

|                       |                     |
|-----------------------|---------------------|
| 女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料 |                     |
| 資料番号                  | 02-補-E-19-0610-1_改6 |
| 提出年月日                 | 2021年11月8日          |

補足-610-1 建屋耐震評価に関する補足説明資料

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

建屋耐震評価に関する記載内容を補足するための資料を以下に示す。

別紙 1 応力解析モデルでモデル化している部材の扱いについて

別紙 2 新設建屋の設計用地下水位に伴う浮力に関する整理

別紙 3 基礎版及び屋根トラスの応力解析における耐震性に影響を及ぼす要因の整理

別紙 4 新設建屋の地震応答解析モデルに用いる鉄筋コンクリート部の減衰定数について

本資料は、以下の添付書類の補足説明をするものである。

- ・添付書類「VI-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」
- ・添付書類「VI-2-9-3-1 原子炉建屋原子炉棟（二次格納施設）の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「VI-2-9-3-4 原子炉建屋基礎版の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「VI-2-12 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価結果」
- ・添付書類「VI-2-2-4 制御建屋の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「VI-2-2-21 緊急用電気品建屋の地震応答計算書」
- ・添付書類「VI-2-2-22 緊急用電気品建屋の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「VI-2-2-23 緊急時対策建屋の地震応答計算書」
- ・添付書類「VI-2-2-24 緊急時対策建屋の耐震性についての計算書」

 : 本日の説明範囲

## 別紙 2 新設建屋の設計用地下水位に伴う浮力に関する整理

## 1. 新設建屋の設計用地下水位に伴う浮力に関する整理

緊急用電気品建屋及び緊急時対策建屋（以下「新設建屋」という。）の設計用地下水位は、補足説明資料「補足-600-1 地盤の支持性能について」に示すとおり、地表面に設定しており、浮力の影響を受ける。

本資料では、新設建屋の地震応答解析及び耐震性評価における設計用地下水位に伴う浮力の考え方について、特に以下の観点から整理して説明するものである。

- ・基礎版設計における浮力の妥当性
- ・耐震壁の復元力特性設定
- ・S Rモデル採用の妥当性

整理した結果を表1に示す。

また、本資料は、以下の添付書類の補足説明をするものである。

- ・添付書類「VI-2-2-21 緊急用電気品建屋の地震応答計算書」
- ・添付書類「VI-2-2-22 緊急用電気品建屋の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「VI-2-2-23 緊急時対策建屋の地震応答計算書」
- ・添付書類「VI-2-2-24 緊急時対策建屋の耐震性についての計算書」

