

女川原子力発電所2号炉  
東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた  
建屋耐震設計への反映について

---

平成29年12月  
東北電力株式会社

# 目次

---

1. 全体概要
2. 初期剛性が設計より低下している要因の検討
  - 2.1 東北地方太平洋沖地震等による影響検討
  - 2.2 共通して使用しているコンクリート材料の影響の確認
3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響
4. 2号炉原子炉建屋オペフロ上部耐震補強工事
5. 基準地震動 $S_s$ に適用する地震応答解析モデルの策定  
(今後追而する主な検討内容)

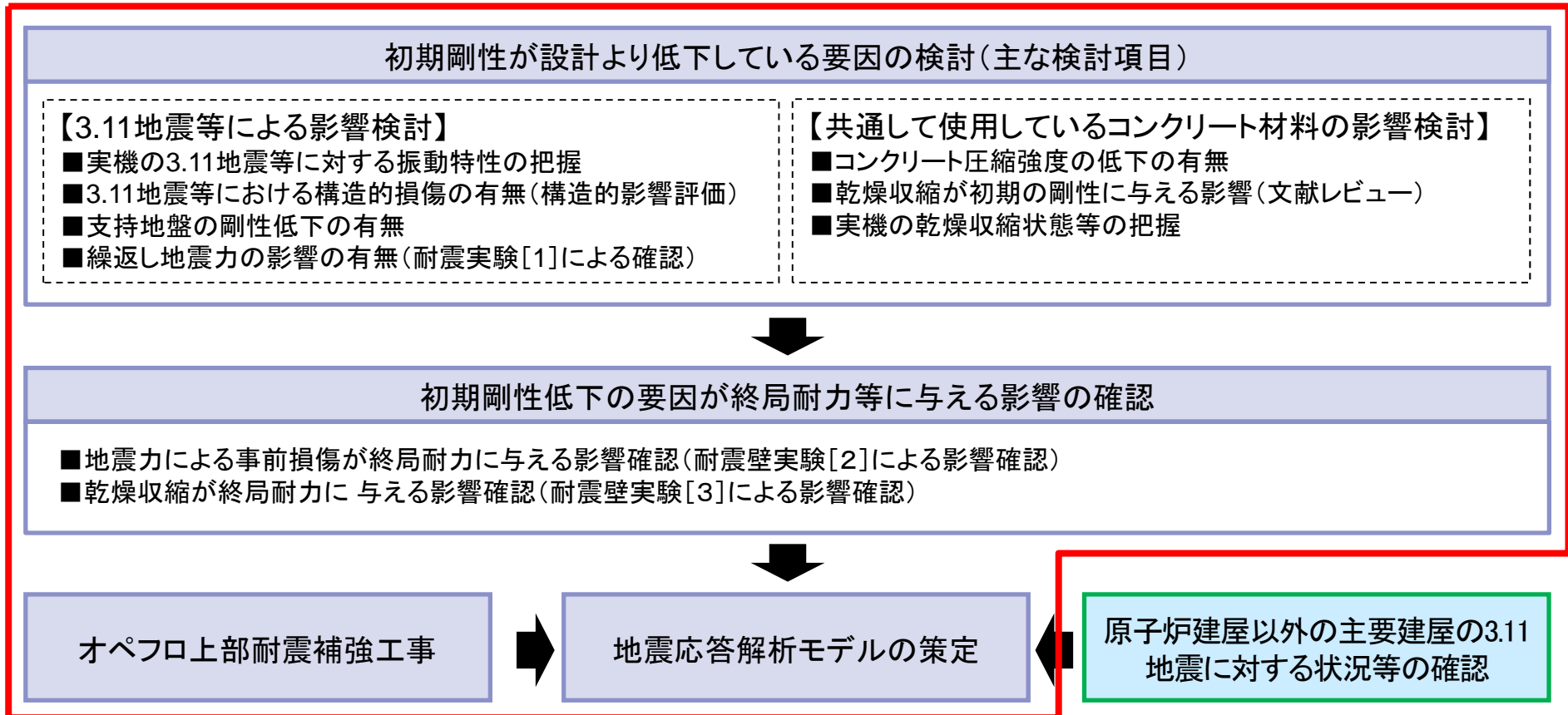
# 1. 全体概要

## 【概要】

- ・女川原子力発電所は、2011年東北地方太平洋沖地震(以下、「3.11地震」という。)や、また、その余震である2011年4月7日宮城県沖地震(以下、「4.7地震」という。)による地震動を受けており、**主要建屋で観測された地震観測記録から、建屋の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。**
- ・初期剛性が設計より低下している原因を特定し、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について示す。

## 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

### 今回の説明範囲



## 2. 初期剛性が設計より低下している要因の検討 検討の概要

### 【「初期剛性が設計より低下している要因の検討」の概要】

- 顕著な剛性低下は3.11地震や4.7地震で認められており、これらの大きな地震動が設計と乖離する初期剛性低下の要因になっているが、これらの地震によって建屋等が具体的にどのような影響を受けたのか等について、女川2号炉原子炉建屋を対象に、「東北地方太平洋沖地震等による影響の確認」として検討を行い、とりまとめた。
- その結果、建屋には地震によるひび割れが認められるものの、顕著な構造的被害は認められないこと、また、これらの傾向は他の建屋にも共通して認められていることから、初期剛性が設計より低下している要因としては、地震動以外の全ての建屋に共通した因子、例えば使用しているコンクリートの特徴等の影響が重畳していることも予想されるため、共通して使用しているコンクリート材料の影響について、「共通して使用しているコンクリート材料の影響の確認」として検討を行い、とりまとめた

### 初期剛性が設計より低下している要因の検討(主な検討項目)

#### 【3.11地震等による影響検討】

- 実機の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(構造的影響評価)
- 支持地盤の剛性低下の有無
- 繰返し地震力の影響の有無(耐震実験[1]による確認)

#### 【共通して使用しているコンクリート材料の影響検討】

- コンクリート圧縮強度の低下の有無
- 乾燥収縮が初期の剛性に与える影響(文献レビュー)
- 実機の乾燥収縮状態等の把握

## 2. 1 東北地方太平洋沖地震等による影響検討 フロー図における位置づけ

### 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

初期剛性が設計より低下している要因の検討(主な検討項目)

**【3.11地震等による影響検討】**

- 実機の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(構造的影響評価)
- 支持地盤の剛性低下の有無
- 繰返し地震力の影響の有無(耐震実験[1]による確認)

**【共通して使用しているコンクリート材料の影響検討】**

- コンクリート圧縮強度の低下の有無
- 乾燥収縮が初期の剛性に与える影響(文献レビュー)
- 実機の乾燥収縮状態等の把握



初期剛性低下の要因が終局耐力等を与える影響の確認

- 地震力による事前損傷が終局耐力に与える影響確認(耐震壁実験[2]による影響確認)
- 乾燥収縮が終局耐力に与える影響確認(耐震壁実験[3]による影響確認)



オペフロ上部耐震補強工事



地震応答解析モデルの策定

## 2. 1 東北地方太平洋沖地震等による影響検討 検討概要

### 実機の3.11地震等に対する振動特性の把握

女川原子力発電所の建屋の地震による初期剛性の低下傾向について、3.11地震に対する主要建屋でのシミュレーション解析や地震計が設置されている建屋における記録分析を実施し、その特徴について検討・整理を行った。



### 3.11地震による影響検討

#### 3.11地震等における構造的損傷の有無(構造的影響評価)

3.11地震や4.7地震では顕著な剛性低下が認められており、建屋等が具体的にどのような影響を受け、現在どのような状態にあるのかを点検及び解析的検討から確認する。

#### 支持地盤の剛性低下の有無

3.11地震等による顕著な初期剛性の低下の要因として、支持地盤の剛性低下や側面地盤の影響が寄与しているのかどうかについて検討を行う。

#### 繰返し地震力の影響の有無(耐震実験[1]による確認)

比較的大きな地震動を繰返し経験することにより耐震壁の剛性が低下していく傾向が認められるかどうかについて、耐震壁に対する繰返し加力を行う耐震実験によって確認を行う。

## 2. 1 東北地方太平洋沖地震等による影響検討 3.11地震による影響検討(イメージ)

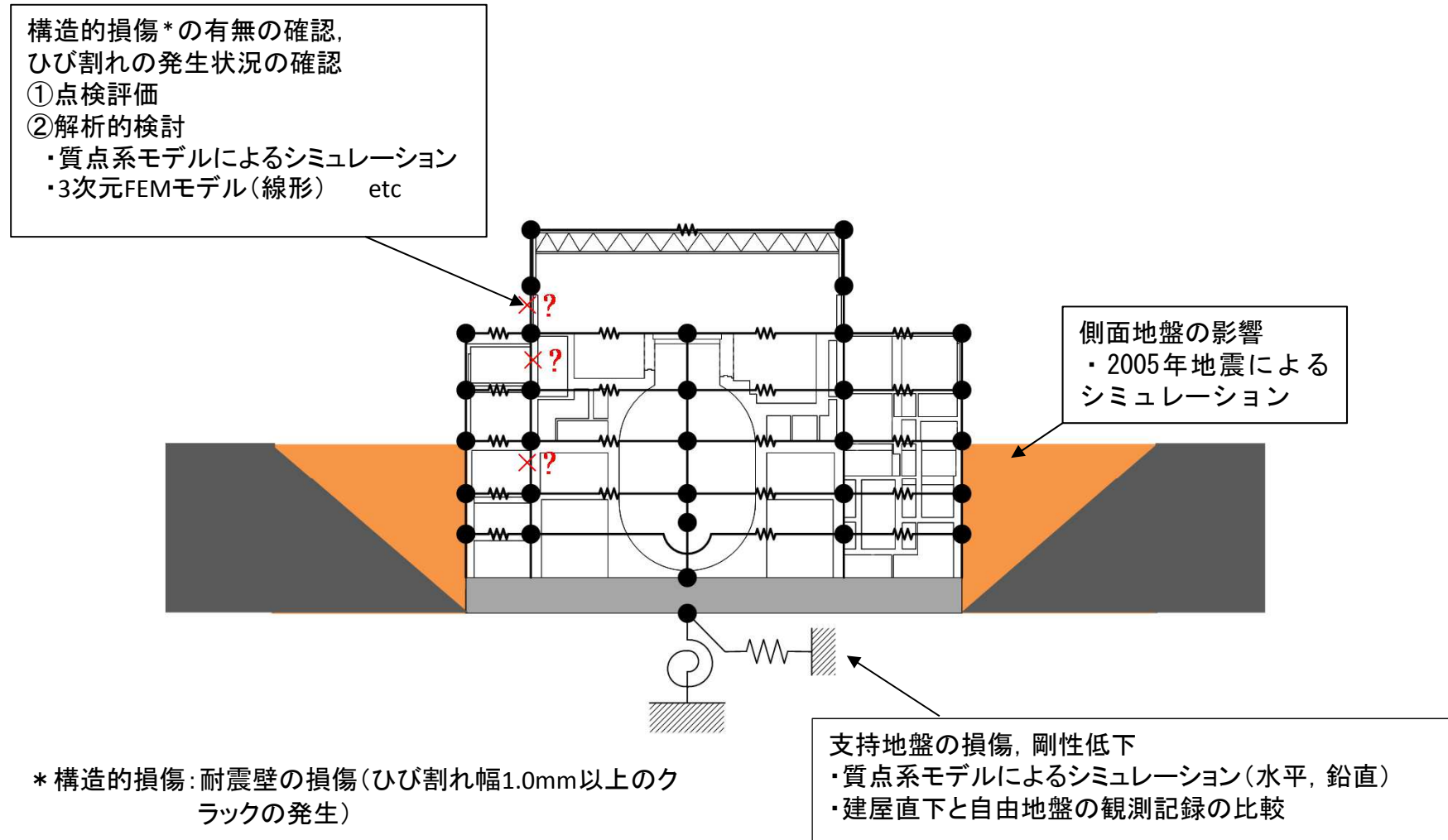


図1 3.11地震による影響検討の検討項目

## 2. 1 東北地方太平洋沖地震等による影響検討 実機の3.11地震等に対する振動特性の把握 質点系モデルによる3.11地震等に対するシミュレーション解析

### ■検討の目的

・2号炉原子炉建屋を例に3.11地震, 4.7地震に対するシミュレーション解析を実施し, 建屋の振動特性を確認する。

(コメントNo.3, 8に対応)

### ■具体的検討内容

・地震応答解析は質点系モデルとし, 水平動, 鉛直動それぞれに対して実施した。また, 比較のために, 女川3号炉原子炉建屋についてもシミュレーション解析を実施した。

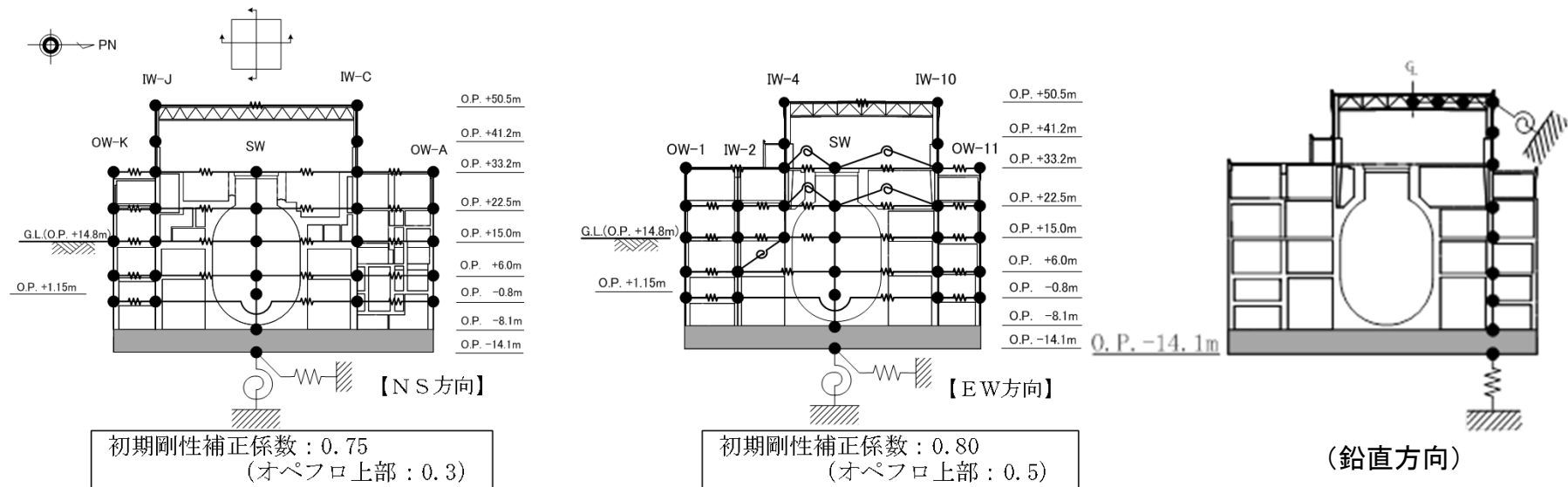


図1 2号炉原子炉建屋 シミュレーションモデル



## 2. 1 東北地方太平洋沖地震等による影響検討 実機の3.11地震等に対する振動特性の把握 2号炉原子炉建屋のシミュレーション解析(水平動, 鉛直動)

### ■2号炉原子炉建屋(水平動, 鉛直動)

・2号炉原子炉建屋の基礎マット上で得られた地震観測記録を入力し, 建屋の各フロアで得られた地震観測記録との整合性を検討したシミュレーション解析の結果, 以下の傾向が確認された。

#### 【水平動】

①水平動について, 建屋の振動特性に支配的なオペレーションフロア (以下, オペフロと呼称) 下部の初期剛性について, NS, EW方向とも, 設計で考慮している剛性よりも2割程度低下させた解析結果が, 記録との整合性が良い。また, 合わせて算定された応力, ひずみとの関係から, 耐震壁は概ね弾性範囲であったと判断される。

②オペフロ上部については, NS, EW方向とも, 設計で考慮している剛性よりも5~7割程度低下させた解析結果が, 記録との整合性が良い。なお, 算定された応力, ひずみとの関係から, 耐震壁は第一折点を超過するレベルであったが, 設計における応力-ひずみ曲線とは乖離がある。

③RC減衰については7%を採用することで記録との整合性が良い結果が得られた。

#### 【鉛直動】

④鉛直動については, 設計で考慮している剛性, 減衰を用いた解析結果が, 記録との整合性が良い。

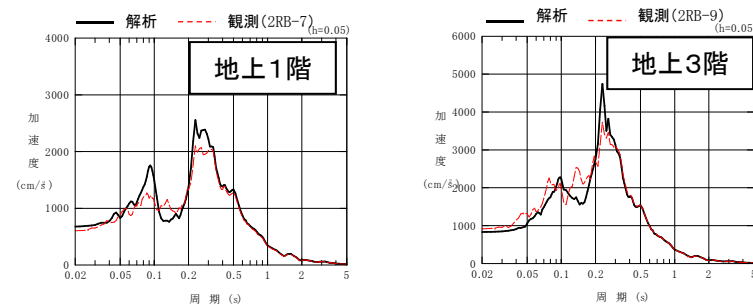


図1 加速度応答スペクトルの比較  
(2号炉原子炉建屋 3.11地震 NS方向)

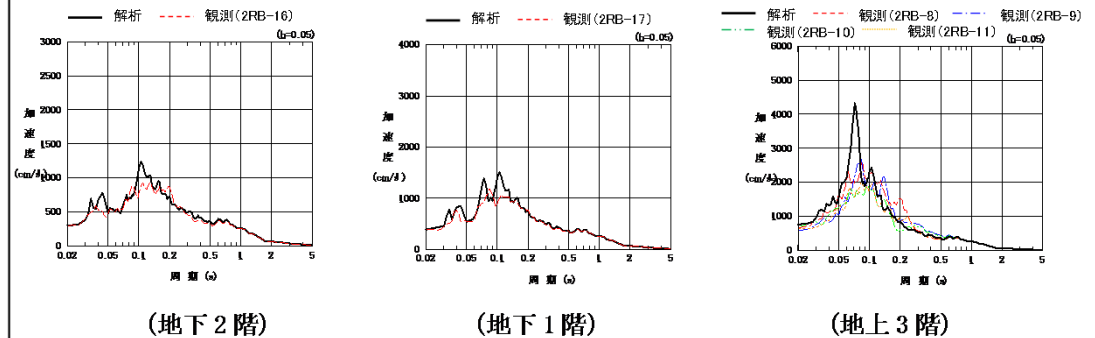


図2 加速度応答スペクトルの比較  
(2号炉原子炉建屋 3.11地震 鉛直方向)



以上の傾向は3.11地震, 4.7地震共通である。

## 2. 1 東北地方太平洋沖地震等による影響検討 実機の3.11地震等に対する振動特性の把握

### 3号炉原子炉建屋のシミュレーション解析(水平動, 鉛直動)

#### ■ 3号炉原子炉建屋(水平動, 鉛直動)

・3号炉原子炉建屋の基礎マット上で得られた地震観測記録を入力し, 建屋の各フロアで得られた地震観測記録との整合性を検討したシミュレーション解析の結果は, 水平動, 鉛直動とも2号炉原子炉建屋とほぼ同様の結果となった。

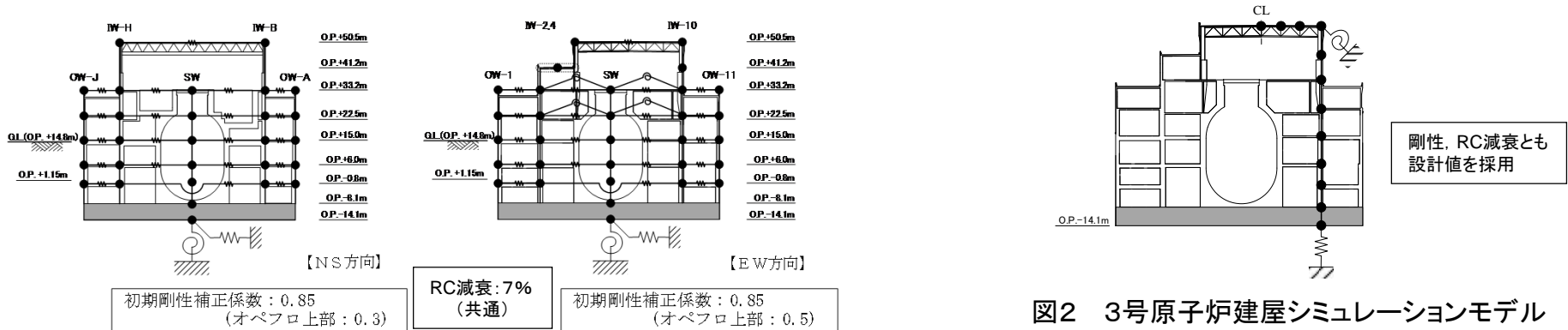


図2 3号原子炉建屋シミュレーションモデル(鉛直方向)

図1 3号炉原子炉建屋 シミュレーションモデル(水平方向)

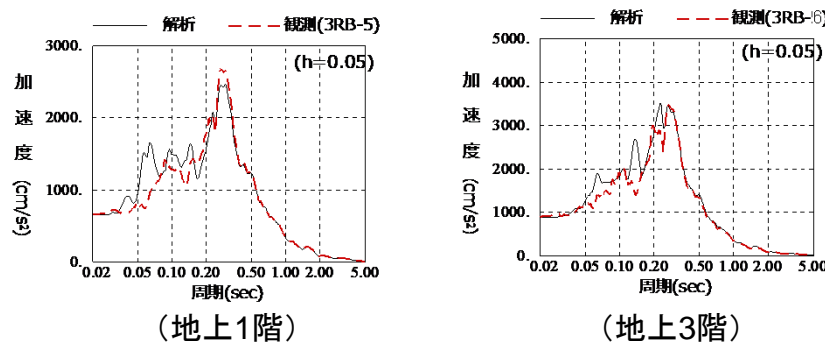


図3 加速度応答スペクトルの比較  
(3号炉原子炉建屋 3.11地震 NS方向)

