

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-029 改 01
提出年月日	2022年8月22日

工事計画に係る補足説明資料

(竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書)

2022年8月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## 補足説明資料目次

### I. はじめに

1. 強度計算の方針に関する補足説明資料
  - 1.1 風力係数
  - 1.2 強度計算時の施設の代表性
  - 1.3 構造強度評価における評価対象部位の選定
2. 竜巻防護対策設備の強度計算に関する補足説明資料
  - 2.1 シャックルの許容限界について
  - 2.2 飛来物のオフセット衝突の影響について
  - 2.3 金網の設計裕度の考え方
  - 2.4 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
  - 2.5 ワイヤロープの初期張力について
  - 2.6 補助金網の影響について
3. 竜巻防護対策設備の衝突解析に関する補足説明資料
  - 3.1 衝突解析の解析手法の保守性
4. 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算に関する補足説明資料
  - 4.1 設計飛来物の衝突による衝撃荷重の算定について
  - 4.2 鉄筋コンクリートの衝突解析モデルにおける破断限界の設定について
  - 4.3 タービン建物屋根スラブの貫通及び裏面剥離評価について
  - 4.4 鉄筋コンクリート部材の貫通及び裏面剥離評価について
5. 排気筒の強度計算に関する補足説明資料
  - 5.1 設計飛来物の衝突想定箇所について
  - 5.2 腐食代の考慮について
6. 排気管及びベント管の強度計算に関する補足説明資料
  - 6.1 非常用ディーゼル発電設備及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備排気管の許容応力

: 今回提出範囲

## I. はじめに

### 1. 概要

本補足説明資料は、以下の説明書についての内容を補足するためのものである。

本補足説明資料と添付書類との関係を表 1 に示す。

- ・ VI-3-別添 1 「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算書」

表 1 補足説明資料と添付書類との関連 (1/3)

竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書の補足説明資料	該当添付書類
<p>1. 強度計算の方針に関する補足説明資料</p> <p>1.1 風力係数</p> <p>1.2 強度計算時の施設の代表性</p> <p>1.3 構造強度評価における評価対象部位の選定</p>	<p>VI-3-別添 1-7 「原子炉補機海水ポンプ及び高压炉心スプレイ補機海水ポンプの強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-8 「海水ストレーナの強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-9 「配管及び弁の強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-13-2 「消音器の強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-13-3 「排気管及びベント管の強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-7 「原子炉補機海水ポンプ及び高压炉心スプレイ補機海水ポンプの強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-8 「海水ストレーナの強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-9 「配管及び弁の強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-11 「空調換気設備の強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-12 「非常用発電装置の強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-13-2 「消音器の強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-13-3 「排気管及びベント管の強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-7 「原子炉補機海水ポンプ及び高压炉心スプレイ補機海水ポンプの強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-8 「海水ストレーナの強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-9 「配管及び弁の強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-11 「空調換気設備の強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-12 「非常用発電装置の強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-13-2 「消音器の強度計算書」</p> <p>VI-3-別添 1-13-3 「排気管及びベント管の強度計算書」</p>

表 1 補足説明資料と添付書類との関連 (2/3)

竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書の補足説明資料	該当添付書類					
<p>4. 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算に関する補足説明資料</p> <table border="1" data-bbox="408 1391 798 2033"> <tr> <td data-bbox="408 1391 504 2033">4.1 設計飛来物の衝突による衝撃荷重の算定について</td> <td data-bbox="408 208 798 1391" rowspan="4">                     VI-3-別添 1-6 「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」                 </td> </tr> <tr> <td data-bbox="504 1391 600 2033">4.2 鉄筋コンクリートの衝突解析モデルにおける破断限界の設定について</td> </tr> <tr> <td data-bbox="600 1391 695 2033">4.3 タービン建物屋根スラブの貫通及び裏面剥離評価について</td> </tr> <tr> <td data-bbox="695 1391 798 2033">4.4 鉄筋コンクリート部材の貫通及び裏面剥離評価について</td> </tr> </table>	4.1 設計飛来物の衝突による衝撃荷重の算定について	VI-3-別添 1-6 「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」	4.2 鉄筋コンクリートの衝突解析モデルにおける破断限界の設定について	4.3 タービン建物屋根スラブの貫通及び裏面剥離評価について	4.4 鉄筋コンクリート部材の貫通及び裏面剥離評価について	
4.1 設計飛来物の衝突による衝撃荷重の算定について	VI-3-別添 1-6 「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」					
4.2 鉄筋コンクリートの衝突解析モデルにおける破断限界の設定について						
4.3 タービン建物屋根スラブの貫通及び裏面剥離評価について						
4.4 鉄筋コンクリート部材の貫通及び裏面剥離評価について						

: 今回提出範囲

表 1 補足説明資料と添付書類との関連 (3/3)

<p>竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書の補足説明資料</p>	<p>該当添付書類</p>
<p>6. 排気管及びびべント管の強度計算に関する補足説明資料</p> <p>6.1 非常用ディーゼル発電設備及び高压炉心スプレイ系ディーゼル発電設備排気管の許容応力</p>	<p>VI-3-別添1-13-3「排気管及びびべント管の強度計算書」</p>

4. 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算  
に関する補足説明資料

#### 4.1 設計飛来物の衝突による衝撃荷重の算定について



## 1. 概要

本資料では、VI-3-別添 1-6「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」の地震応答解析モデルを用いた建物の全体的な応答の評価における設計飛来物による衝撃荷重 $W_M$ の保守性について説明する。

## 2. 算定方法及び算定結果

VI-3-別添 1-6「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」における地震応答解析モデルを用いた建物の全体的な応答の評価において、水平方向の設計飛来物による衝撃荷重 $W_M$ は、設計飛来物と被衝突体の接触時間を設定し、設計飛来物の衝突前の運動量と衝撃荷重による力積が等しいものとする下式により算定している。

$$W_M = m \cdot V / \Delta t = m \cdot V^2 / L_1$$

ここで、

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

設計飛来物による衝撃荷重 $W_M$ の算定結果を表 2-1 に示す。

表 2-1 設計飛来物による衝撃荷重 $W_M$ の算定における評価条件及び結果

設計飛来物 質量 $m$ (kg)	設計飛来物の 衝突速度 $V$ (m/s)	設計飛来物の最も短い 辺の全長 $L_1$ (m)	設計飛来物に よる衝撃荷重 $W_M$ (kN)
135	51	0.2	1760

### 3. 算定結果の保守性について

#### 3.1 検討概要

設計飛来物の衝突による衝撃荷重は、設計飛来物の衝突角度や断面形状等により変動するが、地震応答解析モデルを用いた評価においては、設計飛来物と被衝突体の接触時間を設定することで運動量と力積の関係に基づき算定している。

