

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	O2-他-F-24-0006_改2
提出年月日	2021年4月19日

# 女川原子力発電所第2号機

## 3.11地震等の影響を踏まえた建屋の耐震評価について

---

2021年4月19日  
東北電力株式会社

# 目次

---

## 1. はじめに

## 2. 地震応答解析モデルの策定

### 2.1 3.11地震等の影響を踏まえた検討(原子炉建屋)

### 2.2 原子炉建屋以外の既設建屋の地震応答解析モデルの策定

## 3. 入力地震動の算定

### 3.1 入力地震動算定における既工認からの見直し概要(原子炉建屋)

### 3.2 原子炉建屋以外の既設建屋の入力地震動の算定方法

## 4. 新設建屋の耐震評価への反映について

# 1. はじめに

- 第876回審査会合(2020年7月14日)において説明した主要説明項目のうち、「詳細設計申送り事項 No.2-4 3.11地震等の影響を踏まえた建屋の耐震評価」に関し、以下について説明する。

## ①初期剛性低下の地震応答解析モデルへの反映

- ✓ 3.11地震等の影響を踏まえた検討の全体概要, 原子炉建屋における評価とその代表性
- ✓ 原子炉建屋以外の既設建屋の地震応答解析モデルの策定プロセスと策定結果

## ②入力地震動の算定方針

- ✓ 入力地震動算定における既工認からの見直し概要(原子炉建屋を代表に検討)
- ✓ 原子炉建屋以外の既設建屋の入力地震動の算定方針

## ③新設建屋の評価への反映方針

### 【2-4】3.11地震等の影響を踏まえた建屋の耐震評価

11

#### 1. 概要

- 建屋の地震応答解析モデルの策定方針については、原子炉建屋を代表に検討し、3.11地震等の地震やコンクリートの乾燥収縮によるひび割れ等に伴う初期剛性の低下について、地震観測記録や試験データなどから適切に地震応答解析モデルへ反映し、保守性を確認した上で適用することとしている。
- 原子炉建屋以外の既設建屋は、原子炉建屋における検討と同様の考え方を適用することによって地震応答解析モデルを構築することとしている。
- 具体的には、過去の地震観測記録の傾向分析や質点系シミュレーション解析に基づき建屋初期剛性を評価し、地震応答解析モデルに反映しており、その詳細評価結果について説明する。
- 入力地震動の評価については、原子炉建屋は表層地盤の影響を考慮した入力地震動(E+F入力)とし、また算定にあたっては表層地盤の非線形性を考慮した解析を採用している。
- 原子炉建屋以外の既設建屋は、建屋ごとに周辺地盤との接地状況やシミュレーション解析結果を踏まえた算定方法としている。
- そのうち制御建屋については、表層地盤の影響を考慮せずに基準地震動 $S_s$ または弾性設計用地震動 $S_d$ を建屋基礎底面に直接入力(2E入力)することとしており、その詳細内容について説明する。

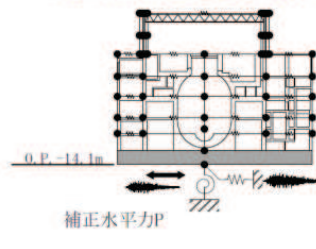


図1 地震応答解析の概念図  
(原子炉建屋)

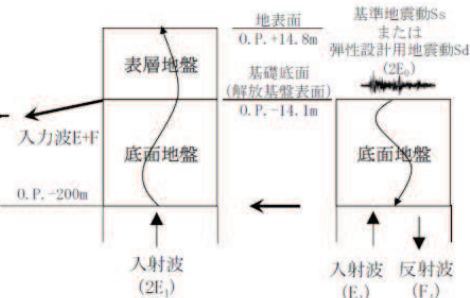


図2 地震応答解析の概念図  
(制御建屋)

#### 2. 今後の説明予定

- 原子炉建屋及び制御建屋について、2020年5月提出の計算書等により地震応答解析モデル及び入力地震動評価の詳細説明、地震応答解析結果を説明予定。その他建屋については、2020年11月に資料提出し、説明予定。

2020年7月14日  
第876回審査会合(資料1)

## 3.11地震等の影響を踏まえた耐震評価の方針

- 工事計画認可において、原子炉建屋以外の既設建屋は、設置変更許可における原子炉建屋の検討と同様の考え方を適用することによって耐震評価を実施することとしている。具体的には、
- ① **初期剛性の低下**に関し、原子炉建屋と同様に、**質点系シミュレーション解析に基づき建屋初期剛性を評価し、過去の地震観測記録の傾向分析や点検結果等を踏まえて、適切に地震応答解析モデルに反映する。**
  - ② **入力地震動の算定**については、原子炉建屋は表層地盤の影響を考慮した入力地震動(E+F入力)とし、表層地盤の非線形性を考慮した解析(逐次非線形解析)を採用するが、原子炉建屋以外の既設建屋は、**建屋ごとに周辺地盤との接地状況やシミュレーション解析結果を踏まえて決定する。**

### 3.11地震等の影響を踏まえた既設建屋の耐震評価に係る各審査段階の説明

	設置変更許可	工事計画認可
地震応答解析モデルの策定	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 原子炉建屋について、質点系シミュレーション解析に基づき建屋初期剛性を評価し、過去の地震観測記録の傾向分析や点検結果等を踏まえて、適切に地震応答解析モデルに反映</li> <li>• 初期剛性低下の要因分析を実施の上、その要因が終局耐力に及ぼす影響が小さいことを耐震実験で確認したことから、復元力特性の設定に反映</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 原子炉建屋以外の既設建屋においても原子炉建屋と同様の考え方を適用し、質点系シミュレーション解析に基づき建屋初期剛性を評価し、過去の地震観測記録の傾向分析や点検結果等を踏まえて適切に地震応答解析モデルに反映</li> </ul>
入力地震動の算定	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 原子炉建屋は3.11地震等のシミュレーション解析の結果、直接入力(2E入力)よりもE+F入力の方が観測記録との整合性が良い結果を与えたため、表層地盤の影響を考慮した入力地震動を採用(E+F入力を採用)</li> <li>• 他の建屋については埋込形状や同様のシミュレーション解析による検討を踏まえ、入力地震動の算定方法について決定する方針を記載</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 左記の方針を踏まえた検討の結果、今回工認では以下の3建屋で表層地盤の影響を考慮(E+F入力を採用)し、残りの建屋は既工認通りとした 原子炉建屋 タービン建屋 第3号機海水熱交換器建屋</li> </ul>

### 3.11地震等の影響を踏まえた検討の全体概要

- 主要建屋で観測された地震観測記録を用いたシミュレーション解析結果から、建屋初期剛性が設計で考慮している初期剛性に比べ低下している傾向が確認された。
- 初期剛性が設計値より低下している要因を特定し、その要因を踏まえた基準地震動 $S_s$ に対する地震応答解析モデルの策定など、原子炉建屋(主にオペフロ上部)の評価を代表として設計体系に反映すべき事項を整理した。

#### 3.11地震等の施設への影響を踏まえた耐震性評価に反映すべき事項の検討の全体フロー

地震観測記録を用いたシミュレーション解析により、初期剛性の低下を確認

#### 初期剛性が設計より低下している要因の検討

【地震等による構造的影響】

- 実機建屋の3.11地震等に対する振動特性の把握
- 3.11地震等における構造的損傷の有無
- 3D-FEMモデルによるオペフロ上部の剛性低下(大架構)
- 繰返し試験体(耐震実験[1])による確認

【コンクリートの乾燥収縮の影響】

- 剛性低下や乾燥収縮の影響等に関する文献レビュー
- 実機の乾燥収縮状態等の把握
- 乾燥試験体(耐震実験[3])による確認

【その他の要因影響】

- 支持地盤の剛性低下の有無
- 実機コンクリート圧縮強度の設計基準強度との比較

#### 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響の確認

【地震による事前損傷が終局耐力等に与える影響】

- 事前損傷試験体(耐震実験[2])による確認

【乾燥収縮が終局耐力等に与える影響】

- 乾燥試験体(耐震実験[3])による確認
- 乾燥収縮の影響等に関する文献レビュー

オペフロ上部耐震補強工事

設計体系に反映すべき事項の整理(地震応答解析モデルの策定, ばらつき評価等)