表1 新設建屋の設計用地下水位に伴う浮力に関する整理

| 項目              | 設計における考え方  | 関連図書  |
|-----------------|--|---|
| 基礎版設計における浮力の妥当性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>基礎版の評価に当たっては浮力を考慮した評価を実施している。</li> <li>一方で、保守性を考慮して設定した設計用地下水位と浸透流解析結果には差異があることから、その差異が最も大きい原子炉建屋を代表に影響評価を実施している。原子炉建屋基礎版の評価結果では鉛直上向きの荷重ケースで面外せん断が最も厳しい結果となっているが、浮力を低減した場合には、面外せん断の検定値が小さくなることを確認している。</li> <li>新設建屋の基礎版評価においても、面外せん断が厳しい荷重ケースは鉛直上向きとなっており、同様の結果が得られると判断した。</li> </ul>  | <p>補足-610-8 原子炉建屋基礎版の耐震性についての計算書に関する補足説明資料 別紙7 原子炉建屋基礎版の応力解析における浮力の影響検討</p>   |
| 耐震壁の復元力特性設定     | <ul style="list-style-type: none"> <li>新設建屋の地震応答解析結果からは、緊急用電気品建屋では全ての質点で第1折点以下、緊急時対策建屋では一部で第1折点を上回る質点があるものの、おおむね第1折点以下の応答結果が得られている。</li> <li>復元力特性の第1折点に着目した場合、関連するパラメータはFc（コンクリート強度）と<math>\sigma_v</math>（軸応力度）となるが、いずれも浮力の影響を受けないため、復元力特性設定への浮力の影響は無い。</li> </ul>   | <p>—</p>  |
| S Rモデル採用の妥当性    | <ul style="list-style-type: none"> <li>新設建屋の地震応答解析に当たっては、建屋を曲げ変形とせん断変形をすす耐震壁からなる質点系モデルとし、地盤を等価なばねで評価した建屋—地盤連成モデル（S Rモデル）としている。水平方向の地震応答解析モデルにおいては、基礎版底面に底面水平ばね及び底面回転ばねを、基礎版の埋込み部分には側面水平地盤ばねを考慮している。</li> <li>新設建屋について、地下水位を地表面とした場合の影響を考慮するために、地盤の有効応力の変化を考慮した地震応答解析（有効応力解析）を行い、S Rモデルによる地震応答解析結果と比較した結果、S Rモデルの応答結果の保守性を確認したことから、新設建屋にS Rモデルを適用することの妥当性があるものと判断した。</li> </ul> | <p>補足-610-10 緊急用電気品建屋の耐震性についての計算書に関する補足説明資料 別紙1-1-1 S Rモデルを適用することの妥当性について<br/>補足-610-11 緊急時対策建屋の耐震性についての計算書に関する補足説明資料 別紙1-1-1 S Rモデルを適用することの妥当性について</p> |

別紙 4 新設建屋の地震応答解析モデルに用いる鉄筋コンクリート部の減衰定数について

## 目 次

|                             |        |
|-----------------------------|--------|
| 1. はじめに.....                | 別紙 4-1 |
| 2. 減衰定数に関する検討の概要.....       | 別紙 4-2 |
| 3. 中小地震観測記録に基づく減衰定数の整理..... | 別紙 4-4 |
| 3.1 検討対象建屋.....             | 別紙 4-4 |
| 3.2 検討方法.....               | 別紙 4-4 |
| 3.3 検討結果.....               | 別紙 4-5 |
| 4. まとめ.....                 | 別紙 4-8 |

## 1. はじめに

地震応答解析に用いる RC 造部の減衰定数については、補足説明資料「補足-620-3 原子炉建屋の地震応答計算書に関する補足説明資料」の「別紙 4 地震応答解析モデルに用いる鉄筋コンクリート部の減衰定数に関する検討」（以下「減衰定数に関する検討」という。）において、既往の知見に加え、施設の地震観測記録による検討を行ったうえで、入力地震動及び建屋の構造と形状を踏まえた考察を加えて、女川原子力発電所の建屋の基準地震動  $S_s$  レベル及び弾性設計用地震動  $S_d$  レベルの地震応答解析に用いる鉄筋コンクリート部の減衰定数は、水平及び鉛直とも 5% と整理している。

「減衰定数に関する検討」においては、女川原子力発電所の建屋の観測記録を用いた検討で得られている減衰定数は、原子炉建屋の検討結果を主に示している。また、基準地震動  $S_s$  及び弾性設計用地震動  $S_d$  に対する応答レベルは、原子炉建屋の地震応答解析結果により、基準地震動  $S_s$  による耐震壁の最大応答せん断ひずみはスケルトンカーブの第 1 折点付近から第 2 折点を若干越える程度、弾性設計用地震動  $S_d$  による耐震壁の最大応答せん断ひずみは概ね  $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3}$  程度であり、その応答レベルに対して減衰定数に関する検討を行っている。なお、原子炉建屋以外の既設建屋においては、各建屋の補足説明資料に示すとおり、弾性設計用地震動  $S_d$  と同等の地震動レベルである 2011 年東北地方太平洋沖地震（以下「3.11 地震」という。）の観測記録を用いたシミュレーション解析により減衰定数 5% 以上で観測記録を再現できることを確認している。