ここでは、VI-3-別添 1-6「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」の「3.5.3 変形評価」図3-8～図3-11に示す地震応答解析モデルを用いた評価における衝撃荷重の算定結果の保守性を確認するため、3次元有限要素法を用いた衝突解析を実施し、時刻歴衝撃荷重を算定する。また、得られた時刻歴衝撃荷重に対し応答スペクトルを求め、建物の固有周期を考慮することで、建物に作用する衝撃荷重を評価する。なお、衝突解析には、解析コード「LS-DYNA」を用いる。

検討フローを図3-1に示す。

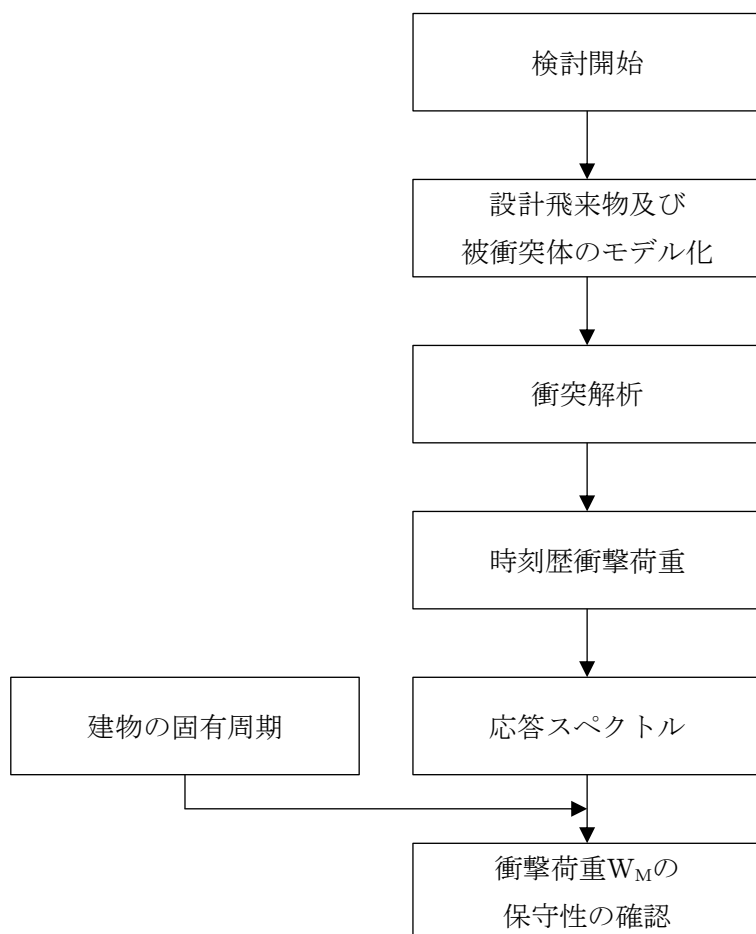


図3-1 検討フロー

### 3.2 衝突解析方法

設計飛来物である鋼製材が、水平方向の最大速度である 51 (m/s) で被衝突体に衝突するものとする。解析は、被衝突体に対し設計飛来物が最小断面積で衝突する場合（ケース①軸方向衝突）及び最大断面積で衝突する場合（ケース②軸直行方向衝突）を想定する。

解析モデルとして、設計飛来物をシェル要素でモデル化する。設計飛来物の諸元及び材料定数並びにモデル化における非線形特性は、VI-3-別添 1-6「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」における衝突解析モデルと同一とする。被衝突体については、設計飛来物と被衝突体の接触時間を短くし、時刻歴衝撃荷重を保守的に評価するため、剛体とする。