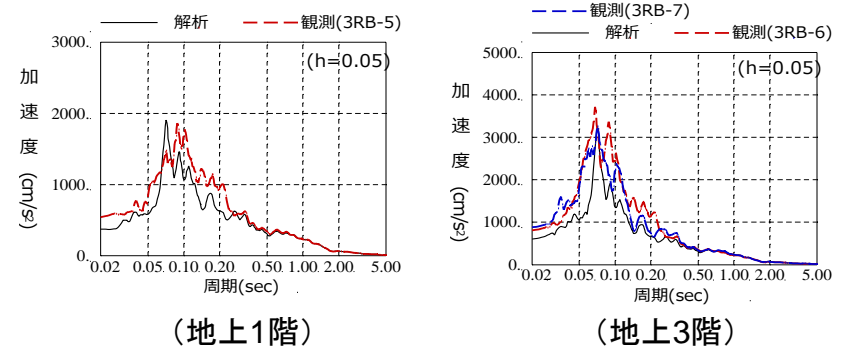


図4 加速度応答スペクトルの比較  
(3号炉原子炉建屋 3.11地震 鉛直方向)

#### ■ 2号炉原子炉建屋のシミュレーション解析結果

・2号炉原子炉建屋のシミュレーション解析の結果, オペフロ下部において設計を2割程度低下する剛性の低下が認められたこと, オペフロ上部は第一折点を超過した状態であるが, 設計における応力-ひずみ曲線と乖離があること, これらの傾向は3.11地震, 4.7地震共通であり, 3号炉原子炉建屋とも共通することを確認した。

## 2. 1 東北地方太平洋沖地震等による影響検討 実機の3.11地震等に対する振動特性の把握 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の目的

10

### ■ 検討の目的

・女川原子力発電所の地震計が設置されている建屋(10建屋)における記録の分析を行い、建屋の地震による初期剛性の低下の傾向について検討する。(コメントNo.9に対応)

### ■ 検討方法

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法採用した。

### ■ 検討項目

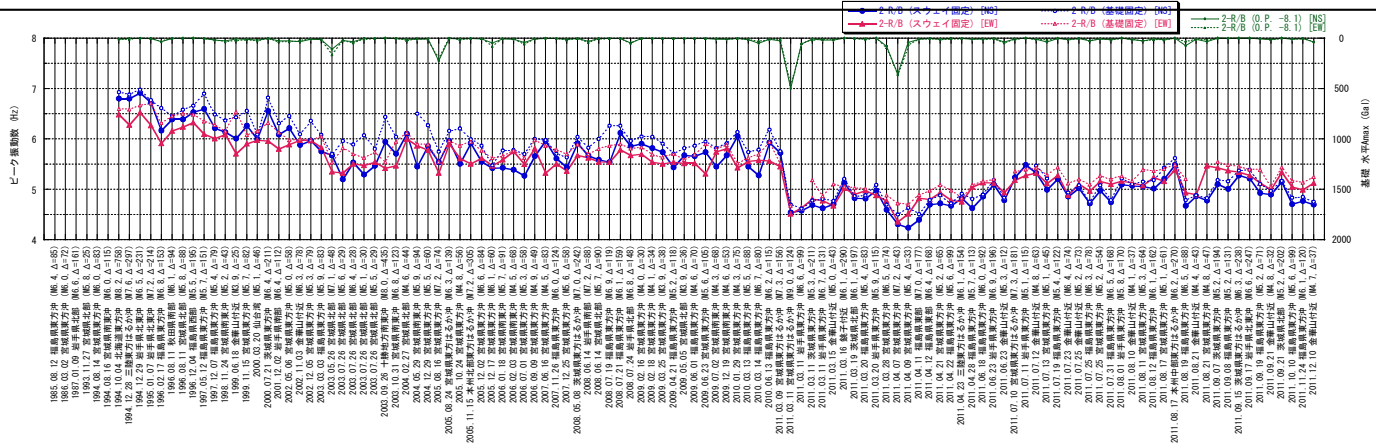
以下の検討項目について、大地震以外の中小地震も対象にして検討を行う。また、比較のために、東通原子力発電所1号炉原子炉建屋で得られた地震観測記録についても分析を行う。

### 主な検討項目

No	検討項目	検討の狙い
1	各建屋の剛性低下傾向(水平動)	3.11地震等において2号炉原子炉建屋で認められたような初期剛性の低下が他の建屋でも認められるかどうかを確認する。
2	剛性低下量と地震動の大きさの関係	剛性低下量と地震動の大きさに相関性があるかどうかを確認する。
3	剛性低下量の経時的変化	コンクリートの経年変化(例えば圧縮強度の低下、乾燥収縮の進展等)が剛性低下に寄与しているかどうかについて確認する。
4	各建屋の剛性低下傾向(鉛直動)	鉛直動にも剛性低下の傾向が認められるのかについて確認する。また、水平動の剛性低下のメカニズムとの関係について考察する。
5	剛性低下と建屋の構造的特徴との関係	建屋の剛性低下の傾向が他の建屋と異なる場合については、構造的特徴の違いなどその要因について検討を行う。

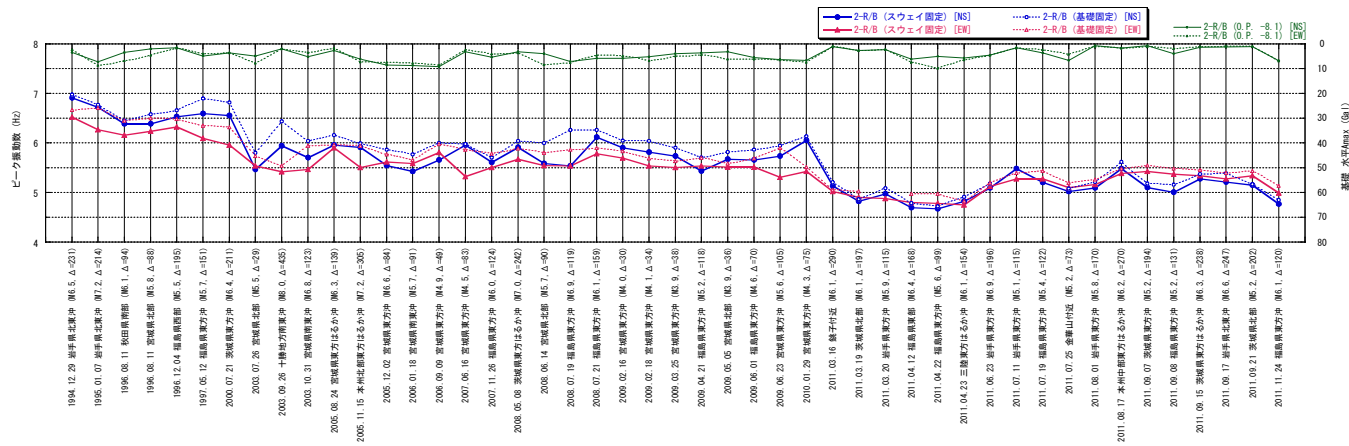
## 2. 1 東北地方太平洋沖地震等による影響検討 実機の3.11地震等に対する振動特性の把握 女川2号機原子炉建屋の観測記録の分析例(水平動)

【使用した地震計位置】基礎マット上とオペフロ階に設置されている地震計の伝達関数より評価  
 【主な傾向】水平動について、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、わずかながら経時の変化による剛性低下(振動数低下)傾向も認められる



固有振動数(設計値) : NS方向 4.83Hz, EW方向 4.91Hz

図1 固有振動数低下の傾向(水平方向)(女川2号炉原子炉建屋例)



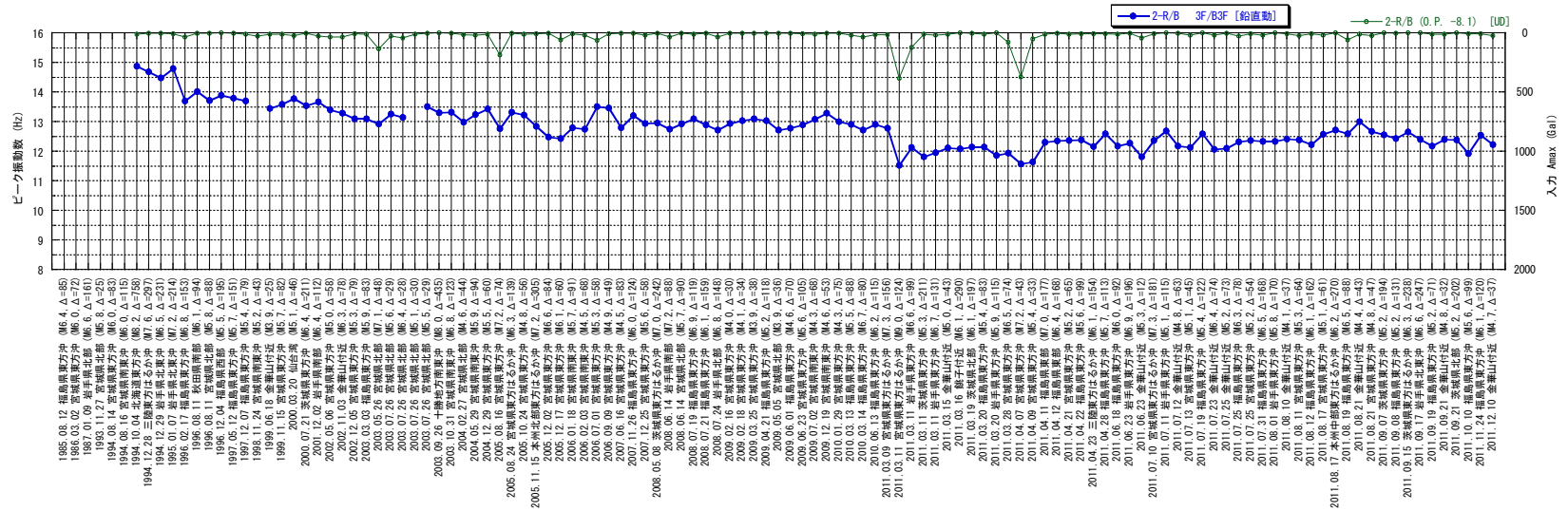
固有振動数(設計値) : NS方向 4.83Hz, EW方向 4.91Hz

図2 固有振動数低下の傾向(小振幅地震, 水平方向)(女川2号炉原子炉建屋の例)

## 2. 1 東北地方太平洋沖地震等による影響検討 実機の3.11地震等に対する振動特性の把握 女川2号機原子炉建屋の観測記録の分析例(鉛直動)

【使用した地震計位置】基礎マット上とオペフロ階に設置されている地震計の伝達関数より評価

【主な傾向】鉛直動についても水平動ほど顕著ではないが、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。



固有振動数(設計値) : UD方向 9.96Hz

図1 固有振動数低下の傾向(鉛直方向)(女川2号炉原子炉建屋の例)

## 2. 1 東北地方太平洋沖地震等による影響検討 実機の3.11地震等に対する振動特性の把握 東通1号機原子炉建屋の観測記録の分析例(水平動)

【使用した地震計位置】基礎マット上とオペフロ階に設置されている地震計の伝達関数より評価  
 【主な傾向】東通の場合、地震動レベルの大きい地震に見舞われた経験がなく(最大で30ガル程度)、女川のような極端な剛性低下(振動数低下)傾向は認められない。経時的変化も顕著ではない。

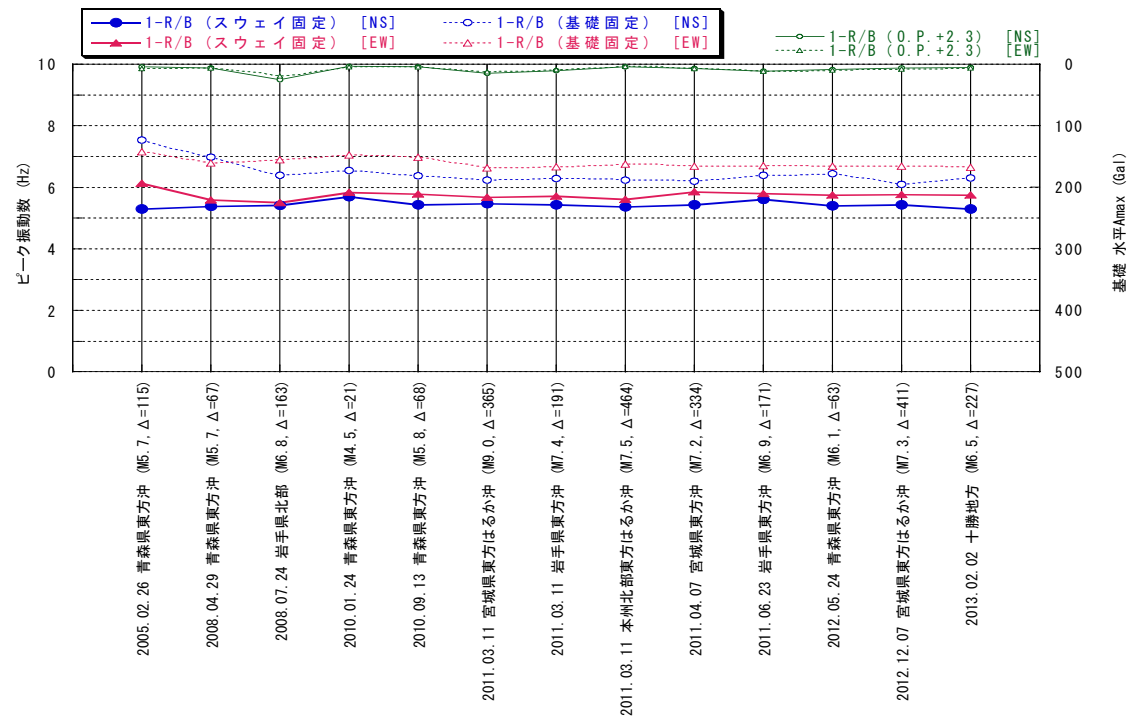


図1 東通1号炉原子炉建屋 固有振動数低下の傾向

## 2. 1 東北地方太平洋沖地震等による影響検討 実機の3.11地震等に対する振動特性の把握 各建屋の剛性低下の地震観測記録による傾向分析結果の特徴

### 検討結果の特徴

No	検討項目	検討結果の特徴
1	各建屋の剛性低下傾向(水平動)	3.11地震等において2号炉原子炉建屋で認められたような初期剛性の低下が他の建屋でも同様に認められた。
2	剛性低下量と地震動の大きさの関係	水平動について、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た。
3	剛性低下量の経時的変化	わずかながら経時的変化による剛性低下(振動数低下)傾向も認められる建屋があったが、地震動レベルの大きさによる影響と重畳された傾向とも解釈される。建設直後の小地震のみから評価した剛性低下量(振動数低下量)は大きくはない。
4	各建屋の剛性低下傾向(鉛直動)	鉛直動についても地震動レベルの大きさと建屋の剛性低下量(振動数低下量)については相関性が全建屋で認められたが、水平動ほど低下量は大きくはない。
5	剛性低下と建屋の構造的特徴との関係	女川3号炉海水熱交換機建屋については、剛性低下量が他の建屋に比べて小さい結果が得られた。これは、同建屋は地中に埋め込まれた建屋であり、埋め戻し土の影響によって減衰効果が大きいことが影響しているものと思われる。

#### 【参考】鉛直動による剛性低下について

鉛直動に対しても水平動と同様、中小地震による剛性低下傾向が認められること、但し、その低下量は水平に比べ小さい傾向にあることについては、

- ・後述する乾燥収縮が駆体に与える影響として、収縮ひずみによる内部応力の発生が考えられるが、この効果は水平、鉛直両方向に影響を与えると考えられる(両方向の剛性低下の要因になっていると考えられる)。
- ・一方で、地震力が大きくなるに従い、剛性低下量も大きくなる傾向があるが、水平動と鉛直動については、もともと入力される地震力としては水平方向が大きい傾向にあること、また鉛直方向の揺れに対しては自重の影響が大きく、相対的に鉛直動による建屋の各部の応答は水平動に比べて小さくなることから剛性の低下量も水平と上下で変わっていると考えられる。

鉛直動に対する応答が水平動の応答に比べ小さい例としては、例えばオペフロ上部の変位観測システムによる3.11地震時の最大変位量は水平方向の約1/4となっている。

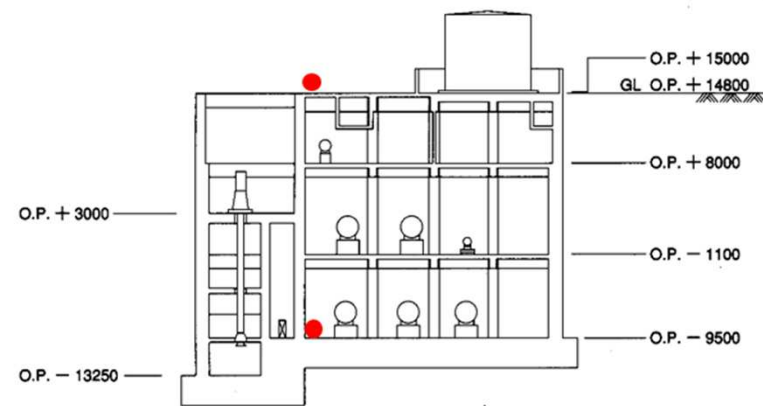


図1 女川3号炉 海水熱交換機建屋 断面図

### 3.11地震等における構造的損傷の有無の確認の概要

■検討の目的

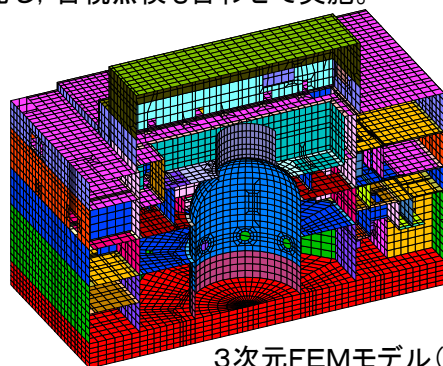
3.11地震や4.7地震では顕著な剛性低下が認められており、建屋等が具体的にどのような影響を受け、現在どのような状態にあるのかを点検及び解析的検討から確認する。(コメントNo.7, 8, 11, 12, 14, 15, 16, 25に対応)

表1 3.11地震による影響検討の検討項目

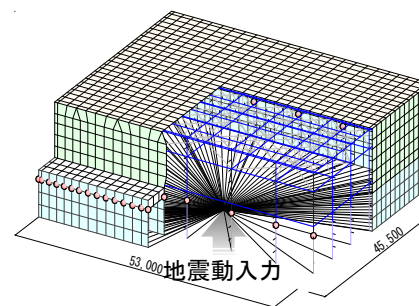
検討項目	部位	地震方向	検討方法(点検以外)	備考
躯体 (構造的損傷*1 の有無の確認)	耐震壁	面内	質点系モデル	建屋全体を対象にしたモデル
			3次元FEMモデル(等価線形)	
			オペフロ上部3次元FEMモデル(非線形)	
			層間変位計測システムによる記録	
		面外	3次元FEMモデル(等価線形)	検討対象:オペフロ上部
		ねじれ	地震観測記録の傾向分析	オペフロ上部の記録に基づき検討
	基礎版	面内, 面外	3次元FEMモデル(等価線形)	
	フレーム		3次元FEMモデル(等価線形)	
床スラブ	面内	3次元FEMモデル(等価線形)		
	面外	3次元FEMモデル(等価線形)	検討対象:オペフロ階, 屋根	

\* 1: 構造的損傷: ひび割れ幅1.0mm以上のクラックが発生するような事象の有無の確認。必要に応じ、目視点検も合わせて実施。

青字: 今回コメント回答として新たに示した追加検討項目を示す



3次元FEMモデル(等価線形)



オペフロ上部3次元FEMモデル(非線形)



# 第475回審査会合における説明概要(1)

第475回審査会合(H29.6.15)  
資料1-4 p16再掲

## 検討の概要

- 3.11地震や4.7地震では顕著な剛性低下が認められており、建屋等が具体的にどのような影響を受け、現在どのような状態にあるのかを確認するために、女川2号炉原子炉建屋を対象に、構造的損傷(ひび割れ幅1.0mm以上のクラックが発生するような事象)の有無について確認を行った。確認は、解析的検討に加え、必要に応じ、目視点検も合わせて実施した。
- 具体的には、耐震壁、基礎マット、フレーム(梁・柱)の鉄筋コンクリート部材、および屋根トラスについて、点検評価と解析的評価を実施した。
- 剛性低下に寄与する鉄筋コンクリート部材の評価結果の特徴は以下のとおり。
  - ①点検としては、地震力を負担する耐震壁を対象に実施した。また、解析の結果、フレーム等で裕度が少ない箇所、基礎版など地震力を考慮した設計を実施している箇所についても点検を実施した。
  - ②解析的検討も、基本的には水平地震力を負担する耐震壁について、質点系シミュレーションによる検討を実施した。評価の結果、裕度の小さいオペフロ上部については3次元FEMモデル(非線形)による詳細検討を実施した。また、点検が困難な箇所の耐震壁や耐震壁以外の部材の構造的影響の確認も兼ねて、建屋全体の3次元FEMモデル(等価線形)による検討も実施した。
  - ③点検、解析の結果は整合した結果となっていることも確認し、点検、解析の検討結果から、鉄筋コンクリート部材は、部分的に地震によるひび割れは認められるものの、弾性設計用地震動に対する設計範囲内(鉄筋が損傷していない状態)であることを確認した。

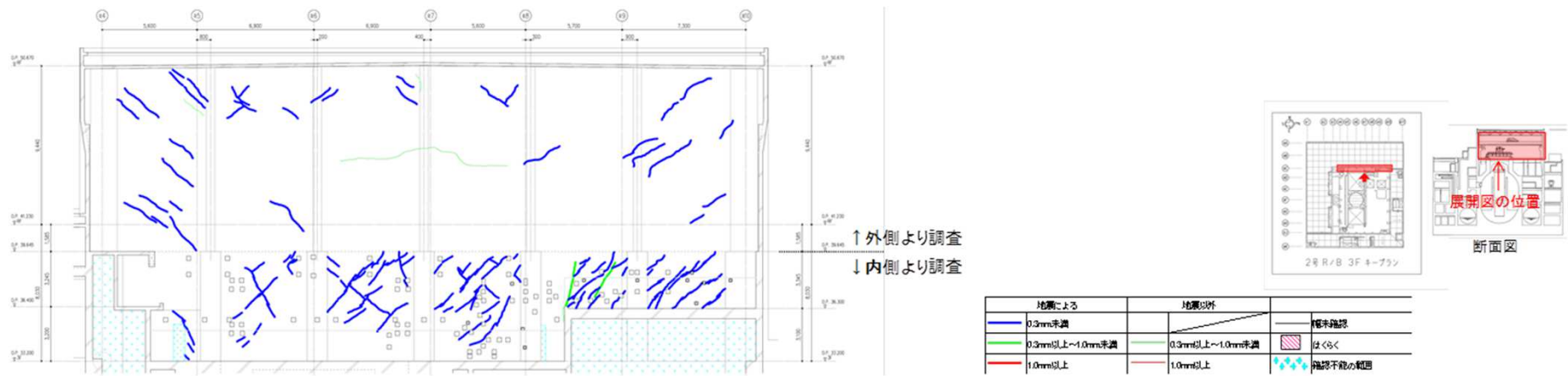


図1 地震後点検結果の例(2号炉原子炉建屋 地上3階 RC通り)