一方、新設建屋の基準地震動  $S_s$  に対する応答レベルは、耐震壁の最大応答せん断ひずみが、緊急用電気品建屋では  $0.1 \times 10^{-3}$  以下、緊急時対策建屋では  $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3}$  程度である。また、第 2 保管エリアの直下に位置する淡水貯水槽は、弾性解析としているものの、スケルトンカーブの第 1 折点に対して、半分程度の応答レベルであり、特に緊急用電気品建屋及び淡水貯水槽は基準地震動  $S_s$  に対する応答レベルが小さい。

以上を踏まえ、本資料は、「減衰定数に関する検討」において想定している応答レベルよりも基準地震動  $S_s$  に対する応答レベルが小さい新設建屋に対して、地震応答解析に用いる鉄筋コンクリート部の減衰定数を 5% と設定することの妥当性を確認するものである。検討に当たっては、「減衰定数に関する検討」の結果を整理した上で、既設建屋の中小地震観測記録に基づく減衰定数の検討結果を用いて確認する。



## 2. 減衰定数に関する検討の概要

「減衰定数に関する検討」における整理の結果として、地震応答解析モデルに設定する減衰定数について考察した結果を表 2-1 に示す。

女川原子力発電所の原子炉建屋については、弾性設計用地震動  $S_d$  と同等の地震動レベルである 3.11 地震の観測記録の建屋減衰を NS 方向：7%，EW 方向：7%，UD 方向：5%とした水平方向及び鉛直方向のシミュレーションを行っており、加速度応答スペクトル及び最大応答加速度分布より、水平方向、鉛直方向共に、観測記録と良く整合している。RC 耐震壁試験結果よりも大きな減衰定数となっているが、RC 耐震壁試験は耐震壁そのものを用いた単純な構造体に対する減衰を評価しているのに対し、建屋は多数の耐震壁から構成された 3 次元的な広がりをもつ複雑な構造体であるためと考えられる。鉛直方向についても、複数の壁と床により構成される複雑な構造をもつ部位については、構造の複雑さによる減衰効果があると考えられる。女川原子力発電所の原子炉建屋は、多数の構造床や構造壁で構成されており、複雑な構造体に分類できる。このことから、実現象においては、RC 耐震壁試験から得られた 5%程度の減衰定数に対し、構造の複雑さによる減衰の増加により 2%程度以上減衰は増加し、第 1 折点付近では 7%程度以上、第 2 折点付近では 8%程度以上の減衰定数となることが推定される。

以上より、基準地震動  $S_s$  に対する応答レベルが第 1 折点を超える応答であること、弾性設計用地震動  $S_d$  は 3.11 地震と同等の地震動レベルであり、3.11 地震における減衰定数が NS 方向：7%，EW 方向：7%，UD 方向：5%であることを踏まえると、設計に用いる建屋の減衰として 5%を設定することは妥当であると整理している。また、原子炉建屋以外の既設建屋においても、3.11 地震の観測記録を用いたシミュレーション解析により減衰定数 5%以上で観測記録を再現できることを確認している。シミュレーション解析に用いた各建屋の解析モデルに設定した減衰定数について、表 2-2 に示す。なお、いずれの建屋もシミュレーション解析モデルでは側面地盤ばねを考慮していないため、建屋が埋め込まれていることによる建屋応答低減効果（地盤への逸散減衰）は減衰定数の中に含まれることになる。

一方で、第 1 折点未満の応答については、RC 耐震実験では 1~4%であり、減衰定数が振幅依存性を持っていることを考慮すると、建屋が複雑な構造体であることを踏まえても非常に応答の小さい領域では 5%よりも小さい減衰定数となることも考えられるため、既設建屋における既往の中小地震観測記録を用いた検討により、応答の小さい領域での減衰定数について検討を行う。