## 原子炉建屋(オペフロ上部の検討)の代表性

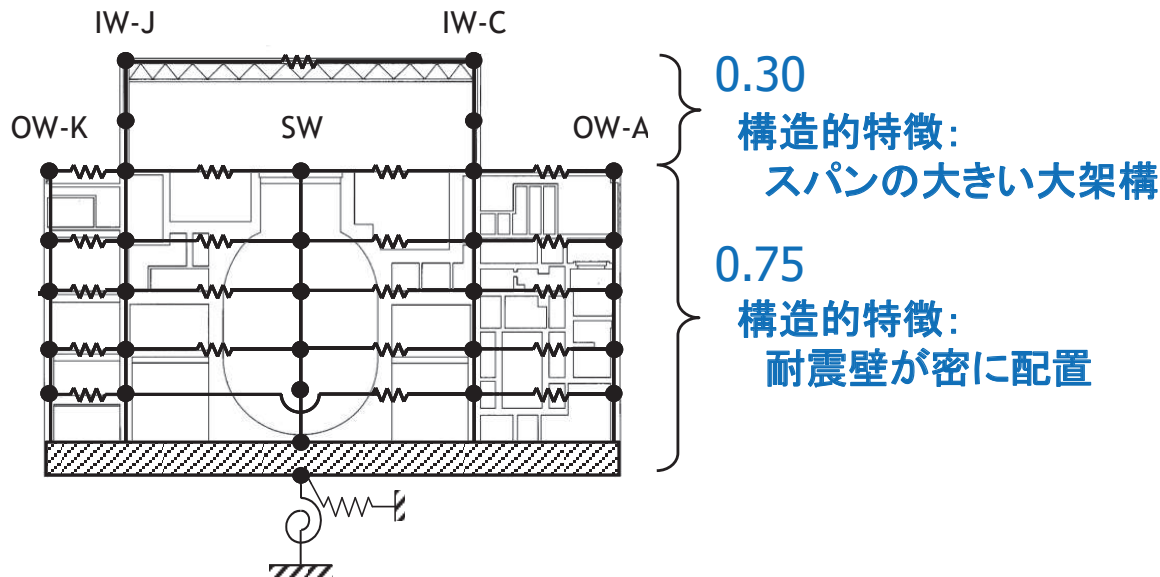
### 【原子炉建屋における検討】

- 今回工認における原子炉建屋の地震応答解析モデルの初期剛性低下の補正係数は、3.11地震等の地震観測記録を用いたシミュレーション解析に基づき、影響検討も踏まえて下表のとおり設定している。
- 特に低下率の大きい上部(地上3階及びクレーン階(オペフロ上部; O.P.33.2mより上部))では、コンクリートの乾燥収縮による影響に加え、スパンの大きい大架構の構造的特徴も影響\*しており、その特徴を踏まえた詳細検討で3.11地震等による構造的健全性について問題ないことを確認している。

### 【他の既設建屋への反映】

- 原子炉建屋以外の既設建屋についても地震観測記録によって算定された剛性低下率は、構造的特徴も踏まえると、原子炉建屋下部や上部の検討結果と同様の特徴・傾向を有していることから、地震観測記録を踏まえた剛性低下を地震応答解析モデルに反映する。

\* : オペフロ上部の剛性補正係数が0.3, 0.5とオペフロ下部の0.75, 0.8よりも小さく、これは、オペフロ上部の構造的な特徴として、比較的耐震壁やスラブが薄くスパンの大きい大架構であることが影響していると考えられるため、実態を表す3次元FEMモデルと質点系モデルにより剛性と耐力を比較検討し、質点系モデルの保守性を確認している。



原子炉建屋 NS方向 シミュレーション解析モデルの補正係数

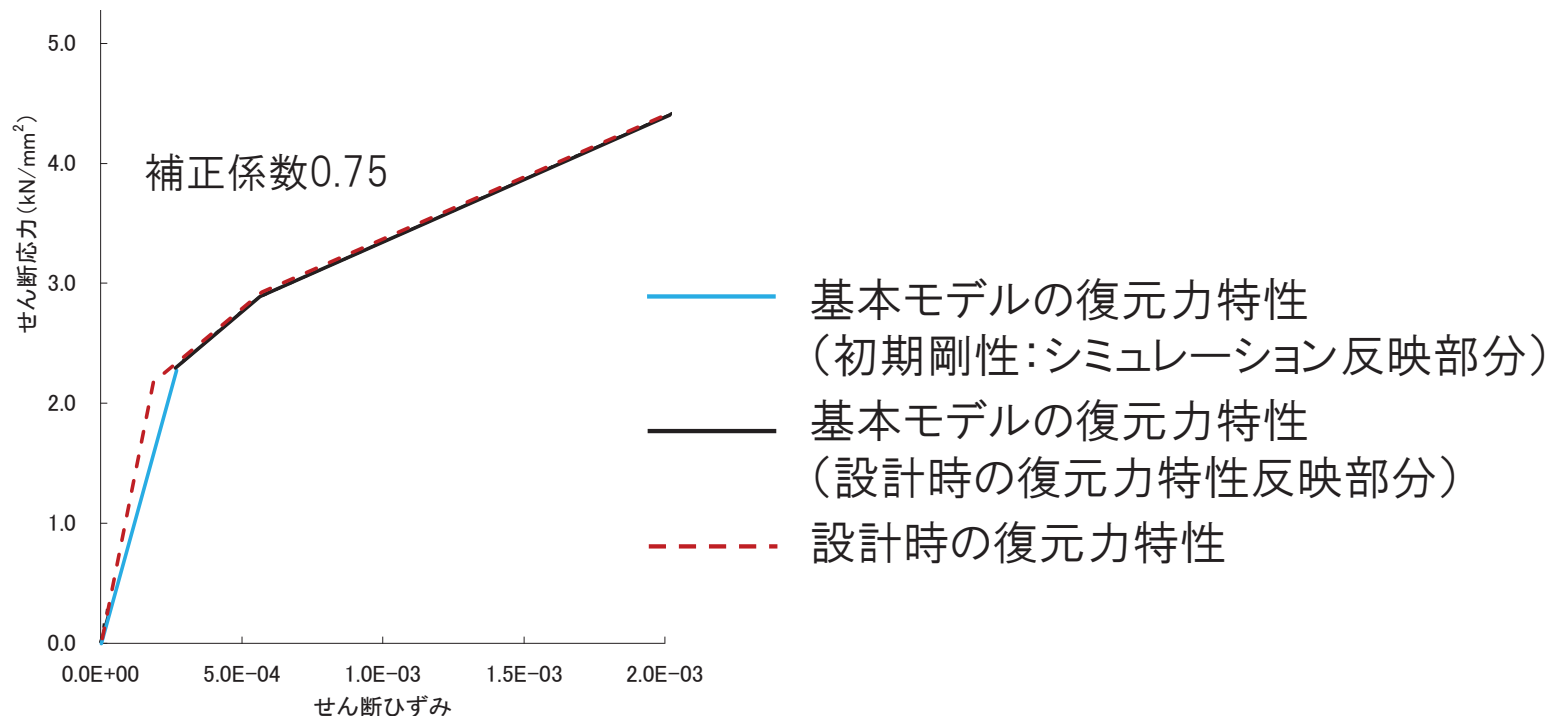
原子炉建屋の初期剛性の設計値に対する補正係数

原子炉建屋	NS方向	EW方向
地上3階及びクレーン階 (O.P.33.2mより上部)	0.30	0.50
地下3階～地上2階 (O.P.33.2mより下部)	0.75	0.80

## 地震応答解析モデル(基本モデル)の策定概要

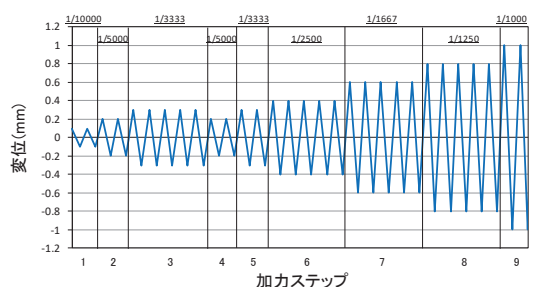
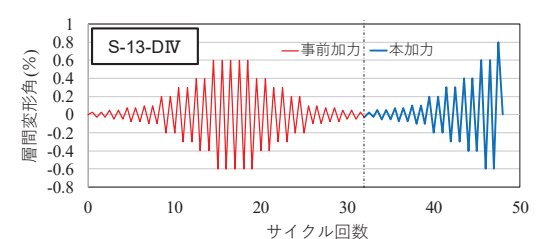
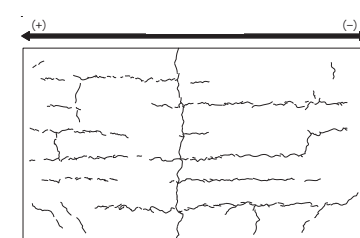
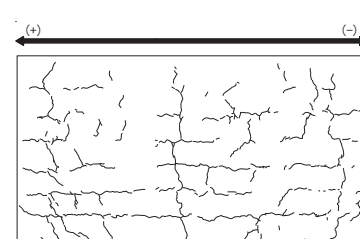
### 【原子炉建屋における策定概要】

- 設計よりも初期剛性が低下した要因は、地震力の影響とコンクリートの乾燥収縮の影響の重畳と考えられることから、その要因とその影響に関する検討結果を踏まえて、基本モデルの復元力特性を設定する。
- **耐震実験**より、地震による事前損傷やコンクリートの乾燥収縮はJEAG式の評価基準値付近(せん断ひずみ $2.0 \times 10^{-3}$ )及び終局点(せん断ひずみ $4.0 \times 10^{-3}$ )に影響を与えないこと、実機の乾燥収縮はほぼ定常状態にあることから、**ベースとする復元力特性は、既工認と同様、JEAG式を基本モデルに適用する。**
- 初期剛性を低下させた3.11地震等のシミュレーション解析において、オペフロ上部のように折点を超えるような応答に対しても十分観測記録との整合性が確保できることを踏まえ、**初期剛性は3.11地震、4.7地震時の低下した状態を基本モデルに採用する。**



基本モデルのせん断力復元力特性  
(原子炉建屋:補正係数0.75の例)