解析モデルの概略図を図 3-2 に示す。

時刻歴衝撃荷重は被衝突体の支持反力の合計値とする。また、得られた時刻歴衝撃荷重に対する応答スペクトルを評価する。

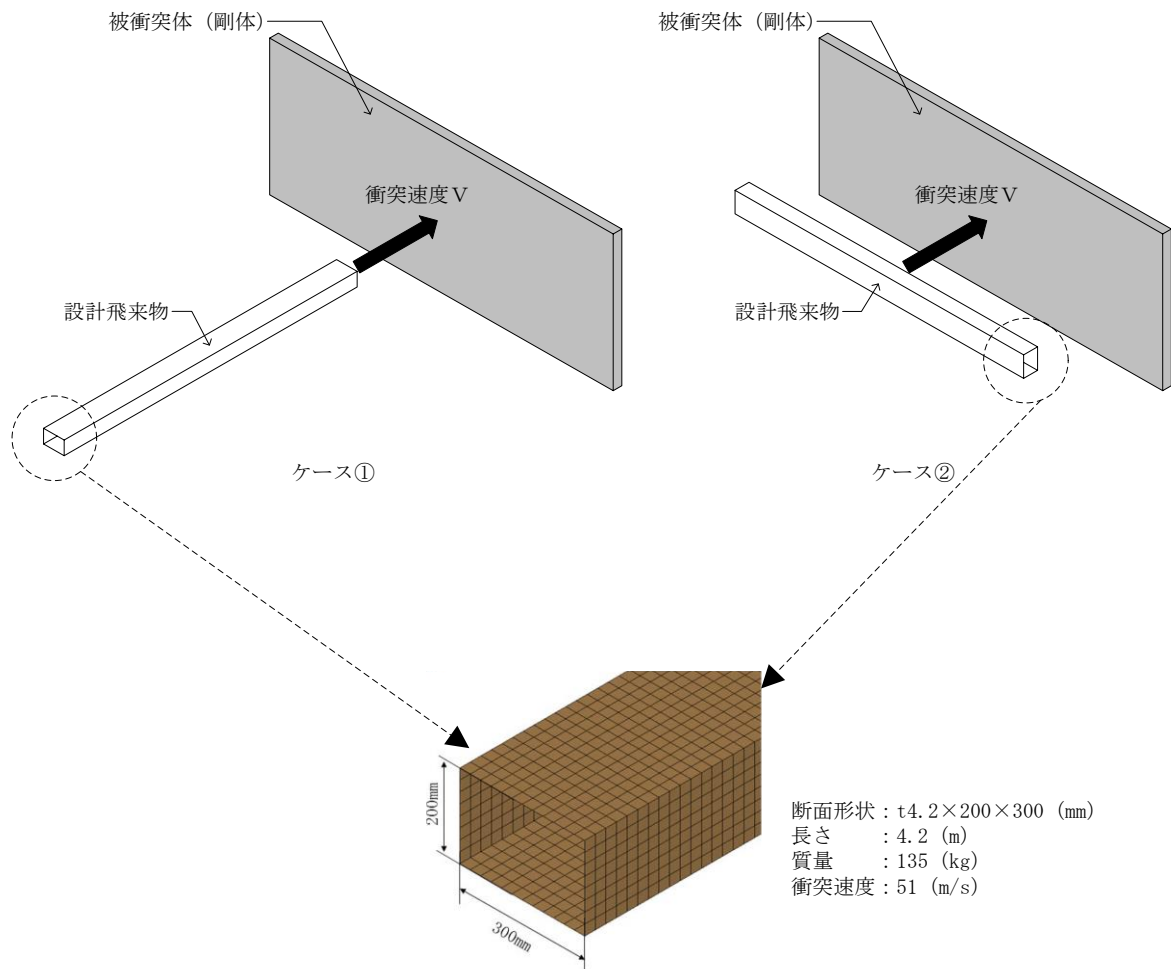


図 3-2 解析モデルの概略図

### 3.3 検討結果

時刻歴衝撃荷重の算定結果を図 3-3 及び図 3-4 に、時刻歴衝撃荷重に対する応答スペクトルを図 3-5 及び図 3-6 に示す。

図 3-3 及び図 3-4 より、衝撃荷重のピークはケース①、ケース②においてそれぞれ最大で約  $2.5 \times 10^3 \text{kN}$ 、約  $1.7 \times 10^5 \text{kN}$  と大きな値であるが、荷重の作用時間は瞬間的である。一方、図 3-5 及び図 3-6 の応答スペクトルによると、建物等の耐震設計において考慮している約 0.05 秒以上の周期帯では、 $1.0 \times 10^3 \text{kN}$  程度であり、時刻歴衝撃荷重のピークが非常に大きな値であったとしても、建物の全体的な挙動に対する影響は小さいことが確認できる。

また、建物の一次固有周期帯においては、衝撃荷重の応答スペクトルは、 $1.0 \times 10^3 \text{kN}$  程度以下である。建物の一次固有周期を表 3-1 に示す。

以上より、「表 2-1 設計飛来物による衝撃荷重  $W_M$  の算定における評価条件及び結果」に示した衝撃荷重の算定結果が、建物の全体的な挙動を確認する上では、保守的であることを確認した。

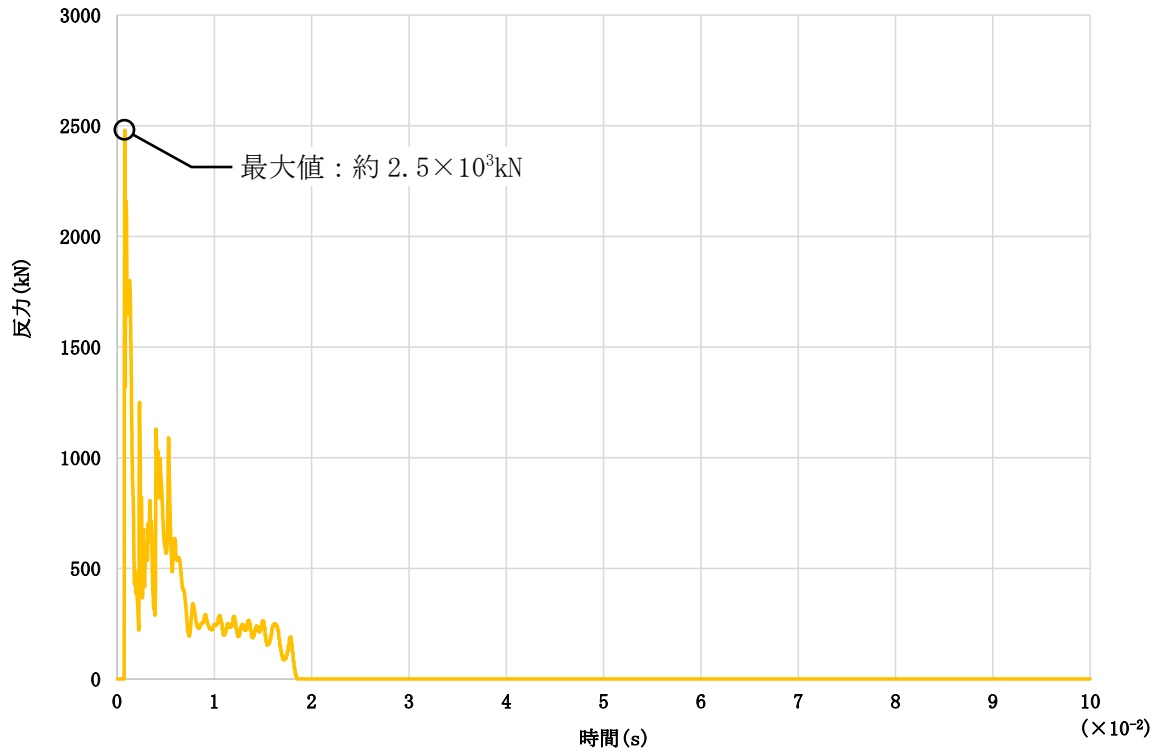


図 3-3 時刻歴衝撃荷重 (ケース①軸方向衝突)

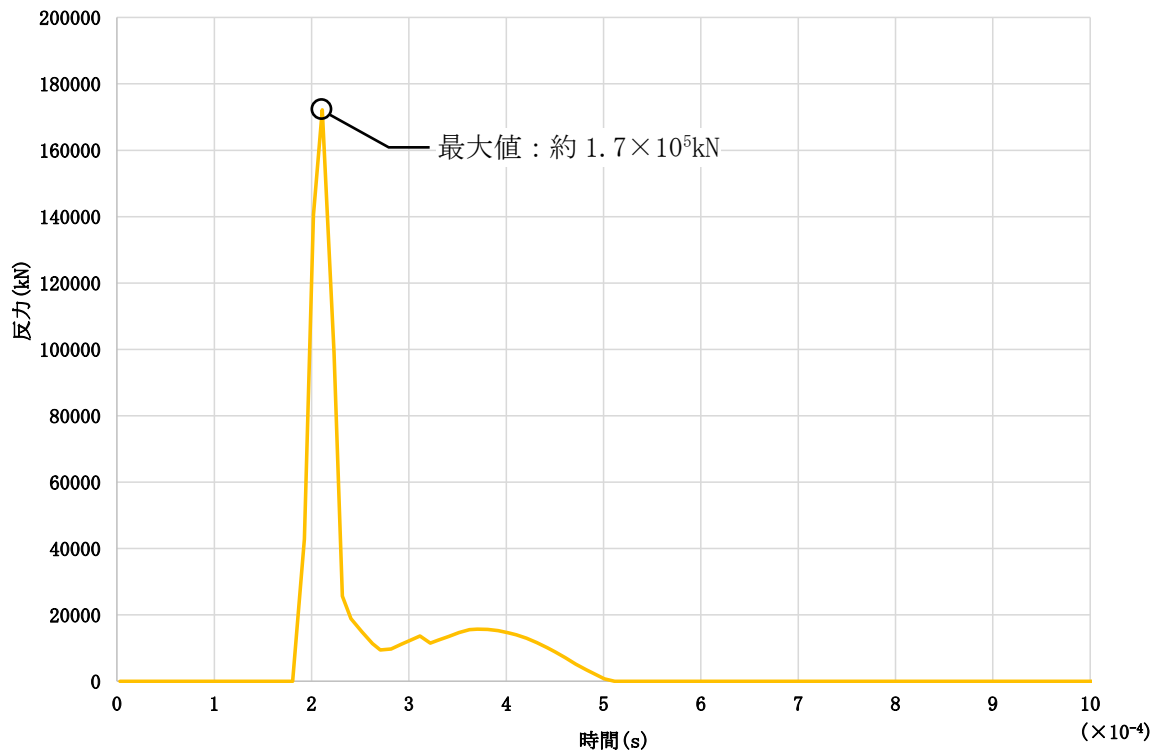


図 3-4 時刻歴衝撃荷重 (ケース②軸直行方向衝突)

