

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-029 改 04
提出年月日	2023年1月30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)

2023年1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. 竜巻防護対策設備等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
  - 4.5 原子炉建物燃料取替階ブローアウトパネルに対する対応方針について
  - 4.6 1号機原子炉建物の解析モデルにおける地盤ばねの設定について
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

: 本日の説明範囲

## 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 (1/6)

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 (2/6)

<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>2. 竜巻防護対策設備の強度計算に関する補足説明資料</p> <table border="1" data-bbox="408 1391 750 2033"> <tr> <td data-bbox="408 1391 459 2033">2.1 シヤックルの許容限界について</td> <td data-bbox="408 203 750 1391" rowspan="6"> <p>VI-3-別添 1-3 竜巻防護ネットの強度計算書</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="459 1391 510 2033">2.2 飛来物のオフセット衝突の影響について</td> </tr> <tr> <td data-bbox="510 1391 561 2033">2.3 金網の設計裕度の考え方</td> </tr> <tr> <td data-bbox="561 1391 657 2033">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</td> </tr> <tr> <td data-bbox="657 1391 708 2033">2.5 ワイヤロープの初期張力について</td> </tr> <tr> <td data-bbox="708 1391 750 2033">2.6 補助金網の影響について</td> </tr> </table>	2.1 シヤックルの許容限界について	<p>VI-3-別添 1-3 竜巻防護ネットの強度計算書</p>	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	
2.1 シヤックルの許容限界について	<p>VI-3-別添 1-3 竜巻防護ネットの強度計算書</p>							
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								

表 1 補足説明資料と添付書類との関連 (3/6)

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>3. 竜巻防護対策設備の衝突解析に関する補足説明資料</p> <p>3.1 衝突解析の解析手法の保守性</p>	<p>VI-3-別添 1-4 竜巻防護鋼板の強度計算書</p> <p>VI-3-別添 1-5 架構の強度計算書</p> <p>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</p> <p>VI-3-別添 1-10 排気筒の強度計算書</p> <p>VI-3-別添 1-13-4 1号機排気筒の強度計算書</p>

表 1 補足説明資料と添付書類との関連(4/6)

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> <p>4.1 設計飛来物の衝突による衝撃荷重の算定について</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>4.5 原子炉建物燃料取替階ブローアウトパネルに対する対応方針について</p> <p>4.6 1号機原子炉建物の解析モデルにおける地盤ばねの設定について</p>	<p>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」</p> <p>VI-3-別添 1-13-1 「建物の強度計算書」</p>

表 1 補足説明資料と添付書類との関連 (5/6)

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
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	VI-3-別添 1-10 排気筒の強度計算書
5.2 腐食代の考慮について	VI-3-別添 1-13-4 1号機排気筒の強度計算書



表 1 補足説明資料と添付書類との関連 (6/6)

<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ので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)