# 耐震実験の全体像(1)

	耐震実験[1]	耐震実験[2]	耐震実験[3]
目的	比較的大きな地震動を繰返し経験することで耐震壁の剛性が低下していく傾向が認められるかを確認	耐震壁の損傷程度の違いが耐震壁の初期の剛性や終局耐力に及ぼす影響について確認	乾燥収縮が、耐震壁の初期の剛性や終局耐力に及ぼす影響について確認
実験概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 耐震壁に対する静的繰返し加力を行う耐震実験</li> <li>➢ 鉄筋比1.4%</li> <li>➢ 微小変形レベルでの繰返し加力時の剛性の低下傾向を確認するために、同一変位に対する繰返し加力のサイクル数は、最大5サイクル</li> <li>➢ 経験した変形角よりも小さい変形角(インナーループ)での剛性低下挙動も検討するため、インナーループとなる繰返し加力を実施</li> </ul>  <p>加力概念図</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 損傷度合いをパラメータとした静的加力による耐震実験</li> <li>➢ 加力パターンは、“事前加力”で損傷度合いに違いを与え、“本加力”によって、終局耐力まで加力</li> <li>➢ 損傷度合いは、無損傷, 損傷度 I (せん断変形角<math>0.75 \times 10^{-3}</math>) ~ IV (せん断変形角<math>6.0 \times 10^{-3}</math>)の計5試験体</li> <li>➢ 鉄筋比1.32%</li> </ul>  <p>加力概念図</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 補足的な検討として、鉄筋量を変えた場合(半分の鉄筋量)の実験を実施</li> <li>➢ 鉄筋比0.66%</li> <li>➢ 他の条件は上記実験と同じ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 試験体の大きさ・形状や配筋などは耐震実験[1]と同じ</li> <li>➢ 加力方法も耐震実験[1]と同じで、繰返し加力、また、インナーループとなる繰返し加力を実施</li> <li>➢ 約3ヶ月間気中養生により壁部分を乾燥</li> <li>➢ 実験時のコンクリートの乾燥収縮率は約800<math>\mu</math></li> </ul>  <p>加力前の乾燥試験体[1]乾燥収縮ひび割れ状況</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 乾燥期間のパラメータスタディとして、約8ヶ月間気中養生により壁部分を乾燥</li> <li>➢ 実験時のコンクリートの乾燥収縮率は約1000<math>\mu</math></li> </ul>  <p>加力前の乾燥試験体[2]乾燥収縮ひび割れ状況</p>



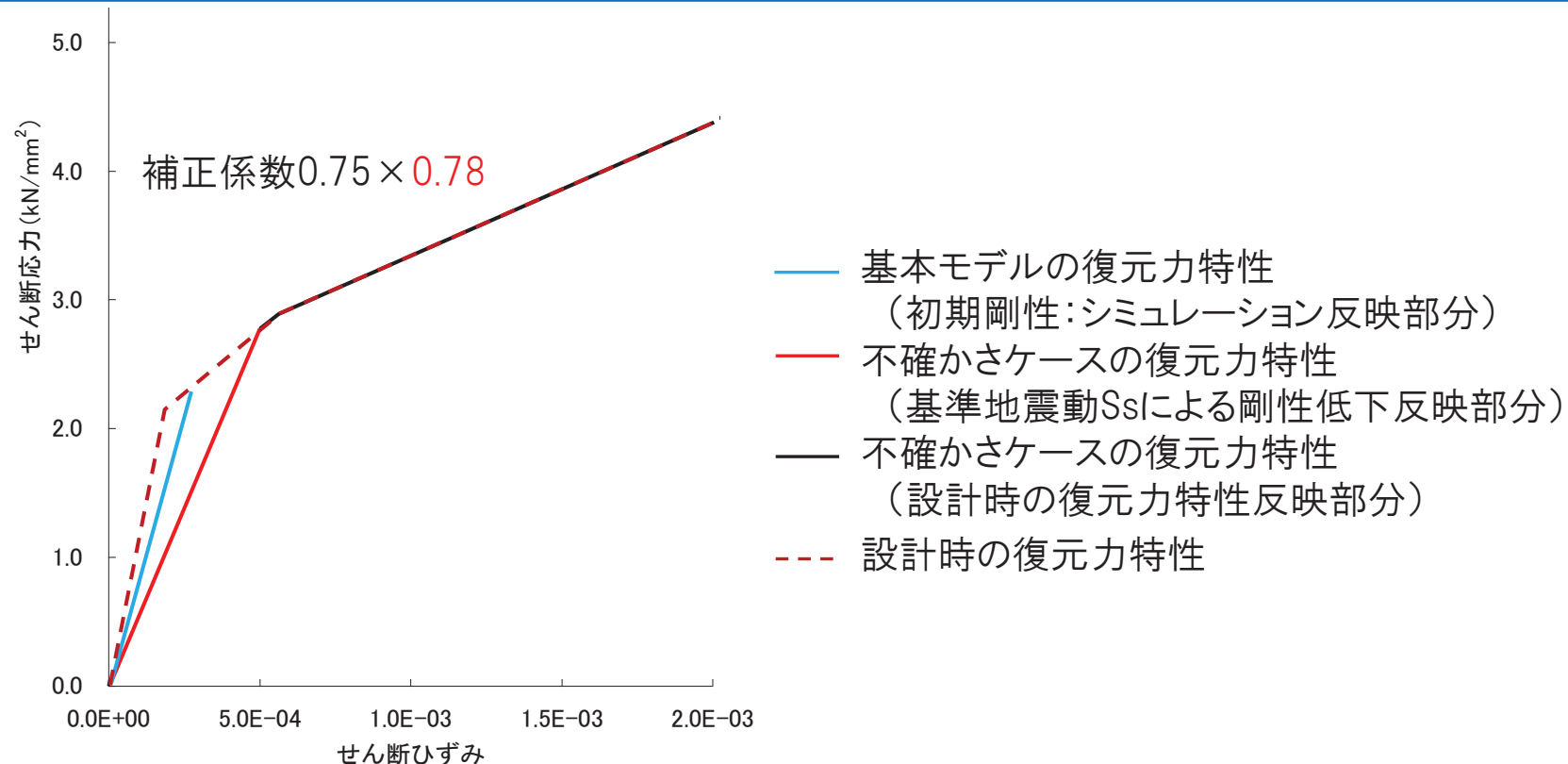
# 耐震実験の全体像(2)

	耐震実験[1]	耐震実験[2]	耐震実験[3]
<b>成果</b> (実験毎)	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ JEAG式に対し、初期剛性、評価基準値付近、終局耐力付近すべてにおいて上回る結果となり、繰返し加力による有意な剛性低下は認められなかった。</li> <li>➢ インナーループによる繰返し加力や主要変形角での5回の繰返し加力から、事前損傷が評価基準値付近の耐力や終局耐力に与える影響は小さいことを確認した。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 損傷度 I ~ IV 全てのケースで終局耐力は、無損傷の試験体と同等であり、地震による事前損傷が、JEAG式の終局耐力に与える影響は小さいことを確認した。</li> <li>➢ 損傷度 I, II では、JEAG式の評価基準値付近での耐力低下は認められなかった。</li> <li>➢ 補足検討として実施した鉄筋比0.66%とした場合でも、その傾向は変わらなかった。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 乾燥試験体の初期剛性はJEAG式より低下するものの、評価基準値付近や終局耐力ではJEAG式を上回ることを確認した。また、乾燥試験体[1][2]で、初期の剛性を含めて、荷重-変形関係は同等であった。</li> <li>➢ インナーループによる繰返し加力や主要変形角での5回の繰返し加力から、乾燥させた試験体でも事前損傷が評価基準値付近の耐力や終局耐力に与える影響は小さいことを確認した。</li> </ul>
<b>成果</b> (各実験の比較)	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 耐震実験[1]と耐震実験[3]との条件の違いは、乾燥収縮の有無であるが、剛性低下の傾向に違いが生じ、耐震実験[3]の方が初期の剛性低下量が大きい。なお、主要地震(2005年宮城県沖の地震や3.11地震)時の原子炉建屋の建設当初から剛性低下量との整合性は耐震実験[3]の方が良い。</li> <li>➢ このことから、設計よりもさらに初期剛性が低下した要因として、地震の影響に加え、乾燥収縮の影響が重畳したことを示す結果となっている。</li> <li>➢ また、インナーループでの繰返し加力や主要変形角での5回の繰返し加力の結果から、乾燥していない試験体(耐震実験[1])と乾燥した試験体(耐震実験[3])の事前損傷の影響による剛性低下の傾向はほとんど変わらないことを確認した。</li> </ul>		
<b>耐震実験結果のまとめ</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 繰返し加力による有意な剛性低下は認められなかった。</li> <li>➢ 原子炉建屋の建設当初からの剛性低下量は、耐震実験[3](地震と乾燥収縮の影響の重畳)の結果が、整合性が良い。</li> <li>➢ 地震による事前損傷や乾燥収縮の影響が、原子力施設建屋の基準地震動Ssに対する評価基準値(せん断ひずみ: <math>2.0 \times 10^{-3}</math>)付近の耐力や終局耐力に与える影響は小さい。</li> </ul>		