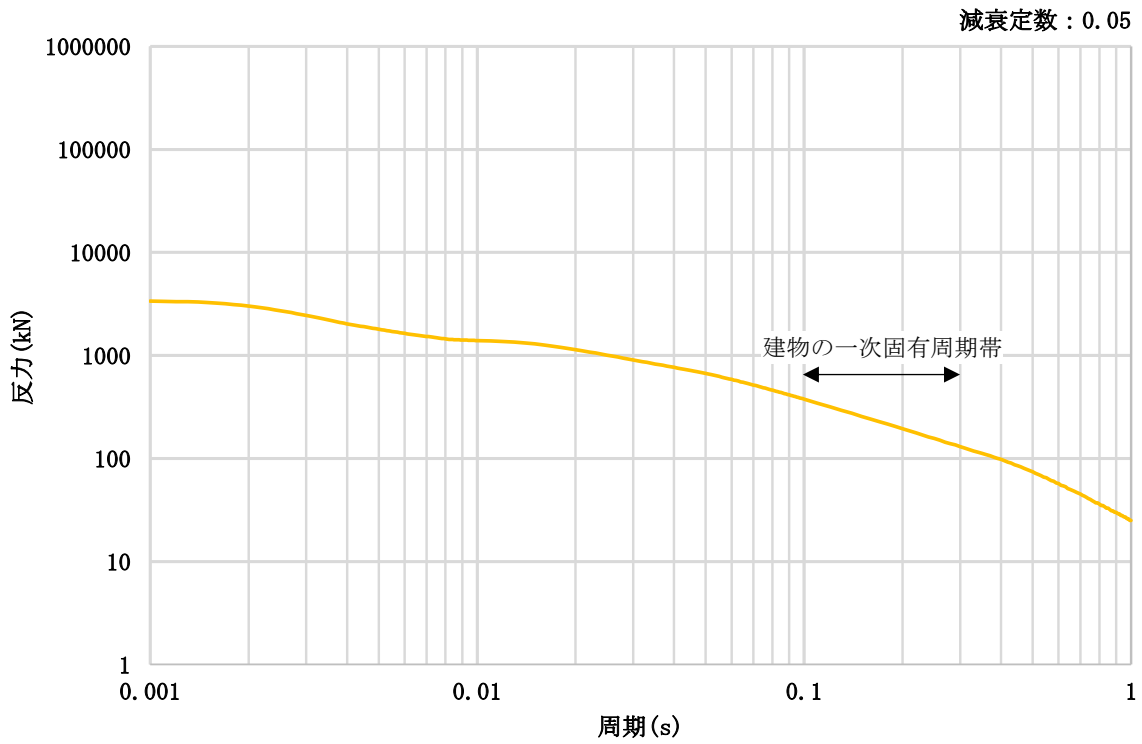


図 3-5 時刻歴衝撃荷重による応答スペクトル (ケース①軸方向衝突)

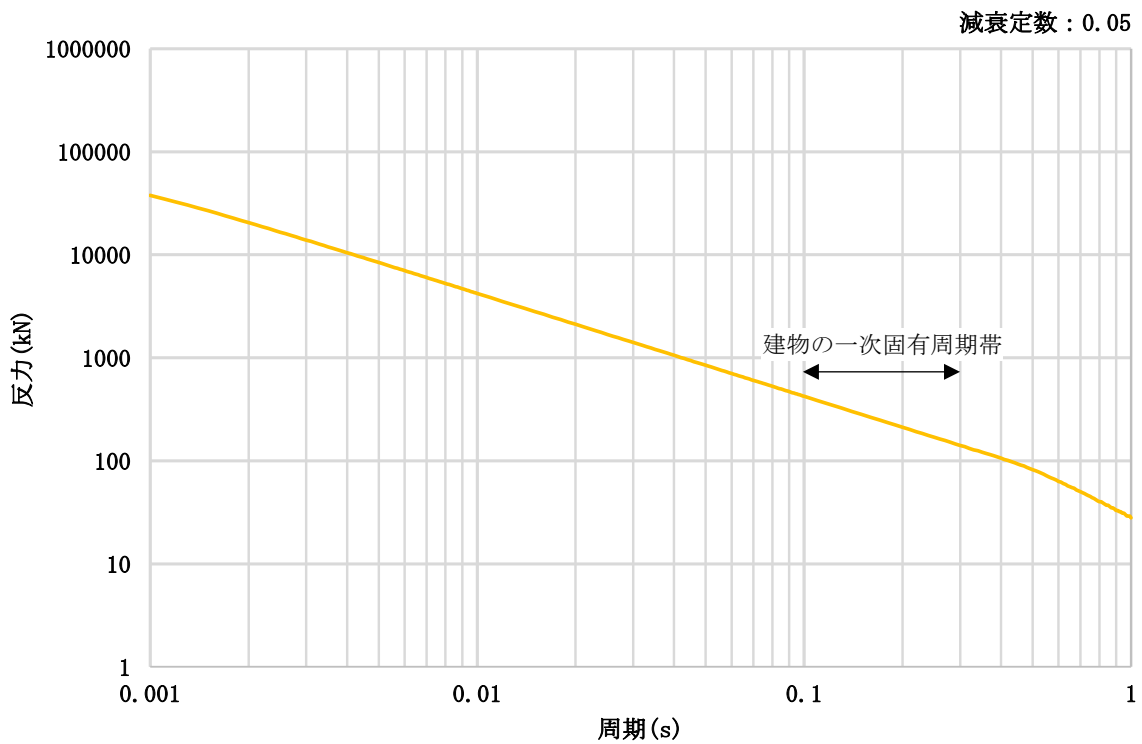


図 3-6 時刻歴衝撃荷重による応答スペクトル (ケース②軸直行方向衝突)

表 3-1 建物の一次固有周期

建物名称	一次固有周期*	
	(s)	
	N S 方向	E W 方向
原子炉建物	0.220	0.203
タービン建物	0.206	0.157
廃棄物処理建物	0.205	0.191
制御室建物	0.140	0.116