$$\Delta t = L_1 / V$$

$L_1$  : 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。

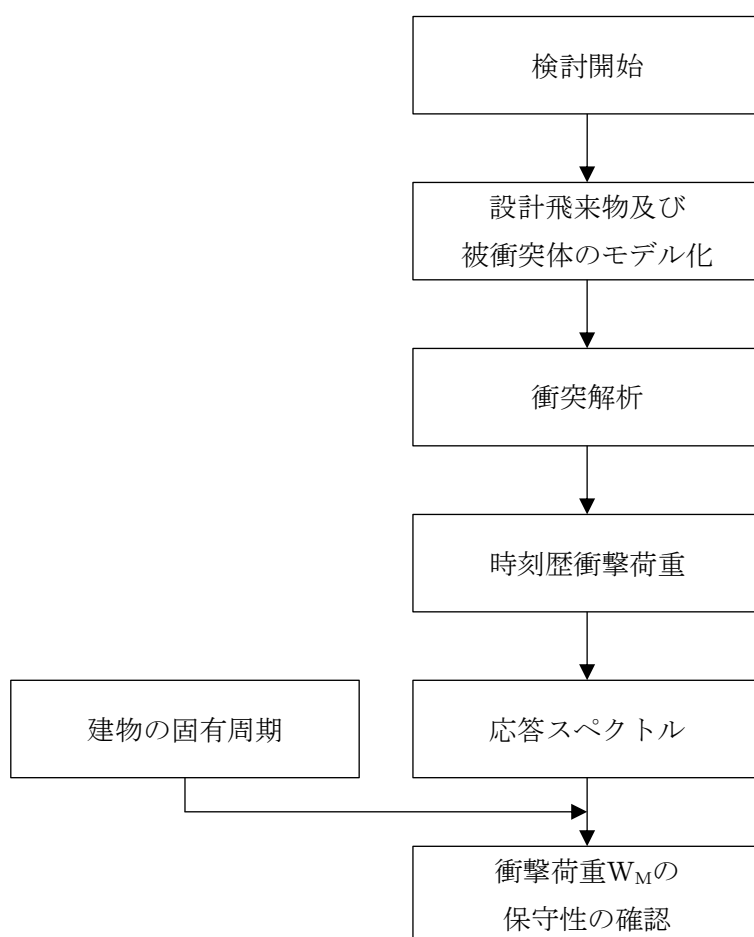


図3-1 検討フロー

### 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。時刻歴衝撃荷重に対する応答スペクトルの概要、算定条件を参考資料に示す。