## 地震応答解析モデル(不確かさケース)の設定[初期剛性]

### 【原子炉建屋の基準地震動Ss評価に対する不確かさケース】

- 過去の中小地震も含めた記録では時間経過に伴い剛性が低下する傾向の他に、過去の観測よりも大きな加速度となる更新地震によっても剛性が低下する傾向が認められていることから、初期剛性低下の影響を保守的に反映するモデルを不確かさケースとして採用する。
- 不確かさケースの初期剛性は、基準地震動Ss入力前後の1次固有振動数の比( $f_{Ss後}/f_{Ss前}$ )から剛性比を算定し、それを基本モデルの初期剛性に掛けることによって算定する。(原子炉建屋の場合、基本ケースの0.78倍)
- 不確かさケースは、応答が小さい耐震壁の剛性も含めて一律に低下させるため、基本モデルに基準地震動Ssを繰り返し入力する応答よりも変形が進み、保守的評価となる。



不確かさケースのせん断力復元力特性  
(原子炉建屋: 補正係数0.75の例)

## 弾性設計用地震動Sdに対する評価

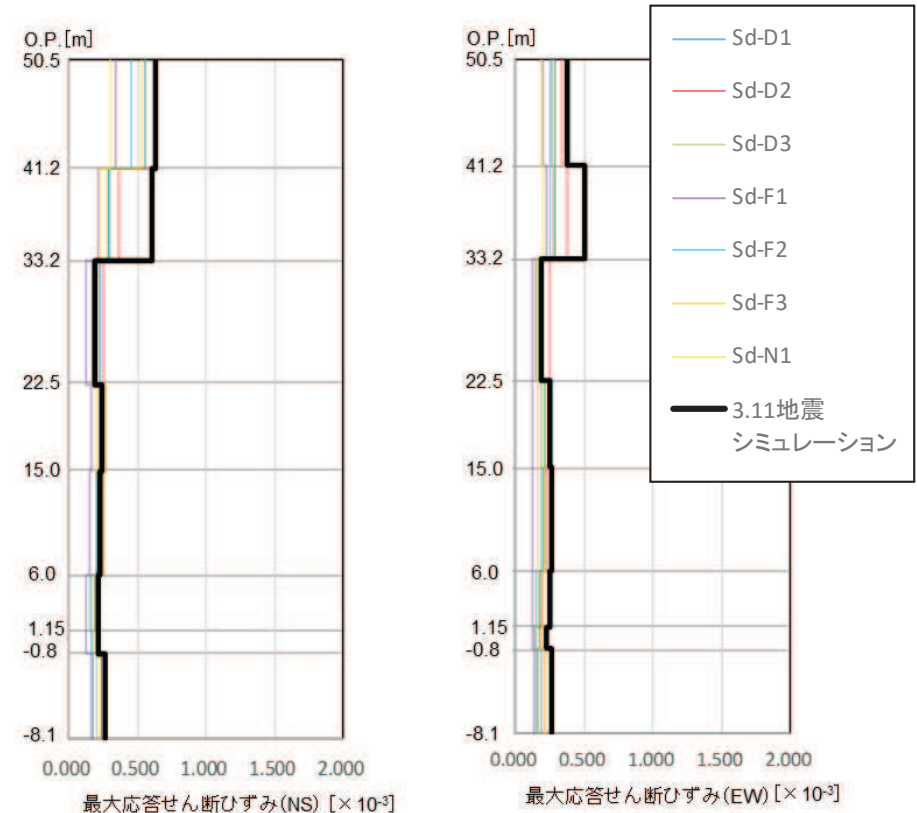
### 【原子炉建屋の弾性設計用地震動Sd評価に対する 基本ケースと不確かさケース】

#### ➤ 基本ケース

- ・弾性設計用地震動Sdに対する建屋応答が3.11地震による応答と同程度であることから、3.11地震シミュレーション解析の剛性を採用している基本モデルによる評価を行い、おおむね弾性範囲であることを確認する。
- ・おおむね弾性範囲であることについては、応力が許容限界以下であることを確認することを基本とする。
- ・なお、初期剛性低下を考慮した復元力特性を用いていることにより同じ応力度でも変形(せん断ひずみ)が大きくなるが、耐震実験[2]で地震による事前損傷がJEAG式の評価基準値付近(せん断ひずみ $2.0 \times 10^{-3}$ )及び終局点(せん断ひずみ $4.0 \times 10^{-3}$ )の耐力に影響を与えないことを確認していることから、基準地震動Ssに対する安全機能の保持をより高い精度で確認する観点からは問題ない。

#### ➤ 不確かさケース

- ・建屋の経年に伴う乾燥収縮はほぼ収束していること、弾性設計用地震動Sdを超えるような大きな揺れに対して更なる剛性低下が生じた場合の建屋の耐震安全性については、上記のとおり耐震実験による結果から基準地震動Ssに対する安全機能の保持をより高い精度で確認する観点からは問題なく、Sd評価においては剛性低下に関する不確かさケースは設定しない。

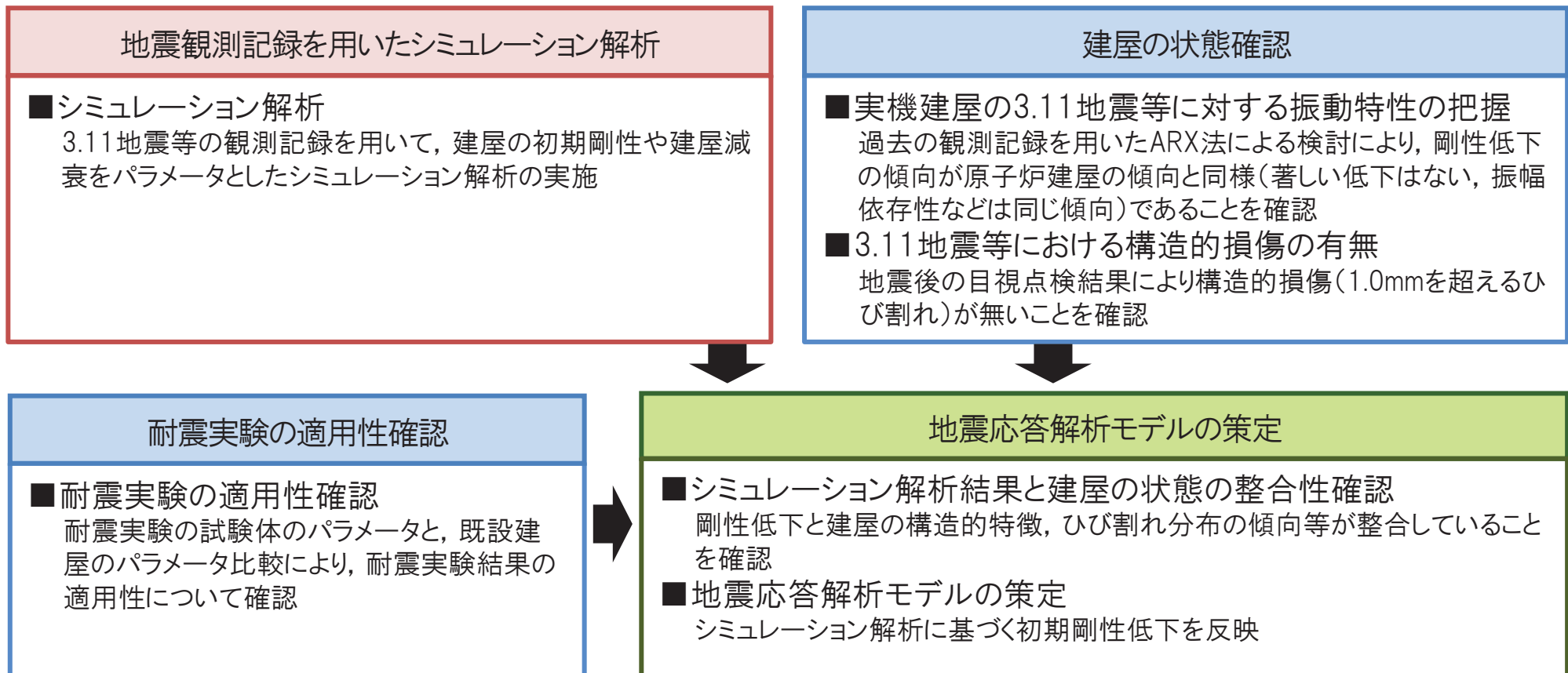


弾性設計用地震動Sdおよび3.11地震に対する  
最大応答せん断ひずみの比較(原子炉建屋)

## 原子炉建屋以外の既設建屋への反映フロー

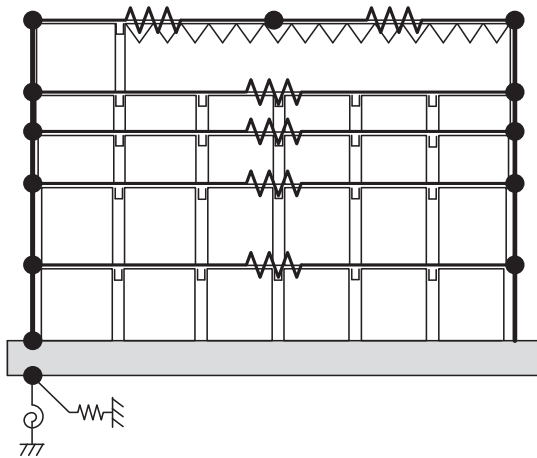
- 原子炉建屋(主にオペフロ上部)を代表に3.11地震等の施設への影響を踏まえた設計体系に反映すべき事項の検討を実施し、初期剛性低下の要因分析とその要因が終局耐力等に与える影響について確認を行った。
- 原子炉建屋以外の既設建屋についても、地震観測記録によって算定された剛性低下率は、構造的特徴も踏まえると、原子炉建屋上部や下部の検討結果と同様の特徴・傾向を有していること、過去の観測記録の検討により剛性低下の傾向も同様であることから、地震観測記録を踏まえた剛性低下を地震応答解析モデルに反映する方針としている。
- 既設建屋への反映にあたっては、以下のフローにて実施した。