表 2-1 地震応答解析モデルに設定する減衰定数の考察にあたっての整理

|     | 応答レベル                | 線形   |              | 非線形                  |             |
|-----|----------------------|--|--------------|----------------------|-------------|
|     |                      | 第 1 折点<br>未満   | 第 1 折点<br>付近 | 第 2 折点<br>付近         | 許容限界<br>付近  |
| 実現象 | 女川原子力発電所<br>における地震動  | 弾性設計用地震動 S <sub>d</sub>  |              | 基準地震動 S <sub>s</sub> |             |
|     | RC 耐震実験<br>(履歴減衰を含む) | 1%~4%程度<br>↓<br>構造の複雑さによる減衰の増加<br>2%程度以上   | 5%程度         | 6%~7%<br>程度          | 6%~7%<br>程度 |
|     | 女川原子力発電所             | 5%程度以上<br>↑  | 7%程度<br>以上   | 8%程度<br>以上           | 8%程度<br>以上  |
| 解析  | 質点系モデル<br>(女川原子力発電所) | ↑ 5%程度以上<br>NS 方向 : 7%<br>EW 方向 : 7%<br>UD 方向 : 5%<br>で 3.11 地震の観測記録<br>をシミュレーション<br>(水平・鉛直) |              |                      |             |

表 2-2 既設建屋の 3.11 地震シミュレーション解析に用いた減衰定数

| 建屋             | 減衰定数 |    | 関連図書             |
|----------------|------|----|------------------|
|                | 水平   | 鉛直 |                  |
| 原子炉建屋          | 7%   | 5% | 補足-620-1 別紙 1    |
| 制御建屋           | 5%   | 5% | 補足-620-4 別紙 1-2  |
| タービン建屋         | 5%   | 5% | 補足-610-13 別紙 1-2 |
| 第 3 号機海水熱交換器建屋 | 20%  | 5% | 補足-610-12 別紙 1-2 |
| 第 1 号機制御建屋     | 5%   | 5% | 補足-610-15 別紙 1-2 |

### 3. 中小地震観測記録に基づく減衰定数の整理

新設建屋の基準地震動  $S_s$  に対する応答レベルは、特に緊急用電気品建屋及び淡水貯水槽は基準地震動  $S_s$  に対する応答レベルが小さく、耐震壁の最大応答せん断ひずみが、緊急用電気品建屋では  $0.1 \times 10^{-3}$  以下、淡水貯水槽は、スケルトンカーブの第 1 折点に対して、半分程度の応答レベルである。

ここでは、既設建屋の中小地震観測記録に基づく減衰定数を整理し、応答レベルが小さい新設建屋に設定する減衰定数について検討を行う。

#### 3.1 検討対象建屋

基準地震動  $S_s$  に対する応答レベルが小さい新設建屋の特徴としては、緊急用電気品建屋については、地下 1 階、地上 1 階で、地上部分は鉄骨造のフレーム構造となっているため、地下部分の高さ約 10m 程度の鉄筋コンクリート造部は地中部分のみの建屋である。また、淡水貯水槽は、基礎底面からの高さ約 13m の地中構造物となっている。既設建屋のうち、第 3 号機海水熱交換器建屋は、基礎底面からの高さ約 27m が地中に埋め込まれた建屋であり、特徴が類似していることから、第 3 号機海水熱交換器建屋を検討対象建屋とする。なお、建屋全体のうち半分埋め込まれた原子炉建屋についても合わせて検討を行い、傾向を確認した。

#### 3.2 検討方法

検討にあたっては、補足説明資料「補足-620-1 東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた建屋耐震設計方法への反映について」の「別紙 2 各建屋の剛性低下（固有振動数低下）の地震観測記録による傾向分析」と同様に、建屋を等価 1 質点系モデルに置換した ARX モデルを用いて、中小地震記録に対する建屋全体の平均的な減衰定数の変化の分析を行った。

