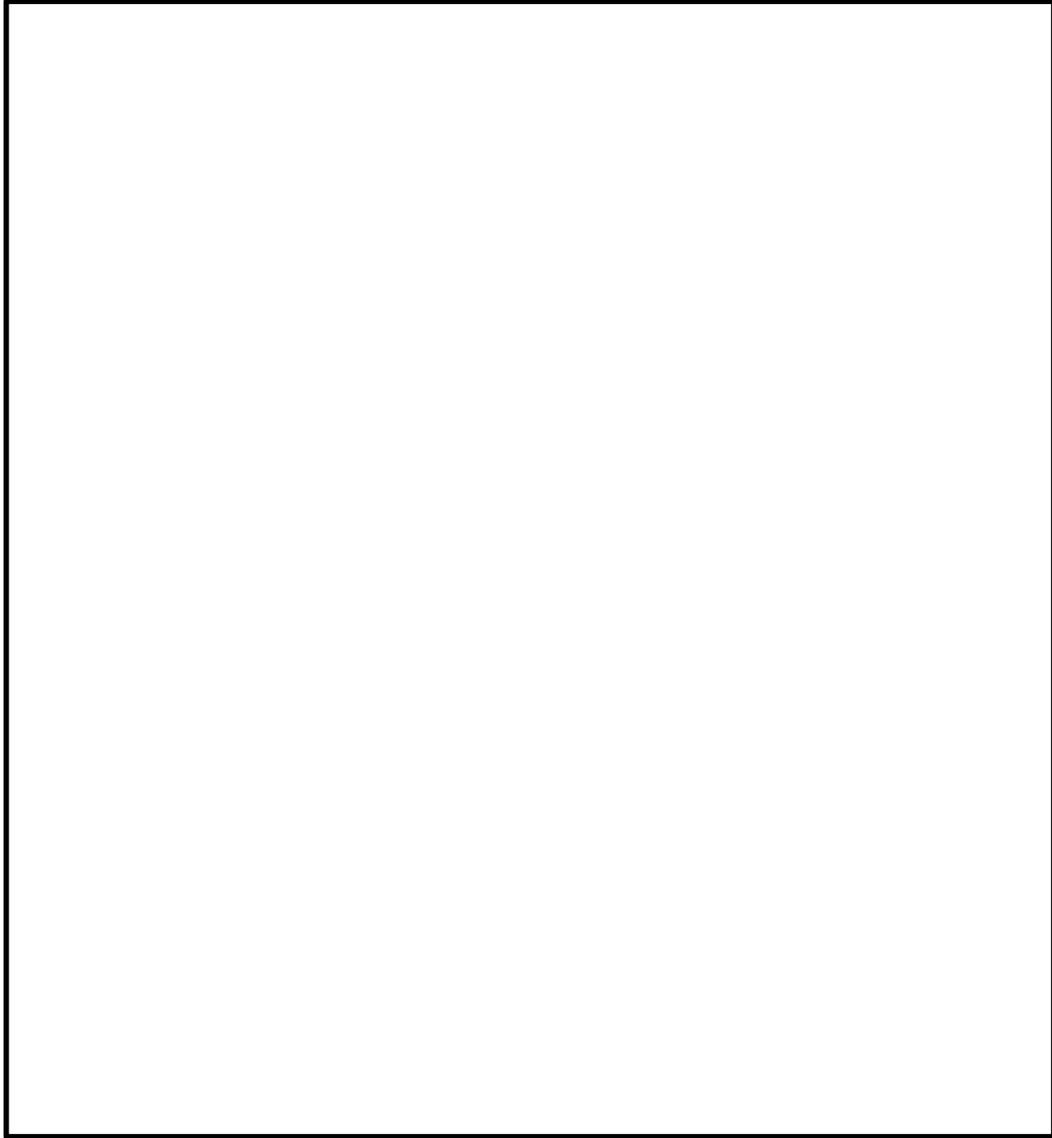


図 3-4 応力-ひずみ/ひび割れ幅関係  
(原子炉建屋屋上屋根スラブコンクリート)

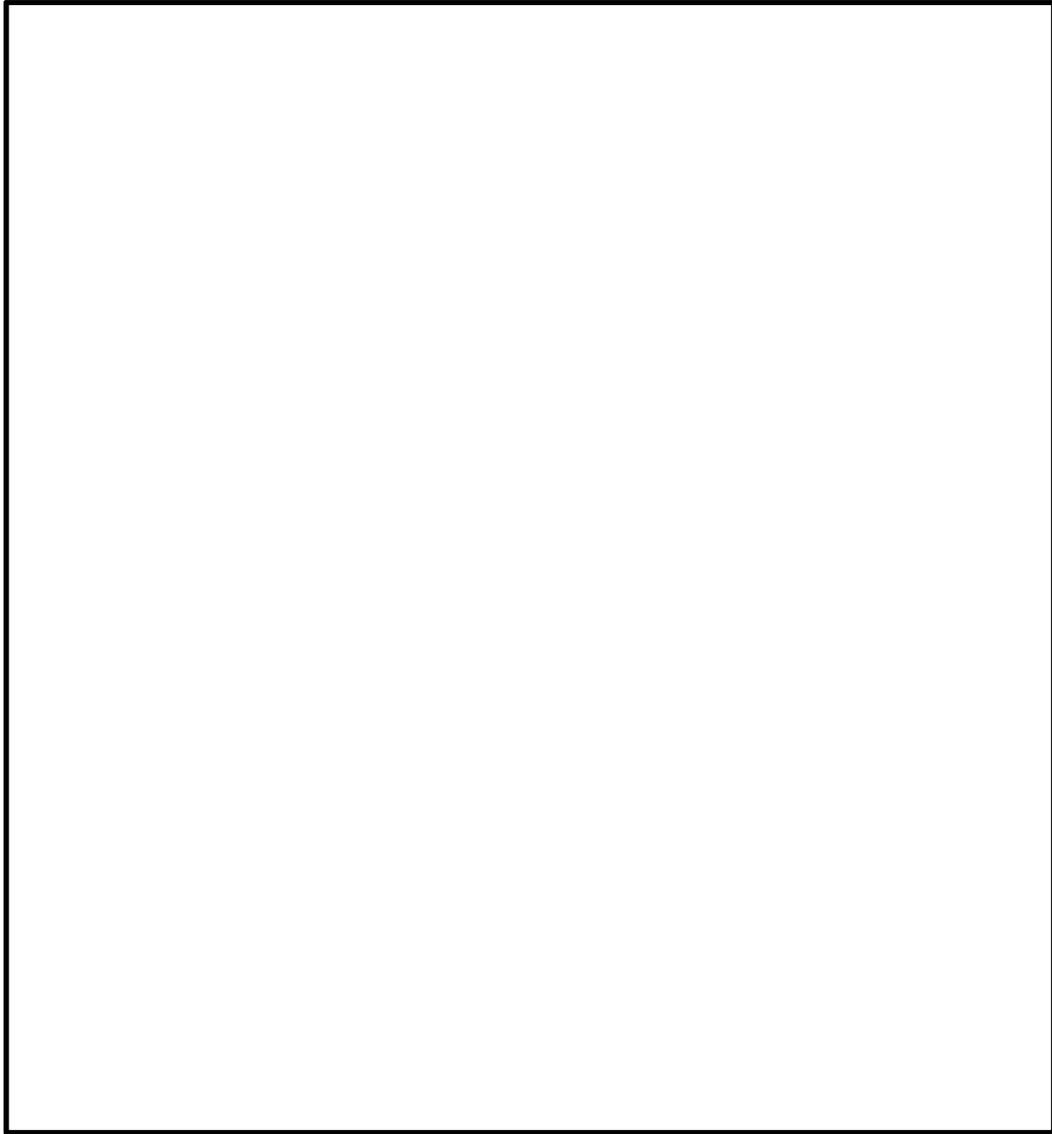


図 3-5 応力-ひずみ/ひび割れ幅関係  
(タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブコンクリート)