### 既設建屋への反映フロー



# 地震観測記録を用いたシミュレーション解析(制御建屋の検討例)

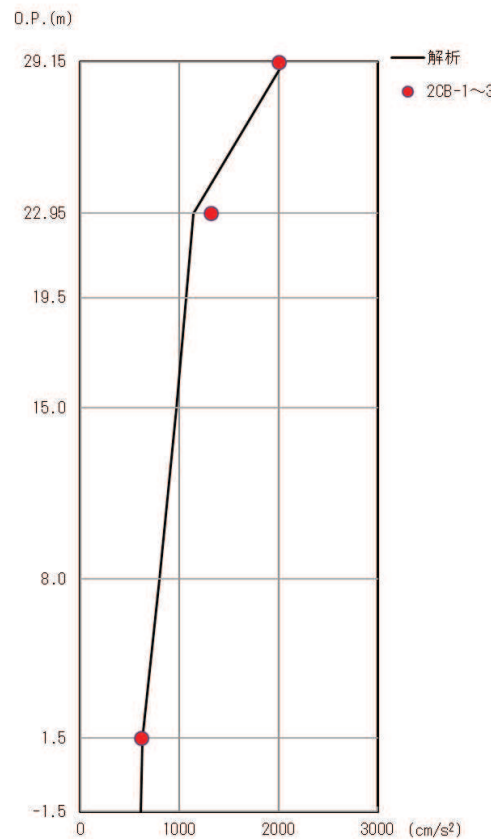
- 3.11地震等の観測記録を用いて、建屋の初期剛性や建屋減衰をパラメータとしたシミュレーション解析の実施した。シミュレーション解析は、今回工認対象となる既設建屋(地震計を設置している建屋)全てに対して実施した。
- その例として制御建屋の検討結果を例に示す。制御建屋については構造的特徴や固有振動数の経時的変化の傾向も踏まえ、初期剛性の補正係数は建屋全体一律に設定し、NS方向で0.4, EW方向で0.5とすることで、観測記録との整合性が良い結果が得られた。
- NS方向の補正係数がEW方向に比べて小さいのは、原子炉建屋の傾向と整合している。



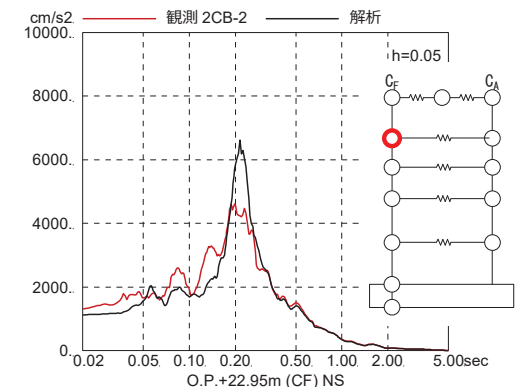
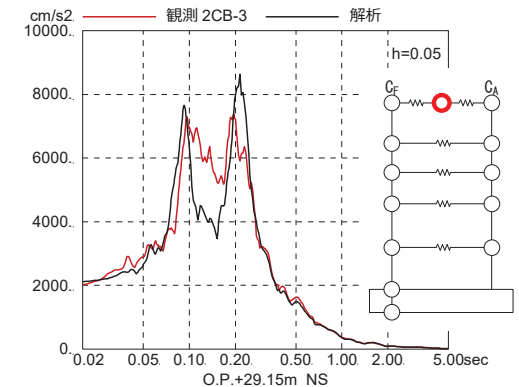
制御建屋シミュレーション解析モデル(NS方向)

制御建屋の初期剛性の設計値に対する補正係数

	NS方向	EW方向
制御建屋	0.40	0.50



最大応答加速度分布

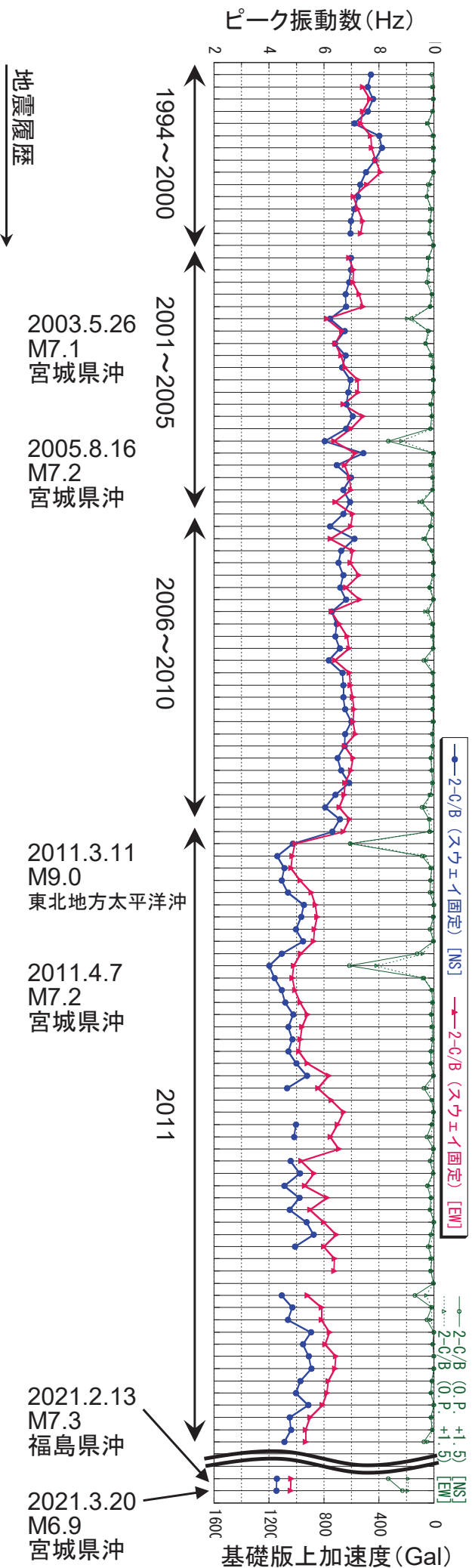


加速度応答スペクトル

シミュレーション解析結果(3.11地震, NS方向)

## 建屋の状態確認(制御建屋の検討例)

- 建屋の基礎版上に設置された地震計と建屋上部に設置された地震計で得られた観測記録の伝達関数から、建屋の卓越周期(卓越振動数)を評価した。伝達関数から卓越周期の判別にはARX法を採用した。原子炉建屋と同様に、今回工認対象となる既設建屋全てに対して検討を実施した。
- その例として制御建屋の検討結果を例に示す。地震動レベルの大きさと建屋の剛性低下(振動数低下)については相関性が認められる。また、わずかながら経時的変化による剛性低下(振動数低下)傾向も認められ、これは原子炉建屋の傾向と整合している。他の建屋も同様の傾向となっている。
- また、制御建屋における3.11地震後に実施した耐震壁の目視点検結果では、原子炉建屋と同様に構造的損傷(1.0mmを超えるひび割れ)は無いが、地震による微細なひび割れがあり、初期剛性低下の傾向と整合している。
- なお、2021.2.13福島県沖の地震及び2021.3.20宮城県沖の地震におけるピーク振動数は3.11地震時と同等であり、今回工認モデルの適用性についても確認した。