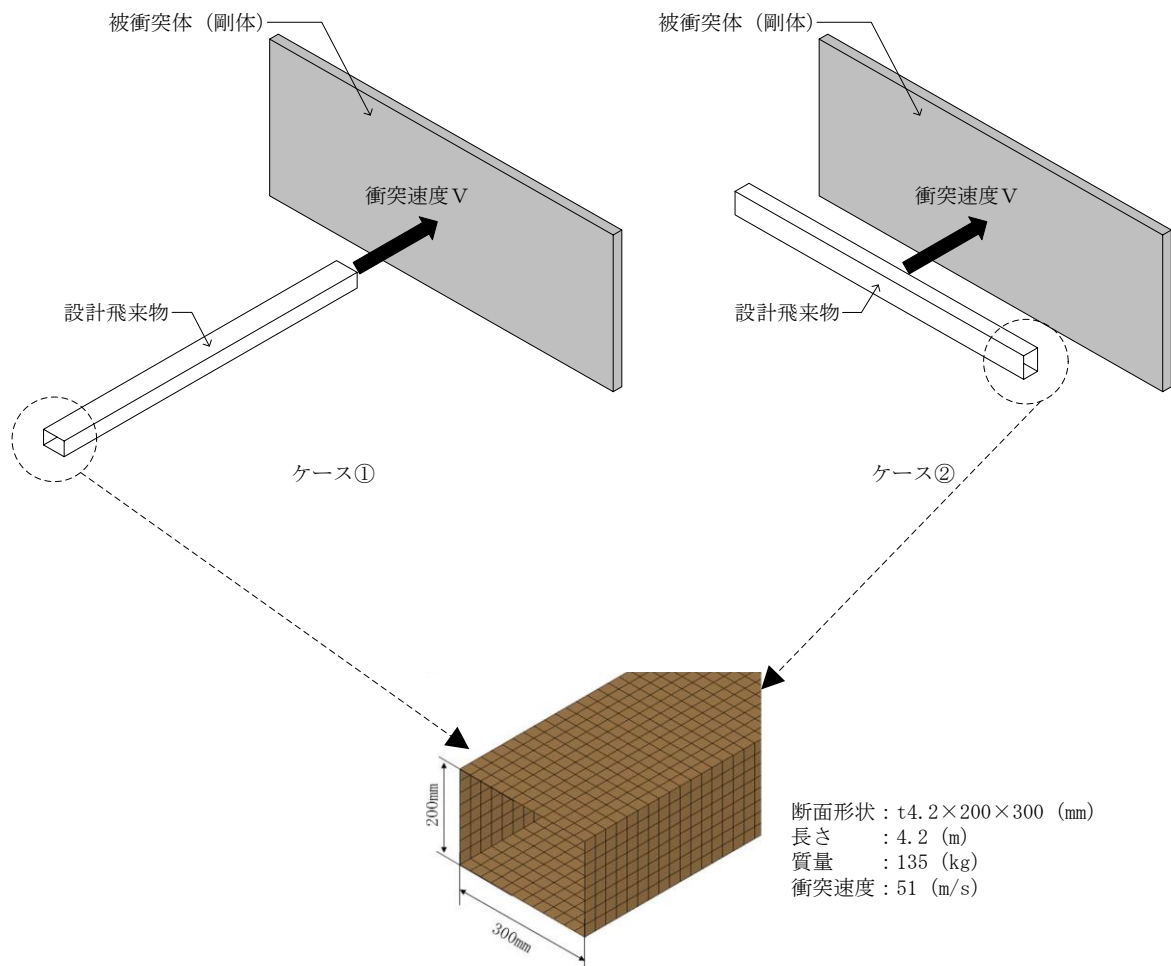


図 3-2 解析モデルの概略図

### 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の上では、保守的であることを確認した。

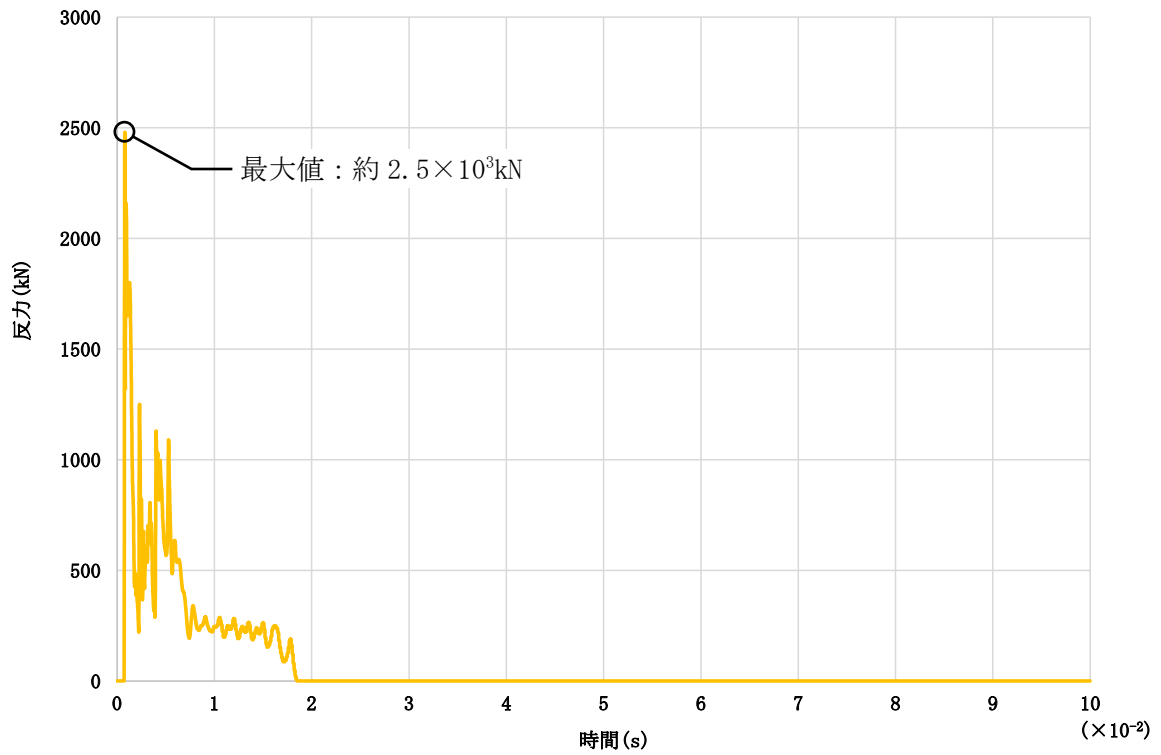


図 3-3 時刻歴衝撃荷重 (ケース①軸方向衝突)