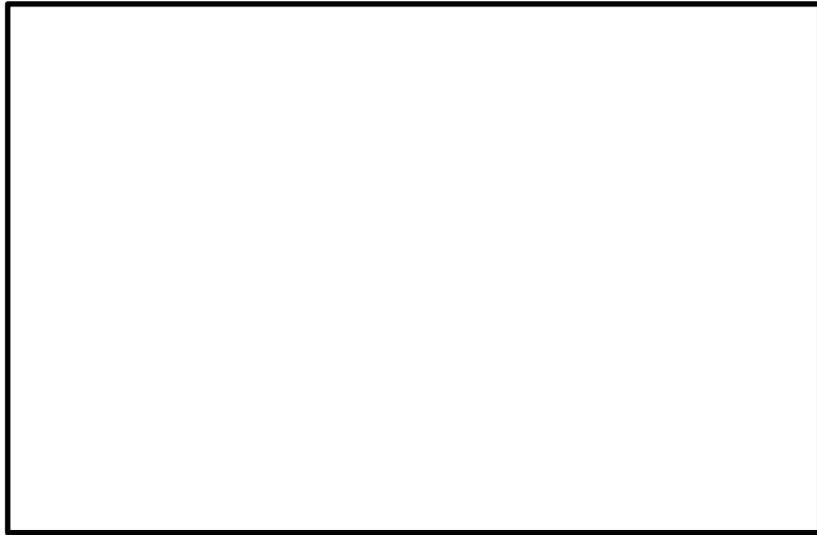


図 3-6 応力-ひずみ関係 (鉄筋)

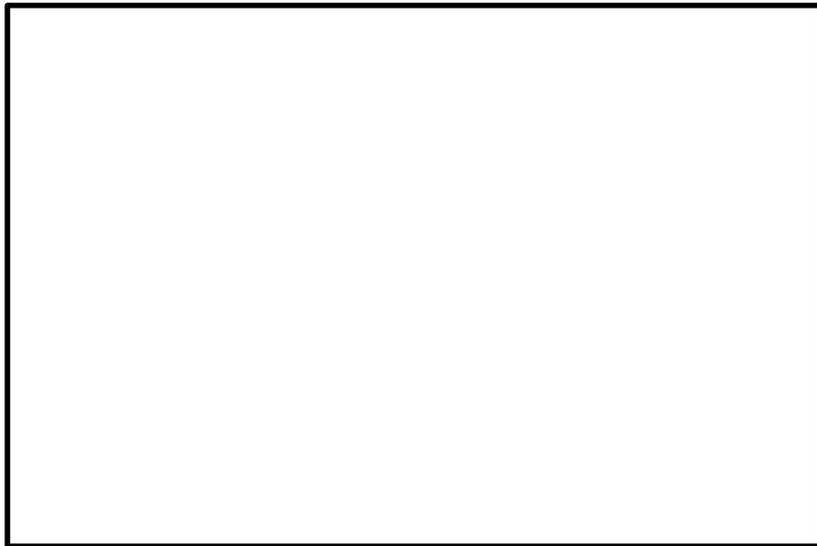


図 3-7 応力-ひずみ関係 (デッキプレート)



図 3-8 応力-ひずみ関係 (足場パイプ)

d. ひずみ速度効果

竜巻による設計飛来物に対する解析は、衝撃問題で変形速度が大きいため、ひずみ速度効果を考慮することとし、以下に示す Cowper-Symonds の式を適用する。

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

ここで、 $\sigma_D$ は動的応力、 $\sigma_S$ は静的応力、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、 $C$ 及び $P$ はひずみ速度依存性パラメータを表す。

ひずみ速度依存性パラメータを表 3-20 に示す。

表 3-20 ひずみ速度依存性パラメータ

材料	足場パイプ
材料	STK500
C (s <sup>-1</sup> )	<div style="border: 2px solid black; width: 100px; height: 20px;"></div>
P	<div style="border: 2px solid black; width: 100px; height: 20px;"></div>

3.5.2 裏面剥離評価

(1) 式による評価

設計飛来物が各施設に衝突する場合の裏面剥離限界厚さを、NEI07-13 に示されている Chang 式を用いて算定する。

Chang 式を以下に示す。

$$S = 1.84 \cdot \alpha_s \cdot \left( \frac{V_0}{V} \right)^{0.13} \cdot \frac{\left( \frac{W \cdot V^2}{0.0980} \right)^{0.4}}{d^{0.2} \cdot f_c^{0.4}}$$

(2) 屋根スラブに対する衝突解析

設計飛来物に対して、Chang 式による裏面剥離限界厚さを満足しない原子炉建屋屋上屋根スラブ、タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブについては、設計飛来物による衝撃荷重 $W_M$ を考慮し、貫通評価と同じ 3 次元 FEM モデルを用

いた衝突解析により屋根スラブのデッキプレートに生じるひずみを算出し、許容限界を超えないことを確認する。

なお、風圧力による荷重 $W_w$ 及び気圧差による荷重 $W_p$ については、衝撃荷重と逆方向に作用するため、保守的に考慮せず、設計飛来物の衝突により発生する応力に対して、部材の自重による応力は極めて小さいことから常時作用する荷重 $F_d$ は考慮しない。

衝突解析に使用する解析コード、解析モデル及び諸元、材料定数、材料の非線形特性、ひずみ速度効果は貫通評価における設定に同じ。

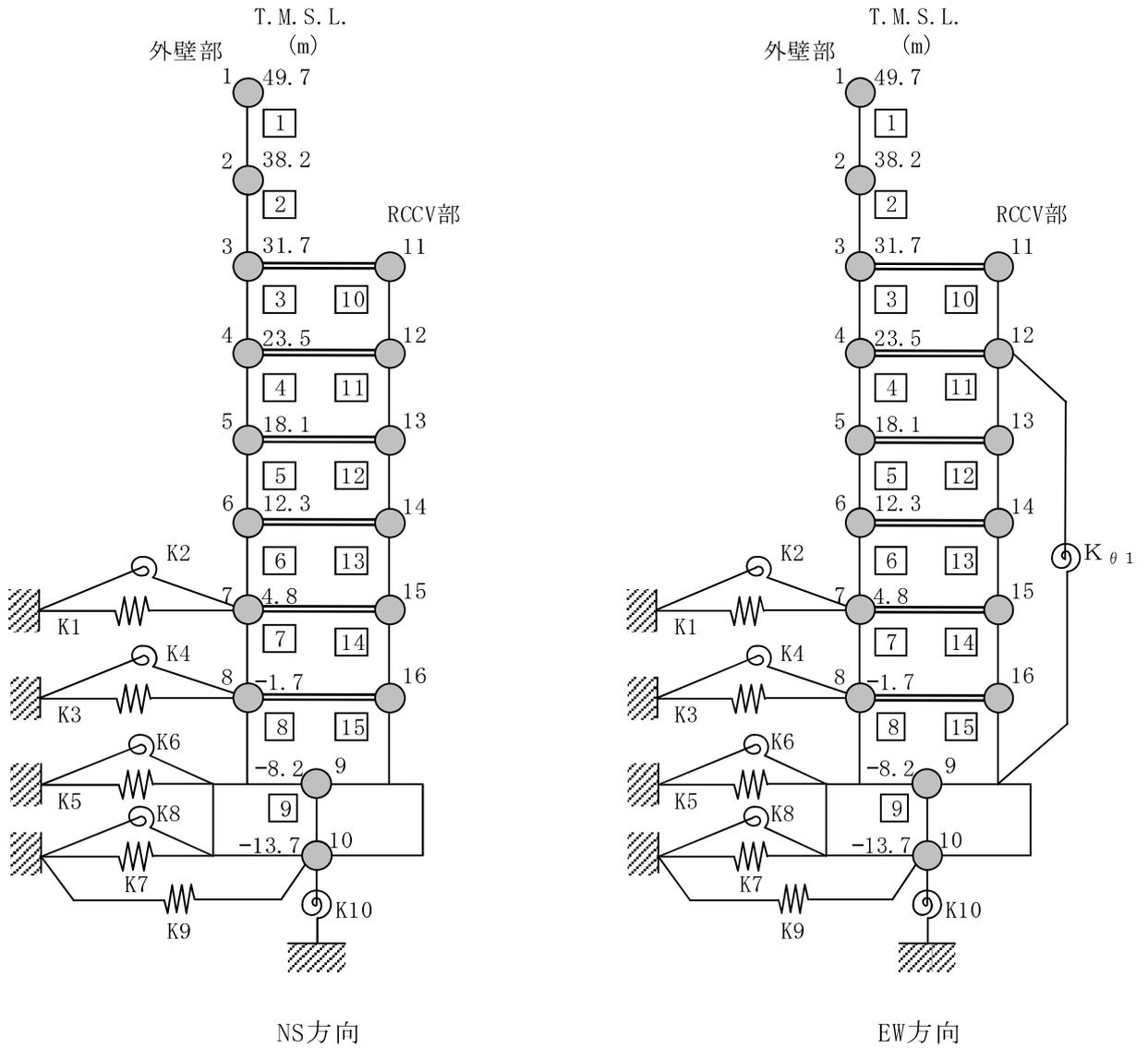
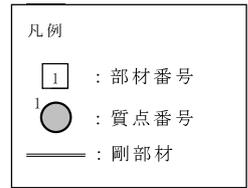
### 3.5.3 変形評価