### 固有振動数低下の傾向(水平方向)(制御建屋)

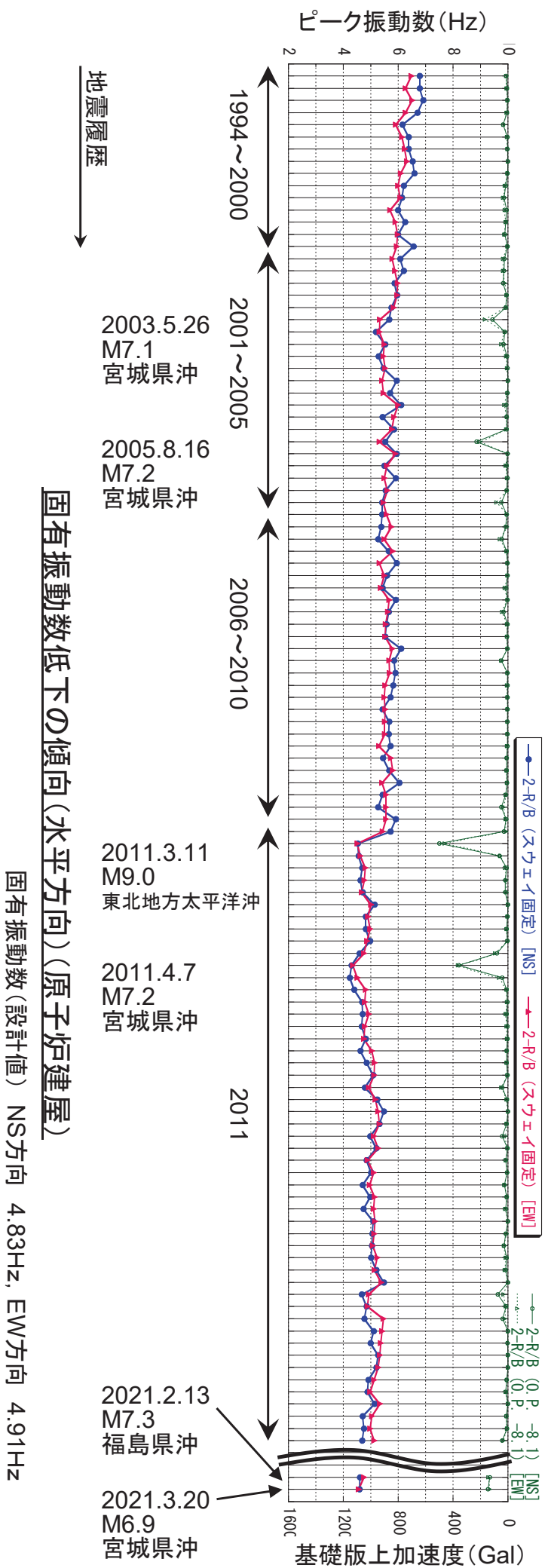
固有振動数(設計値) NS方向 7.15Hz, EW方向 6.94Hz

※2011.3.11地震以降にNS方向よりもEW方向の振動数が0.3~0.5Hz程度低くなっているが、これは初期剛性の補正係数がEW方向0.51に対してNS方向0.4となっていることと概ね整合している。

## 2. 地震応答解析モデルの策定 2.2 原子炉建屋以外の既設建屋の地震応答解析モデルの策定

### (参考)建屋の状態確認(原子炉建屋の検討例)

- 地震動レベルの大きさと建屋の剛性低下(振動数低下)については相関性が認められる。また、わずかながら経時的変化による剛性低下(振動数低下)傾向も認められる。
- なお、2021.2.13福島県沖の地震及び2021.3.20宮城県沖の地震におけるピーク振動数は3.11地震時と同等であり、今回工認モデルの適用性についても確認した。

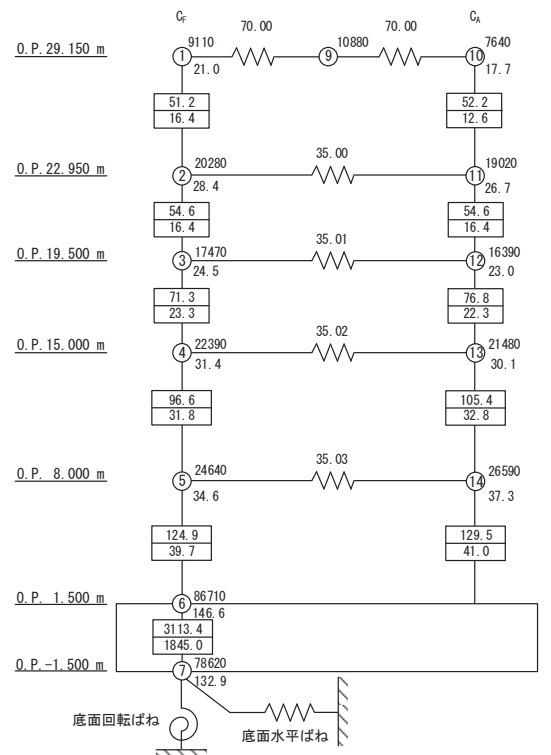
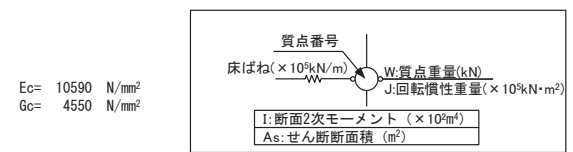


# 地震応答解析モデルの策定(制御建屋の検討例)

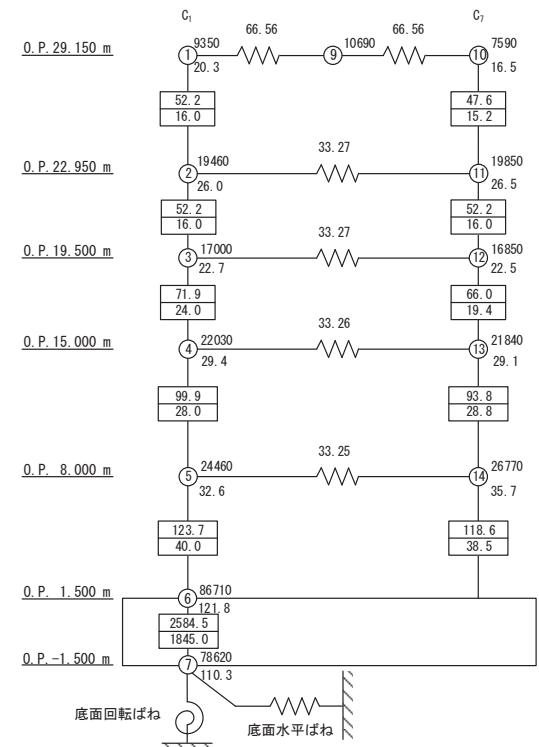
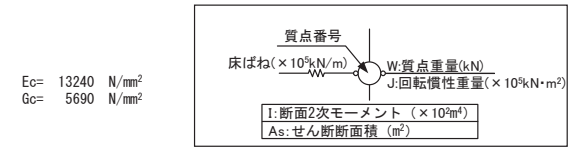
- シミュレーション解析結果と建屋の状態の整合性確認の結果，剛性低下と建屋の構造的特徴，ひび割れ分布の傾向等が整合していることを確認したことから，シミュレーション解析に基づく初期剛性低下を今回工認モデル(基本モデル)に反映する。
- 不確かさケースの初期剛性は，原子炉建屋と同様に，基準地震動 $S_s$ 入力前後の1次固有振動数の比( $f_{Ss後}/f_{Ss前}$ )から剛性比を算定し，それを基本モデルの初期剛性に掛けることによって算定する。(制御建屋の場合，基本ケースの0.70倍)

## 制御建屋の初期剛性の設計値に対する補正係数

	NS方向	EW方向
制御建屋	0.40	0.50



地震応答解析モデル(NS方向)



地震応答解析モデル(EW方向)



## 耐震実験の適用性確認

- 耐震実験[1], [2], [3]では, 表1に示すコンクリート強度及び鉄筋比の試験体により実施しているが, 既設建屋の各パラメータと比較することにより, 耐震実験の既設建屋への適用性を確認した。表2に既設建屋のコンクリート強度(設計基準強度)及び鉄筋比を示す。
- コンクリート強度及び鉄筋比は, 耐震実験と既設建屋とで対応しており, 耐震実験結果の既設建屋に対する適用性を確認した。

表1 耐震実験のコンクリート強度及び鉄筋比

耐震実験	コンクリート強度 (実強度)	鉄筋比(%)
耐震実験[1]	28.3(N/mm <sup>2</sup> )	1.40
耐震実験[2]	34.3~35.3(N/mm <sup>2</sup> )	1.32
耐震実験[2](参考検討)	31.9~33.2(N/mm <sup>2</sup> )	0.66
耐震実験[3]	40.2~41.9(N/mm <sup>2</sup> )	1.40

表2 既設建屋の設計基準強度及び耐震壁の鉄筋比の範囲

建屋名	設計基準強度	鉄筋比(%)
原子炉建屋	32.4(N/mm <sup>2</sup> ) (330(kgf/cm <sup>2</sup> ))	0.774~1.950
制御建屋		0.717~1.794
第3号機海水熱交換器建屋		0.794~1.367
タービン建屋		0.794~1.605
第1号機制御建屋		0.718~1.446

## 地震応答解析モデルの策定(既設建屋の初期剛性低下の補正係数)

- 原子炉建屋は、質点系シミュレーション解析に基づき建屋初期剛性を評価し、過去の地震観測記録の傾向分析や点検結果等を踏まえて、設計値に対する補正係数を0.3~0.8と設定し、地震応答解析モデルに反映している。
- 原子炉建屋以外の既設建屋についても同様な検討を行い、剛性低下と建屋の構造的特徴、ひび割れ分布の傾向等が整合していることを確認の上、設計値に対する補正係数を設定した。

今回工認における既設建屋の初期剛性の設計値に対する補正係数

建屋		補正係数								(参考)建屋に要求される機能 (今回工認)	
		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0		
原子炉建屋	地上3階及びクレーン階 (O.P.33.2mより上部)	NS ●		EW ●							Sクラス (原子炉建屋原子炉棟:二次格納施設) Sクラス設備の間接支持機能
	地下3階~地上2階 (O.P.33.2mより下部)						NSEW ● ●				
制御建屋				NSEW ● ●							Sクラス(中央制御室しゃへい壁) Sクラス設備の間接支持機能
タービン建屋	地上2階及びクレーン階 (O.P.24.8mより上部)	NSEW ● ●									Bクラス(補助しゃへい壁) Bクラス設備(Sd機能維持設備含む)の 間接支持機能 原子炉建屋、制御建屋へ波及的影響を 与えないこと
	地下2階~地上1階 (O.P.24.8mより下部)	NSEW ● ●									
補助ボイラー建屋									NS・EW ◆		Cクラス設備の間接支持機能 制御建屋へ波及的影響を与えないこと
第3号機海水熱交換器建屋							NS・EW ●				浸水防護施設の間接支持機能
第1号機制御建屋		NS ●	EW ●								制御建屋へ波及的影響を与えないこと