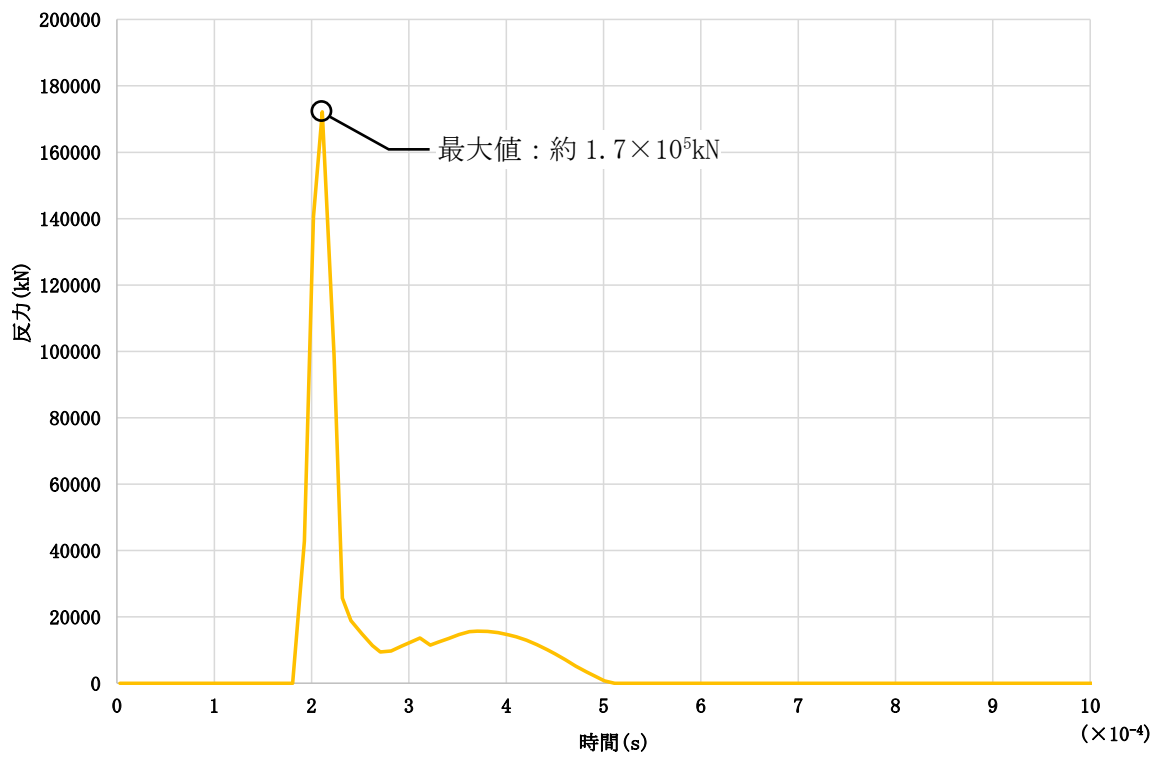


図 3-4 時刻歴衝撃荷重 (ケース②軸直行方向衝突)



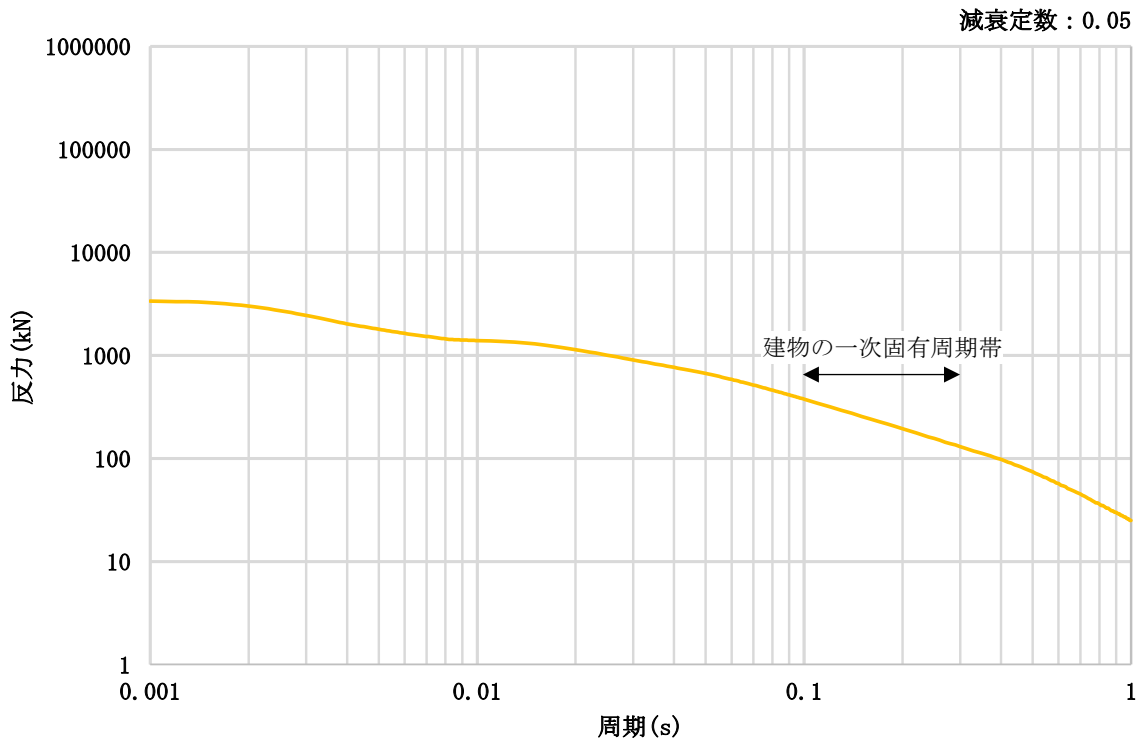


図 3-5 時刻歴衝撃荷重による応答スペクトル (ケース①軸方向衝突)