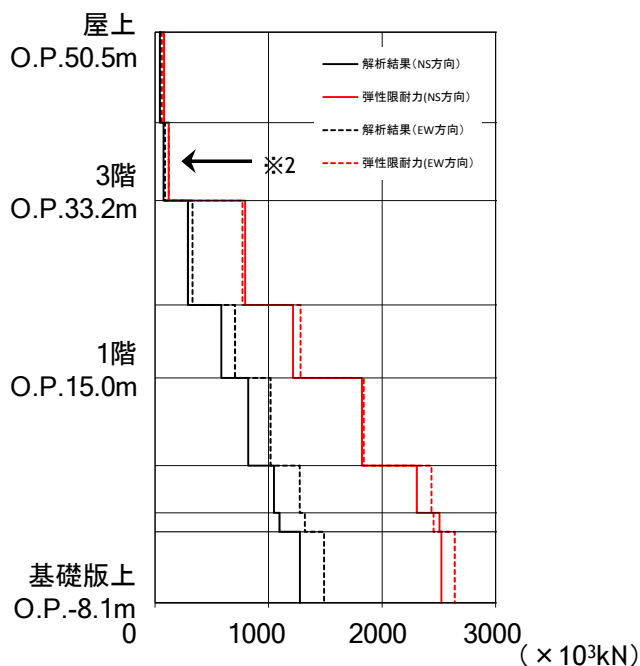
## 2.1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 3.11地震等における構造的損傷の有無(構造的影響評価) 第475回審査会合における説明概要(2)

### 【質点系シミュレーションモデルに基づく評価結果例】

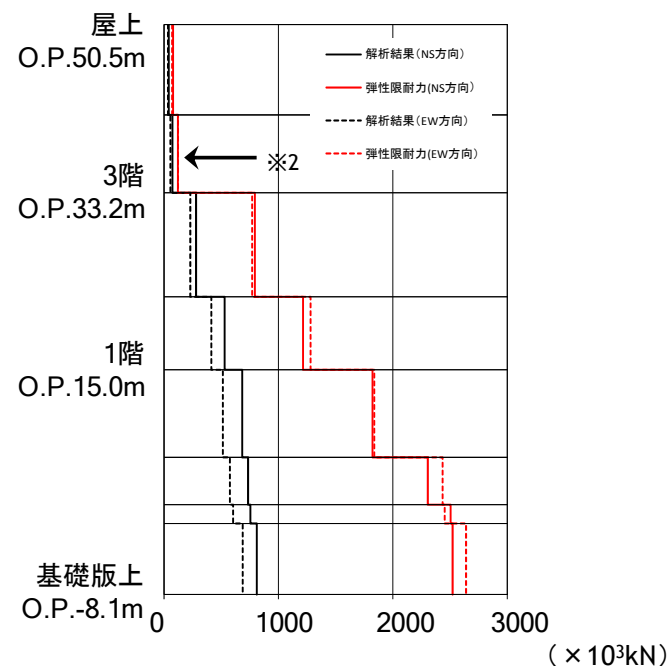
耐震壁の応答は、オペフロ上部でひずみが最も大きいですが、各階の層せん断力は弾性限耐力※1以下であり、この検討結果では鉄筋については弾性範囲である。

※2 比率(各階の層せん断力/弾性限耐力)の最大値は以下のとおりである。

3.11地震 :0.72(EW方向)      4.7地震 :0.60(NS方向)



シミュレーション解析結果 3.11地震



シミュレーション解析結果 4.7地震

※1 弾性限耐力: 鉄筋(設計配筋量)のみで負担できる短期許容応力度( $P_w \times \sigma_y$ )から算定

$P_w$ : せん断力を負担する耐震壁の鉄筋比

$\sigma_y$ : 鉄筋の短期許容引張応力度

## 第475回審査会合における説明概要(3)

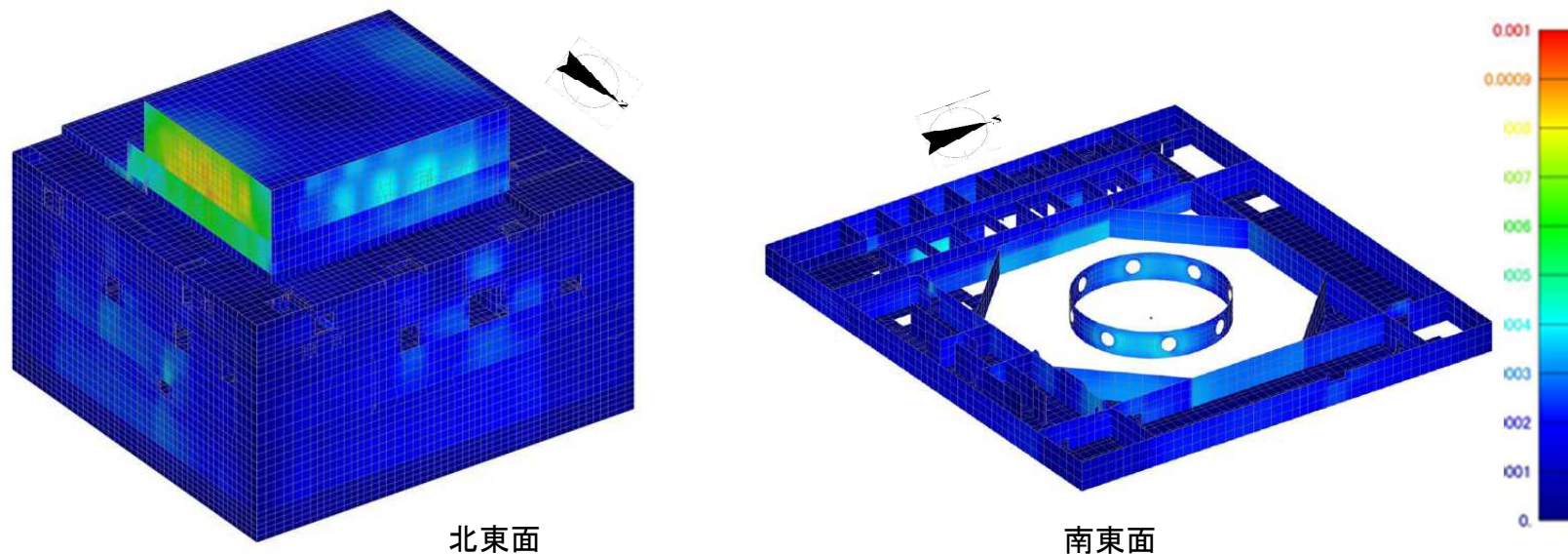
第475回審査会合(H29.6.15)  
資料1-4 p32, 39 再掲

### 【3次元FEMモデル(等価線形)による評価結果例】

点検が困難な箇所の耐震壁や耐震壁以外の部材の構造的影響の確認も兼ねて、建屋全体の3次元FEMモデル(等価線形)による検討を実施した。観測記録との整合性を確認した上で、各部の発生応力について確認した。確認結果は以下の通り。

- ・解析結果による耐震壁のせん断ひずみは、最大でもオペフロ上部において $0.83 \times 10^{-3}$ 程度であった。
- ・オペフロ上部を除けば、部分的に耐震壁の一部でせん断ひび割れの目安値( $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3}$ )を超える箇所はあるものの、最大でもオペフロ上部のひずみの半分程度である。耐震壁で周囲に比べ部分的にせん断ひび割れの目安値を超えている箇所としては、ベント管周り等の開口部付近である。
- ・床スラブのせん断ひずみは、開口付近で部分的にせん断ひび割れの目安値を超えている箇所はあるものの、大部分は目安値以下である。

なお、ベント管周り等の開口部については、点検によって、地震による大きなひび割れの発生は認められないことを確認している。



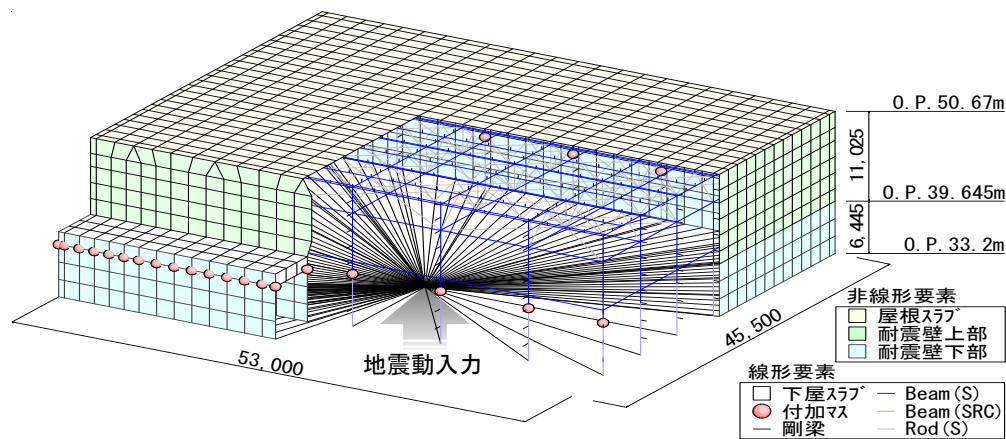
建屋全体3次元FEMモデルによるせん断ひずみ分布の例

## 第475回審査会合における説明概要(4)

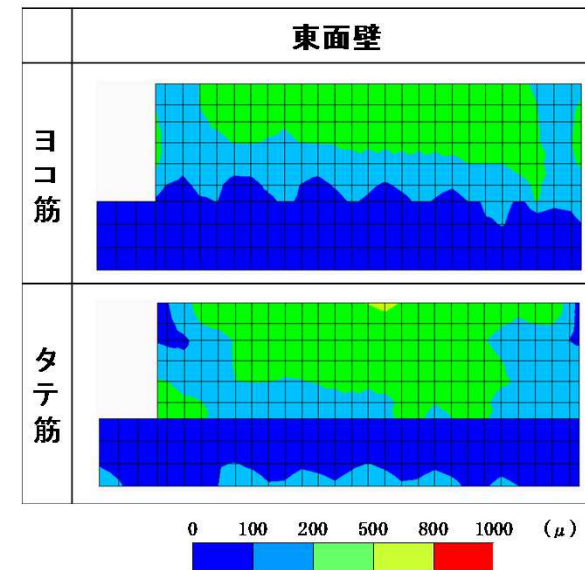
### 【オペフロ上部3次元FEMモデル(非線形)による評価結果例】

階毎の層せん断力と弾性限耐力との比較, また, 軸毎の層せん断力と弾性限耐力の比較において, 最も裕度の少ないオペフロ上部の鉄筋の損傷の有無を評価することを目的に, より詳細な3次元FEM非線形解析を実施した。モデル策定に当たっては, オペフロ上部に設置していた相関変位計測システムによる観測記録との整合性を確認している。

その結果, 鉄筋の最大引張ひずみは676 $\mu$ で, 降伏ひずみ(1680 $\mu$ )を下回っており, 耐震壁の鉄筋は弾性範囲であることを確認した。



オペフロ上部3次元FEM(非線形)モデル図

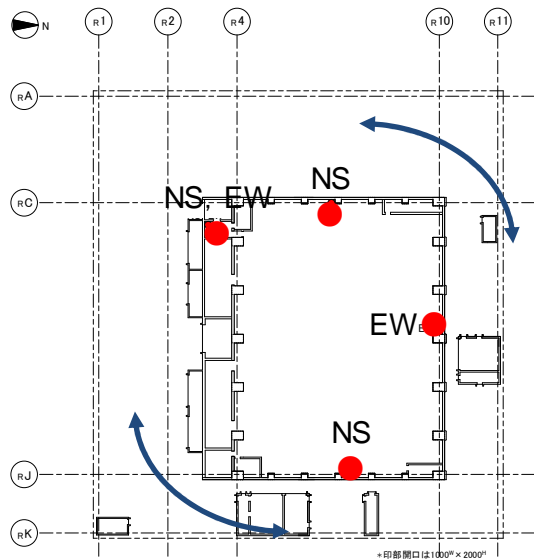


鉄筋のひずみ分布図

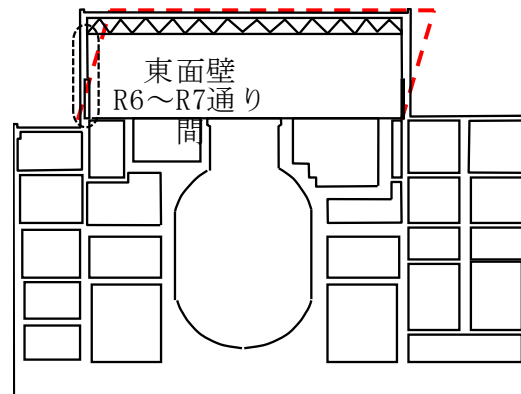
## 2. 1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 3.11地震等における構造的損傷の有無(構造的影響評価) 追加検討の概要

### ■追加検討の目的

検討項目	検討目的
3次元的なねじれの影響確認	3.11地震時の建屋の3次元的なねじれ振動が建屋の構造特性に影響を及ぼす振動レベルであったかどうかについて確認する。
耐震壁の残留変形の確認	3.11地震等に対して、建屋の耐震壁の塑性化に起因する大きな残留変形が残っていないかどうかを確認する。
床等の面外応力に対する影響確認	床の構造設計では長期荷重が、また、耐震壁については面内方向の地震荷重が支配的となるが、面外方向の応答が大きい箇所について、その影響について確認する。

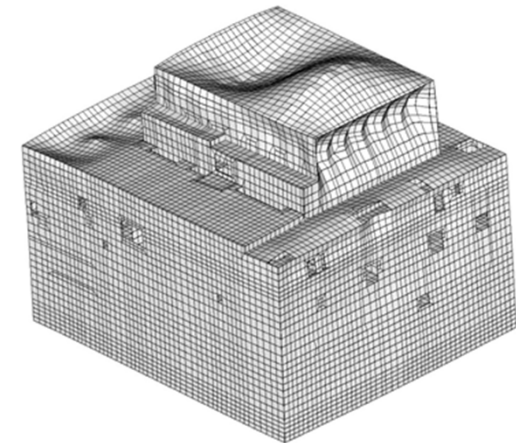


3次元的なねじれの影響確認



耐震壁の残留変形の確認

コメントNo. 27, 28に対応



床等の面外応力に対する影響確認

## 2. 1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 3.11地震等における構造的損傷の有無(構造的影響評価) 追加検討のうち 3次元的なねじれの影響確認(1)

項目	概要
検討の目的	3.11地震時の建屋の3次元的なねじれ振動が建屋の構造特性に影響を及ぼす振動レベルであったかどうかについて確認する。
検討対象箇所	検討対象箇所は、地震動レベルが最も大きく、かつ、地震計の配置からねじれ影響の確認をしやすい2号炉原子炉建屋オペフロ上部を対象とした。
検討方法①	対面する地震計同士では、ねじれ振動は逆方向の揺れとなる。従って、両者の記録の伝達関数で位相が180度ずれる周期がねじれ振動の固有周期となるため、そこからねじれの固有周期を評価した。なお、3.11地震による影響も確認するため、地震観測記録は3.11地震前後で分けて評価した。
検討結果①	ねじれの固有周期は、NS方向の記録では、3.11地震前が約8Hz、3.11地震後が約7.5Hzとわずかに低下している。但し、建屋の3.11地震後の1次周期(約4.17Hz(NS方向))とはかけ離れている。

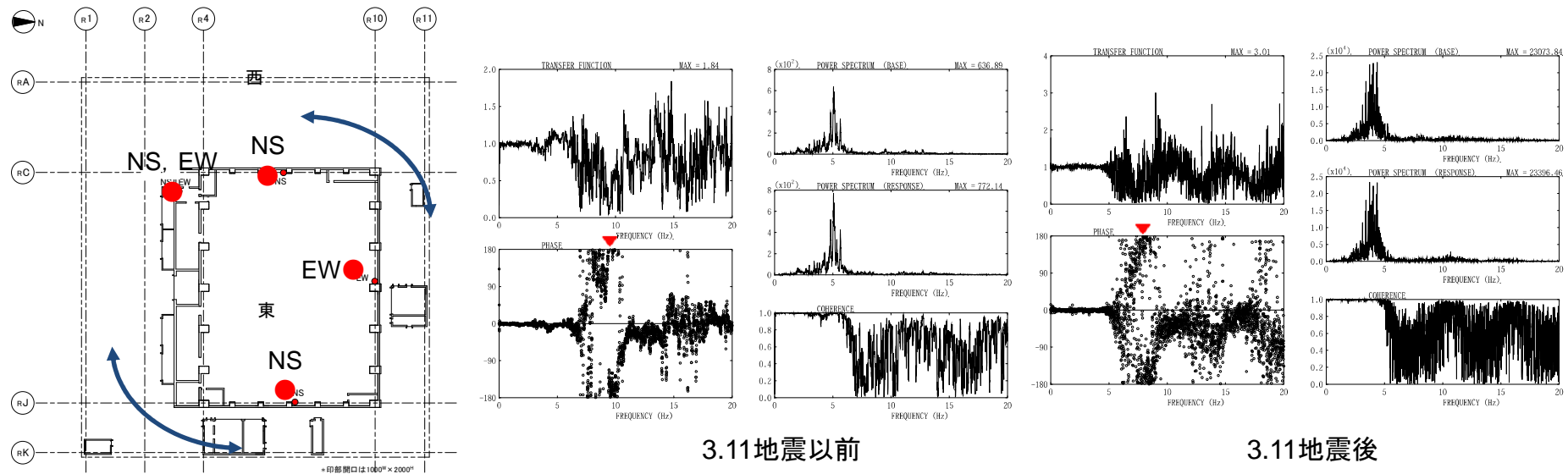
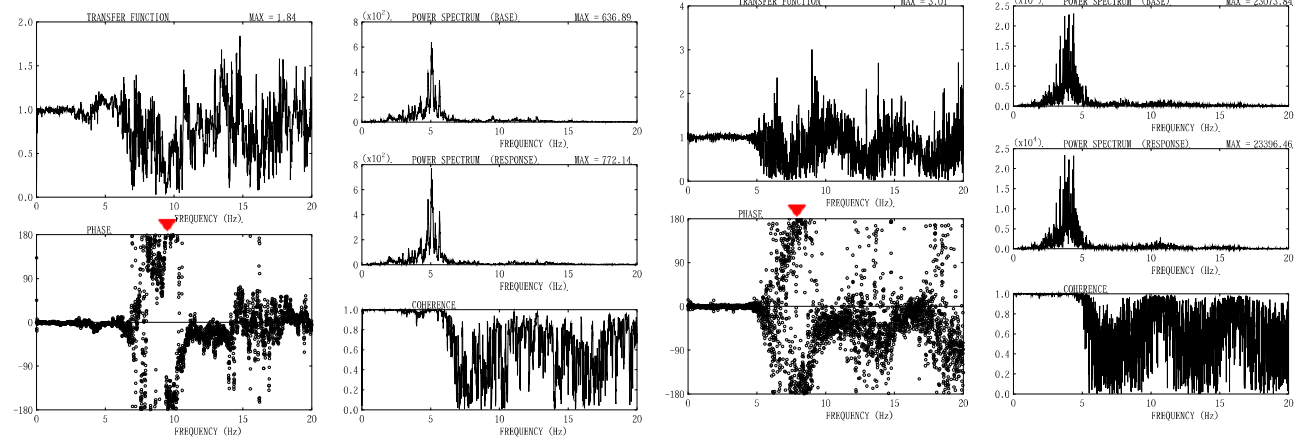


図1 女川2号炉原子炉建屋3階地震計配置

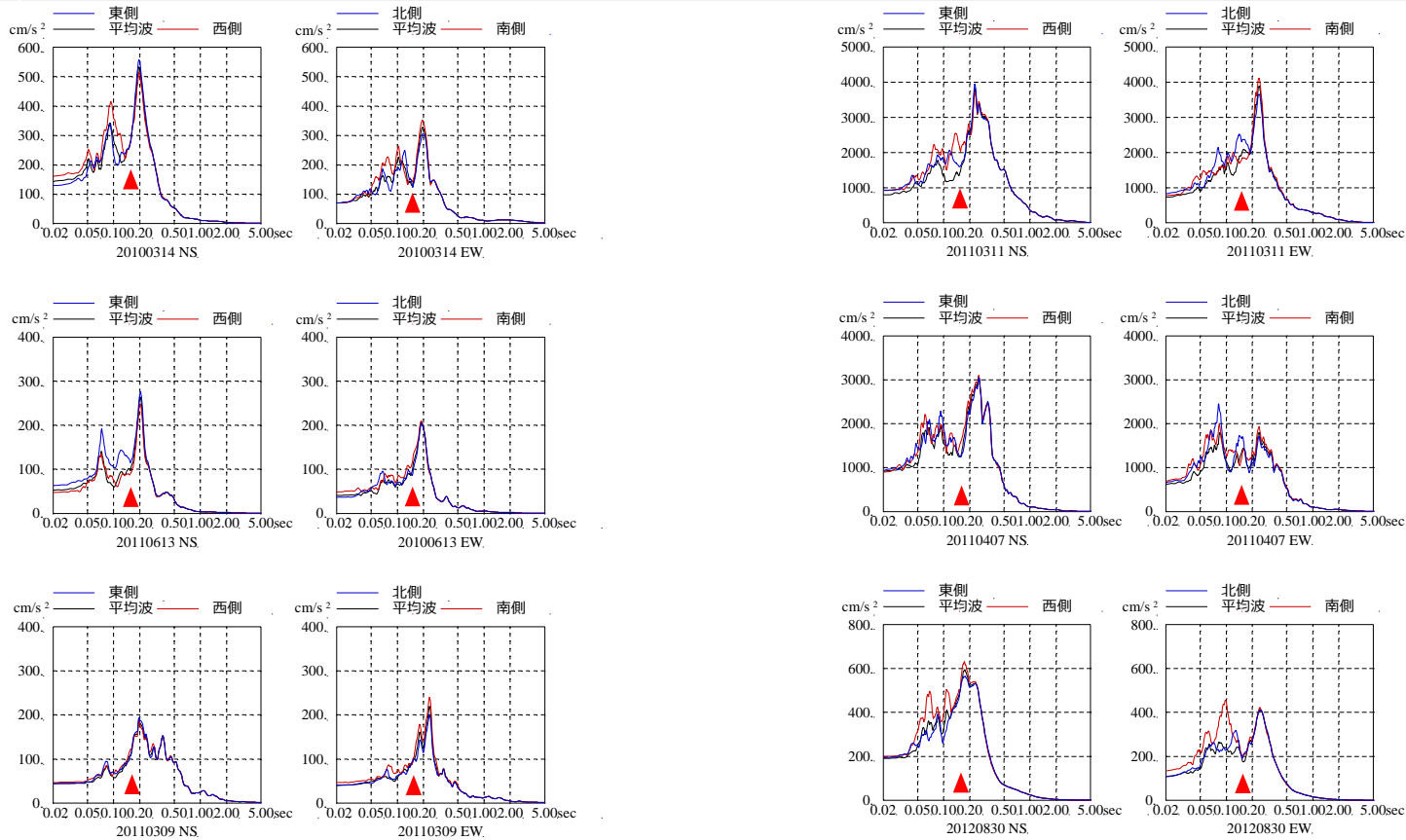


3.11地震以前 3.11地震後

図2 女川2号炉原子炉建屋3階NS方向観測記録の伝達関数(東側地震計/西側地震計)