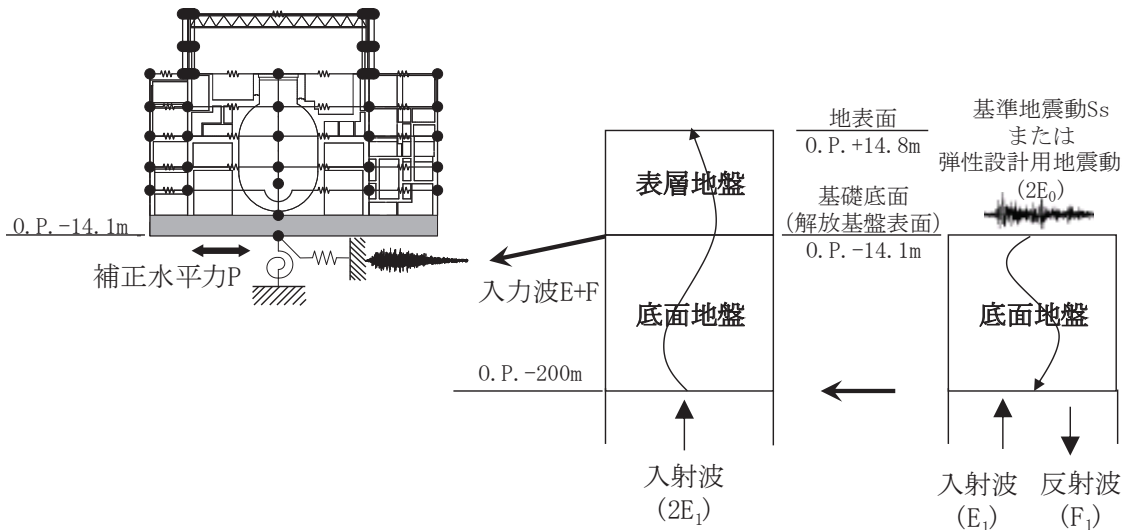
●:原子炉建屋オペフロ上部と同様の大架構的特徴を有した部位 ●:原子炉建屋オペフロ下部と同様の耐震壁の配置が密な部位

◆:補助ボイラー建屋は、地震計が設置されていなく、シミュレーション解析が実施できないことから、設計剛性を採用

# 入力地震動算定における既工認からの見直し概要(原子炉建屋)

## 【原子炉建屋での見直し概要】

- 既工認においては、深く埋め込まれている原子炉建屋であっても表層地盤の影響、すなわち入力地震動に与える影響と埋込み効果(側面地盤ばね)は考慮しない地震応答解析モデルを採用し、保守的な評価としていた。
- これに対し、**3.11地震等の観測記録を用いた原子炉建屋等のシミュレーション解析**では、表層地盤の影響を考慮した入力地震動を用いた方が、直接入力するケースに比べ、より観測記録との整合性が良く、**表層地盤の影響が確認された**。
- 一方、埋込み効果については、原子炉建屋のシミュレーション解析では**側面地盤ばねを考慮しないモデルが観測記録と整合性が良かった**。
- 以上の結果を踏まえ、今回工認では、**表層地盤が入力地震動に与える影響が確認された建屋について入力地震動の評価方法を見直した**。



今回工認における地震応答解析モデルへの入力概要

## 既工認からの見直しの概要(2号炉原子炉建屋(R/B))

JEAG4601での記載	
入力地震動	埋込み効果の評価
埋込まれている場合は、表層地盤の影響*が期待出来る旨の記載あり * E+F入力、直接入力(2E)より小さい	支持地盤と側面地盤のせん断波速度( $V_s$ )の違いが大きい場合は <b>側面地盤ばねの評価に留意する必要がある旨の記載あり</b>

○(女川は約29mの埋込み)

△(女川の支持地盤は硬質であり  $V_s$ の違いが大きい)

## 既工認での周辺地盤の影響評価

既工認では側面地盤ばね評価の課題も踏まえて、以下のとおり設定

入力地震動	埋込み効果
基準地震動を直接入力 (表層地盤の影響を無視)	側面地盤ばねを設けず (埋込み効果を無視)

※既工認では、参考検討として、採用手法と、【E+F入力+埋込み効果考慮(JEAG手法で評価(Novakばね))】の比較から採用手法の保守性を確認

## 建設の特徴、観測記録の傾向

入力地震動	埋込み効果
3.11地震等のはぎとり波を用いた建屋シミュレーション解析 ⇒ <b>表層地盤の影響を考慮するE+F入力が直接入力(2E)よりも適合性が良い</b>	・建屋周囲は、掘削土等により埋戻しを実施している。 ⇒埋込みによる拘束等は小さい状況 ・3.11地震のはぎとり波を用いた <b>建屋シミュレーション(R/B, Hx/B)でも、Novakばね無しの方が適合性が良い</b>

## 今回工認での周辺地盤の影響評価

今回工認では建設の特徴や観測記録の傾向を考慮し、以下のとおり設定

入力地震動	埋込み効果
<b>表層地盤の影響を考慮するE+F入力に変更</b>	側面地盤ばねを設けず (埋込み効果を無視)

## 入力地震動評価の特徴(手法の特徴, 既設建屋評価への影響)

### 【原子炉建屋における見直し】

- 硬質岩盤における他サイトでの既工認で、支持地盤の特徴が入力地震動に与える影響を評価するために、表層地盤も含めた2次元地盤モデルにより算定した入力地震動を採用する一方、埋込み効果は考慮していない例がある。女川では、支持地盤については不整形等の顕著な影響は無いため、表層の影響を評価することのみを目的として入力地震動の評価を行うが、側面地盤ばねについては、3.11地震の傾向を踏まえ、考慮しない方針である。
- 既工認で採用していた基準地震動の直接入力(2E入力)から表層地盤の影響を考慮したE+F入力に変更することによる応答低減効果が施設評価に与える影響は大きい。
- 入力地震動の算定方法として、表層地盤上部の非線形性を考慮した一次元地盤応答解析(逐次非線形解析)を採用するが、既工認で同手法を採用して入力地震動を評価した実績は無く、今回工認で初めてのケースとなる。

### 埋め込まれた建屋の周辺地盤の扱いに関する既工認からの変更点(原子炉建屋)

	既工認	今回工認	変更の適用性	他サイト 既工認実績	変更による効果
側面地盤ばね の扱い	非考慮	非考慮	変更無し	女川の今回工認と同じく 側面地盤ばねは「非考慮」、 入力地震動評価時の表層 地盤の影響は「考慮」の ケース有り	<b>大</b> <u>(応答低減効果)</u>
入力地震動評価時 の表層地盤 の影響考慮	非考慮 (2E入力)	<b>考慮</b> <u>(E+F入力)</u>	地震観測記録の 傾向を反映		
入力地震動の 算定方法 (非線形性の考慮)	—	表層地盤上部の <b>非線 形性を考慮した一次 元地盤応答解析</b> <u>(逐次非線形解析)</u>	地震観測記録で 妥当性を検証	<b>無</b>	小

## 原子炉建屋以外の既設建屋の入力地震動の算定方法

▶ 表層地盤の影響を考慮する建屋は以下の手順で選定した。

建屋の周辺状況から検討対象建屋を選定 ⇒ 3.11地震等によるシミュレーション解析からE+F効果について確認

▶ 建屋の周辺状況からの検討対象建屋の選定では、埋込み深さがある程度深く、かつ、2～3面程度周辺地盤と接している建屋を選定した。その上で、シミュレーション解析の結果、2E入力よりもE+F入力の方が観測記録との整合性が良い結果を与えた建屋については、今回工認において表層地盤の影響を考慮する。

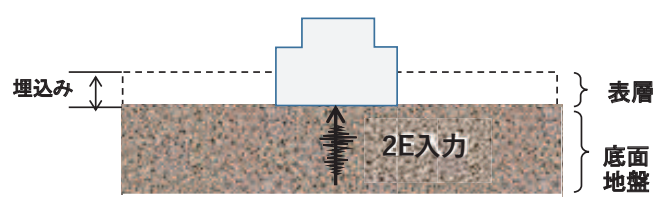
### 今回工認におけるE+F入力を考慮する既設建屋の選定

建屋	埋込み深さ (基礎底面位置)	地盤 状況	シミュレーショ ン解析	表層地盤の 影響考慮 (E+F入力)	(参考) 建屋に要求される機能 (今回工認)
原子炉建屋	約29m (O.P.-14.1m)	3面接地	2Eに比べ E+F入力が より整合	<b>考慮</b>	Sクラス(原子炉建屋原子炉棟) Sクラス設備の間接支持機能
制御建屋	約16m (O.P.-1.5m)	1～2面 接地	—	非考慮* (既工認と同じ)	Sクラス(中央制御室しゃへい壁) Sクラス設備の間接支持機能
タービン建屋	約17m (O.P.-2.2m)	2～3面 接地	2Eに比べ E+F入力が より整合	<b>考慮</b>	Bクラス(補助しゃへい壁) Bクラス設備(Sd機能維持設備含む)の 間接支持機能 原子炉建屋、制御建屋へ波及的影響を 与えないこと
補助ボイラー建屋	約7m (O.P.+8.0m)	2面接地	—	非考慮*	Cクラス設備の間接支持機能 制御建屋へ波及的影響を与えないこと
第3号機 海水熱交換器建屋	約27m (O.P.-12.5m)	4面接地	2Eに比べ E+F入力が より整合	<b>考慮</b>	浸水防護施設の間接支持機能
第1号機 制御建屋	約15m (O.P.0m)	2面接地	—	非考慮* (既工認と同じ)	制御建屋へ波及的影響を与えないこと