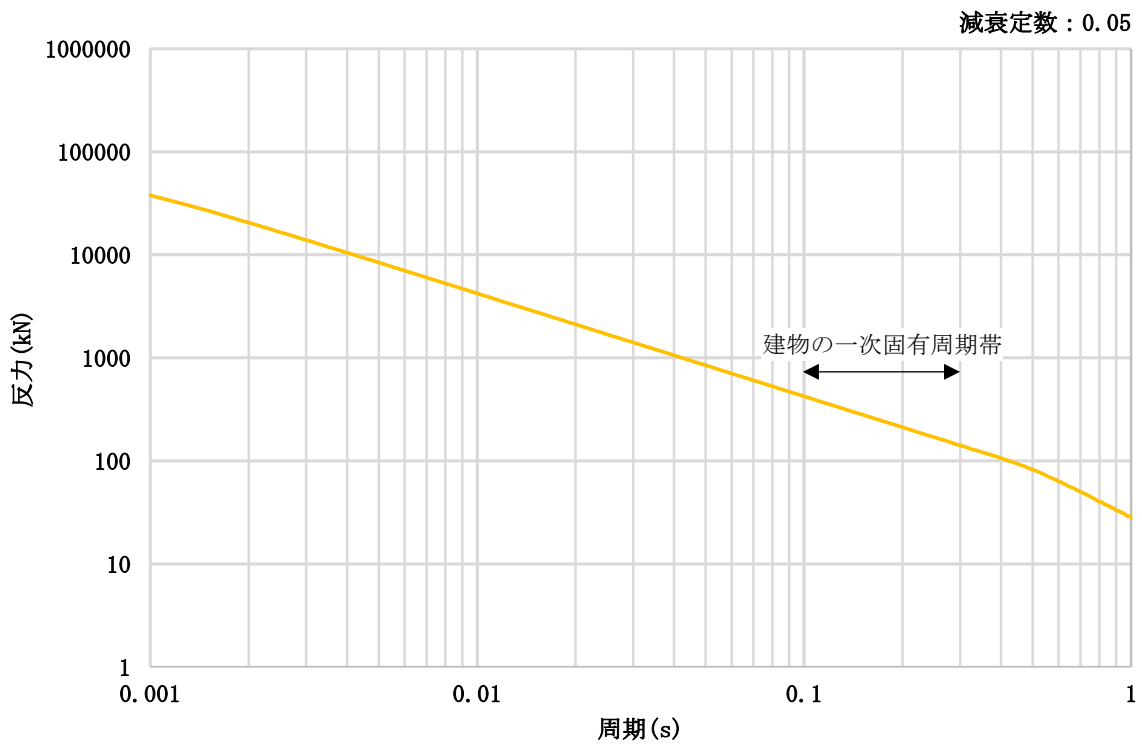


図 3-6 時刻歴衝撃荷重による応答スペクトル (ケース②軸直行方向衝突)

表 3-1 建物の一次固有周期

建物名称	一次固有周期*	
	(s)	
	NS方向	EW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。

時刻歴衝撃荷重に対する応答スペクトルについて

1. 概要

本資料では、設計飛来物による衝突解析から得られた時刻歴衝撃荷重に対する応答スペクトルの概要及び算定条件について説明する。

2. 時刻歴衝撃荷重に対する応答スペクトルの概要

応答スペクトルは、減衰定数一定、固有周期の異なる1自由度振動系の質点に、時刻歴衝撃荷重  $P(t)$  を入力し、縦軸に応答の最大せん断力値、横軸に固有周期をとったものである。時刻歴衝撃荷重に対する応答スペクトルの概念図を図1に示す。