## 2. 1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 3.11地震等における構造的損傷の有無(構造的影響評価) 追加検討のうち 3次元的なねじれの影響確認(2)

項目	概要
検討方法②	対面の観測記録を平均すると、逆位相となるねじれの卓越周期付近では、その影響がキャンセルされる。そこで、平均波と、単独波それぞれ観測記録の応答スペクトルを比較することにより、ねじれ成分がどの程度の大きさを持つかについて確認した。検討は3.11地震前後の記録で検討した。
検討結果②	ねじれの卓越周期付近(0.13秒付近)では、平均波と単独波で大きな違いは認められない。また、特に大きなスペクトル特性も認められない。



加速度応答スペクトルの比較

以上の検討から、ねじれ振動が建屋の振動特性に与える影響は大きくなく、ねじれ振動が剛性低下の主要因とはなっていない。

## 2.1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 3.11地震等における構造的損傷の有無(構造的影響評価) 耐震壁の残留変形の確認(1)

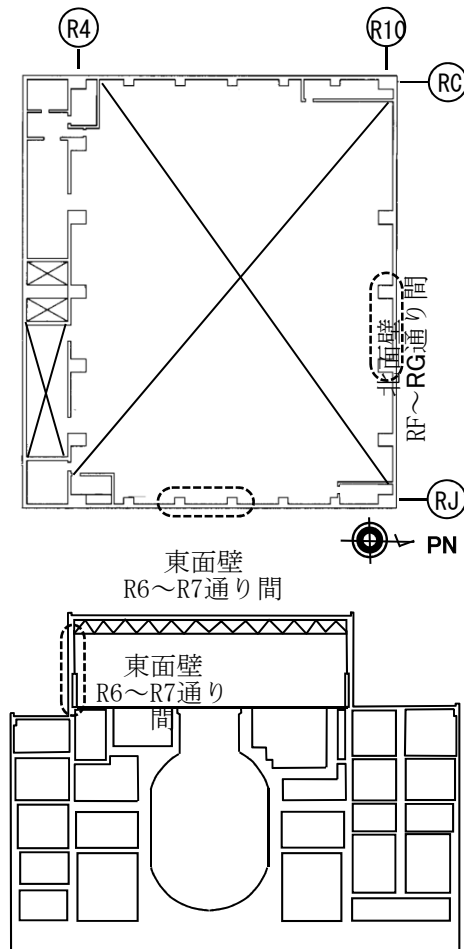
23

### ■ 検討の目的

3.11地震等に対して、建屋の耐震壁の塑性化に起因する大きな残留変形が残っていないかどうかを確認する。

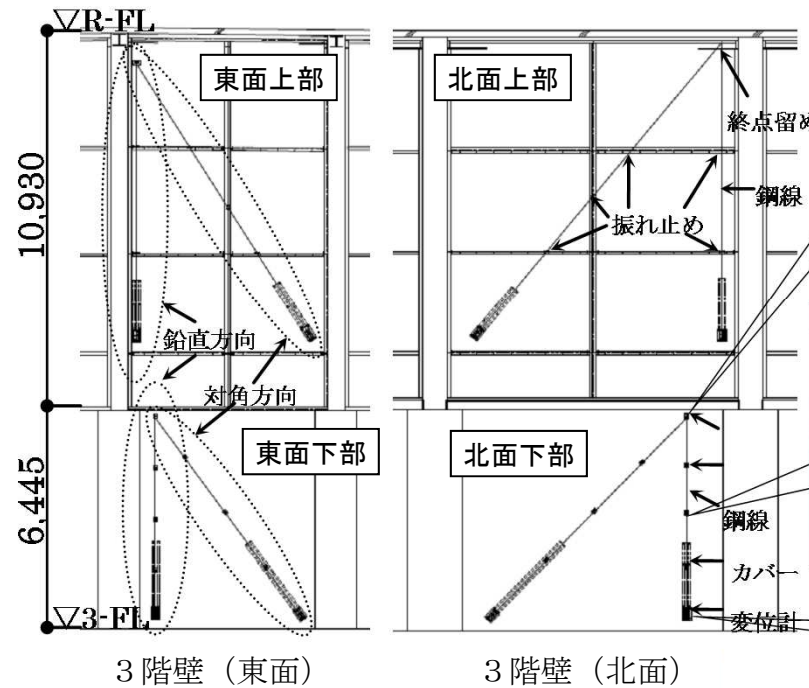
### ■ 検討対象

検討対象は、地震動レベルが最も大きく、かつ、地震による層間変位を直接観測するシステムを設置している女川2号炉原子炉建屋オペフロ上部を対象とし、最大変位、残留変位について検討した。



第2.2-4-8図 変位計測システムの設置場所

相関変位計測システムの精度: 約1/500mm(約0.002mm)



第2.2-4-9図 変位計測システムの設置詳細



## 耐震壁の残留変形の確認(2)

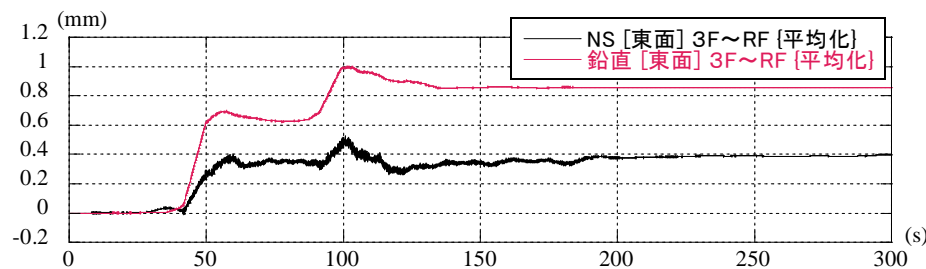
## ■ 検討方法

層間変位計測システムで観測された3.11地震の記録に対し、±4秒間でスムージング化した波形を作成し、残留変形を確認した。

## ■ 検討結果

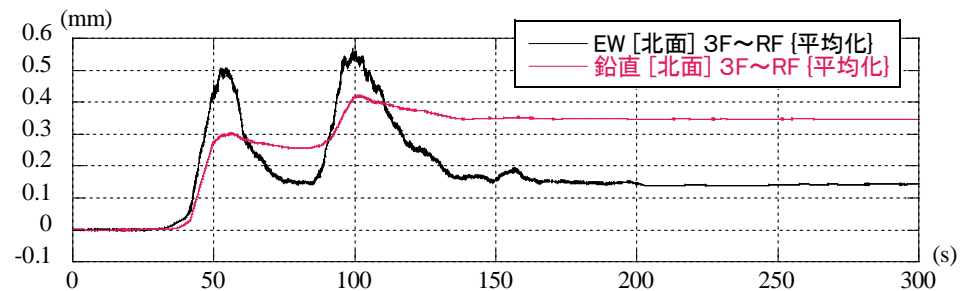
- ① 水平方向最大約0.4mm、鉛直方向最大約0.85mmの残留変位が確認された。この値は、例えば建設時の所定の寸法精度(例えばJASS5Nの場合、15m以上の高さの場合±30mm)と比較してもかなり小さい。なお、オペフロ上部には地震によるひび割れが多数認められたが、仮に残留ひび割れ幅が0.2mm程度として、単純にひび割れ本数の積算値が残留変位に相当すると仮定すると、鉛直では4本程度( $0.85 \div 0.2$ )となり、点検と必ずしも整合しない。残留変位の解釈については、今後も検討が必要である。
- ② なお、層間変位計測システムによる観測記録による最大層間変形角は約 $0.2 \sim 0.5 \times 10^{-3}$ であり、地震により耐震壁にひび割れが入る目安値( $0.25 \times 10^{-3}$ )を超えている。これは点検結果とも整合的である。

以上から、**建屋の耐震壁の塑性化に起因する大きな残留変形は残っていないことを確認した。**



変位波形(スムージング後)

変位観測記録(東面) NS方向(3F~RF)



変位波形(スムージング後)

変位観測記録(北面) EW方向(3F~RF)

## 2. 1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 3.11地震等における構造的損傷の有無(構造的影響評価) 床等の面外応力に対する影響確認(1)

### ■検討の目的

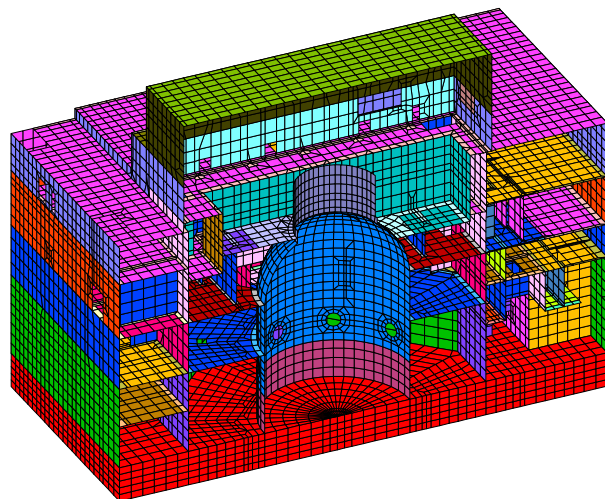
床の構造設計では長期荷重が、また、耐震壁については面内方向の地震荷重が支配的となるが、面外方向の応答が大きい箇所について、その影響について確認する。(コメントNo. 27に対応)

### ■検討対象

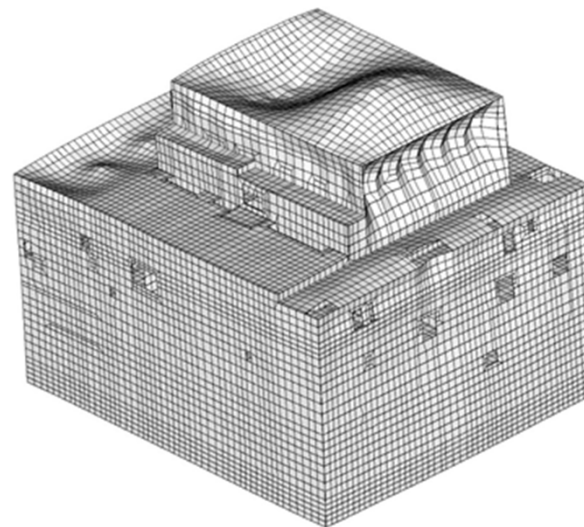
検討対象箇所は、最も大きな地震力が作用したオペフロ階以上、具体的にはオペフロ階の床及び屋根スラブとオペフロ階より上部の耐震壁を対象とした。

### ■検討方法

3次元FEMモデル(等価線形)に3.11地震の観測記録を入力した結果を確認する。



3次元FEM等価線形モデル(断面図)



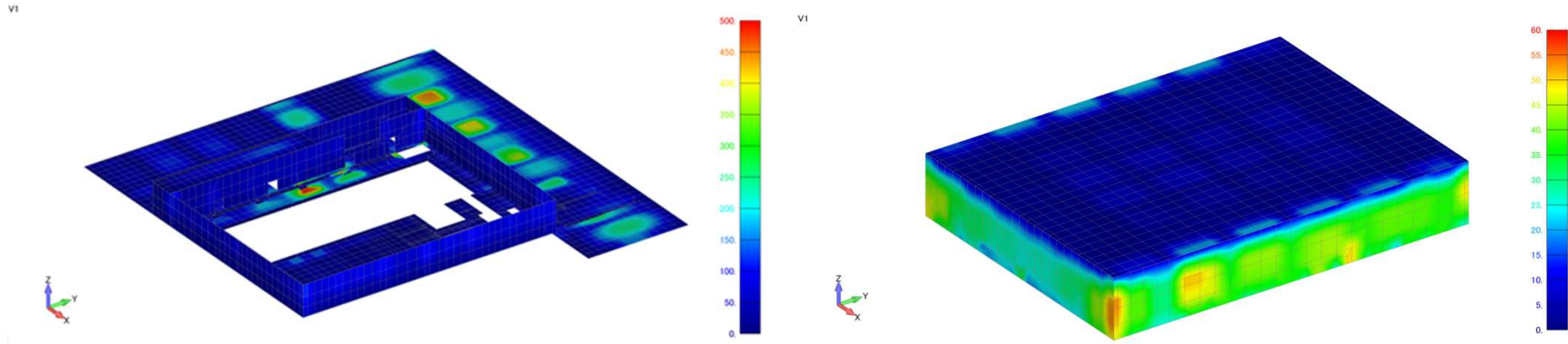
3次元FEMモデルEW方向1次 固有モード図(南東)

## 2. 1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 3.11地震等における構造的損傷の有無(構造的影響評価) 床等の面外応力に対する影響確認(2)

### ■ 検討結果

- ①床スラブについては、オペフロ階の部分的なエリアにおいて、発生応力が大きい結果が得られた。ただし、その箇所においても、部材断面の検討結果では鉄筋は弾性範囲であり、**全ての床スラブにおいて弾性範囲である事を確認した。**
- ②オペフロ階より上部の耐震壁についても、比較的大きな面外方向の応力が発生しているが、部材断面の検討結果では鉄筋は弾性範囲であった。なお、壁の健全性については、点検結果に加え、3次元FEMモデル(非線形)による確認を行っている。

(参考)解析モデルは剛域などの拘束条件を設定していないシェル要素で構成しているため、面外方向については応力が比較的大きめに算定されると考えられる。



2号炉原子炉建屋 3階面外曲げ応力図  
(北東面 3.11地震)

2号炉原子炉建屋 CR階耐震壁面外曲げ応力図  
(北東面 3.11地震)

## 2. 1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 3.11地震等における構造的損傷の有無(構造的影響評価) 床等の面外応力に対する影響確認(3)

### 【補足検討】オペフロ階床の点検・評価

念のため、オペフロ階の発生応力の大きい床について点検評価を実施した所、乾燥収縮によるものと考えられるひび割れは認められたものの、ひび割れ幅の大きいひび割れは無く、また、その特徴は、発生応力が小さい箇所の床スラブのひび割れ状況と類似した結果となっている。従って、当該箇所には地震による顕著なひび割れは発生していないものと判断した。

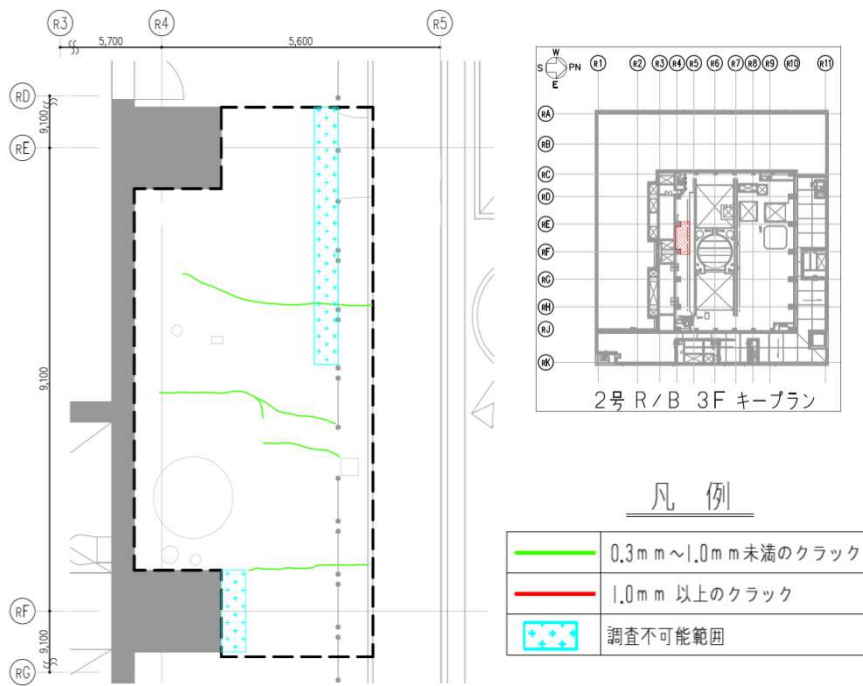


図1 2号炉原子炉建屋3階床ひび割れ調査結果  
(発生応力の大きい部位を選定)

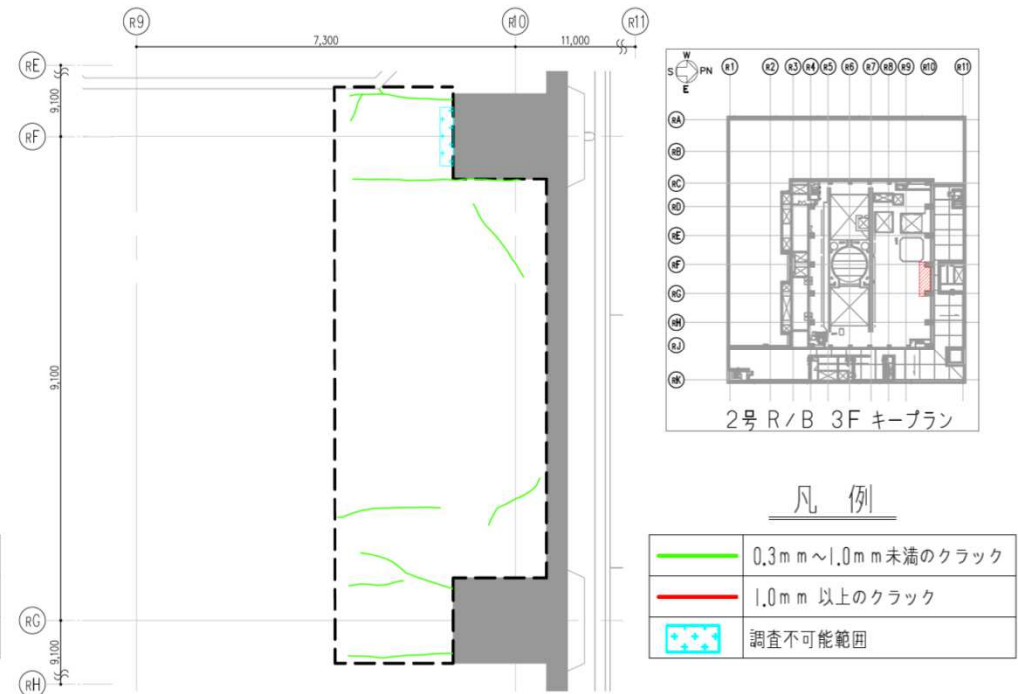


図2 2号炉原子炉建屋3階床ひび割れ調査結果  
(発生応力の小さい部位を選定)

## 2. 1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 3.11地震等における構造的損傷の有無(構造的影響評価) 検討結果

### ■3.11地震等における構造的損傷の有無(構造的影響評価)の検討結果

女川2号炉原子炉建屋は3.11地震の影響を受け設計と乖離する剛性低下を来たしているが、**建屋の状態としては微細なクラックが発生している状態**であり、ひび割れ幅1.0mm以上のクラックが発生するような構造的損傷を受けた状態には至っていないものと判断した。

表1 3.11地震による影響検討の検討項目

検討項目	部位	地震方向	検討方法(点検以外)	備考
躯体 (構造的損傷* 1の有無の確認)	耐震壁	面内	質点系モデル	建屋全体を対象にしたモデル
			3次元FEMモデル(線形)	
			オペフロ上部3次元FEMモデル(非線形)	
			変位計測システムによる記録	残留変位の確認
	面外	ねじれ	3次元FEMモデル(線形)	検討対象:オペフロ上部
			観測記録の傾向分析	オペフロ上部の記録に基づき検討
	基礎版	面内, 面外	3次元FEMモデル(線形)	
	フレーム		3次元FEMモデル(線形)	
床スラブ	面内	3次元FEMモデル(線形)		
		面外	3次元FEMモデル(線形)	検討対象:オペフロ階, 屋根