注：代表として基本ケースを示す。

注記\*：固有周期の値はVI-2-2「耐震設計上重要な設備を設置する施設の耐震性に関する説明書」に基づく。

## 4.2 鉄筋コンクリートの衝突解析モデルにおける 破断限界の設定について



## 1. 概要

VI-3-別添 1-6「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」における鉄筋コンクリート部材への設計飛来物の衝突解析においては、評価対象部位に設定しているタービン建物屋根スラブ及び外壁の鉄筋（SD35（SD345 相当））並びにタービン建物屋根スラブのデッキプレート（SDP2）に対して、NEI07-13\*の動的特性に関する係数及びJ I Sに定められる伸びの値を基に破断限界を設定していることから、具体的な値として鉄筋（SD35（SD345 相当））について表 1-1 に、デッキプレート（SDP2）について表 1-2 に示す。また、T F（多軸性係数）を 2.0 とした場合の真応力-真ひずみ線図を図 1-1 に示す。

注記\* : Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NEI07-13))

表 1-1 真応力-新ひずみの設定 (鉄筋 (SD35 (SD345 相当)))

静的物性値	物性値	単位	記号	算出式	設定値	備考
公称値	ヤング率	MPa	E	-	206000	
	ポアソン比	-	$\nu$	-	0.3	
	降伏強度	MPa	$\sigma_{\text{ensy}}$	-	345	JISの“降伏点”下限値
	降伏ひずみ	-	$\epsilon_{\text{ensy}}$	$\sigma_{\text{ensy}}/E$	0.00167	
	破断強度	MPa	$\sigma_{\text{enrfail}}$	-	490	JISの“引張強さ”下限値
	破断塑性ひずみ	-	$\epsilon_{\text{enrfail}}$	$\epsilon_{\text{enrfail}} - \sigma_{\text{enrfail}}/E$	0.178	
	破断全ひずみ	-	$\epsilon_{\text{enrfail}}$	-	0.18	JISの“伸び”
	DIF (降伏強さ)	-	DIF <sub>y</sub>	-	1.1	NE107-13
	降伏強度 (DIF考慮)	MPa	$\sigma_{\text{ensydf}}$	$\sigma_{\text{ensy}} * \text{DIF}_y$	380	
	降伏ひずみ (DIF考慮)	-	$\epsilon_{\text{ensydf}}$	$\epsilon_{\text{ensy}}$	0.00167	
動的物性考慮	DIF (破断強さ)	-	DIF <sub>fail</sub>	-	1.05	NE107-13
	破断強度 (DIF考慮)	MPa	$\sigma_{\text{enrfaildf}}$	$\sigma_{\text{enrfail}} * \text{DIF}_{\text{fail}}$	515	
	TF	-	TF	-	2.0	NE107-13より“2.0”とする。
	降伏強度	MPa	$\sigma_{\text{ydf}}$	$\sigma_{\text{ensydf}} * (1 + \epsilon_{\text{ensydf}})$	380	
	降伏ひずみ	-	$\epsilon_{\text{ydf}}$	$\ln(1 + \epsilon_{\text{ensydf}})$	0.00167	
	ヤング率	MPa	E	-	206000	
	破断強度	MPa	$\sigma_{\text{faildf}}$	$\sigma_{\text{enrfaildf}} * (1 + \epsilon_{\text{enrfail}})$	607	
	破断全ひずみ	-	$\epsilon_{\text{fail}}$	$\ln(1 + \epsilon_{\text{enrfail}})$	0.166	
	破断塑性ひずみ	-	$\epsilon_{\text{fail}}$	$\epsilon_{\text{fail}} - \sigma_{\text{faildf}}/E$	0.163	
	第2折れ点応力	MPa	$\sigma_{\text{failtf}}$	$\sigma_{\text{ydf}} + (\sigma_{\text{faildf}} - \sigma_{\text{ydf}}) / (\epsilon_{\text{fail}} - \epsilon_{\text{ydf}}) * (\epsilon_{\text{failtf}} - \epsilon_{\text{ydf}})$	497	図形的に算出。
第2折れ点全ひずみ	-	$\epsilon_{\text{failtf}}$	$\ln(1 + \epsilon_{\text{enrfail}}/TF)$	0.086		
第2折れ点塑性ひずみ	-	$\epsilon_{\text{failtf}}$	$\epsilon_{\text{failtf}} - \sigma_{\text{failtf}}/E$	0.084		

表 1-2 真応力-新ひずみの設定 (デッキプレート (SDP2))

物性値	単位	記号	算出式	設定値	備考
静的物性値	ヤング率	E	—	206000	
	ポアソン比	$\nu$	—	0.3	
	降伏強度	$\sigma_{\text{enkv}}$	—	235	JISの“降伏点”下限値
	降伏ひずみ	$\epsilon_{\text{enkv}}$	$\sigma_{\text{enkv}}/E$	0.00114	
	破断強度	$\sigma_{\text{enrfail}}$	—	400	JISの“引張強さ”下限値
	破断塑性ひずみ	$\epsilon_{\text{enrfail}}$	$\epsilon_{\text{enrfail}} - \sigma_{\text{enrfail}}/E$	0.168	
	破断全ひずみ	$\epsilon_{\text{enrfail}}^t$	—	0.17	JISの“伸び”
	DIF (降伏強さ)	DIF <sub>y</sub>	—	1.29	NE107-13
	降伏強度 (DIF考慮)	$\sigma_{\text{enkvdif}}$	$\sigma_{\text{enkv}} * \text{DIF}_y$	303	
	降伏ひずみ (DIF考慮)	$\epsilon_{\text{enkvdif}}$	$\epsilon_{\text{enkv}}$	0.00114	
動的物性考慮	DIF (破断強さ)	DIF <sub>fail</sub>	—	1.1	NE107-13
	破断強度 (DIF考慮)	$\sigma_{\text{enrfaildif}}$	$\sigma_{\text{enrfail}} * \text{DIF}_{\text{fail}}$	440	
	TF	TF	—	2.0	NE107-13より“2.0”とする。
	降伏強度	$\sigma_{\text{ydif}}$	$\sigma_{\text{enkvdif}} * (1 + \epsilon_{\text{enkvdif}})$	303	
	降伏ひずみ	$\epsilon_{\text{ydif}}$	$\ln(1 + \epsilon_{\text{enkvdif}})$	0.00114	
	ヤング率	E	—	206000	
	破断強度	$\sigma_{\text{faildif}}$	$\sigma_{\text{enrfaildif}} * (1 + \epsilon_{\text{enrfail}})$	515	
	破断全ひずみ	$\epsilon_{\text{fail}}^t$	$\ln(1 + \epsilon_{\text{enrfail}})$	0.157	
	破断塑性ひずみ	$\epsilon_{\text{fail}}$	$\epsilon_{\text{fail}}^t - \sigma_{\text{faildif}}/E$	0.155	
	第2折れ点応力	$\sigma_{\text{failtf}}$	$\sigma_{\text{ydif}} + (\sigma_{\text{faildif}} - \sigma_{\text{ydif}}) / (\epsilon_{\text{fail}}^t - \epsilon_{\text{ydif}}) * (\epsilon_{\text{failtf}} - \epsilon_{\text{ydif}})$	413	図形的に算出。
第2折れ点全ひずみ	$\epsilon_{\text{failtf}}^t$	$\ln(1 + \epsilon_{\text{enrfail}})/\text{TF}$	0.082		
第2折れ点塑性ひずみ	$\epsilon_{\text{failtf}}$	$\epsilon_{\text{failtf}}^t - \sigma_{\text{failtf}}/E$	0.080		