#### (1) 耐震壁及び鉄骨架構

原子炉建屋、タービン建屋の耐震壁に生じるひずみとタービン建屋の鉄骨架構に生じる変形は、設計荷重による建屋のせん断スケルトン曲線（ $\tau - \gamma$ 関係）を用いて算定する。

原子炉建屋、タービン建屋の地震応答解析モデル図を図3-9～図3-10に、 $\tau - \gamma$ 関係を表3-21～表3-24に示す。

原子炉建屋、タービン建屋の地震応答解析モデル図及び $\tau - \gamma$ 関係はVI-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」、VI-2-2-5「タービン建屋の地震応答計算書」に示すとおり。



注： $K_{\theta 1}$ はRCCV回転ばねを示す。

図 3-9 原子炉建屋の地震応答解析モデル図  
(VI-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」より抜粋)

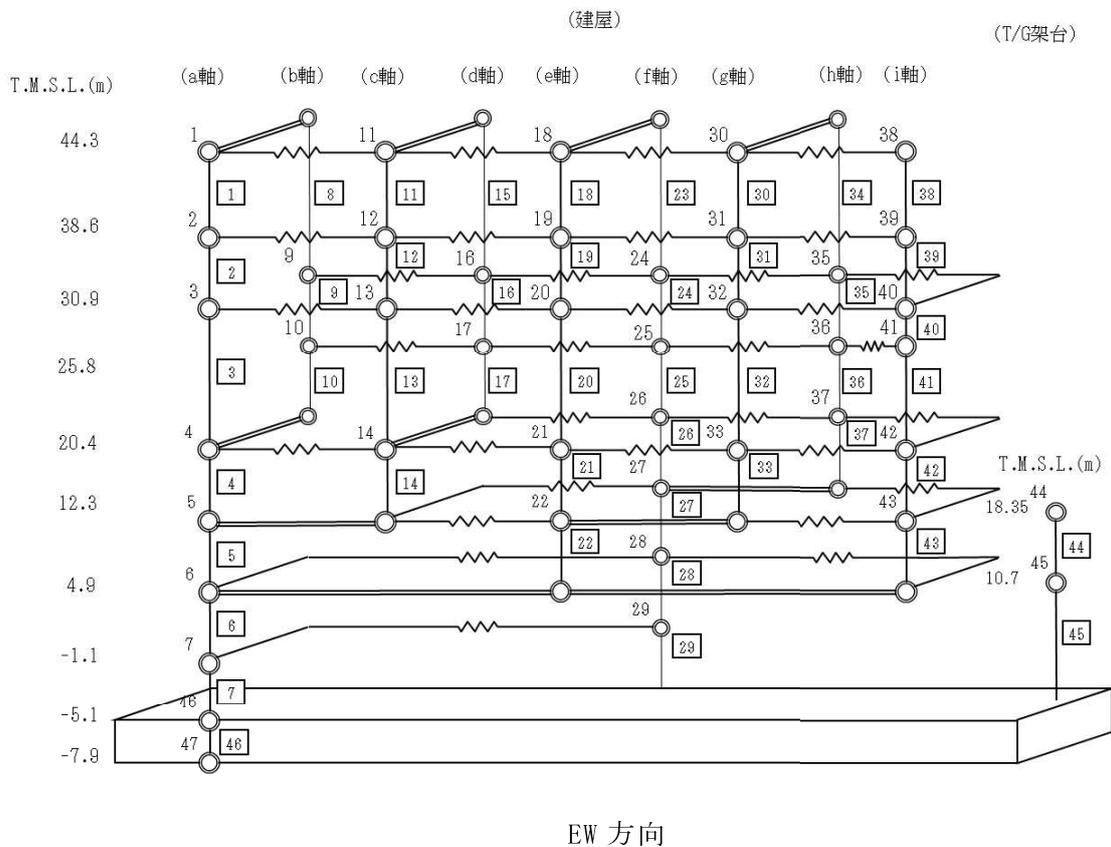
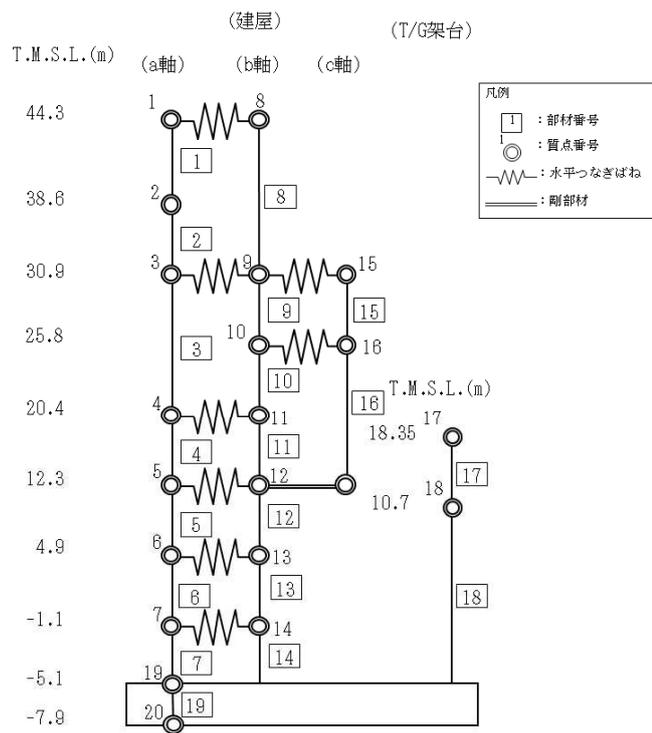


図 3-10 タービン建屋の地震応答解析モデル図  
(VI-2-2-5「タービン建屋の地震応答計算書」より抜粋)

表 3-21 原子炉建屋のせん断スケルトン曲線 ( $\tau - \gamma$  関係) (NS 方向)

部材 番号	第1折点		第2折点		終局点	
	$\tau_1$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_1$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\tau_2$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_2$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\tau_3$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_3$ ( $\times 10^{-3}$ )
1	2.38	0.198	3.21	0.597	6.87	4.00
2	2.35	0.196	3.17	0.589	6.46	4.00
3	2.33	0.194	2.87	0.605	4.89	4.00
4	2.45	0.204	3.26	0.621	6.70	4.00
5	2.44	0.204	3.14	0.632	6.35	4.00
6	2.57	0.214	3.40	0.655	6.93	4.00
7	2.66	0.222	3.55	0.674	7.34	4.00
8	2.66	0.222	3.48	0.689	6.99	4.00

表 3-22 原子炉建屋のせん断スケルトン曲線 ( $\tau - \gamma$  関係) (EW 方向)