青字:今回コメント回答として新たに示した追加検討項目を示す

\*1:構造的損傷:ひび割れ幅1.0mm以上のクラックが発生するような事象の有無の確認。必要に応じ、目視点検も合わせて実施。

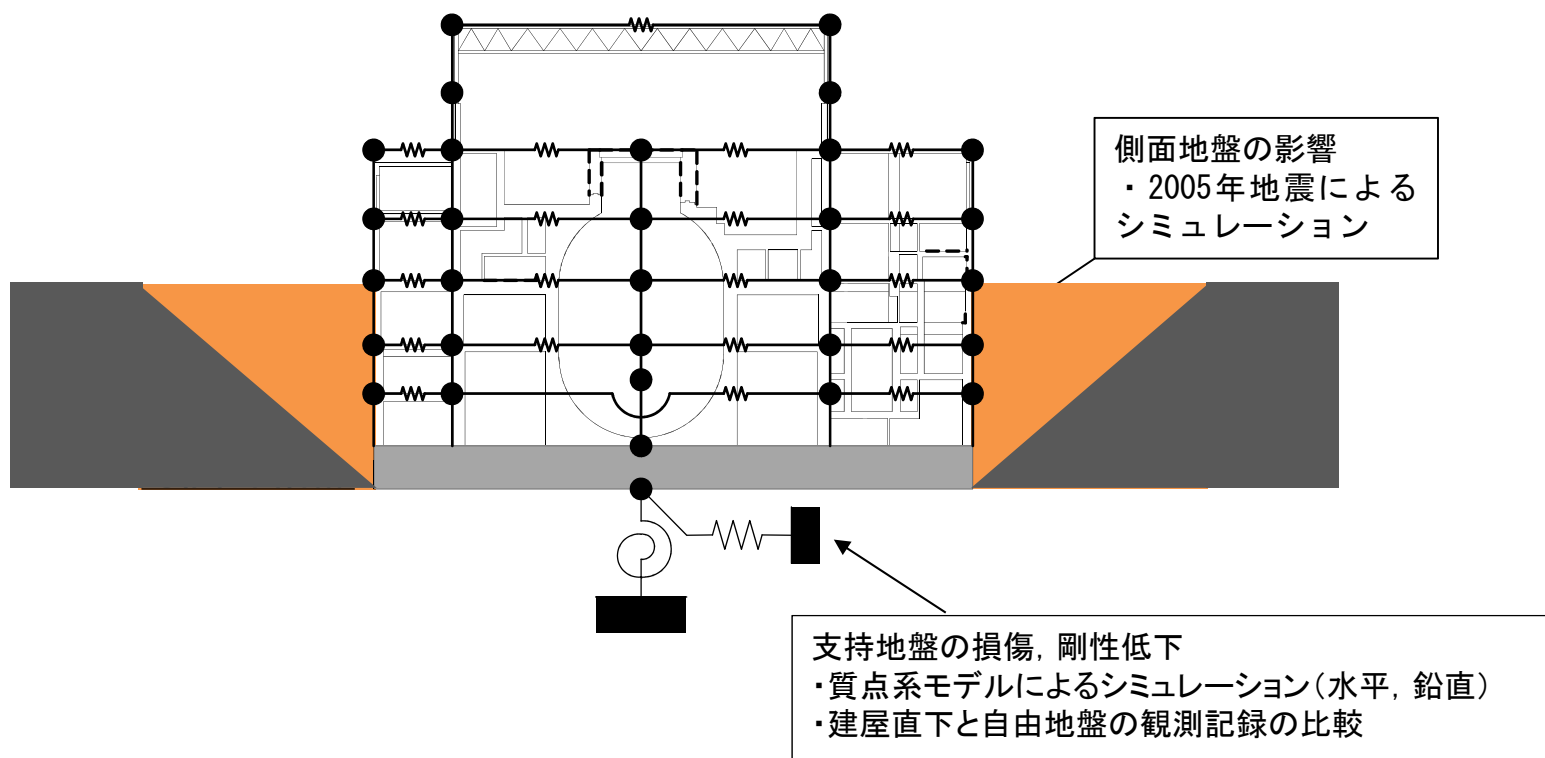
## 2.1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 支持地盤の剛性低下の有無 検討の概要

### ■ 検討の目的

3.11地震等による顕著な初期剛性の低下の要因として、支持地盤の剛性低下や側面地盤の影響が寄与しているのかどうかについて検討を行う。(コメントNo.31に対応)

### ■ 検討の方法

- ①2号炉原子炉建屋の質点系シミュレーション解析結果から得られる支持地盤の支持力確認
- ②自由地盤と建屋直下(1号炉原子炉建屋)の観測記録の比較
- ③側面地盤が建屋の振動特性に与える影響の確認



## 2.1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 支持地盤の剛性低下の有無 2号炉原子炉建屋シミュレーションによる支持地盤の支持力確認

### ■検討の目的

剛性低下に支持地盤が影響しているかどうかについて確認することを目的に、2号炉原子炉建屋の質点系による建屋シミュレーション解析結果得られた支持地盤の発生応力と許容値を比較する。

### ■検討結果

建屋シミュレーション解析結果得られた支持地盤の発生応力の最大値は $1.2\text{N/mm}^2$ であり、地盤の短期許容支持力度 $9.1\text{N/mm}^2$ に対して十分下回っており、支持地盤は健全であったものと判断される。

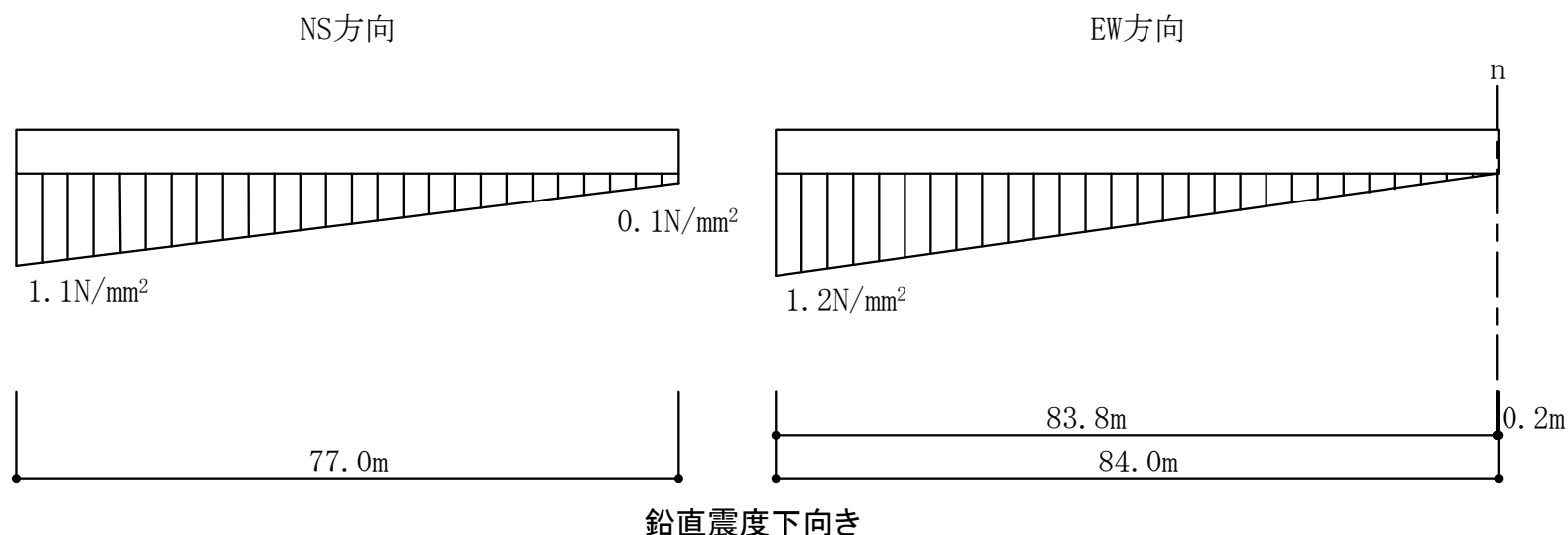


図1 女川2号炉原子炉建屋 3.11地震 最大接地圧

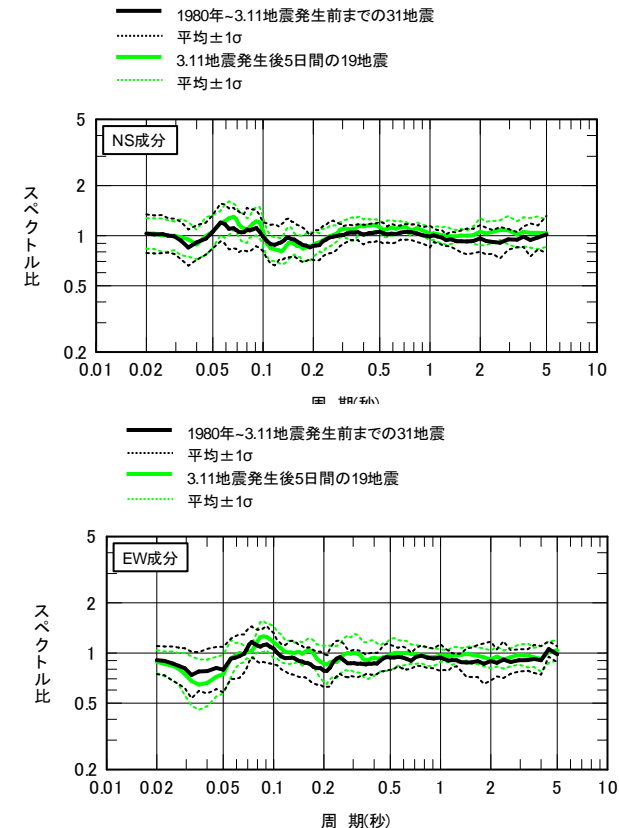
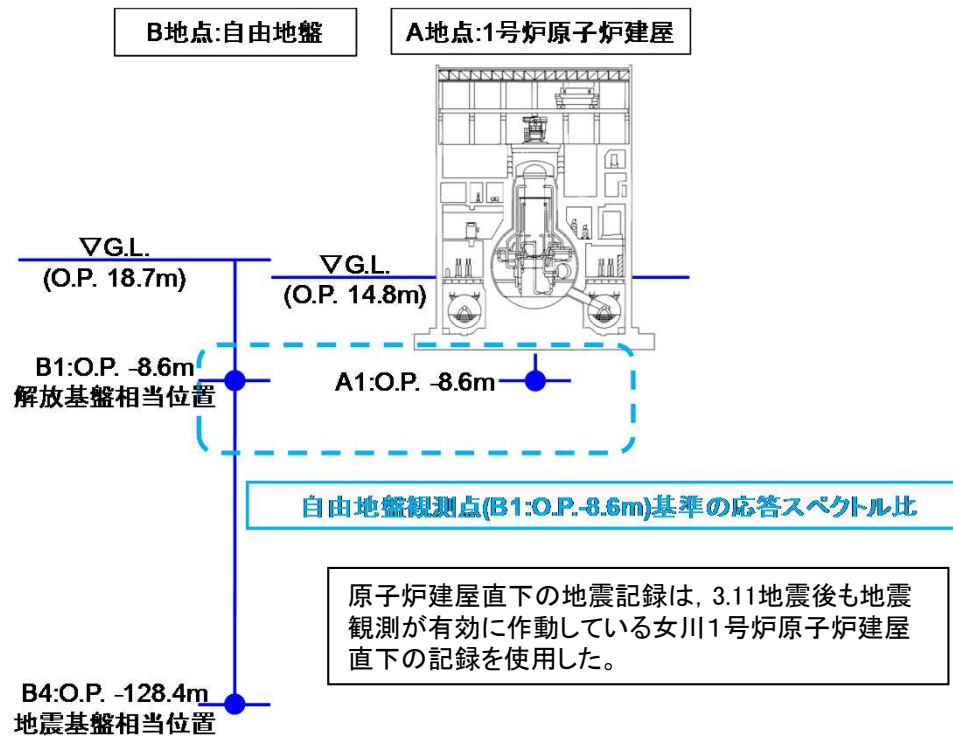
## 2. 1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 支持地盤の剛性低下の有無 自由地盤, 建屋直下の観測記録の比較(1)

### ■ 検討の目的

剛性低下に支持地盤が影響しているかどうかについて確認することを目的に, 自由地盤地震計の記録と, 原子炉建屋直下に設置されている地震計の記録の応答スペクトル比等に基づき, 3.11地震前後で傾向の変化の有無について確認する。

### ■ 検討結果①(水平アレー記録の確認)

自由地盤の浅部(解放基盤表面レベル)に設置している地震計と女川1号炉原子炉建屋直下の地震記録のスペクトル比について, 3.11地震前後の中小地震による傾向の比較を行った。その結果, **3.11地震前後で傾向に変化はない事**を確認した。





## 2.1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 支持地盤の剛性低下の有無 自由地盤, 建屋直下の観測記録の比較(2)

### ■ 検討結果②(鉛直アレイ記録の確認)

自由地盤の深部地盤と浅部地盤の観測点間における応答スペクトル比について3.11地震前後の中小地震による傾向, 3.11地震と中小地震の傾向について比較を行った。

その結果, 3.11地震前後で傾向に変化はない事を確認した。

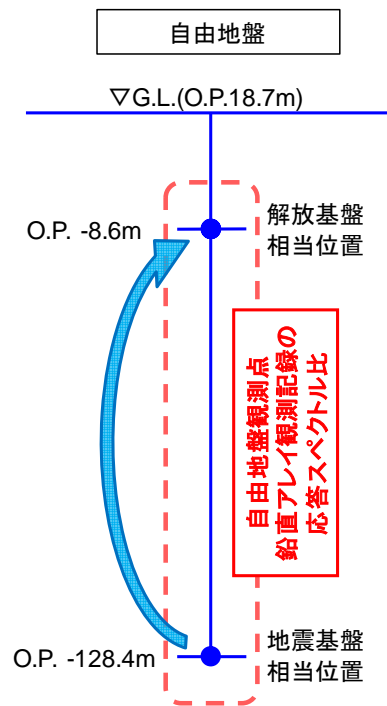


図1 地盤系の地震計配置および検討対象地震観測位置

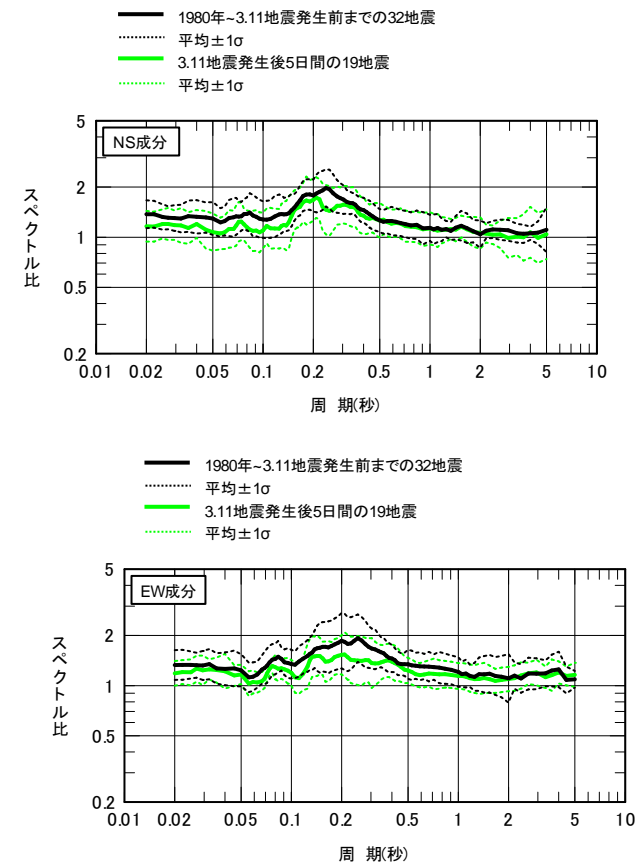


図2 スペクトル比(女川1号原子炉建屋直下/自由地盤)

## 2.1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 支持地盤の剛性低下の有無 側面地盤が建屋の振動特性に与える影響の確認

### ■ 検討の目的

剛性低下に側面地盤が影響しているかどうかを検討することを目的に、側面地盤が建屋の振動特性に与える影響を確認する。

### ■ 検討方法

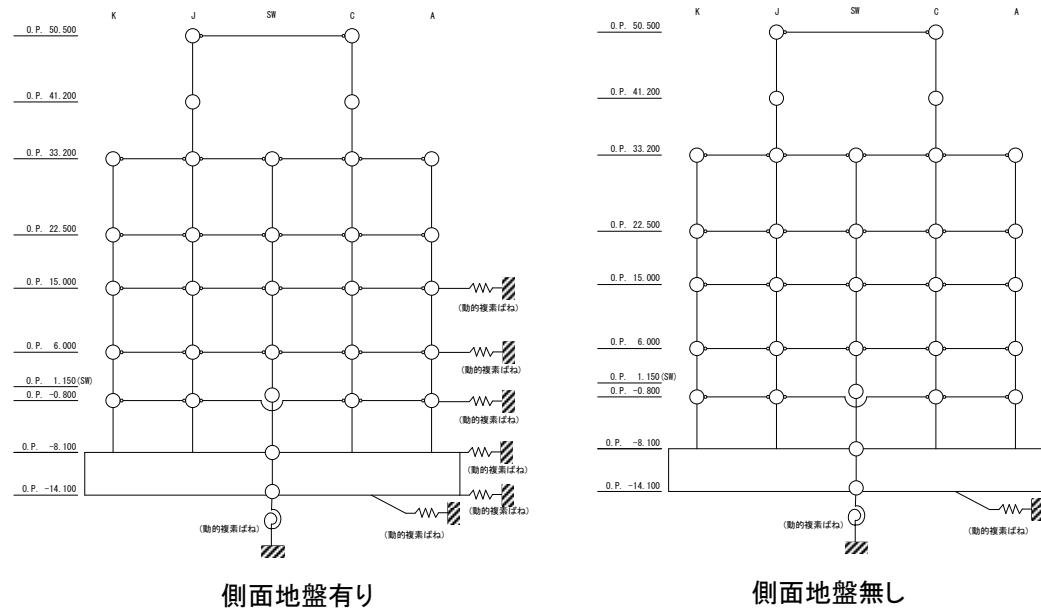
3.11地震の場合、建屋周辺地盤の陥没等による埋め戻し土の剛性低下が著しいため、その影響が小さい2005年宮城県沖地震を対象に、側面地盤バネの有無が地震応答解析結果に与える影響について確認する。

### ■ 検討結果

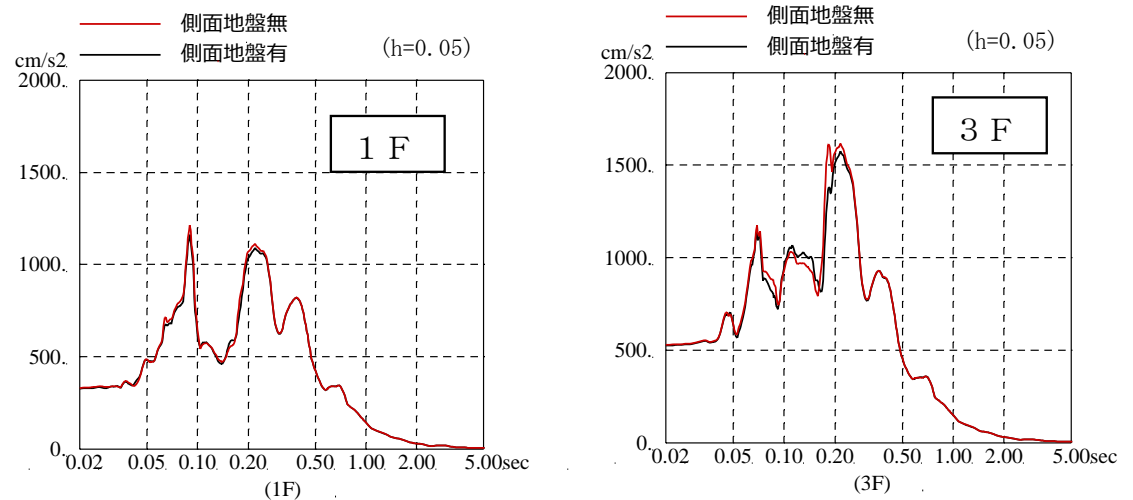
検討の結果、側面地盤バネの有無による地震応答解析結果(床応答スペクトル)に与える影響は小さいことを確認した。

なお、2号炉原子炉建屋の当初設計では、側面地盤による埋込み効果を期待していないため、側面の埋め戻し工事においても設計を意識した特別な管理は行っていない。そのため、2号炉原子炉建屋のように重量の大きい建屋に対しては、特に埋め戻し土が振動特性に及ぼす影響は小さいと考えられ、検討結果はそれと整合する。

以上の検討から、3.11地震等による顕著な初期剛性の低下の要因として、支持地盤の剛性低下や側面地盤の影響が寄与していないことを確認した。



第2.2-5-6図 建屋モデル図(2号炉原子炉建屋NS方向)



第2.2-5-7図 加速度応答スペクトルの比較(2号炉原子炉建屋NS方向)

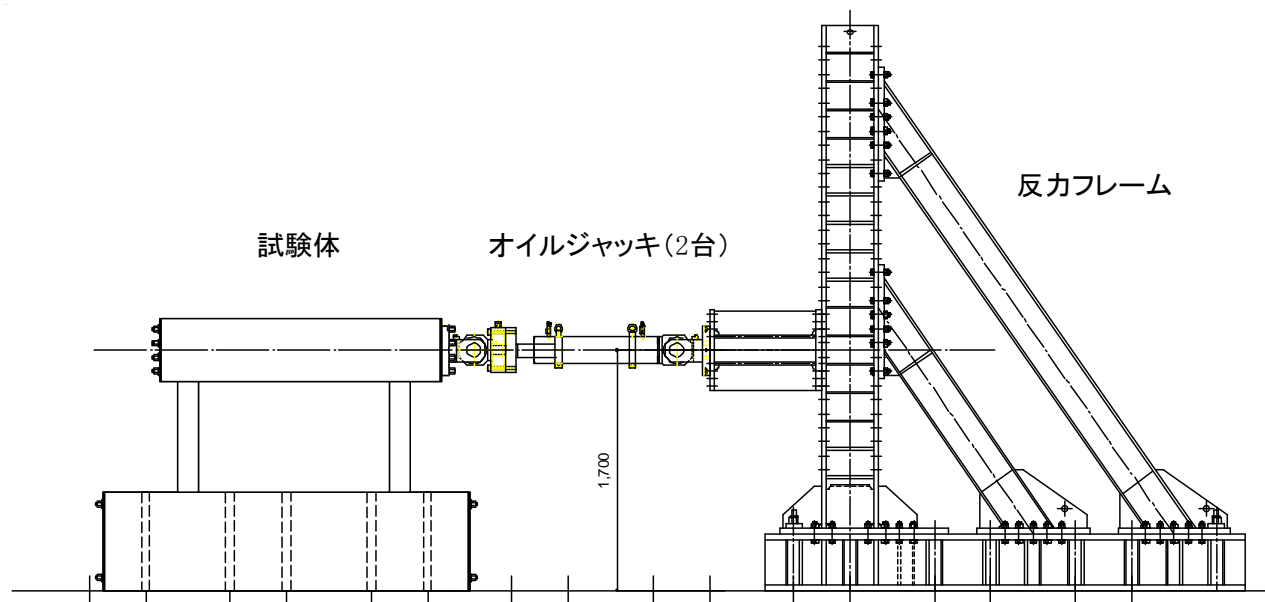
## 2.1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 繰返し地震力の影響の有無 耐震実験[1]による確認 (1)