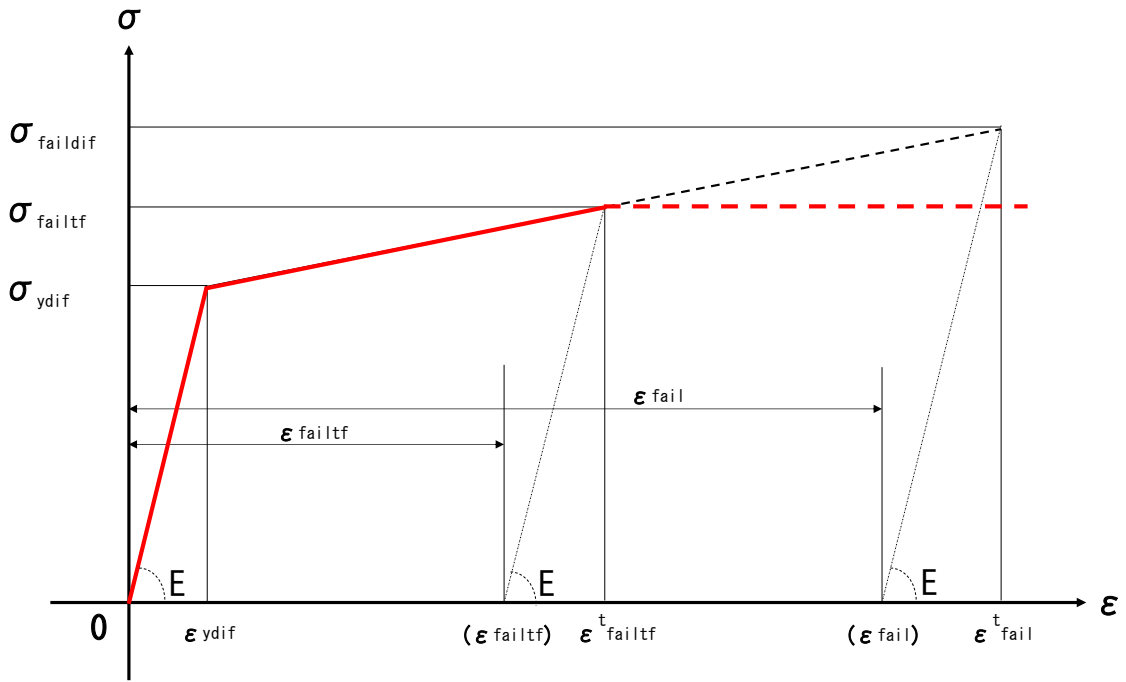


図 1-1 真応力-真ひずみ線図 (TF=2.0 の場合)

#### 4.3 タービン建物屋根スラブの貫通及び 裏面剥離評価について

## 1. 概要

VI-3-別添 1-6「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」において、タービン建物屋根スラブ（以下「屋根スラブ」という。）のコンクリートの最小厚さは□mmであり、D e g e n式による貫通限界厚さ 190mm、C h a n g式による裏面剥離限界厚さ 350 mmを下回る結果となる。

一方、屋根スラブの下面にはデッキプレートが設置されており、実際には当該デッキプレートが施設の外殻を構成する部材の貫通や、施設の外殻を構成する部材自体の転倒及び脱落を防ぐ効果を発揮すると考えられる。

これを踏まえて、VI-3-別添 1-6「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」における「3.5.2 裏面剥離評価」では屋根スラブの3次元FEMモデルを用いた衝突解析により、設計飛来物の衝突に対するデッキプレートのひずみが許容限界を超えない旨を評価し、施設の外殻を構成する部材の脱落が生じないことを確認している。

本資料では、衝突解析におけるデッキプレートのモデル化の詳細を示し、強度評価においてデッキプレートを考慮することの妥当性を確認する。

## 2. 衝突解析におけるモデル化について

### 2.1 衝突解析におけるモデルの設定

評価対象とする屋根スラブは、躯体厚さが最も薄く、支持スパンが大きい箇所を選定している。屋根スラブのモデル化範囲を図2-1に、解析モデルを図2-2に示す。

衝突解析では、設計飛来物の衝突によるデッキプレートのひずみを確認するため、コンクリート、鉄筋、デッキプレート及び設計飛来物をモデル化している。モデル化範囲である屋根スラブは、周囲の四辺が鉄骨はりで支持されているため、周囲の境界条件を固定とみなして屋根スラブの拘束効果を考慮している。