部材 番号	第1折点		第2折点		終局点	
	$\tau_1$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_1$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\tau_2$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_2$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\tau_3$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_3$ ( $\times 10^{-3}$ )
1	2.44	0.203	3.29	0.611	6.54	4.00
2	2.40	0.200	3.24	0.601	6.65	4.00
3	2.49	0.208	3.35	0.627	6.53	4.00
4	2.40	0.200	3.14	0.611	6.26	4.00
5	2.41	0.201	3.14	0.616	6.50	4.00
6	2.49	0.207	3.28	0.633	6.89	4.00
7	2.56	0.213	3.38	0.653	7.09	4.00
8	2.56	0.213	3.29	0.670	6.61	4.00

表 3-23 タービン建屋のせん断スケルトン曲線 ( $\tau - \gamma$  関係) (NS 方向)

部材 番号	第1折点		第2折点		終局点	
	$\tau_1$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_1$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\tau_2$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_2$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\tau_3$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_3$ ( $\times 10^{-3}$ )
3	2.31	0.192	3.02	0.550	3.97	4.00
4	2.15	0.180	2.72	0.552	3.84	4.00
5	2.56	0.213	3.38	0.559	4.87	4.00
6	2.55	0.213	3.29	0.587	4.60	4.00
7	2.50	0.208	3.23	0.516	4.61	4.00
9	2.77	0.231	3.74	0.530	5.00	4.00
10	2.34	0.195	3.16	0.535	4.48	4.00
11	1.90	0.159	2.57	0.537	3.26	4.00
12	2.58	0.215	3.47	0.542	5.38	4.00
13	2.57	0.214	3.41	0.568	4.80	4.00
14	2.57	0.214	3.32	0.584	3.77	4.00

表 3-24 タービン建屋のせん断スケルトン曲線 ( $\tau - \gamma$  関係) (EW 方向)

部材 番号	第1折点		第2折点		終局点	
	$\tau_1$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_1$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\tau_2$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_2$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\tau_3$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_3$ ( $\times 10^{-3}$ )
3	2.40	0.200	3.24	0.564	4.70	4.00
4	2.26	0.189	3.06	0.566	6.19	4.00
5	2.45	0.204	3.11	0.538	4.80	4.00
6	2.41	0.201	3.03	0.598	4.52	4.00
7	2.44	0.204	3.05	0.613	4.29	4.00
9	2.31	0.193	3.12	0.534	4.92	4.00
10	2.50	0.209	3.38	0.546	6.73	4.00
13	2.61	0.217	3.47	0.555	4.03	4.00
14	2.47	0.205	3.33	0.548	4.49	4.00
16	3.27	0.273	4.42	0.529	5.52	4.00
17	2.70	0.225	2.71	0.675	2.75	4.00
20	1.73	0.144	2.15	0.556	2.15	4.00
21	2.39	0.199	2.44	0.576	2.44	4.00
22	2.83	0.236	3.17	0.565	3.17	4.00
24	1.87	0.156	2.53	0.531	4.00	4.00
25	2.05	0.171	2.77	0.545	3.49	4.00
26	1.96	0.163	2.64	0.554	2.94	4.00
27	2.47	0.206	3.33	0.540	4.36	4.00
28	2.70	0.225	3.62	0.549	4.34	4.00
29	3.22	0.268	4.35	0.583	4.99	4.00
32	1.44	0.120	1.73	0.547	1.76	4.00
33	3.34	0.278	3.75	0.639	3.75	4.00
35	1.87	0.156	2.52	0.529	4.00	4.00
36	2.03	0.169	2.74	0.545	3.49	4.00
37	2.95	0.246	3.99	0.554	4.52	4.00
40	2.66	0.222	3.52	0.549	6.46	4.00
41	2.16	0.180	2.87	0.533	5.12	4.00
42	2.36	0.197	3.04	0.526	5.03	4.00
43	2.42	0.201	3.07	0.600	5.42	4.00

設計荷重のうち、風圧力による荷重 $W_w$ は、建屋の形状を考慮して算出した風力係数及び受圧面積に基づき算出する。

気圧差による荷重 $W_p$ は、建屋の内部から外部に作用し、建屋の層全体の評価においては相殺される荷重であるが、保守的に $W_w$ と同じ方向にのみ作用すると見なす。

また、設計飛来物による衝撃荷重 $W_M$ は、各建屋の最上部に加える。ここで、地震応答解析モデルが多軸モデルの場合には、各軸の最上部の質点に $W_M$ を加え評価を行うものとし、次式の設計飛来物による衝撃荷重の算定式によって算出した運動エネルギーが最大となる鋼製足場板の衝撃荷重 $W_M=1100\text{kN}$ を用いて評価を行う。

$$F_m = m \cdot V / \tau = m \cdot V^2 / L_1$$

(2) 屋根スラブ

a. スタッド

原子炉建屋屋上屋根スラブについて、気圧差による荷重 $W_P$ によりスタッドに生じる引張力を算定し、許容限界を超えないことを確認する。スタッドに作用する引張力は、単位幅の屋根スラブに生じるせん断力を当該範囲のスタッドが均等に負担するものとして評価する。

スタッドに発生する引張力 $T$ の算定式を以下に示す。また、スタッドに作用する荷重の概要を図 3-11 に示す。

スタッド 1 本あたりの発生引張力

$$T = Q \cdot \frac{p}{1000}$$

ここで、 $Q = \frac{\omega_T \cdot L}{2}$

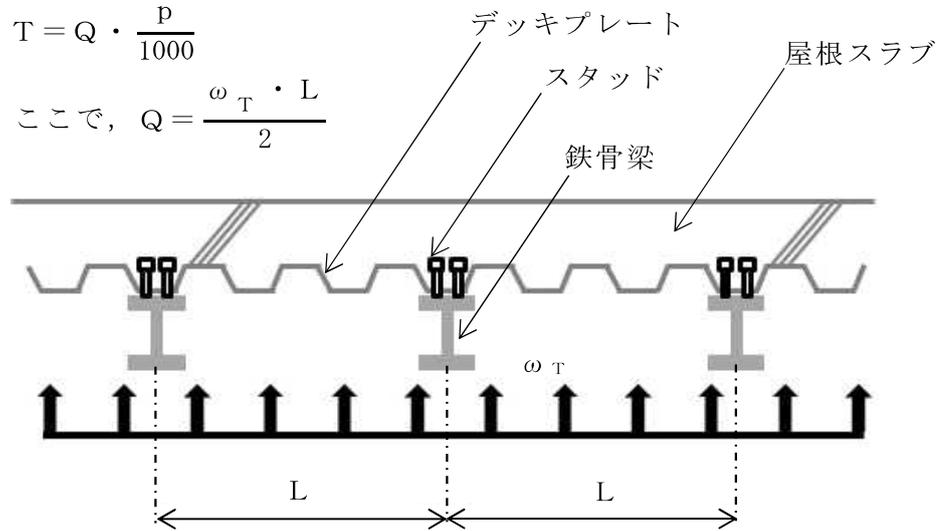


図 3-11 スタッドに作用する荷重の概要

スタッドの許容引張力は、各種合成構造設計指針・同解説に準拠し、スタッドの降伏により定まる場合の許容引張力  $p_{a1}$ 、定着したコンクリート躯体のコーン状破壊により定まる場合の許容引張力  $p_{a2}$ 、コンクリートの支圧破壊により定まる場合の許容引張力  $p_{a3}$  のうち、最も小さい値とする。スタッドの許容引張力  $p_a$  の算定式を以下に示す。

$$p_a = \text{Min} \{ p_{a1}, p_{a2}, p_{a3} \}$$

ここで、

$$p_{a1} = \Phi_1 \cdot s \cdot \sigma_{pa} \cdot a_c a$$

$$p_{a2} = \Phi_2 \cdot c \cdot \sigma_t \cdot A_c$$

$$p_{a3} = f_n \cdot A_0$$

b. デッキプレート

タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブについて、気圧差による荷重  $W_P$  及び常時作用する荷重  $F_d$  によりデッキプレートに発生する曲げモーメント及びせん断力を算定し、許容限界を超えないことを確認する。評価は、デッキプレートを支持する梁位置を支持点とした二連梁として行う。デッキプレートに発生する曲げモーメント  $M$  及びせん断力  $Q$  の算定式を以下に示す。また、デッキプレートに作用する荷重の概要を図 3-12 に示す。