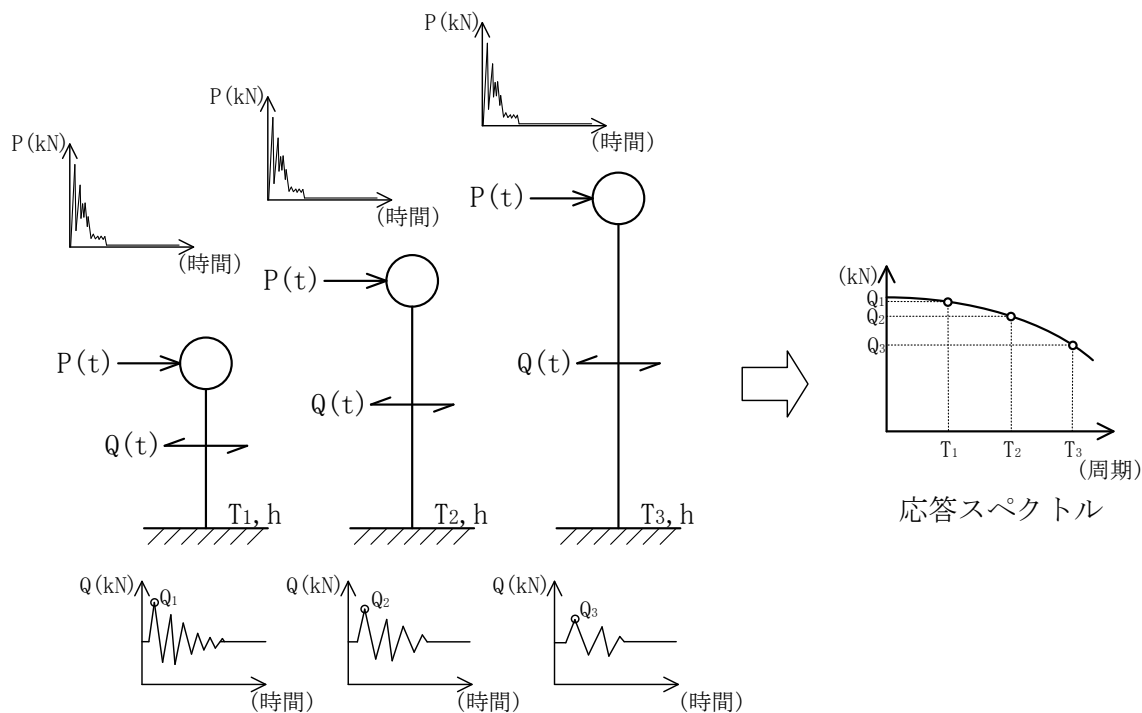


図1 時刻歴衝撃荷重に対する応答スペクトルの概念図

### 3. 応答スペクトルの算定条件

時刻歴衝撃荷重に対する応答スペクトルは、建物の全体的な応答評価における衝撃荷重の保守性の確認として算出することから、原子炉建物、タービン建物、廃棄物処理建物及び制御室建物の主体構造が鉄筋コンクリート造であることを踏まえ、応答スペクトル算出における減衰定数は5%とする。

応答スペクトル算定における周期間隔を表1に示す。

表1 応答スペクトル算定における周期間隔

周期 (s)	周期間隔 (s)
0.001~0.01	0.0001
0.01~0.1	0.001
0.1~1.0	0.01

#### 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 F E M 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。

なお、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、式による評価で貫通限界厚さ又は裏面剥離限界厚さを満足しない原子炉建物屋根スラブ及びタービン建物屋根スラブについて、デッキプレートの切欠きがないことを確認している。