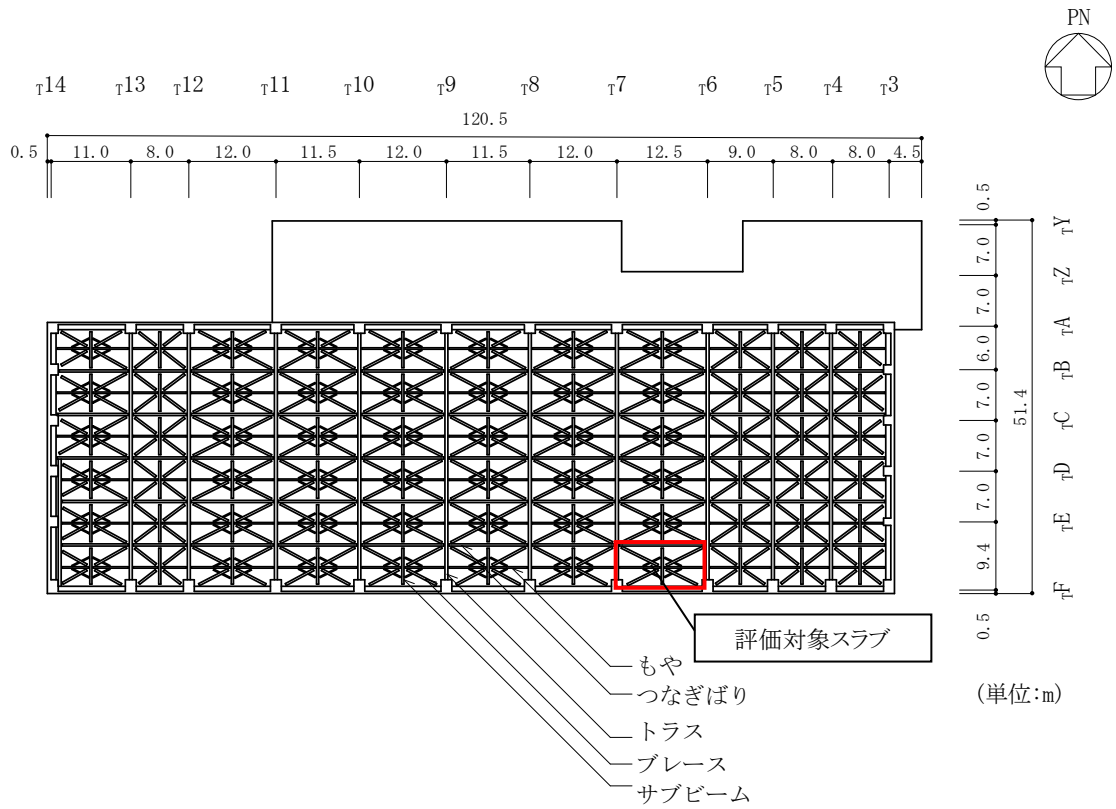
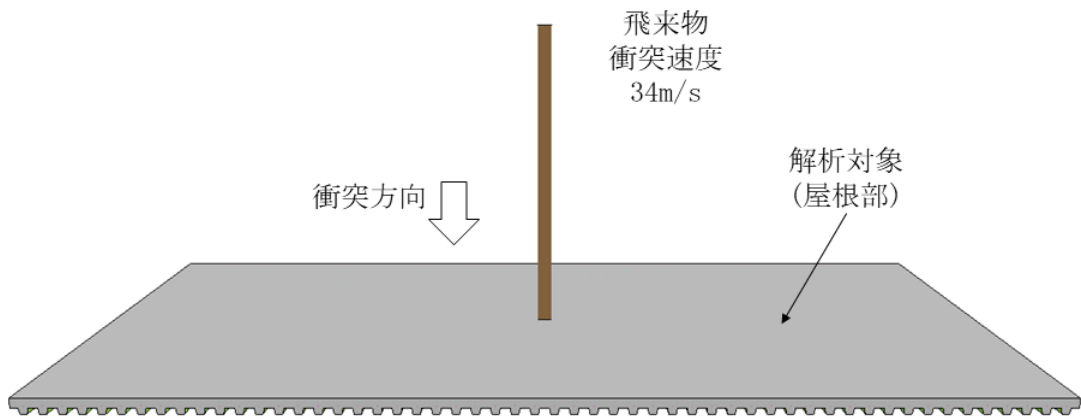
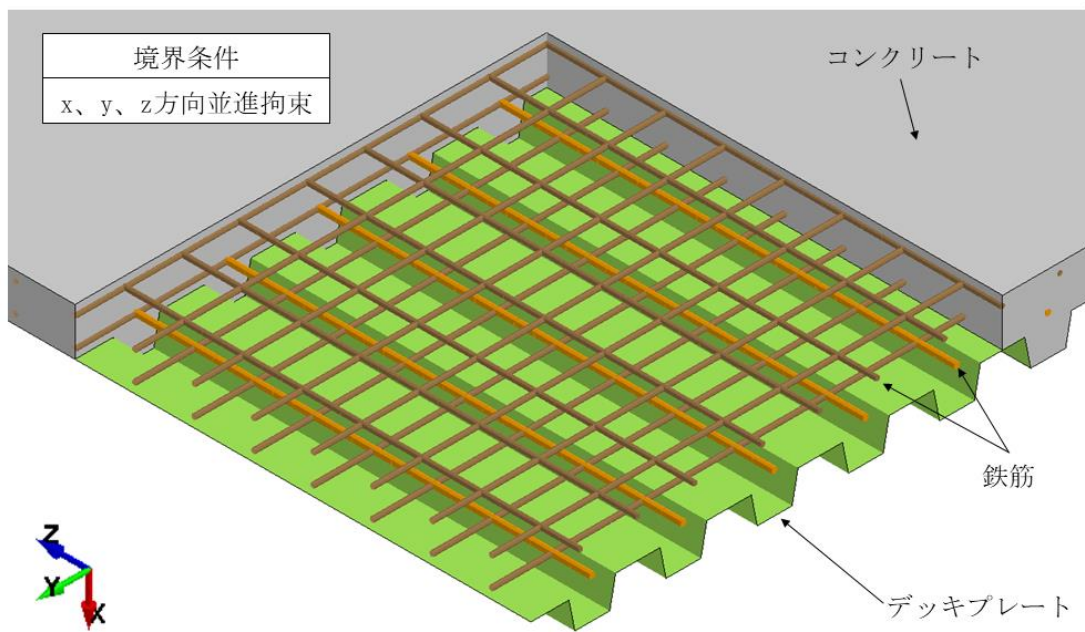


図 2-1 タービン建物屋根スラブのモデル化範囲



<概略図>



<詳細図>

図 2-2 タービン建物屋根スラブの解析モデル



衝突解析の結果にて、表 2-1 に示すとおりデッキプレートに生じるひずみは許容限界を超えないことを確認しており、デッキプレートと比較して鉄筋コンクリート躯体の剛性が極めて大きいことから、屋根スラブに生じる衝撃荷重は大半を躯体が負担し、デッキプレートが負担する衝撃荷重を躯体が軽減していると考えられる。

表 2-1 衝突解析によるデッキプレートのひずみ

評価対象部位	評価結果	許容限界
屋根スラブ (デッキプレート)	$3.5 \times 10^{-3}$	$8.0 \times 10^{-2}$

## 2.2 デッキプレートの初期ひずみについて

デッキプレートは施工時にコンクリートを流し込む型枠としての役割を持ち、コンクリート全体の荷重を支えるが、コンクリートは硬化後自ら自重を支えるためデッキプレートにはほとんど荷重がかからなくなる。

一方、本解析モデルでは、デッキプレートにコンクリートの重量が作用するようモデル化されており、図 2-3 のような初期ひずみ分布が生じている。

初期ひずみの値は最大の部分でも  $8.21 \times 10^{-5}$  となっており、デッキプレートの破断に対する許容限界である  $8.0 \times 10^{-2}$  と比べ極めて小さいため、評価上問題とならないことを確認した。