デッキプレートに発生する単位幅あたりの曲げモーメント

$$M = \text{Max} \{M_1, M_2\}$$

ここで、

$$M_1 = \frac{9}{128} (\omega_T - \omega_d) \cdot L^2$$

$$M_2 = \frac{1}{8} (\omega_T - \omega_d) \cdot L^2$$

デッキプレートに発生する単位幅あたりのせん断力

$$Q = \frac{5}{4} (\omega_T - \omega_d) \cdot L$$

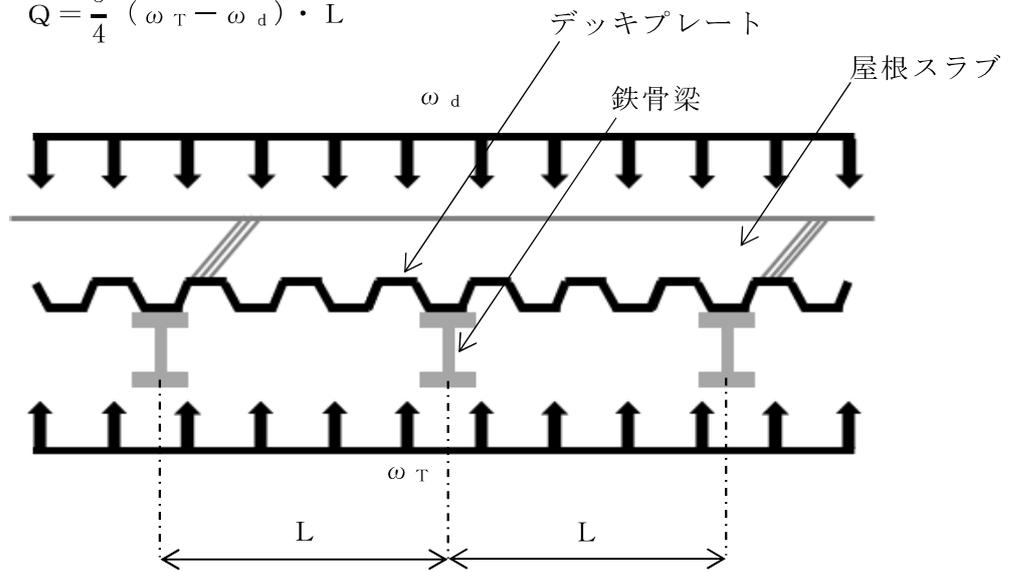


図 3-12 デッキプレートに作用する荷重の概要

許容限界であるデッキプレートの短期許容応力度は、JIS及び鋼構造設計規準に基づき算定する。

#### 4. 評価条件

##### 4.1 貫通評価

##### 4.1.1 式による評価

貫通評価において、各施設の壁、スラブの貫通評価式に用いる条件を表 4-1 に示す。

表 4-1 貫通評価に用いる入力値

記号	単位	定義		数値
D	kgf/cm <sup>3</sup>	設計飛来物直径密度 ( $D = W / d^3$ )		鋼製足場板 : $9.75 \times 10^{-3}$ 足場パイプ : $8.80 \times 10^{-2}$
d	cm	設計飛来物直径		鋼製足場板 : 11.28 足場パイプ : 5.00
F <sub>c</sub>	kgf/cm <sup>2</sup>	コンクリートの設計基準強度		330
N	—	設計飛来物の形状係数		鋼製足場板 : 1.14 足場パイプ : 1.14
V	m/s	壁面	設計飛来物の衝突速度 (水平)	55* <sup>1</sup>
		屋根	設計飛来物の衝突速度 (鉛直)	38* <sup>2</sup>
W	kgf	設計飛来物重量		鋼製足場板 : 14 足場パイプ : 11
α <sub>e</sub>	—	低減係数		1.0

注記\*1 : 水平方向の貫通限界厚さが大きくなる鋼製足場板の衝突速度。

\*2 : 鉛直方向の貫通限界厚さが大きくなる足場パイプの衝突速度。

##### 4.1.2 屋根スラブに対する衝突解析

屋根スラブの貫通評価における衝突解析は、屋根スラブの最大変形が生じると想定される評価対象の中央部に衝突するケースを設定する。

解析ケースを表 4-2 及び図 4-1～図 4-2 に示す。

表 4-2 解析ケース

評価対象	設計飛来物	衝突箇所	設計飛来物の衝突方向	対象部材
原子炉建屋 屋上屋根スラブ	足場 パイプ	中央部	鉛直	コンクリート (厚さ <input type="text"/> ) 鉄筋 (D13@100)
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	足場 パイプ	中央部	鉛直	コンクリート (厚さ <input type="text"/> )

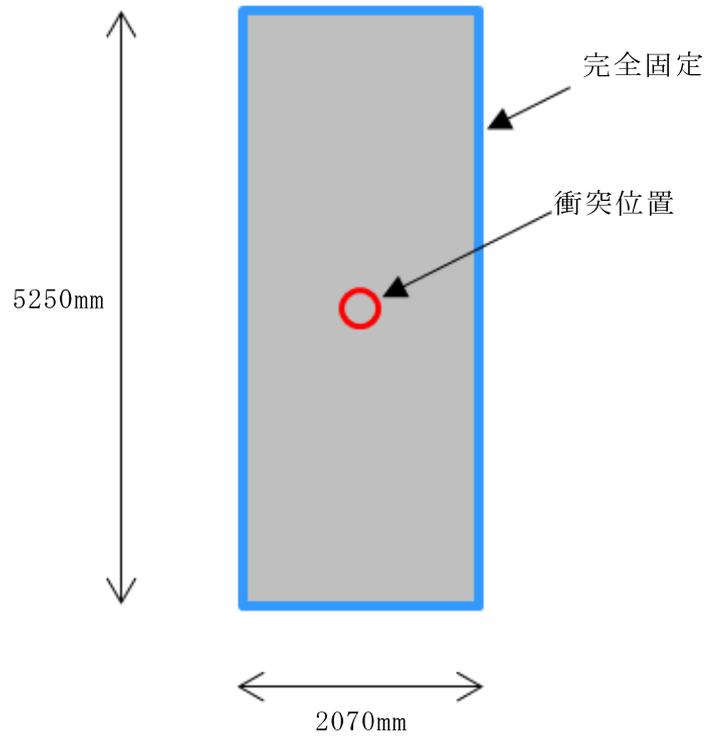


図 4-1 解析ケース (原子炉建屋屋上屋根スラブ)

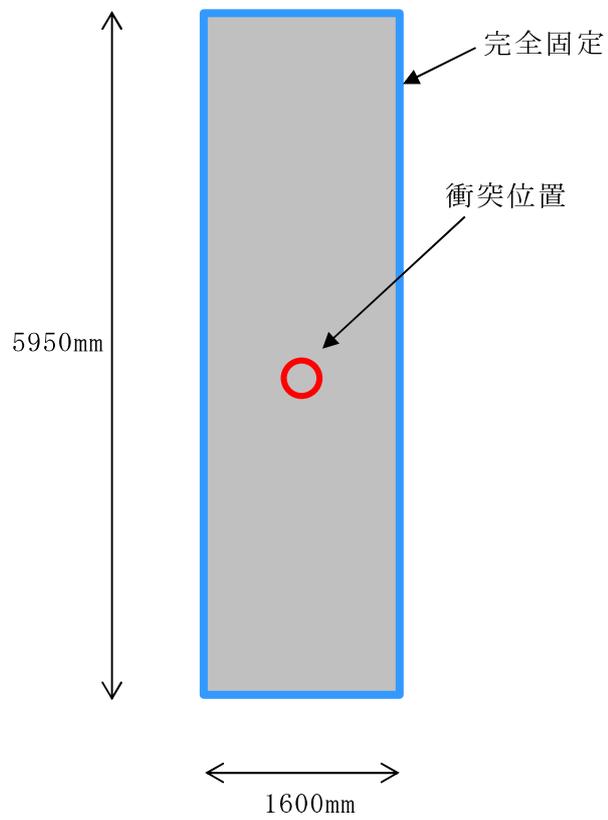


図 4-2 解析ケース (タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブ)