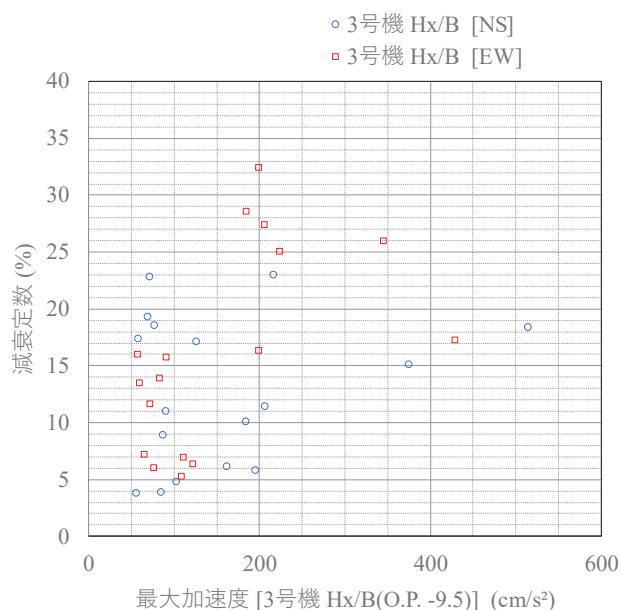
また、検討対象地震は、3.11 地震（基礎版上観測記録の最大加速度が  $500\text{cm/s}^2$  程度）よりも小さい応答を確認する観点から、基礎版上観測記録の最大加速度が  $50\text{cm/s}^2$  以上の地震を対象とした。なお、3.11 地震に対する既設建屋の応答レベルはスケルトンカーブの第 1 折点程度であり、新設建屋の基準地震動  $S_s$  に対する応答レベルがスケルトンカーブの第 1 折点の半分以下であることから、基礎版上観測記録の最大加速度が  $50\text{cm/s}^2$  以上の地震を検討対象とすることは十分に応答が小さい地震記録も含めた検討となる **と判断できる**。

### 3.3 検討結果

第3号機海水熱交換器建屋の検討結果を図4-1に、検討対象地震一覧を表4-1に示す。また、原子炉建屋の検討結果を図4-2に、検討対象地震一覧を表4-2に示す。

第3号機海水熱交換器建屋については、ばらつきは見られるものの、基礎版上観測記録の最大加速度が $100\text{cm/s}^2$ 以下の地震に対しても5%以上の減衰定数が得られている。また、原子炉建屋についても、同様にばらつきはあるものの、弾性設計用地震動 $S_d$ の地震動レベルよりも小さい中小地震記録に対しても、平均で5%程度の減衰定数が得られている。

原子炉建屋よりも第3号機海水熱交換器建屋の方が得られた減衰定数が有意に大きいことが確認できるが、これは、第3号機海水熱交換器建屋が建屋全体が埋め込まれた建屋である一方で、原子炉建屋は建屋の半分が埋め込まれた状況であることから、埋め込まれていることによる効果（地盤への逸散減衰）による差があるためと考えられる。新設建屋のうち、特に基準地震動 $S_s$ に対する応答レベルが小さい緊急用電気品建屋及び淡水貯水槽もほぼ全体が埋め込まれた状況であるため、減衰定数5%を設定することは十分に保守性があると判断できる。