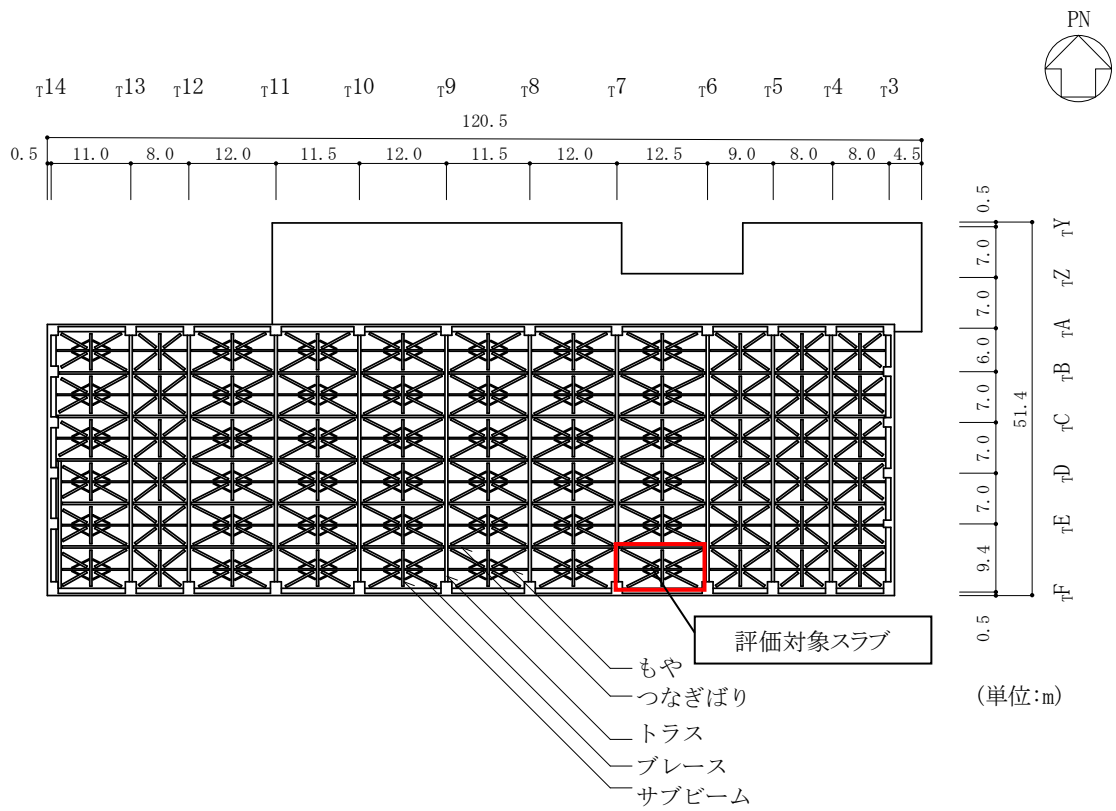
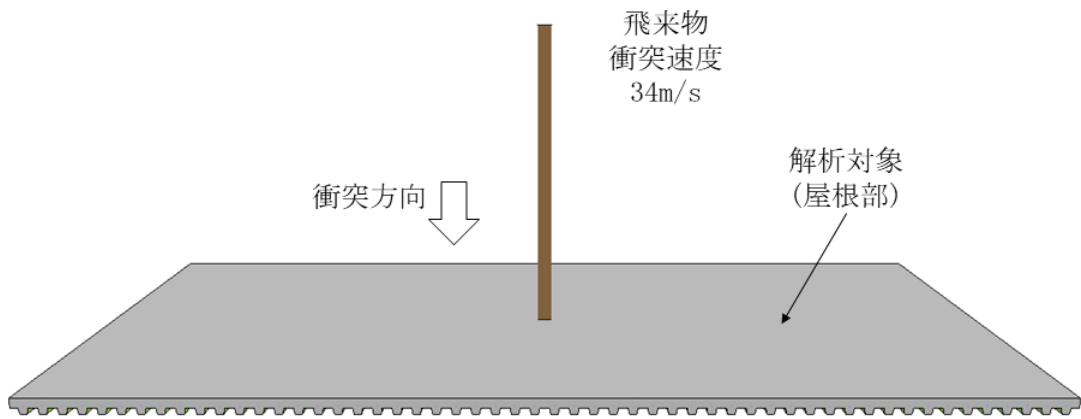
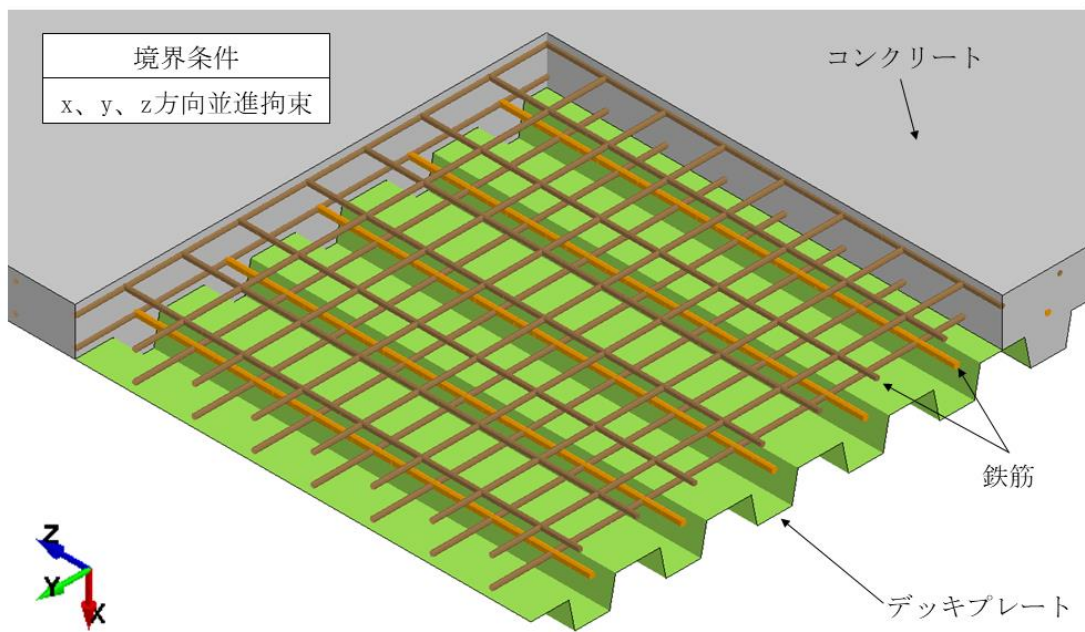