## 4.2 裏面剥離評価

### 4.2.1 式による評価

裏面剥離評価において、各施設の壁、スラブの裏面剥離評価式に用いる条件を表 4-3 に示す。

表 4-3 裏面剥離評価に用いる入力値

記号	定義		数値	単位
d	設計飛来物直径		鋼製足場板：11.28 足場パイプ：5.00	cm
$f_c'$	コンクリートの設計基準強度		330	kgf/cm <sup>2</sup>
V	壁面	設計飛来物の衝突速度（水平）	55* <sup>1</sup>	m/s
	屋根	設計飛来物の衝突速度（鉛直）	38* <sup>2</sup>	
$V_0$	飛来物基準速度		鋼製足場板：60.96 足場パイプ：60.96	m/s
W	設計飛来物重量		鋼製足場板：14 足場パイプ：11	kgf
$\alpha_s$	低減係数		1.0	—

注記\*1：水平方向の裏面剥離限界厚さが大きくなる鋼製足場板の衝突速度。

\*2：鉛直方向の裏面剥離限界厚さが大きくなる足場パイプの衝突速度。

### 4.2.2 屋根スラブに対する衝突解析

屋根スラブの裏面剥離評価における衝突解析は、屋根スラブの最大変形が生じると想定される評価対象の中央部に衝突するケースを設定する。

解析ケースは貫通評価と同じであり、表 4-2 及び図 4-1、図 4-2 の通り。

## 4.3 変形評価

### 4.3.1 耐震壁及び鉄骨架構

原子炉建屋、タービン建屋の耐震壁及びタービン建屋の鉄骨架構の変形評価に用いる条件を表 4-4～表 4-6 に示す。

なお、風力係数は風上、風下の質点の差異に関わらず、保守的に同じ値を用いるものとし、風力係数の設定方針の概念を図 4-3 に示す。

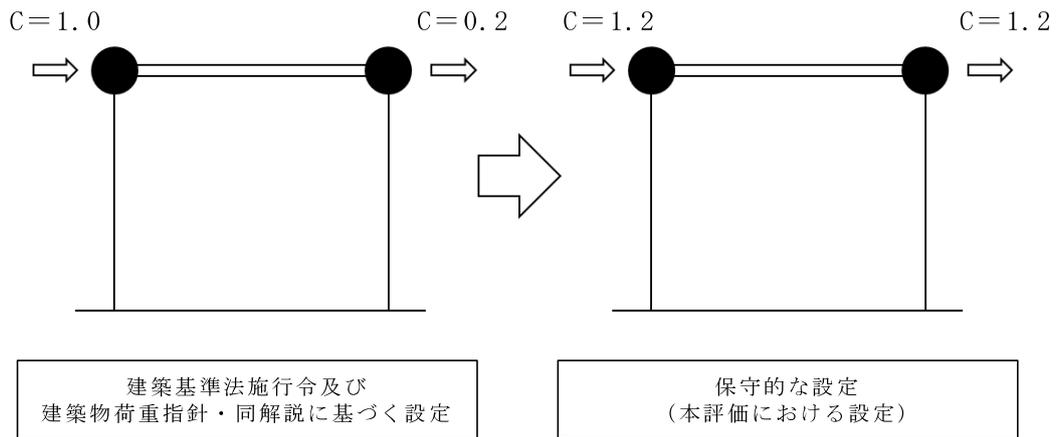


図 4-3 風力係数の設定方針の概念

表 4-4 設計飛来物による衝撃荷重の評価条件

記号	定義	数値	単位
$L_1$	設計飛来物の最も短い辺の全長	0.04	m
m	設計飛来物質量	14	kg
V	設計飛来物の衝突速度 (水平)	55	m/s

表 4-5 原子炉建屋の変形評価の評価条件

T. M. S. L. (m)	位置	風力係数 C	受圧面積 A ( $m^2$ )	
			NS 方向	EW 方向
43.95~50.89	風上	1.2	414	271
	風下	1.2		
34.95~43.95	風上	1.2	538	474
	風下	1.2		
27.60~34.95	風上	1.2	446	421
	風下	1.2		
20.80~27.60	風上	1.2	411	406
	風下	1.2		
15.20~20.80	風上	1.2	369	366
	風下	1.2		
12.00~15.20	風上	1.2	211	209
	風下	1.2		

表 4-6 タービン建屋の変形評価の評価条件

T. M. S. L. (m)	位置	風力係数 C	受圧面積 A (m <sup>2</sup> )	
			NS 方向	EW 方向
41.45～45.98	風上	1.2	262	452
	風下	1.2		
34.75～41.45	風上	1.2	380	650
	風下	1.2		
28.35～34.75	風上	1.2	500	621
	風下	1.2		
23.10～28.35	風上	1.2	433	509
	風下	1.2		
16.35～23.10	風上	1.2	570	657
	風下	1.2		
12.00～16.35	風上	1.2	375	427
	風下	1.2		

#### 4.3.2 屋根スラブ

##### (1) スタッド

原子炉建屋屋上屋根スラブのスタッドの変形評価に用いる条件を表 4-7 に示す。

表 4-7 スタッドの評価条件

記号	定義	数値	単位
$A_c$	コーン状破壊面の有効投影面積	21771	$\text{mm}^2$
$A_0$	スタッド頭部の支圧面積	459	$\text{mm}^2$
$a_c a$	スタッドの断面積で、 軸部断面積とねじ部有効断面積の小なる方の値	201	$\text{mm}^2$
$D$	スタッドの頭部直径	29	mm
$d$	スタッドの軸部直径	16	mm
$F_c$	コンクリートの設計基準強度	22.0	$\text{N/mm}^2$
$f_n$	コンクリートの支圧強度	132	$\text{N/mm}^2$
$l_e$	スタッドのコンクリート内への有効埋込み長さ	70	mm
$p_a$	スタッド 1 本あたりの許容引張力	19.0	kN
$p_{a1}$	スタッド鋼材の降伏により定まる場合の スタッド一本あたりの許容引張力	47.2	kN
$p_{a2}$	定着したコンクリート躯体の コーン状破壊により定まる場合の スタッド 1 本あたりの許容引張力	19.0	kN
$p_{a3}$	コンクリートの支圧破壊により定まる スタッド 1 本あたりの許容引張力	60.6	kN
$c \sigma_t$	コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度	1.31	$\text{N/mm}^2$
$s \sigma_{pa}$	スタッドの引張強度	235	$\text{N/mm}^2$
$s \sigma_y$	スタッドの規格降伏点強度	235	$\text{N/mm}^2$
$\Phi_1$	低減係数	1.0	—
$\Phi_2$	低減係数	0.667	—
$p$	スタッドの間隔（鉄骨梁の長さ方向）	300	mm
$p'$	スタッドの間隔（鉄骨梁のフランジ幅方向）	180	mm
$T$	スタッドに生じる引張力	2.1	kN

(2) デッキプレート

タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブのデッキプレートの変形評価に用いる条件を表 4-8 に示す。

表 4-8 デッキプレートの評価条件

記号	定義	数値	単位
L	デッキプレートの支持スパン	1.6	m
M	設計竜巻による単位幅あたりの曲げモーメント (=Max{M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> })	0.93	kN・m
M <sub>1</sub>	支持スパン中央部における 単位幅あたりの曲げモーメント	0.52	kN・m
M <sub>2</sub>	支持位置における 単位幅あたりの曲げモーメント	0.93	kN・m
Q	デッキプレートに生じる 単位幅のせん断力	5.80	kN/m
$\omega_d$	常時作用する荷重による 単位幅あたりの荷重	3.5	kN/m
$\omega_T$	設計竜巻による単位幅あたりの荷重 (=Max{ $\omega_{T1}$ , $\omega_{T2}$ })	6.4	kN/m
$\omega_{T1}$	複合荷重W <sub>T1</sub> による 単位幅あたりの荷重	6.4	kN/m
$\omega_{T2}$	複合荷重W <sub>T2</sub> による 単位幅あたりの荷重 (設計飛来物による衝撃荷重W <sub>M</sub> は考慮しない)	3.9	kN/m
t	デッキプレートの厚さ	2.3	mm
b	デッキプレートの単位幅	1000	mm