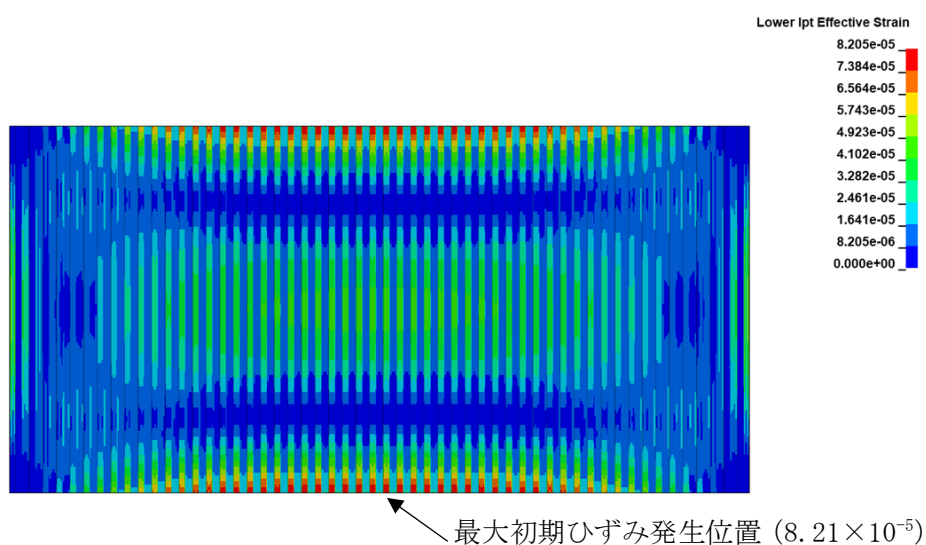


図 2-3 デッキプレート初期ひずみ分布

#### 4.4 鉄筋コンクリート部材の貫通及び 裏面剥離評価について

## 1. 概要

VI-3-別添 1-6「竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書」における「4.1 貫通評価」では、鉄筋コンクリート部材の設計飛来物の衝突に対する貫通限界厚さを算定し、施設の部材厚さとの比較を行っている。また、「4.2 裏面剥離評価」では裏面剥離限界厚さを算定し、施設の部材厚さとの比較を行っている。なお、評価の結果、貫通又は裏面剥離の発生が想定される場合には、詳細な衝突解析を実施し、鉄筋又はデッキプレートに発生するひずみにより評価を行っている。

ここでは、貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さの評価式及び評価式における入力値の詳細について示す。

## 2. 貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さの算定方法

貫通評価において、貫通限界厚さの算定にはD e g e n式を用いており、D e g e n式における貫入深さは修正NDR C式により算定している。また、裏面剥離評価における裏面剥離限界厚さの算定にはC h a n g式を用いている。

D e g e n式、修正NDR C式及びC h a n g式は米国NRCの基準類\*及びNEI07-13に、飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の局部損傷評価式として記載されており、「構造物の衝撃挙動と設計法」((社)土木学会)においては、貫通限界厚さの評価式として、D e g e n式の適用性が高く、裏面剥離限界厚さの評価式として、C h a n g式の適用性が高いとされている。

D e g e n式、修正NDR C式及びC h a n g式を以下に示す。

### 2.1 貫通限界厚さの算定

・D e g e n式を以下に示す。

1.  $1.52 \leq X/d \leq 13.42$  の場合

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

$X/d \leq 1.52$  の場合

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

・修正NDR C式を以下に示す。

$X/d \leq 2.0$  の場合

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

$X/d \geq 2.0$  の場合

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

ここで、

D : 設計飛来物直径密度 ( $D = W/d^3$ ) (kgf/cm<sup>3</sup>)

d : 設計飛来物直径 (cm)

- e : 貫通限界厚さ (cm)
- F<sub>c</sub> : コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)
- N : 設計飛来物の形状係数
- V : 設計飛来物の衝突速度 (m/s)
- W : 設計飛来物重量 (kgf)
- X : 貫入深さ (cm)
- α<sub>e</sub> : 低減係数

## 2.2 裏面剥離限界厚さの算定

・ C h a n g 式を以下に示す。

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

ここで,

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

注記\* : U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: STANDARD REVIEW PLAN, 3.5.3  
BARRIER DESIGN PROCEDURES, NUREG-0800, Revision3, Match 2007

### 3. 評価式における入力値

各評価式に用いる入力値を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

表 3-1 貫通限界厚さの評価式 (Degeen式及び修正NDR式) 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 ( $D=W/d^3$ )	$6.39 \times 10^{-3}$	
d	cm	設計飛来物直径	27.6	
F <sub>c</sub>	kgf/cm <sup>2</sup>	コンクリートの設計基準強度	240 <sup>*1</sup>	
			225 <sup>*2</sup>	
			210 <sup>*3</sup>	
			244 <sup>*4</sup>	
N	—	設計飛来物の形状係数	1.14	
V	m/s	壁面	設計飛来物の衝突速度 (水平)	51
		屋根スラブ	設計飛来物の衝突速度 (鉛直)	34
W	kgf	設計飛来物重量	135	
α <sub>e</sub>	—	低減係数	1.0	

注記\*1：原子炉建物，タービン建物及び廃棄物処理建物の値

\*2：制御室建物の値

\*3：ディーゼル燃料貯蔵タンク室の値

\*4：B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の値 (コンクリートの設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup> より換算)

表 3-2 裏面剥離限界厚さの評価式 (Chang式) に用いる入力値

記号	単位	定義	数値	
d	cm	設計飛来物直径	27.6	
f <sub>c</sub> '	kgf/cm <sup>2</sup>	コンクリートの設計基準強度	240 <sup>*1</sup>	
			225 <sup>*2</sup>	
			210 <sup>*3</sup>	
			244 <sup>*4</sup>	
V	m/s	壁面	設計飛来物の衝突速度 (水平)	51
		屋根スラブ	設計飛来物の衝突速度 (鉛直)	34
V <sub>0</sub>	m/s	飛来物基準速度	60.96	
W	kgf	設計飛来物重量	135	
α <sub>s</sub>	—	低減係数	1.0	

注記\*1：原子炉建物，タービン建物及び廃棄物処理建物の値

\*2：制御室建物の値

\*3：ディーゼル燃料貯蔵タンク室の値

\*4：B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の値 (コンクリートの設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup> より換算)

4. 評価式における低減係数及び形状係数

設計飛来物として設定した鋼製材については、航空機エンジン以上に剛体であり得ることも想定されるため、柔飛来物としての低減は考慮せず、修正NDRC式の形状係数を非常に鋭い場合として1.14、Degen式及びChang式の低減係数を1.0としている。

既往の文献と今回の評価における採用値の比較を表4-1に示す。

表4-1 評価式における形状係数及び低減係数

	Degen式	修正NDRC式	Chang式	想定飛来物
	低減係数 $\alpha_e$	飛来物の形状係数N	低減係数 $\alpha_s$	
NEI07-13	0.60	0.72	0.55	大型商用機のエンジン
文献*1	—	0.72~1.14	—	—
文献*2	0.65	—	0.60	航空機エンジン
採用値	1.00	1.14	1.00	鋼製材

注記\*1：構造工学シリーズ6 構造物の衝撃挙動と設計法，（社）土木学会

\*2：Experimental Studies on Local Damage of Reinforced Concrete Structures by the Impact of Deformable Missiles Part4, overall Evaluation of Local Damage, Kiyoshi Muto, etc., 10<sup>th</sup> SMiRT