図 2-1 タービン建物屋根スラブのモデル化範囲



<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。

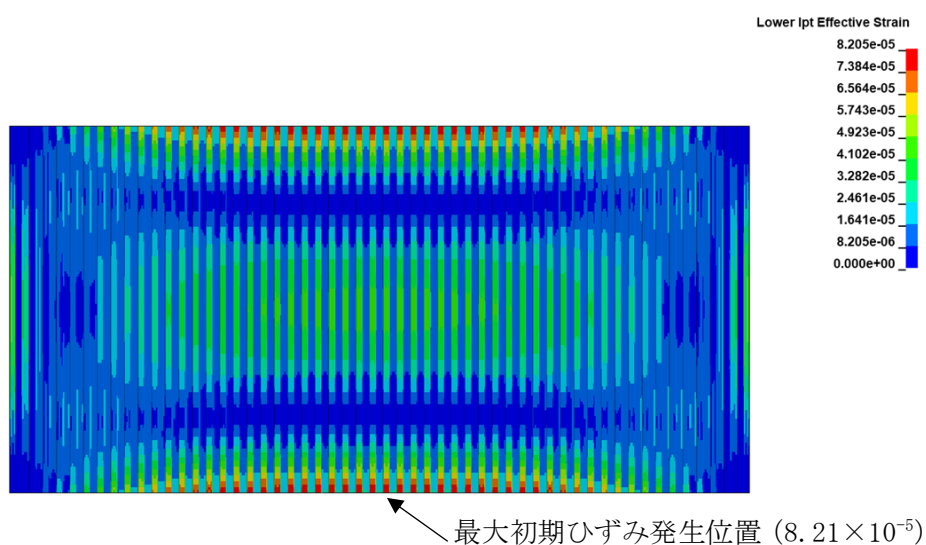


図 2-3 デッキプレート初期ひずみ分布

## 4.6 1号機原子炉建物の解析モデルにおける

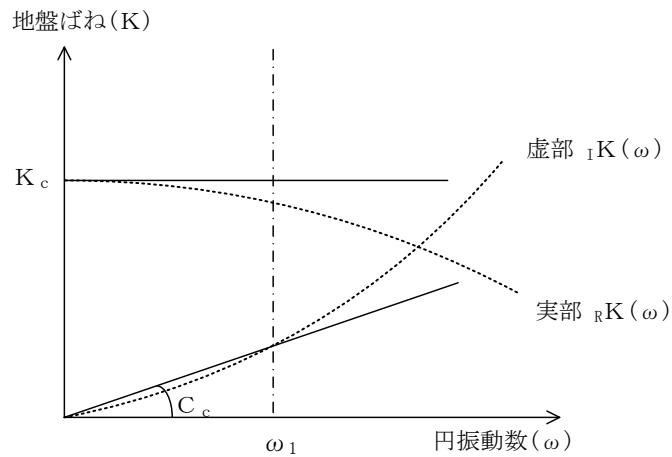
### 地盤ばねの設定について

## 1. 概要

本資料では、VI-3-別添 1-13-1「建物の強度計算書」における 1 号機原子炉建物の解析モデルのうち、地盤ばねの設定方法について説明する。

## 2. 地盤ばねの設定方法

基礎底面の地盤ばねについては、「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）」により、成層補正を行ったのち、振動アドミタンス理論に基づき求めたスウェイ及びロッキングの地盤ばねを、近似法により定数化して用いる。このうち、基礎底面のロッキング地盤ばねは、VI-2-11-2-1-1「1 号機原子炉建物の耐震性についての計算書」と同様に、建物基礎底面と地盤の間の付着力  $0.40\text{N/mm}^2$  を考慮する。地盤ばねの定数化の概要を図 2-1 に、地盤ばね定数及び減衰係数を表 2-1 に示す。基礎底面ばねの評価には解析コード「ADM I T H F」を用いる。



- ばね定数 : 0Hz のばね定数  $K_c$  で定数化
- 減衰係数 : 地盤-建物連成系の 1 次固有円振動数  $\omega_1$  に対応する虚部の値と原点とを結ぶ直線の傾き  $C_c$  で定数化

図 2-1 地盤ばねの定数化の概要

表 2-1 地盤ばね定数と減衰係数 (水平方向)

(a) NS 方向

ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね定数 $K_c$	減衰係数 $C_c$
K1	底面・水平	$1.55 \times 10^9$ (kN/m)	$2.23 \times 10^7$ (kN・s/m)
K2	底面・回転	$2.13 \times 10^{12}$ (kN・m/rad)	$4.32 \times 10^9$ (kN・m・s/rad)

(b) EW 方向

ばね 番号	地盤ばね 成分	ばね定数 $K_c$	減衰係数 $C_c$
K1	底面・水平	$1.51 \times 10^9$ (kN/m)	$2.13 \times 10^7$ (kN・s/m)
K2	底面・回転	$3.02 \times 10^{12}$ (kN・m/rad)	$9.01 \times 10^9$ (kN・m・s/rad)