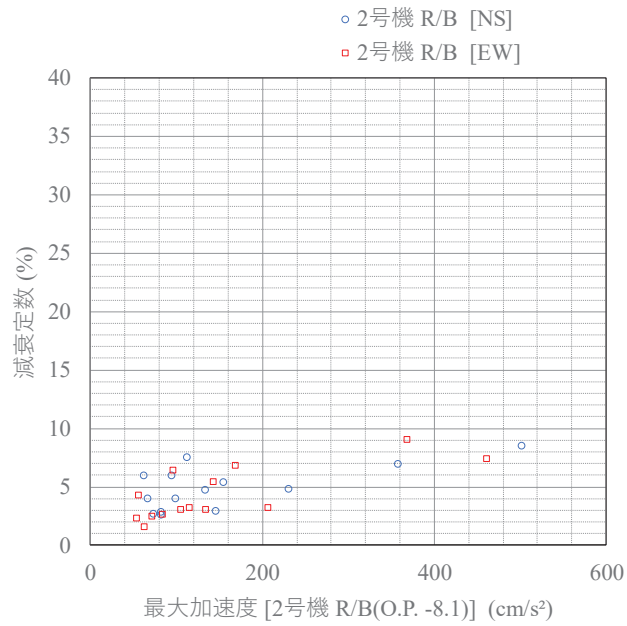


図 4-2 減衰定数の検討結果（原子炉建屋）

表 4-2 検討対象地震一覧（原子炉建屋）

| No. | 地震名  | 加速度<br>(cm/s <sup>2</sup> ) |       |
|-----|--|-----------------------------|-------|
|     |  | NS                          | EW    |
| 1   | 2003.05.26 18:24 宮城県北部 (M7.1, Δ=48km)      | 112.3                       | 167.8 |
| 2   | 2005.08.16 11:46 宮城県東方沖 (M7.2, Δ=74km)     | 230.0                       | 206.0 |
| 3   | 2011.03.11 14:46 宮城県東方はるか沖 (M9.0, Δ=124km) | 501.5                       | 460.7 |
| 4   | 2011.03.11 16:28 岩手県東方沖 (M6.6, Δ=99km)     | 61.7                        | 55.8  |
| 5   | 2011.03.28 07:23 宮城県東方沖 (M6.5, Δ=74km)     | 81.6                        | 95.6  |
| 6   | 2011.04.07 23:32 宮城県東方沖 (M7.2, Δ=43km)     | 357.8                       | 367.4 |
| 7   | 2012.08.30 04:05 宮城県東方沖 (M5.6, Δ=36km)     | 94.8                        | 71.1  |
| 8   | 2013.04.17 21:03 金華山付近 (M5.9, Δ=13km)      | 82.2                        | 62.0  |
| 9   | 2013.08.04 12:28 宮城県東方沖 (M6.0, Δ=38km)     | 98.7                        | 82.9  |
| 10  | 2016.10.16 16:37 金華山付近 (M5.2, Δ=9km)       | 72.9                        | 104.5 |
| 11  | 2016.11.12 06:43 金華山付近 (M5.9, Δ=12km)      | 66.0                        | 53.0  |
| 12  | 2021.02.13 23:07 福島県東方沖 (M7.3, Δ=77km)     | 133.7                       | 142.8 |
| 13  | 2021.03.20 18:09 金華山付近 (M6.9, Δ=14km)      | 145.7                       | 133.2 |
| 14  | 2021.05.01 10:27 宮城県東方沖 (M6.8, Δ=33km)     | 154.8                       | 114.4 |

#### 4. まとめ

応答レベルが小さい新設建屋に対しても、地震応答解析に用いる鉄筋コンクリート部の減衰定数を5%と設定することの妥当性を確認するため検討を行った。

検討に当たっては、「減衰定数に関する検討」の結果を整理した上で、既設建屋の中小地震観測記録に基づく減衰定数の検討結果を用いて確認を行った。

既設建屋の中小地震観測記録に基づく減衰定数の検討により、新設建屋のうち、特に基準地震動  $S_s$  に対する応答レベルが小さい緊急用電気品建屋及び淡水貯水槽について、ほぼ全体が埋め込まれた状況であることを踏まえると、第3号機海水熱交換器建屋における検討結果から埋め込まれていることによる効果が見込まれ、減衰定数5%を設定することは十分に保守性があると判断した。

なお、減衰定数を5%と設定することの十分な保守性を確認したものの、緊急用電気品建屋、淡水貯水槽及び緊急時対策建屋については、新設建屋であり観測記録を用いたシミュレーション解析ができていないことを踏まえ、念のため減衰定数3%による解析を実施し、その影響を確認することとする。