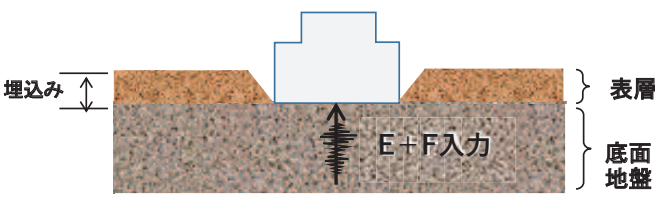
\* :「非考慮」としている建屋の入力地震動は、基準地震動Ss又は弾性設計用地震動Sdを直接入力としている。

# タービン建屋, 第3号機海水熱交換器建屋における検討例

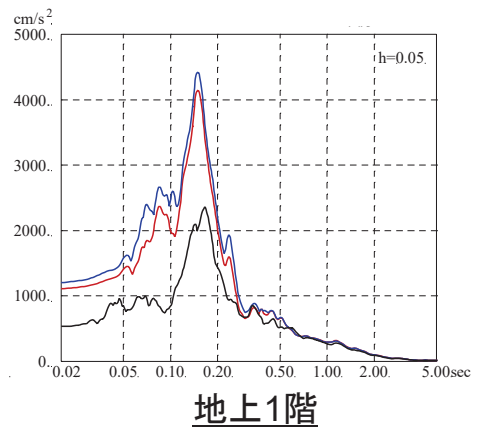
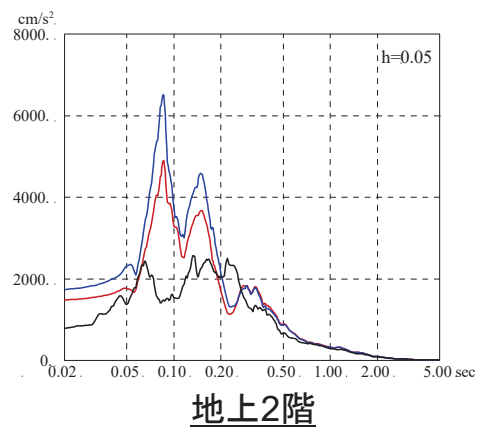
- ▶ タービン建屋と第3号機海水熱交換器建屋について、はぎとり波を用いたシミュレーション解析を実施し、
  - ①3.11地震のはぎとり波を建屋モデルに直接入力(2E入力)した場合
  - ②表層地盤の影響を考慮して算定した基礎版底面レベルの地震動を入力(E+F入力)した場合
 の観測記録の再現性を確認した。
- ▶ シミュレーション解析の結果、2E入力よりもE+F入力の方が観測記録との整合性が良いことを確認したことから、タービン建屋と第3号機海水熱交換器建屋については、今回工認において表層地盤の影響を考慮する。



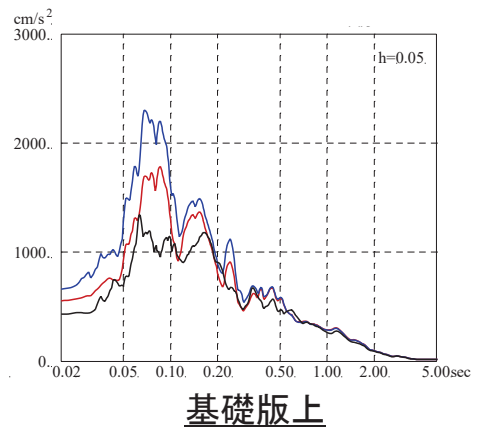
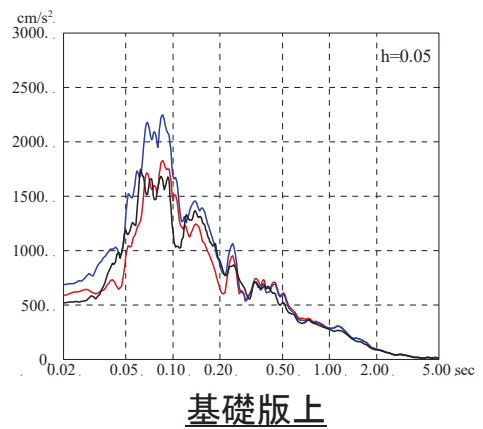
建屋応答(床応答スペクトル)を比較



検討の概念図



— 観測記録  
— E+F入力  
— 2E入力



床応答スペクトルの比較 (タービン建屋, EW方向)

床応答スペクトルの比較 (第3号機海水熱交換器建屋, EW方向)

# 新設建屋の耐震評価への反映

## 【新設建屋の対象建屋】

- 緊急時対策建屋, 緊急用電気品建屋

## 【地震応答解析モデルの設定(建屋初期剛性の設定)】

### ➤ 基本ケース

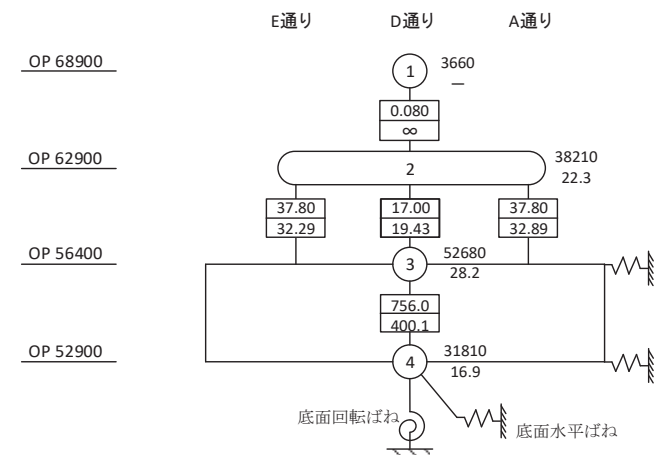
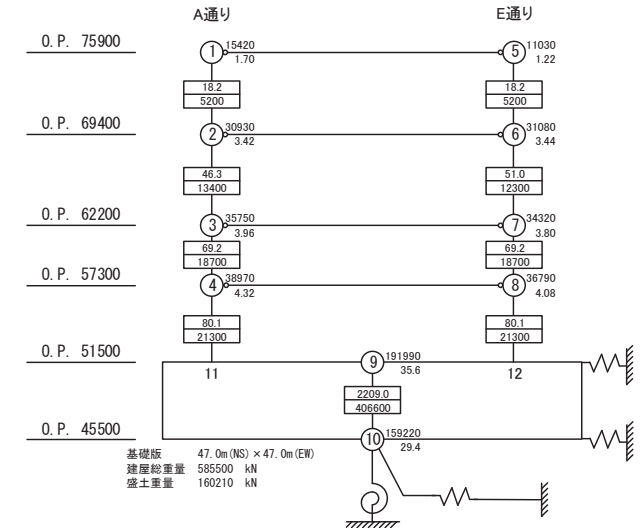
- ・地震の影響を受けていないことから設計剛性(設計基準強度)を用いた地震応答解析モデルを採用する。

### ➤ 不確かさケース

- ・新設建屋は基準地震動 $S_s$ に対して短期許容応力度設計としていることから, コンクリートの乾燥収縮による初期剛性低下の可能性を考慮したとしても, その低下の度合は, コンクリートの設計基準強度と実強度の乖離分で吸収可能と考える。また, 評価基準値(耐震壁のせん断ひずみ:  $2.0 \times 10^{-3}$ )に対しても十分な余裕を有するため, 建屋の耐震安全性は基本ケースの解析で確認可能と考える。
- ・ただし, 念のため, 剛性低下(0.8倍)を考慮することで設計における保守性を確保する。
- ・0.8倍の設定にあたっては, 今回工認における新設建屋の構造的特徴と既設建屋(原子炉建屋)との類似性や, 新設建屋の基準地震動 $S_s$ に対する応答結果を踏まえて総合的に判断の上設定した。

## 【入力地震動の算定】

- 建屋の周辺状況から新設建屋は, 埋込み深さがある程度深く, かつ, 3面が周辺地盤と接していることから, 既設建屋での検討結果を踏まえて, 今回工認において表層地盤の影響(E+F入力)を考慮する。
- また, 建屋周囲のうち, 基礎版レベルまではMMRを打設すること, また, その周囲は岩盤が分布していることを踏まえ, 基礎版レベルまでは側面地盤ばねを設定する。



緊急用電気品建屋  
地震応答解析モデル(NS方向)