5. 強度評価結果

5.1 貫通評価

式による評価にて算定した貫通限界厚さと許容限界の比較を表 5-1 に示す。評価結果より、各施設の評価対象部位の許容限界が、設計飛来物による貫通を生じない貫通限界厚さを上回ることを確認した。

式による評価にて許容限界を満足しなかった原子炉建屋屋上屋根スラブ及びタービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブについて、解析による評価結果を表 5-2 及び図 5-1、図 5-2 に示す。

上記結果より、評価対象部位に設計飛来物による貫通が生じないことを確認した。

表 5-1 貫通評価結果（式による評価）

評価対象部位		設計飛来物	評価結果 (cm)	許容限界 (cm)
原子炉建屋	4階R7通り内壁	鋼製足場板	12	25
タービン建屋	1階非常用電気品室南側内壁	鋼製足場板	12	30

表 5-2 貫通評価結果（解析による評価）

評価対象部位		評価結果 ( $\times 10^{-6}$ )	許容限界 鋼材の破断ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )
原子炉建屋 屋上屋根スラブ	鉄筋	43700	□
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	デッキプレート	70900	

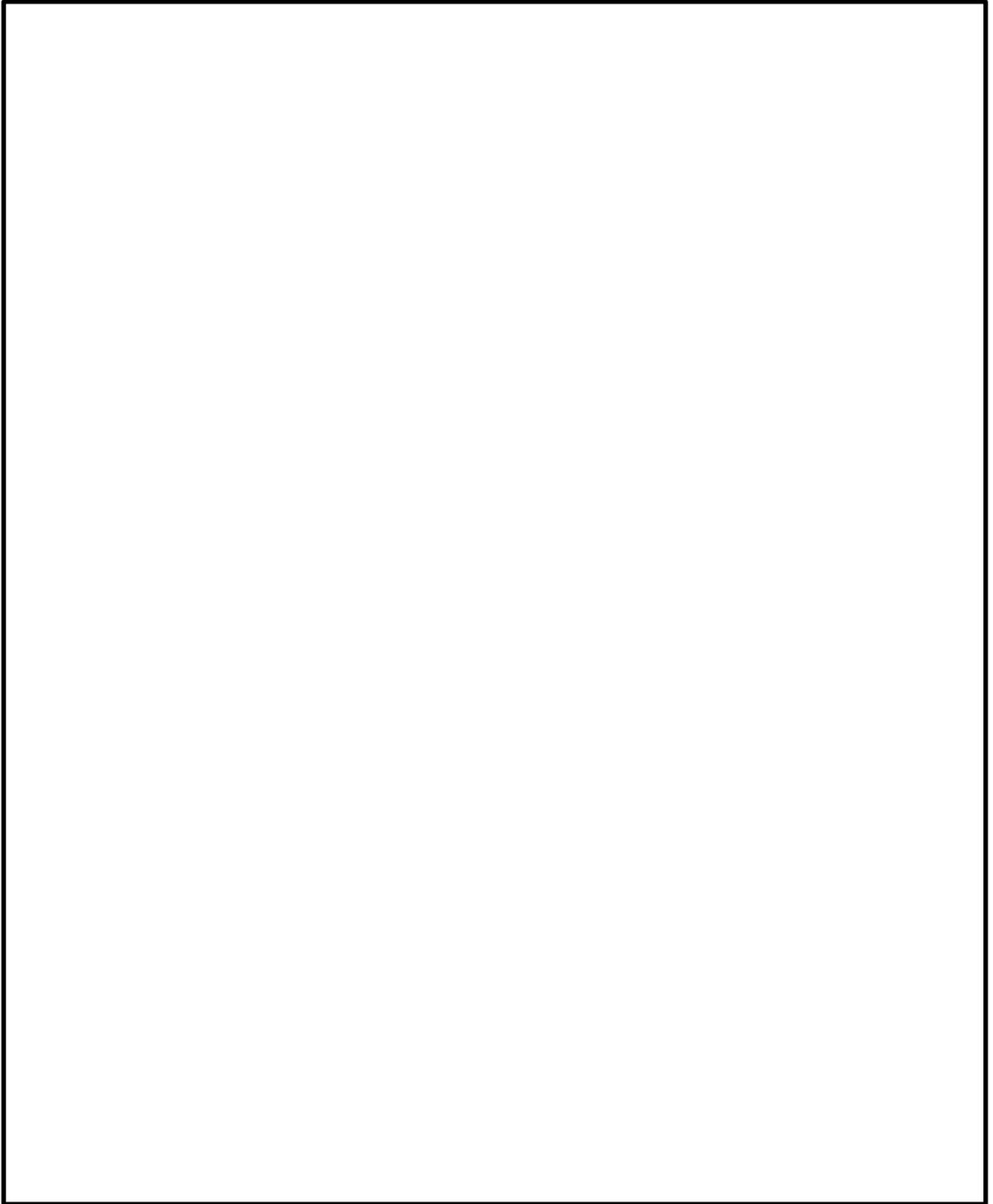


図 5-1 鉄筋のひずみ分布図（原子炉建屋屋上屋根スラブ）

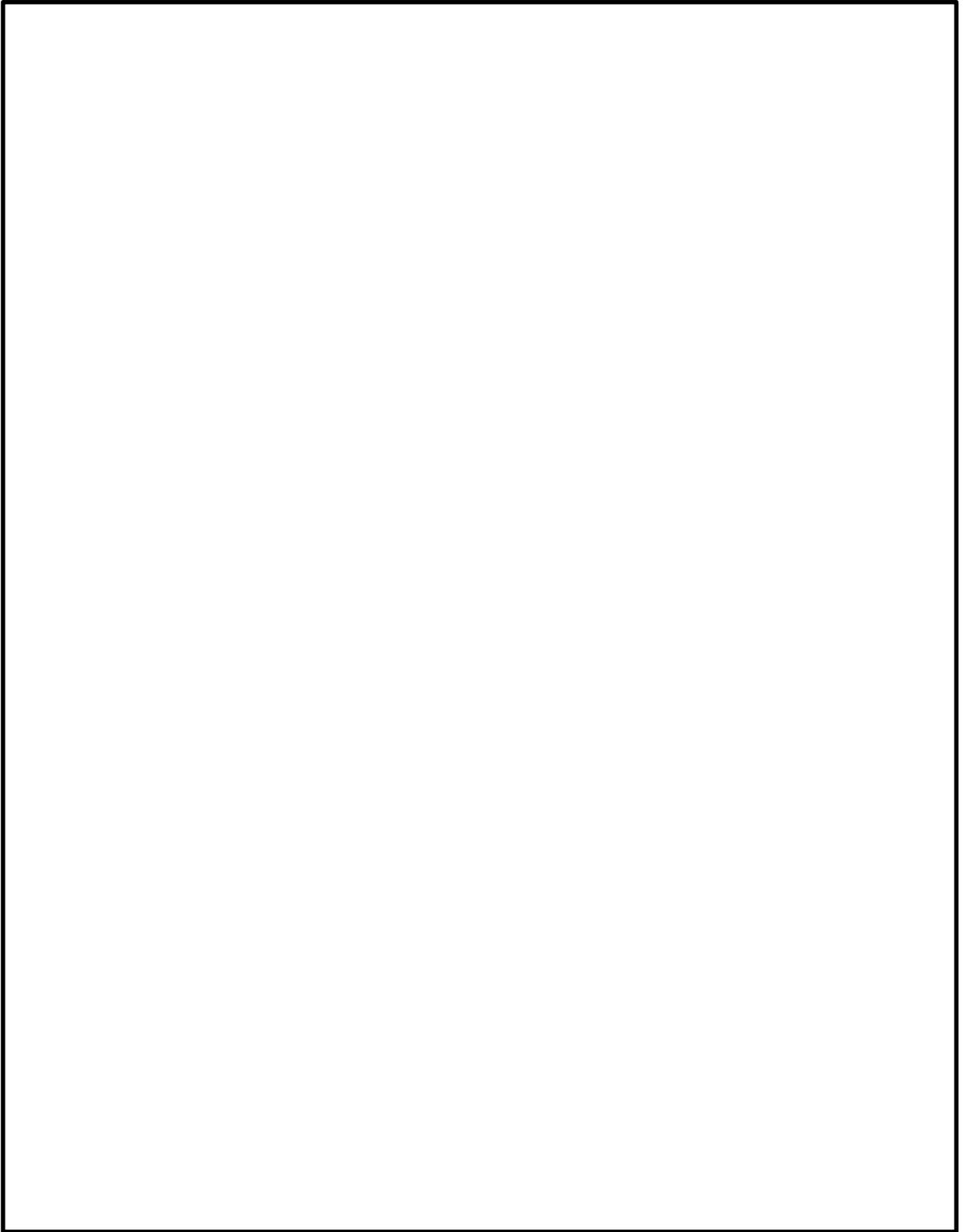


図 5-2 デッキプレートのひずみ分布図（タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブ）

## 5.2 裏面剥離評価

式による評価にて算定した裏面剥離限界厚さと許容限界の比較を表 5-3 に示す。評価結果より、各施設の評価対象部位の許容限界が、設計飛来物による裏面剥離を生じない裏面剥離限界厚さを上回ることを確認した。

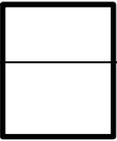
式による評価にて許容限界を満足しなかった原子炉建屋屋上屋根スラブ及びタービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブについて、解析による評価結果を表 5-4 及び図 5-3 に示す。タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブのデッキプレートの解析結果は貫通評価の評価結果と同じであることから、図 5-2 の通り。

上記結果より、評価対象部位に設計飛来物による裏面剥離が生じないことを確認した。

表 5-3 裏面剥離評価結果（式による評価）