### ■検討の目的

女川原子力発電所では、3.11地震以前にも、2003年5月26日宮城県沖地震(M7.1, 1号原子炉建屋基礎版上で200ガル程度)や2005年8月16日宮城県沖地震(M7.2, 1号原子炉建屋基礎版上で250ガル程度)による揺れを受けている。建物が損傷を受けない弾性範囲であっても地震によって剛性が低下する現象は数多く報告されているが、それ以外の低下要因として、こういった比較的大きな地震動を繰返し経験することにより耐震壁の剛性が低下していく傾向が認められるかどうかについて検討する。(コメントNo.19に対応)

### ■検討の方法

耐震壁に対する静的繰返し加力を行う耐震実験(耐震実験[1]と呼称)によって確認を行った。



試験の概要

## 2.1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 繰返し地震力の影響の有無 耐震実験[1]による確認 (2)

### ■実験の概要

耐震実験に当たっては、原子力発電所の耐震壁の特徴を反映した。

- ・試験体の鉄筋量については、2号炉原子炉建屋の耐震壁の鉄筋比が概ね1.2～1.6%前後であることを踏まえて、鉄筋比1.4%とした。
- ・原子力発電所の耐震壁は曲げ変形よりもせん断変形が支配的なため、せん断変形が卓越する試験体の形状・加力方法とした。
- ・特に微小変形レベルでの精度確保が可能な加力装置を用い、せん断ひずみ $0.1 \times 10^{-3}$ (2005年宮城県沖地震による原子炉建屋オペフロ下部の応答程度)から繰返し加力を実施した。
- ・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、一般的な部材実験よりも多い最大5サイクル(一般的な部材実験では2サイクル)とした。



試験全体写真

## 2.1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 繰返し地震力の影響の有無 耐震実験[1]による確認 (3)

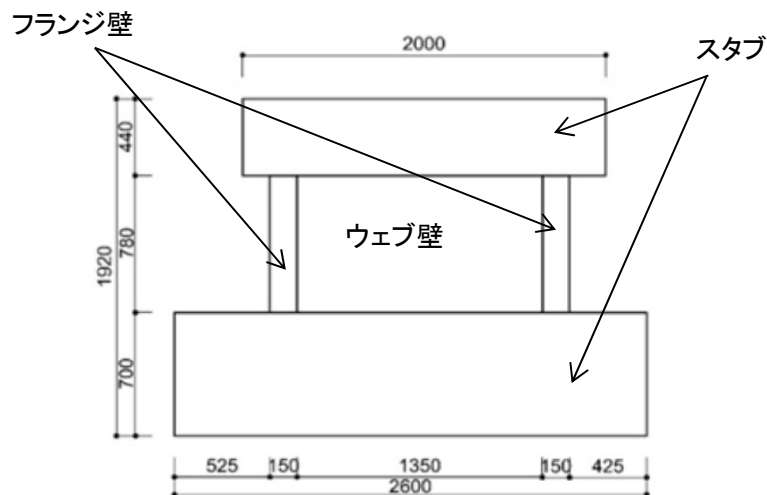


図1 試験体形状

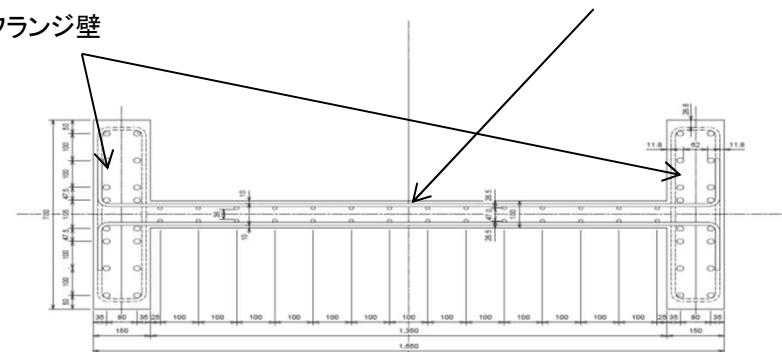


図2 試験体断面配筋図

表1 試験体諸元

	B × D	700 × 150
フランジ壁	主筋	16-D16 ( $p_g=2.8\%$ )
	帯筋	2-D10@100 ( $p_s=0.95\%$ )
ウェブ壁	壁厚	100
	縦筋	D10@100ダブル ( $p_s=1.4\%$ )
	横筋	D10@100ダブル ( $p_s=1.4\%$ )
制御方式		変位制御
(単位:mm)		

### 実験の主な特徴

#### 【加力時期】

- ・コンクリート打設後、型枠をつけたまま4週間養生したのち、約1週間で測定装置などを取りつけた後に加力を実施。

#### 【測定上の特徴】

- ①2つのジャッキを制御することで、試験体にねじれや面外変形挙動が生じないように考慮しつつ、**0.01mmレベルの高精度な変位制御**を可能としている。
- ②**AE(アコースティック・エミッション)**によるひび割れ発生検知も実施している。
- ③画像処理によるひび割れ分布の把握も実施。

## 2.1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 繰返し地震力の影響の有無 耐震実験[1]による確認 (4)

### ■加力サイクルの特徴

- ・初期加力として、変形角 $R=1/10000\text{rad}$  ( $0.1 \times 10^{-3}$ ) および $1/5000\text{rad}$  ( $0.2 \times 10^{-3}$ ) で2サイクルの繰返し加力を実施した後に、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、 $R=1/1000\text{rad}$  ( $1.0 \times 10^{-3}$ ) までの主要変形角に対して**5サイクル繰返し加力**を実施し、 $R=1/1000\text{rad}$  ( $1.0 \times 10^{-3}$ ) 以降は2サイクルの繰返し加力とした。
- ・また、**経験した変形角よりも小さい変形角(インナーloop)**での剛性低下挙動を検討することを目的として、加力ステップ4、5としてインナーloopとなる繰返し加力を合計4サイクル実施した(表および図中の破線で囲んだ部分)。

表1 加力計画

変形角 R (rad.)	計測変位 $\delta$ (mm)	加力 ステップ	加力 サイクル 数	備考
1/10000	0.1	1	2	2005年宮城県沖地震による 原子炉建屋オペフロ下部の 応答程度
1/5000	0.2	2	2	2011年東北地方太平洋沖地 震による
1/3333	0.3	3	5	原子炉建屋オペフロ下部の 応答程度
1/5000	0.2	4	2	
1/3333	0.3	5	2	
1/2500	0.4	6	5	
1/1667	0.6	7	5	
1/1250	0.8	8	5	
1/1000	1.0	9	2	
1/500	2.0	10	2	
1/333	3.0	11	2	
1/250	4.0	12	押切り	

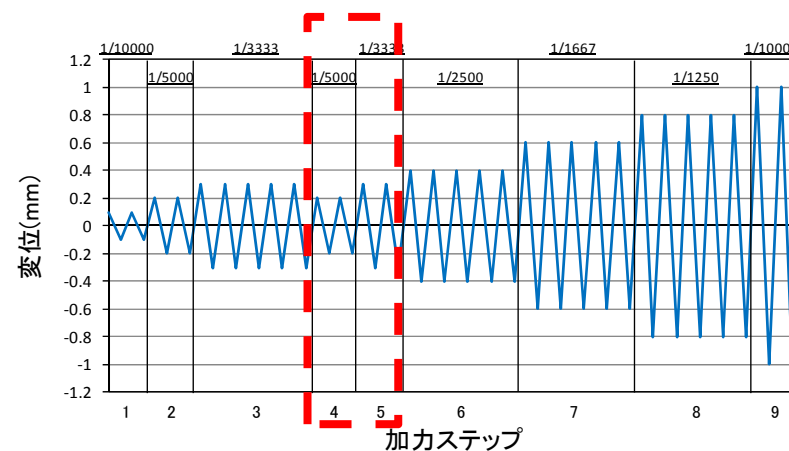
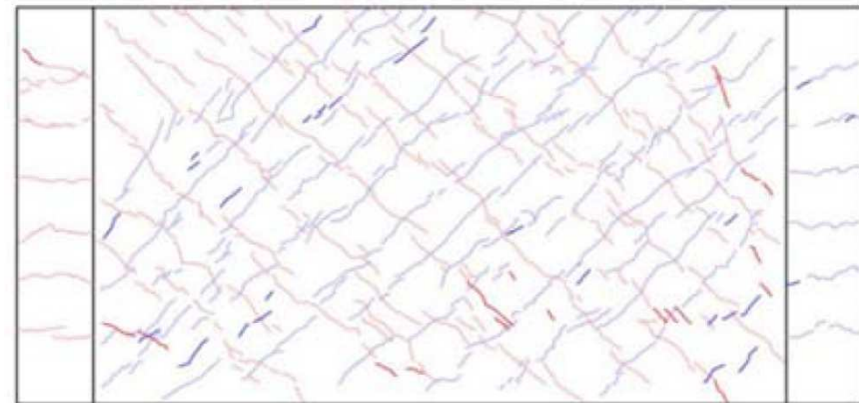


図1 加力概念図



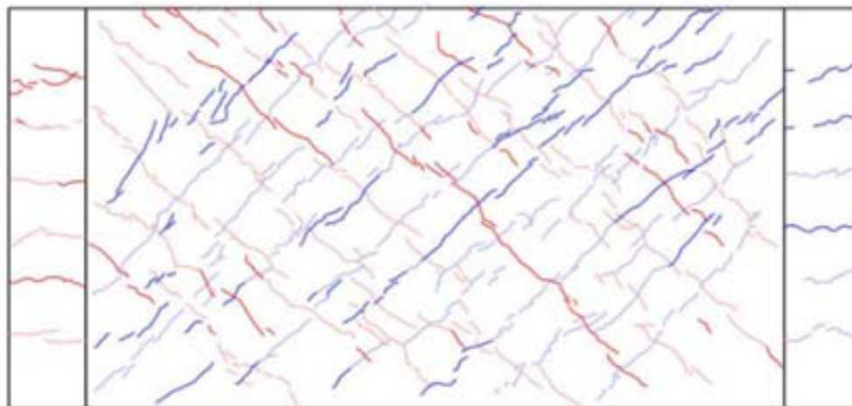
せん断すべり破壊している。

図1 最終破壊時写真



ひび割れの大半はせん断ひび割れ

図3 最終破壊時ひび割れ図



評価基準値においても多数のひび割れが発生している。

図2 1/500rad.( $2.0 \times 10^{-3}$ )におけるひび割れ図

## 2.1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 繰返し地震力の影響の有無 耐震実験[1]による確認 (6)

### ■ 実験結果の特徴① (JEAG式との比較)

試験結果は、初期剛性部分、原子力施設建屋の基準地震動 $S_s$ に対する評価基準値(せん断ひずみ: $2.0 \times 10^{-3}$ )付近、また、終局耐力付近(せん断ひずみ: $4.0 \times 10^{-3}$ )全ての部分において、**JEAG式\*1**に対し**実験結果の応力度は上回る結果**となった。

\*1: 現場封緘養生供試体の圧縮強度試験結果に基づき作成

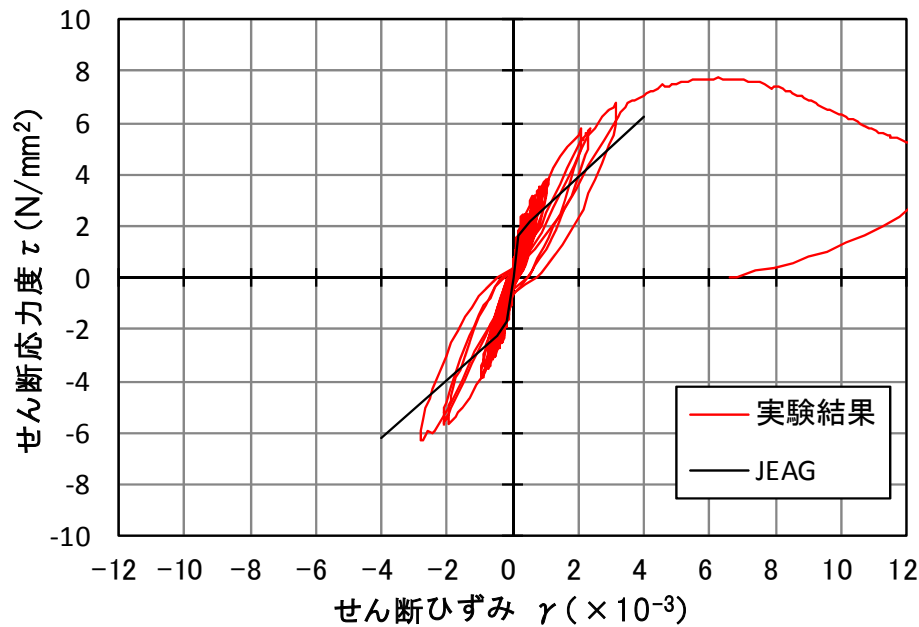


図1 繰返し試験体の耐震壁実験結果(荷重-変形関係)

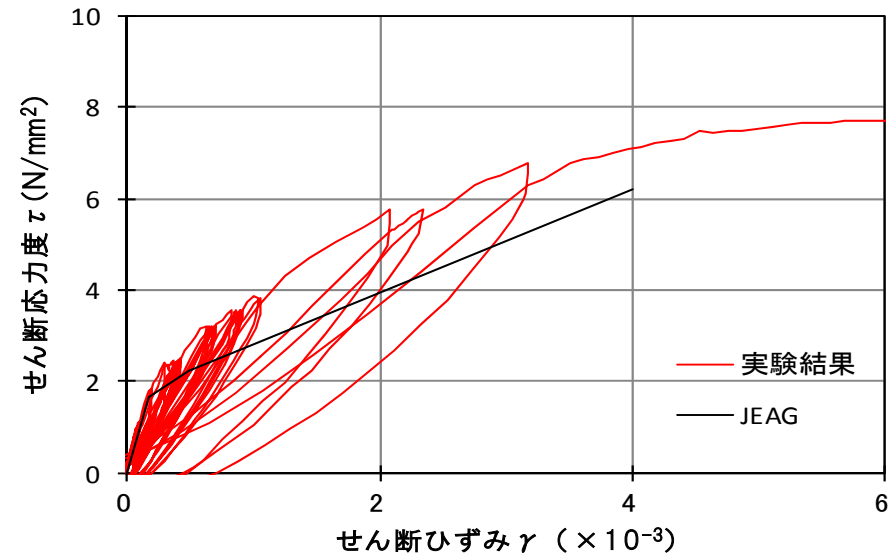


図2 繰返し試験体の耐震壁実験結果(荷重-変形関係)  
正側拡大図



## 2.1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 繰返し地震力の影響の有無 耐震実験[1]による確認 (7)

### ■ 実験結果の特徴②(繰返しの影響)

- ① インナーループとなる繰返し加力では、ほとんど剛性に变化は生じなかった。
- ② 繰返し加力では、1回目→2回目で多少剛性は低下するが、3回目以降はほとんど低下していない。  
(繰返し部分の詳細結果は次頁に示す)

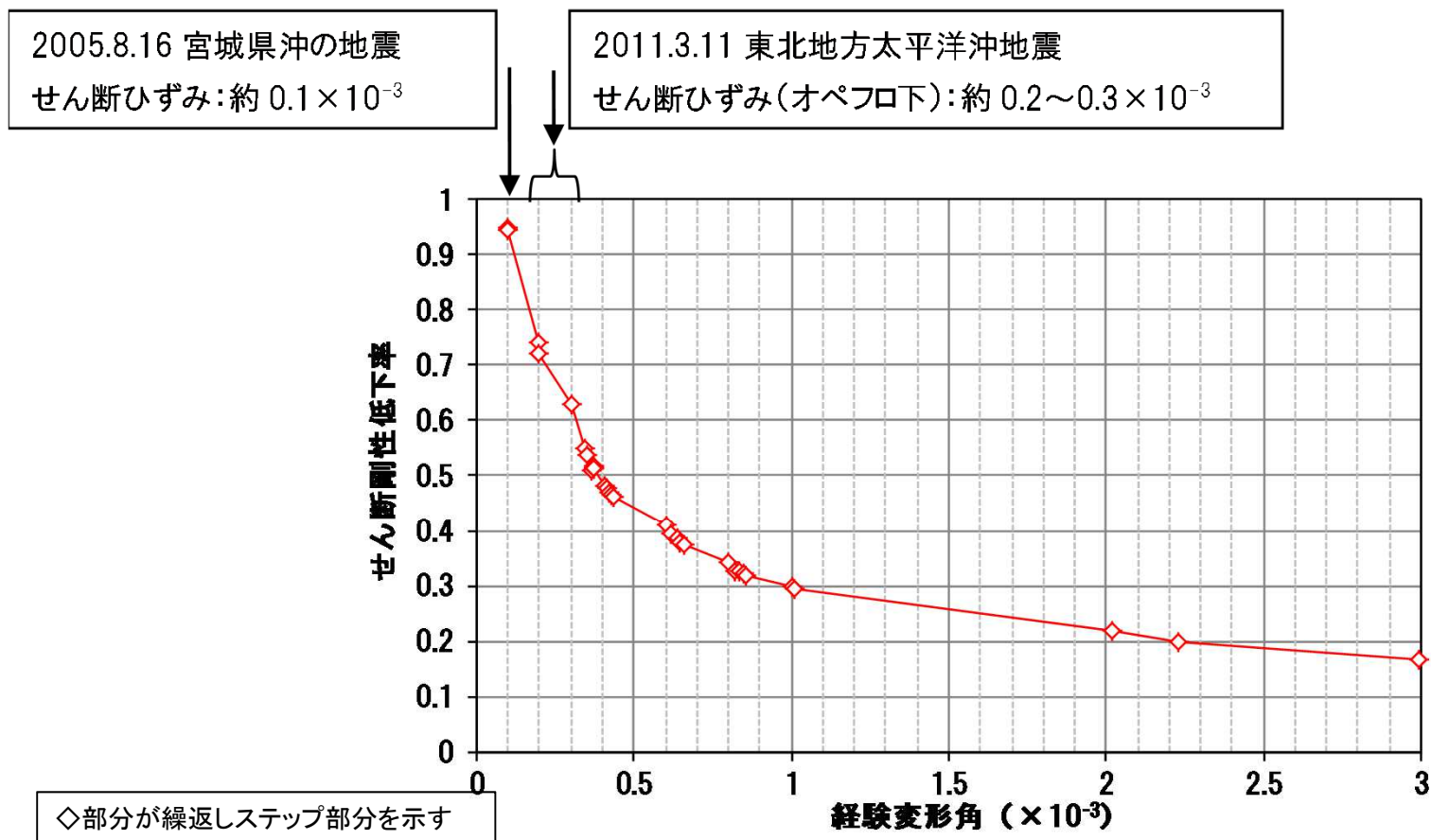


図1 剛性低下率(せん断変形)

## 2.1 初期剛性が設計より低下している要因の検討 繰返し地震力の影響の有無 耐震実験[1]による確認 (8)

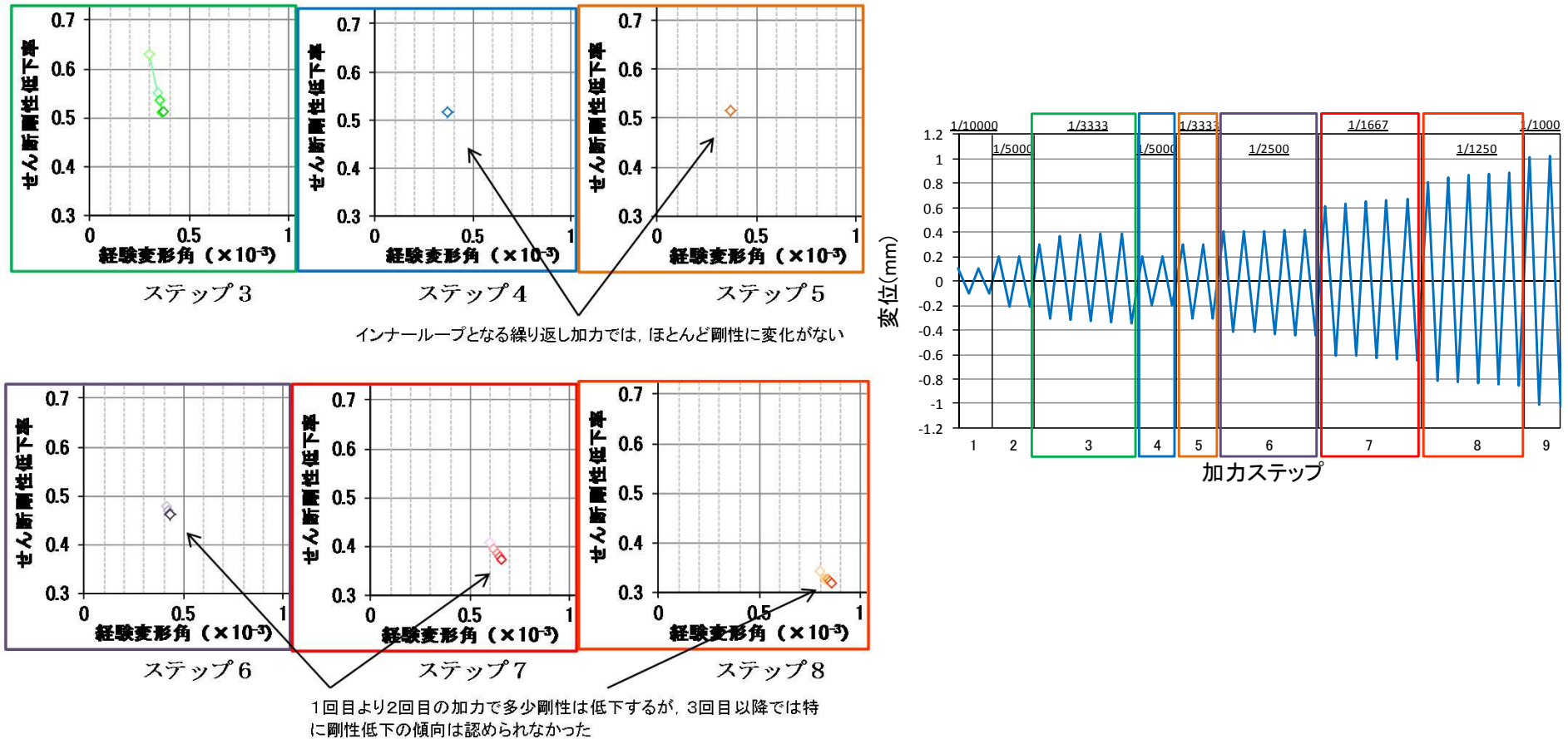


図1 剛性低下率(せん断変形)(拡大図)

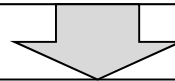
### ■実験結果のまとめ

本実験では、2005年宮城県沖地震程度の揺れの大きさから、繰返し加力が剛性低下へ影響を与えるかどうかについて確認を行ったが、この試験からは有意な低下は認められなかった。

## 2. 1 東北地方太平洋沖地震等による影響検討 検討結果

■東北地方太平洋沖地震等による影響の確認に関する検討結果の概要は以下のとおり。

- ①3.11地震等によって、多くの建屋で、女川2号炉原子炉建屋と同等の剛性低下の傾向が認められた。また、建屋の剛性低下に関しては、地震動レベルとの相関性の他に、経年変化との相関性も弱いながら認められるが、地震動レベルと経年変化の相関性の分離については困難である。また、鉛直動についても、水平動と同様な剛性低下は認められるが、水平動と比較するとその程度は顕著ではない。
- ②3.11地震の影響を受け、女川2号炉原子炉建屋のオペフロ下部にも地震による微細なクラックが発生しているものの、建屋全体として構造的損傷には至っていないことを確認した。
- ③初期剛性の低下の要因として、支持地盤等の剛性低下、側面地盤の振動特性の影響はないことを確認した。
- ④女川は比較的大きな地震に何度か見舞われているが、振動としての「繰返し性」が剛性低下に与える影響については、今回の耐震実験では確認されなかった。



3.11地震における剛性低下の要因として3.11地震による大きな地震動の影響があるが、地震による建屋の損傷度合も踏まえると、設計と乖離する初期剛性の低下が認められた要因として、それ以外の因子も重畳していることが考えられる。

### 初期剛性が設計より低下している要因の検討(主な検討項目)

#### 【3.11地震等による影響検討】

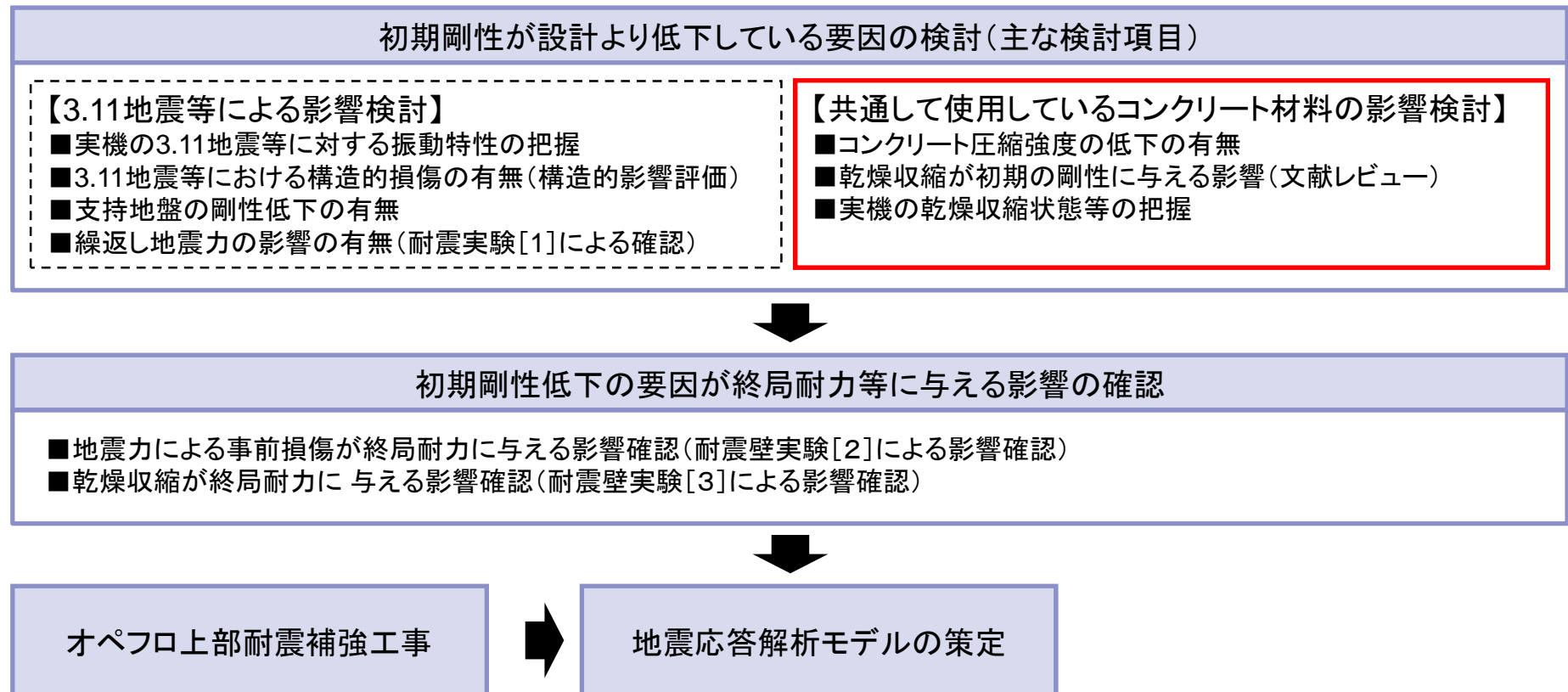
- 実機の3.11地震等に対する振動特性の把握
- 3.11地震等における構造的損傷の有無(構造的影響評価)
- 支持地盤の剛性低下の有無
- 繰返し地震力の影響の有無(耐震実験[1]による確認)

#### 【共通して使用しているコンクリート材料の影響検討】

- コンクリート圧縮強度の低下の有無
- 乾燥収縮が初期の剛性に与える影響(文献レビュー)
- 実機の乾燥収縮状態等の把握

## 2. 2 共通して使用しているコンクリート材料の影響の確認 フロー図における位置づけ

### 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



## 2.2 共通して使用しているコンクリート材料の影響の確認 検討の概要

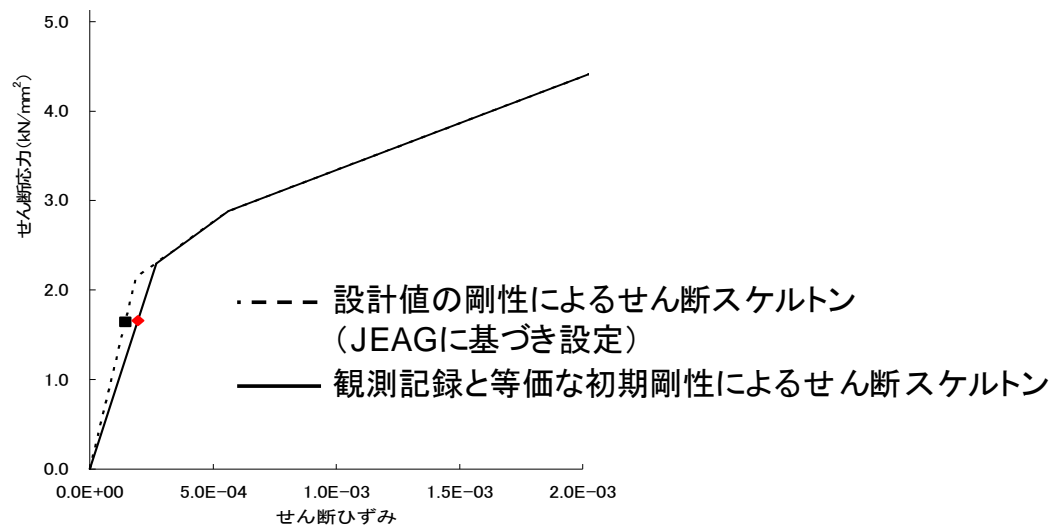
### 2.2-1 検討の概要

#### ■ 検討の目的

「2.1 東北地方太平洋沖地震等による影響検討」の検討結果を踏まえると、初期剛性が設計より低下している要因としては、地震による影響に加え、地震動以外の全ての建屋に共通した因子、例えば使用しているコンクリートの特徴等の影響が重畳していることも予想されるため、共通して使用しているコンクリート材料の影響について確認を行う。(コメントNo.4に対応)

#### ■ 具体的検討項目

- ・設計で用いている鉄筋コンクリート造耐震壁のスケルトンカーブ(JEAG式)では、初期剛性はコンクリート強度の関数として表されている。従って、初期剛性の低下の要因としては、女川の実機に使用しているコンクリート強度の低下が関与している可能性が考えられるため、**実機のコンクリート圧縮強度の低下の有無の確認**を行う。
- ・また、コンクリートの初期の剛性に与える因子として、乾燥収縮による内部応力やひび割れの影響の可能性が指摘されているため、**乾燥収縮についても検討**を行う。



JEAG式では、初期剛性はコンクリート強度の関数として表される。  
せん断変形 第1折点(軸力がない場合)  
せん断応力度  $\tau = \nu F_c$   
せん断ひずみ  $\gamma = \tau / G$   
 $F_c$ : コンクリートの圧縮強度  
 $G$ : せん断弾性係数  
(一般的に、 $G$ はヤング係数 $E$ から設定、また、ヤング係数 $E$ は圧縮強度 $t$ から設定する。)

図1 シミュレーション解析でのせん断スケルトンカーブの設定例

## 2.2 共通して使用しているコンクリート材料の影響の確認 コンクリート圧縮強度の低下の有無

### ■ 検討の概要

- ・実機から採取したコアを用いて実機のコンクリート強度および静弾性係数の確認を行った。
- ・検討対象建屋としては、2号炉原子炉建屋に加え、コンクリート調合が基本的に同じコンクリートを使用した3号炉原子炉建屋とした。（設計値(2号炉原子炉建屋):設計基準強度32.4N/mm<sup>2</sup>, 静弾性係数26.5kN/mm<sup>2</sup>)
- ・なお、コアの採取に当たっては、調査の目的がコンクリート強度そのものの低下の有無の確認であることから、ひび割れやジャンカ等の影響を受けていない箇所から採取した。

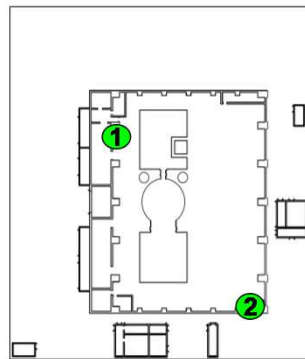


### ■ 検討結果

- ・全ての調査結果において、コンクリート強度および静弾性係数が設計値を上回っていることを確認した。



建屋躯体コンクリートの強度低下が、初期剛性が設計より低下している主要因ではないと考えられる。



女川2号炉原子炉建屋 3階

図1 コンクリートコアの採取位置

表1 コンクリート圧縮強度試験結果および静弾性係数試験結果  
(女川2号炉原子炉建屋)

採取場所	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度平均 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	平均 (kN/mm <sup>2</sup> )
① 3階 (O. P. 33. 2m)	46. 9	45. 9	30. 8	30. 8
	46. 4		31. 7	
	44. 3		29. 9	
② 3階 (O. P. 33. 2m)	55. 3	56. 6	33. 2	33. 5
	59. 5		34. 2	
	54. 9		33. 1	

## 乾燥収縮が初期の剛性に与える影響(文献レビュー) (1)

### 鉄筋コンクリート造建物に与える乾燥収縮の影響

- コンクリートの乾燥収縮 に関し、ひび割れ制御設計・施工の基本的な考え方について、「日本建築学会の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)の特徴」(三橋, コンクリート工学, 45 巻 (2007) 2 号)では, 以下のように記載されている。

コンクリートは, 基本的にはセメントと水を練り混ぜて水和反応を生じさせ, 大小さまざまな骨材を結合してできるものであるために, 水和反応に伴う自己収縮や水分の蒸発, 逸散による乾燥収縮は必然的に起こり得るものである。そのために, 極めて特別な対策を講じない限り, 大小の差はあっても, 収縮ひび割れの発生を避けることは難しい。問題は, 発生した収縮ひび割れが, その建築物に求められる性能を実現・保持する上で有害か否かにある。したがって, 採るべき収縮ひび割れ対策は, コンクリートの収縮により生ずる有害なひび割れを防止, あるいは低減して, 鉄筋コンクリート造建築物が, ひび割れから受ける障害を防ぐことにある。

- 「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)」(日本建築学会, 2006)では, ひび割れ制御設計の基本方針として, 構造体および部材の所要の性能の達成を阻害する収縮ひずみは発生してはならないこと, また, 構造体および部材の性能としては, 鉄筋降伏に対する抵抗性, 仕上材の剥離落下抵抗, たわみ増大抵抗性, 漏水抵抗性および劣化抵抗性が該当することが記載されている。

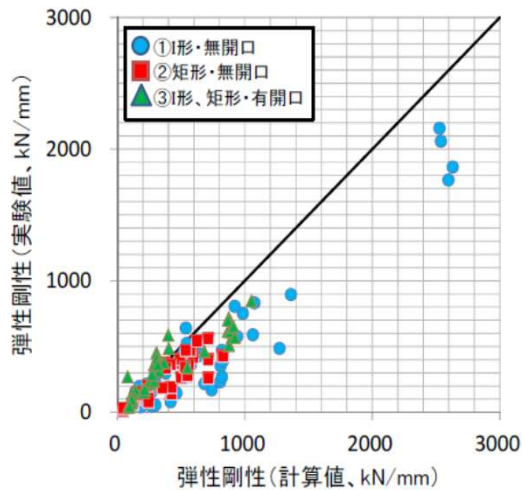


収縮ひび割れが鉄筋コンクリート造建物に与える影響については, 現状は主に耐久性の観点から対策が必要とされているが, 特に構造体の剛性や耐力への影響については問題視されていない。

乾燥収縮が初期の剛性に与える影響(文献レビュー) (2)

【乾燥収縮が初期の剛性に影響を与えていることを指摘している文献例】

- ・国立研究開発法人建築研究所建築研究資料No.175(2016)では、1975年～2013年の間に公表された耐震実験論文をベースに分析を実施し、耐震壁の実験については弾性剛性が計算値に比べ実験値は下回る傾向にある結果を得たこと、その要因として、乾燥収縮による初期ひび割れ等によって、載荷開始時に剛性低下が生じていることなどが原因として考えられることを指摘している。
- ・東条他(2017)では、E-ディフェンスで過去に実施された加振実験のうちRC造建物(ラーメン構造)について、各試験体の固有周期などの振動特性とその変化について整理、検討しており、おおむね弾性応答範囲からわずかに非線形化に入るレベルの小振幅を繰り返し受ける場合も、1次および2次の固有周期は漸増しながら変動する傾向にあること、これは微小な損傷の累積による影響と推察されることを述べている。



(a) 実験値と計算値の比較(評価式I)

図1 耐震壁実験の実験値と計算値の弾性剛性の比較(建築研究所(2016))

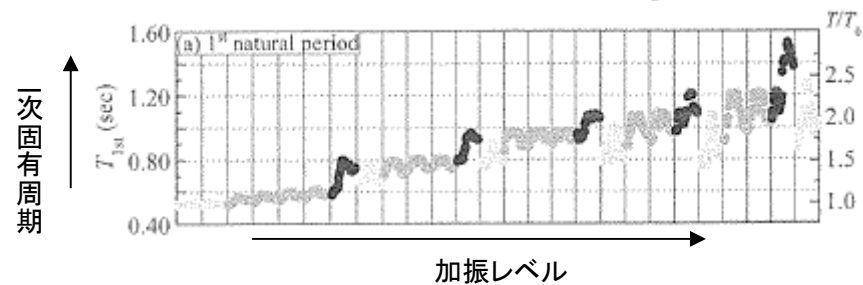


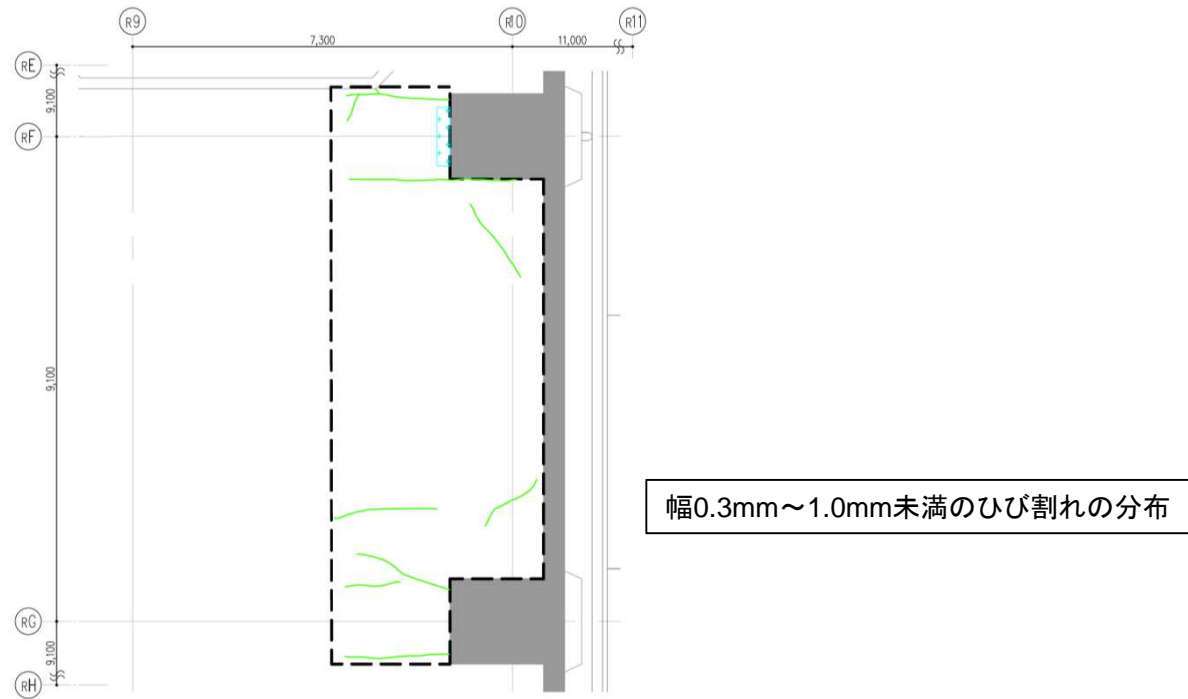
図2 振動レベルと固有周期の関係  
東条他(2007)に一部加筆



## 2.2 共通して使用しているコンクリート材料の影響の確認 実機の乾燥収縮状態等の把握（1）

### ■ 検討の目的

- コンクリートの乾燥収縮が耐震壁の初期の剛性に影響を与える指摘があり、また、女川原子力発電所の各建屋では乾燥収縮ひび割れが認められる。今後、乾燥収縮ひび割れの多寡に関する調査結果を取りまとめて行く予定であるが、ここでは、今後の乾燥収縮ひずみの進行度合いが今後の剛性低下と関係する場合も予想されることから、女川2号炉の建設からの経過年数も踏まえ、関係式から進行度合いを評価した。
- さらに、女川のコンクリートは乾燥収縮をおこしやすいコンクリートであったのかどうかを確認するために、建設で使ったコンクリートと同じ調合のコンクリートを用いて、最終的な乾燥収縮ひずみ量を予測した。



床のひび割れの例(2号炉原子炉建屋オペフロ階)

## 2.2 共通して使用しているコンクリート材料の影響の確認 実機の乾燥収縮状態等の把握 (2)

### 2.3-4 実機の乾燥収縮状態等の把握

#### ■乾燥収縮の進行度合い

- ・コンクリートの乾燥収縮は、コンクリート打設後に急激に進行し、長期的には安定状態に入ることが知られている。日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」では経年的変化に関する評価式(2.1)が提案されており、これに基づき女川2号炉原子炉建屋の耐震壁(オペフロ上部[壁厚400mmを例とした], オペフロ下部[壁厚800mmを例とした])を対象として、乾燥収縮の進行度合いを評価した。
- ・その結果、耐震壁の壁厚相当での乾燥収縮は4000日経過程度まではゆっくりと進行し、その後収束する傾向にあり、現時点(コンクリート打設から**25年程度[9000日程度]**)では概ね収束した状態となっている。

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = k \cdot t_0^{-0.08} \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{h}{100} \right)^3 \right\} \cdot \left( \frac{t - t_0}{0.16 \cdot (V/S)^{1.8} + (t - t_0)} \right)^{1.4 \cdot (V/S)^{-0.18}} \quad \text{式(2.1)}$$

$$k = (11 \cdot W - 1.0 \cdot C - 0.82 \cdot G + 404) \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3$$

ここに、 $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$  : 乾燥開始材齢  $t_0$  日における材齢  $t$  日の収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )

$W$  : 単位水量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$C$  : 単位セメント量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$G$  : 単位粗骨材量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$h$  : 相対湿度 (%) ( $40\% \leq h \leq 100\%$ )

$V$  : 体積 ( $\text{mm}^3$ )

$S$  : 外気に接する表面積 ( $\text{mm}^2$ )

$V/S$  : 体積表面積比 (mm) ( $V/S \leq 300\text{mm}$ )

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  : それぞれ、骨材の種類の影響、セメントの種類の影響、混和材の種類の影響を表す修正係数