評価対象部位		設計飛来物	評価結果 (cm)	許容限界 (cm)
原子炉建屋	4階R7通り内壁	鋼製足場板	21	25
タービン建屋	1階非常用電気品室南側内壁	鋼製足場板	21	30

表 5-4 裏面剥離評価結果（解析による評価）

評価対象部位		評価結果 ( $\times 10^{-6}$ )	許容限界
			鋼材の破断ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )
原子炉建屋 屋上屋根スラブ	デッキプレート	45100	
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	デッキプレート	70900	

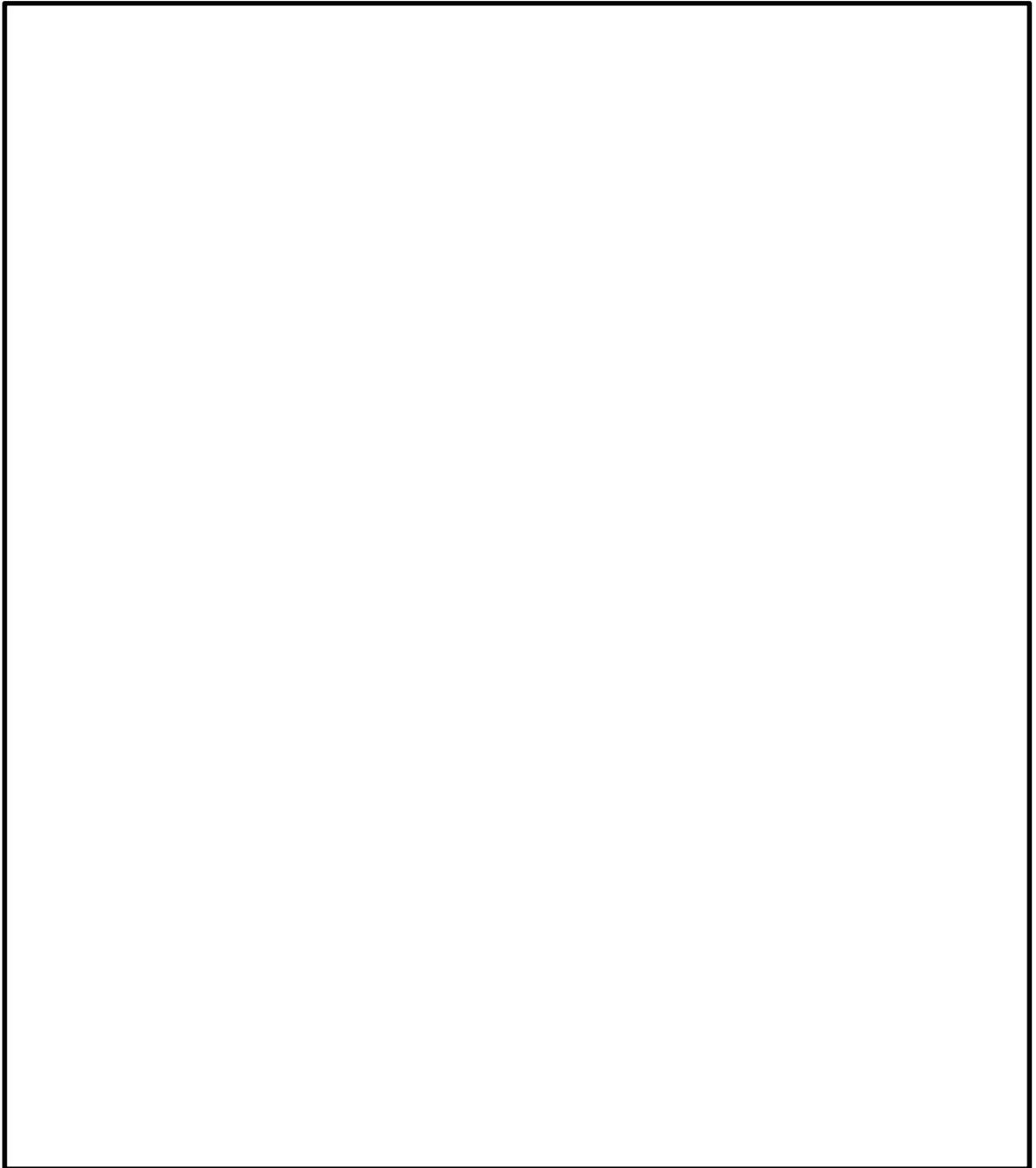


図 5-3 デッキプレートのひずみ分布図（原子炉建屋屋上屋根スラブ）

### 5.3 変形評価

#### 5.3.1 耐震壁及び鉄骨架構

各施設の耐震壁に生じるせん断ひずみと，各施設の鉄骨架構に生じる層間変形角について，許容限界との比較を表 5-5 に示す。

各施設の耐震壁に生じるひずみ及び各施設の鉄骨架構に生じる層間変形角が許容限界を超えないことを確認した。

表 5-5 変形評価結果（耐震壁及び鉄骨架構）

評価対象部位		評価結果	許容限界
耐震壁	原子炉建屋	$0.01 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$
	タービン建屋	$0.04 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3}$
鉄骨架構	タービン建屋	1/2119	1/120

注：NS 方向，EW 方向の評価結果のうち，最も評価結果が厳しい部材について評価結果を記載するものとする

### 5.3.2 屋根スラブ

#### (1) スタッド

原子炉建屋屋上屋根スラブのスタッドに生じる引張力と許容限界の比較を表 5-6 に示す。

評価結果より，スタッドに生じる引張力が許容限界を超えないことを確認した。

表 5-6 変形評価結果（スタッド）

評価対象部位		評価結果		許容限界 (kN)
		項目	数値 (kN)	
原子炉建屋 屋上屋根スラブ	スタッド	引張力	2.1	19.0

#### (2) デッキプレート

タービン建屋海水熱交換器区域屋上屋根スラブのデッキプレートに生じる応力度と許容限界の比較を表 5-7 に示す。

評価結果より，デッキプレートに生じる応力度が許容限界を超えないことを確認した。

表 5-7 変形評価結果（デッキプレート）

評価対象部位		評価結果		許容限界 (N/mm <sup>2</sup> )
		項目	数値 (N/mm <sup>2</sup> )	
タービン建屋 海水熱交換器区域 屋上屋根スラブ	デッキプレート	曲げ	13.2	235
		せん断	2.53	135