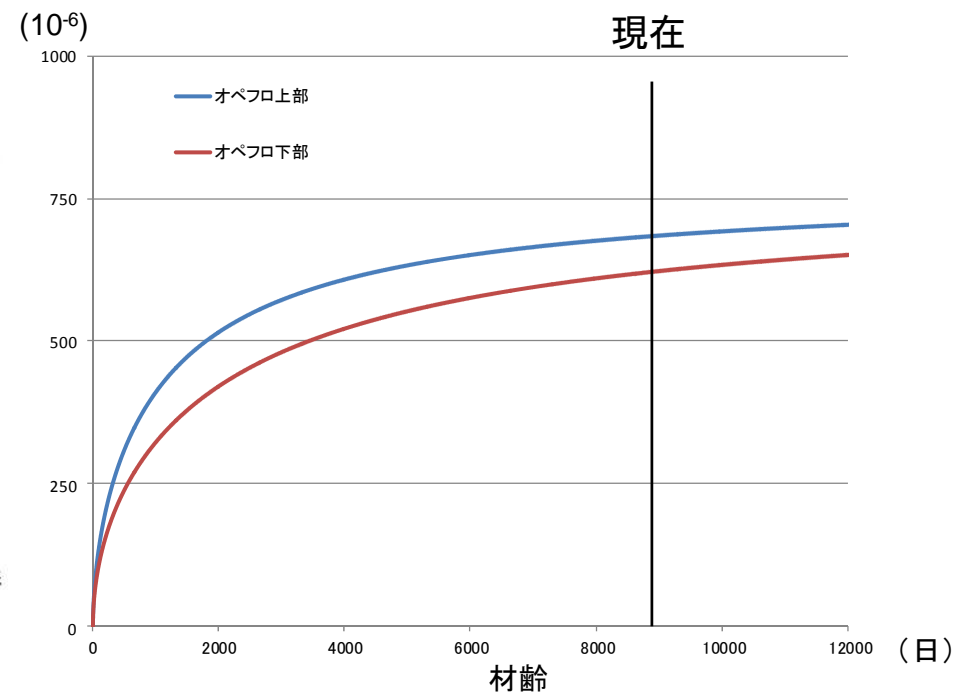


図1 収縮ひずみの算定例(女川2号炉原子炉建屋)

## 2.2 共通して使用しているコンクリート材料の影響の確認 実機の乾燥収縮状態等の把握 (3)

### ■使用コンクリートに関する材料試験による確認

- ・女川2号炉の建設に使用したコンクリートと同じ調合のコンクリートの乾燥収縮率を評価した。
- ・実施にあたっては、比較対象のために、東通1号炉の建設に使用したコンクリートと同じ調合のコンクリートに対しても実施した。

### ■確認結果

- ・女川2号炉は、約700 $\mu$ 程度、東通1号炉は約400 $\mu$ 程度となり、**女川2号炉は東通1号炉に対して乾燥収縮率が大きい結果となった。**
- ・コンクリート乾燥収縮率については主に粗骨材の影響が大きいこと、また、女川の粗骨材は砂岩・頁岩系であり、このような堆積岩を用いたコンクリートは乾燥収縮を起しやすいこと、東通の粗骨材は石灰岩であり、石灰岩を用いたコンクリートは乾燥収縮を起し難いことが指摘されており、試験結果はこの指摘と整合したものとなっている。

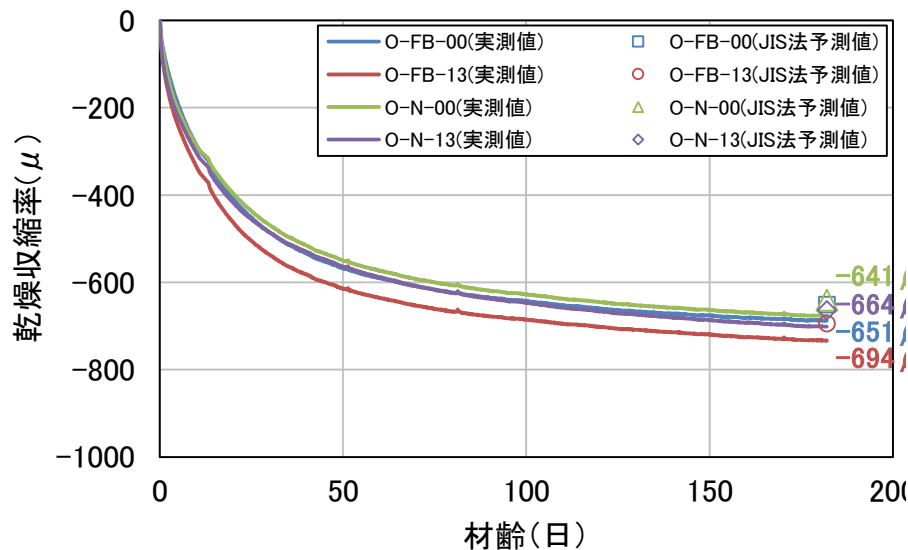


図1 乾燥収縮率 (女川, 乾燥材齢182日時点)

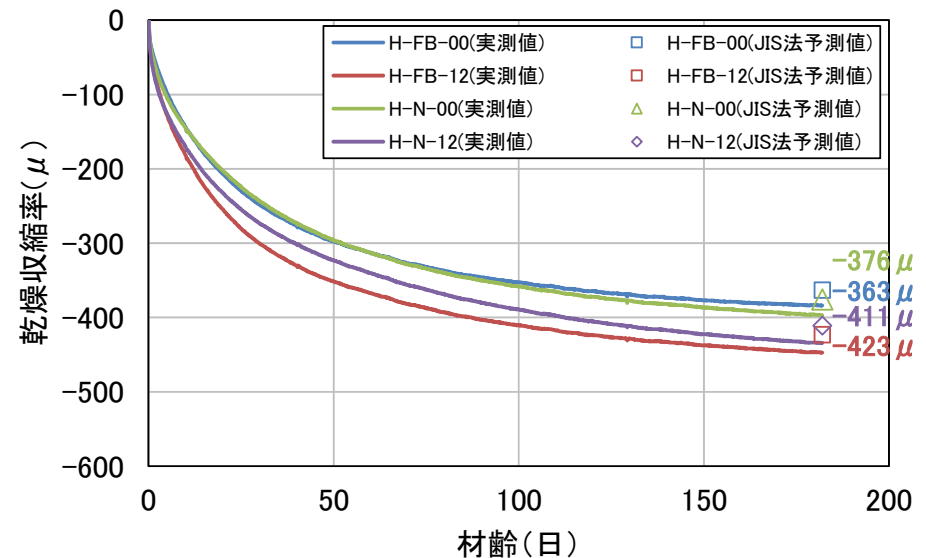


図2 乾燥収縮率 (東通, 乾燥材齢182日時点)

### 実機の乾燥収縮状態等の把握に関する検討結果

乾燥収縮に関するこれらの評価結果については、今後とりまとめる現地における乾燥収縮ひび割れ調査結果との関係性等についても考察していく。

## 2. 2 共通して使用しているコンクリート材料の影響の確認 検討結果

### 「共通して使用しているコンクリート材料の影響の確認」に関する検討結果

- ・実機から採取したコアの圧縮強度試験より、コンクリート強度および静弾性係数が設計値を上回っていることを確認した。従って、**建屋躯体コンクリートの強度低下が、初期剛性が設計より低下している主要因ではない**と考えられる。
- ・一方、**乾燥収縮が初期の剛性に影響を与えていることを指摘している文献がある**ことを確認した。また、今後の乾燥収縮ひびわれに関する現地調査の結果とりまとめに先立ち実施したコンクリートの試験より、女川は東通に比べ乾燥収縮率が大きいこと、一方で女川2号炉の実機の収縮はほぼ収束した状態であることを確認した。

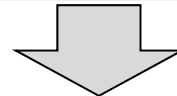
### 初期剛性が設計より低下している要因の検討(主な検討項目)

#### 【3.11地震等による影響検討】

- 実機の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(構造的影響評価)
- 支持地盤の剛性低下の有無
- 繰返し地震力の影響の有無(耐震実験[1]による確認)

#### 【共通して使用しているコンクリート材料の影響検討】

- コンクリート圧縮強度の低下の有無
- 乾燥収縮が初期の剛性に与える影響(文献レビュー)
- 実機の乾燥収縮状態等の把握



### 「3.11地震等による影響検討」の検討結果

### 初期剛性が設計より低下している要因

設計よりもさらに初期剛性が低下した要因としては、耐震壁が乾燥収縮の影響を受けた状態に、3.11地震等の地震力が加わったためと考えられる。

### 初期剛性が設計より低下している要因の検討(主な検討項目)

#### 【3.11地震等による影響検討】

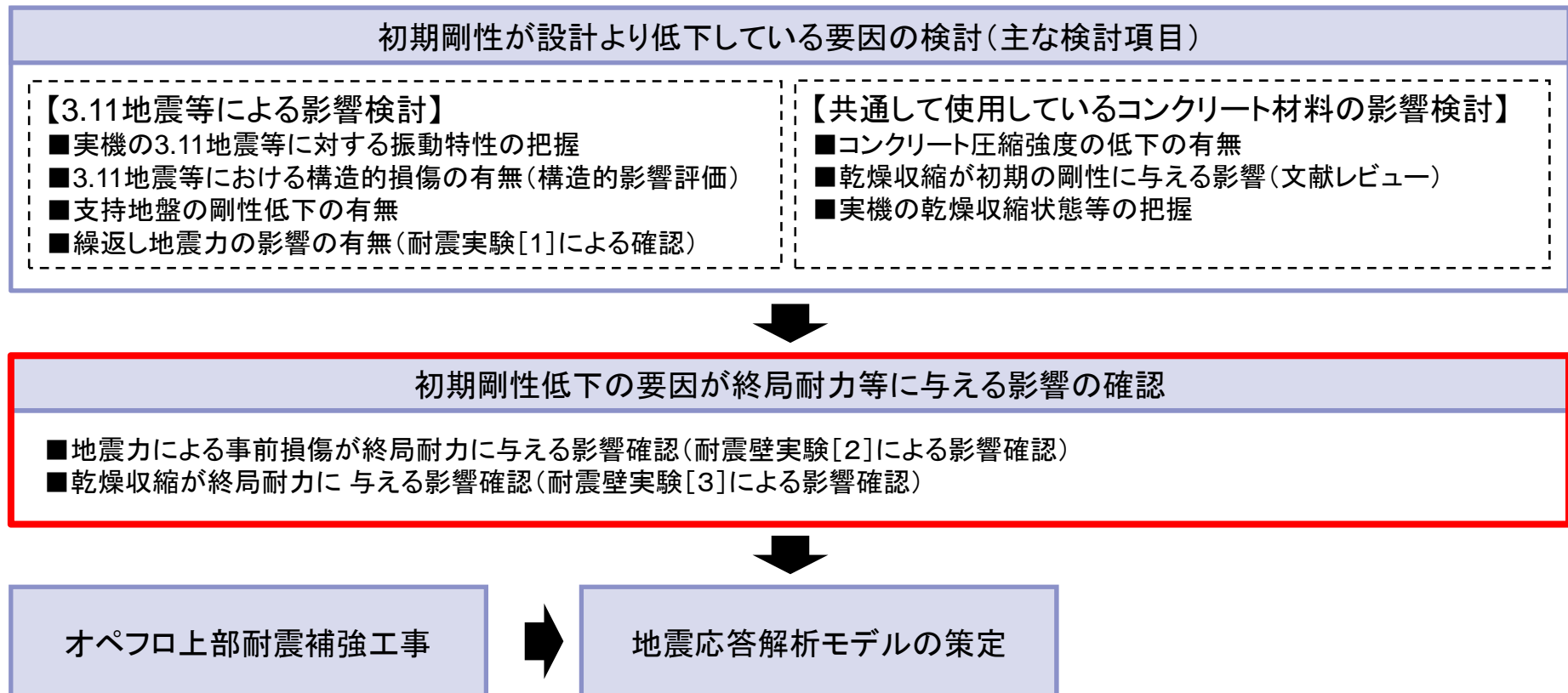
- 実機の3.11地震等に対する振動特性の把握
- 3.11地震等における構造的損傷の有無(構造的影響評価)
- 支持地盤の剛性低下の有無
- 繰返し地震力の影響の有無(耐震実験[1]による確認)

#### 【共通して使用しているコンクリート材料の影響検討】

- コンクリート圧縮強度の低下の有無
- 乾燥収縮が初期の剛性に与える影響(文献レビュー)
- 実機の乾燥収縮状態等の把握

### 3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響 フロー図における位置づけ

#### 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



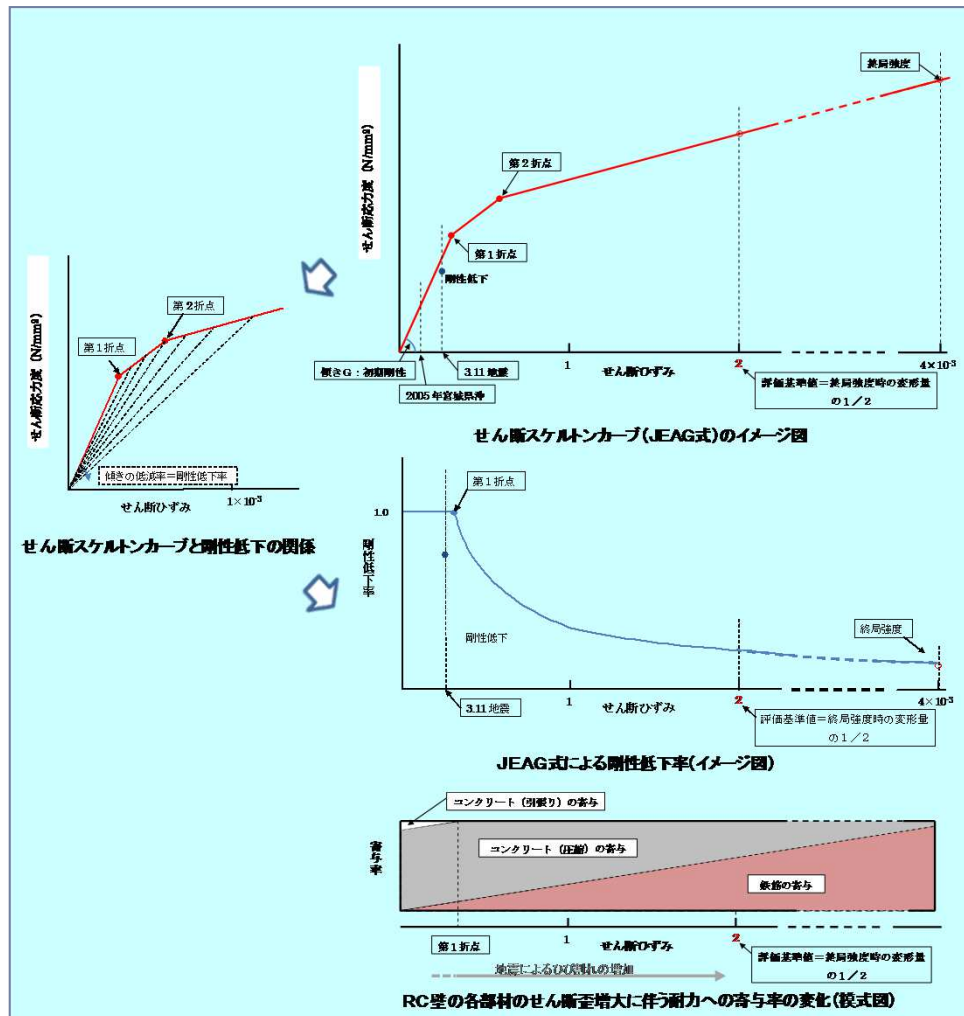
### 3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響 耐震壁の特徴を踏まえた検討方針

- ・設計で採用しているスケルトンカーブ(JEAG式)の初期の剛性はコンクリートのせん断弾性係数Gの値を採用している。このように、変形の小さいひずみ領域では、耐震壁の耐力は主にコンクリートが負担している。
  - ・一方、ひずみが大きくなると地震力によってコンクリートにひび割れが発生してくるため、耐震壁の耐力は徐々に鉄筋の負担割合が多くなっていく。また、コンクリートに地震によるひび割れが入ることにより、乾燥収縮が耐震壁に与える影響も変化していくことが指摘されている。
- ➡ 耐震壁はひずみの大きさによって各種性状が変化するため、耐震実験によって各要因が終局耐力に与える影響を確認する。



原子力発電所耐震壁の鉄筋

原子力発電所の耐震壁の耐震設計では、弾性設計用地震動による地震力は全て鉄筋で負担する設計としており、**単位面積当たりの鉄筋量は、一般建築の2～3倍程度の鉄筋量**となっている。



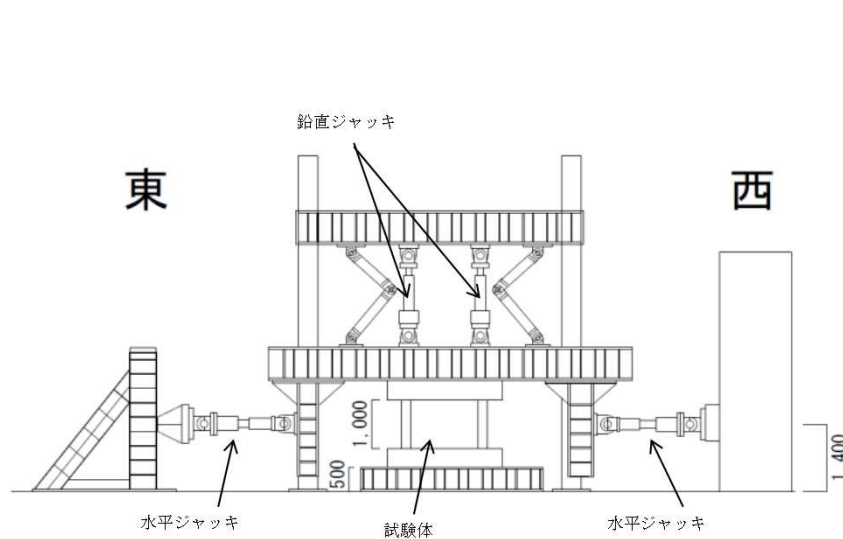
### 3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響 検討概要

#### ■ 検討の目的

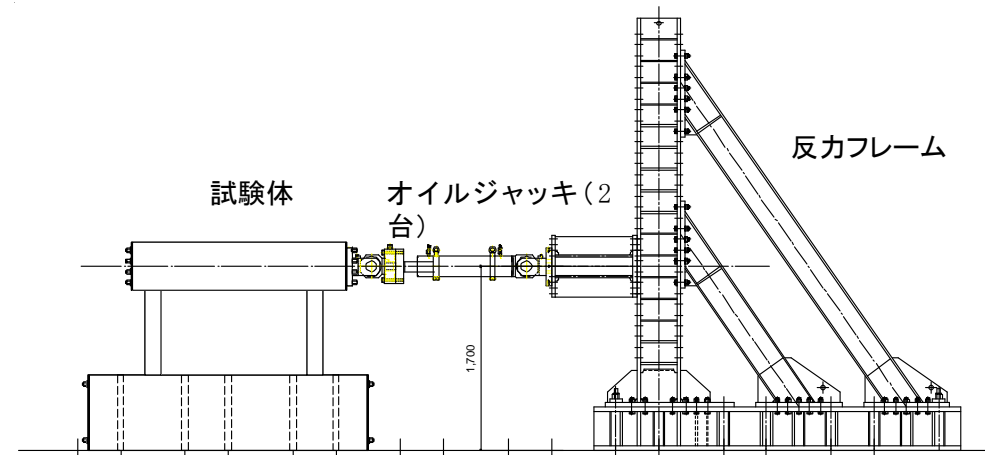
設計よりもさらに初期剛性が低下した要因としては、地震による影響と乾燥収縮による影響に大別されるため、この2つの要因が終局耐力に与える影響について確認する。

#### ■ 検討方法

- ・地震による影響として、耐震壁の損傷程度の違いが終局耐力等に及ぼす影響について耐震実験(耐震実験[2]と呼称)で確認する。
- ・乾燥収縮による影響として、乾燥収縮の影響を受けた試験体の加力試験(耐震実験[3]と呼称)によって、終局耐力等が既往評価式(JEAG式)とどういった関係になるかについて確認する。また、乾燥収縮が終局耐力に与える影響については、他機関による研究についてもレビューを行う。



地震による事前損傷が終局耐力に与える影響(耐震実験[2])



地震による事前損傷が終局耐力に与える影響(耐震実験[3])

### 3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響 地震による事前損傷が終局耐力に与える影響(耐震実験[2]による確認) (1)

#### ■概要

- ・3.11地震では、2号炉原子炉建屋に微小なクラックが認められたものの、大きな損傷は認められていない。
- ・一定の大きさの地震力によって損傷を受けた耐震壁が、さらに大きな地震力を受けた場合、終局耐力がどのようになるかを確認するために、損傷度合いをパラメータとした静的加力による耐震壁実験を行った。

#### ■耐震壁実験の特徴

- ・耐震実験に当たっては、女川2号炉原子炉建屋の3.11地震に対する応答結果や原子力発電所の耐震壁の特徴を、試験体の製作や加力方法に反映した。
- ・主な特徴は以下のとおり。
  - ✓ 試験体の鉄筋量については、2号炉原子炉建屋の耐震壁の鉄筋比が概ね1.2~1.6%前後であることを踏まえて、鉄筋比1.32%とした。
  - ✓ 原子力発電所の耐震壁は曲げ変形よりもせん断変形が支配的なため、せん断変形が卓越する試験体の形状・加力方法とした。
  - ✓ 耐震壁の損傷度合いをパラメータとし、無損傷の試験体も含め、計5試験体に対し試験を実施した。
  - ✓ 事前損傷度合いとしては、3.11地震による2号炉原子炉建屋オペフロ下部の応答を上回る変形量(層間変形角: $0.75 \times 10^{-3}$ )から、原子力施設建屋の基準地震動 $S_s$ に対する評価基準値(せん断ひずみ: $2 \times 10^{-3}$ )の約3倍の変形量(層間変形角: $6 \times 10^{-3}$ )までの計4ケースを実施した。
  - ✓ 加力パターンは、“事前加力”で損傷度合いにあらかじめ違いを与え、“本加力”によって、終局耐力まで加力を実施した。



### 3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響 地震による事前損傷が終局耐力に与える影響(耐震実験[2]による確認) (2)

表1 試験体諸元

部材	試験体名	S-D0	S-D I	S-D II	S-D III	S-D IV
比較項目	損傷度	0	I	II	III	IV
壁	壁高さ(mm)	1000				
	全長(mm)	1800				
	壁厚(mm)	120				
	壁配筋	D6@40(SD295) Double				
	壁筋比(%)	1.32				
	軸応力度(N/mm <sup>2</sup> )	0.50				
	せん断スパン比(N/mm <sup>2</sup> )	0.29				
柱	断面b×D(mm)	200×200				
	主筋	12-D16(SD345)				
	帯筋	2-D10(SD345)@60				
スタブ	断面b×D(mm)	400×400				
	主筋	10-D22(SD390)				
	あばら筋	2-D13(SD390)@100				

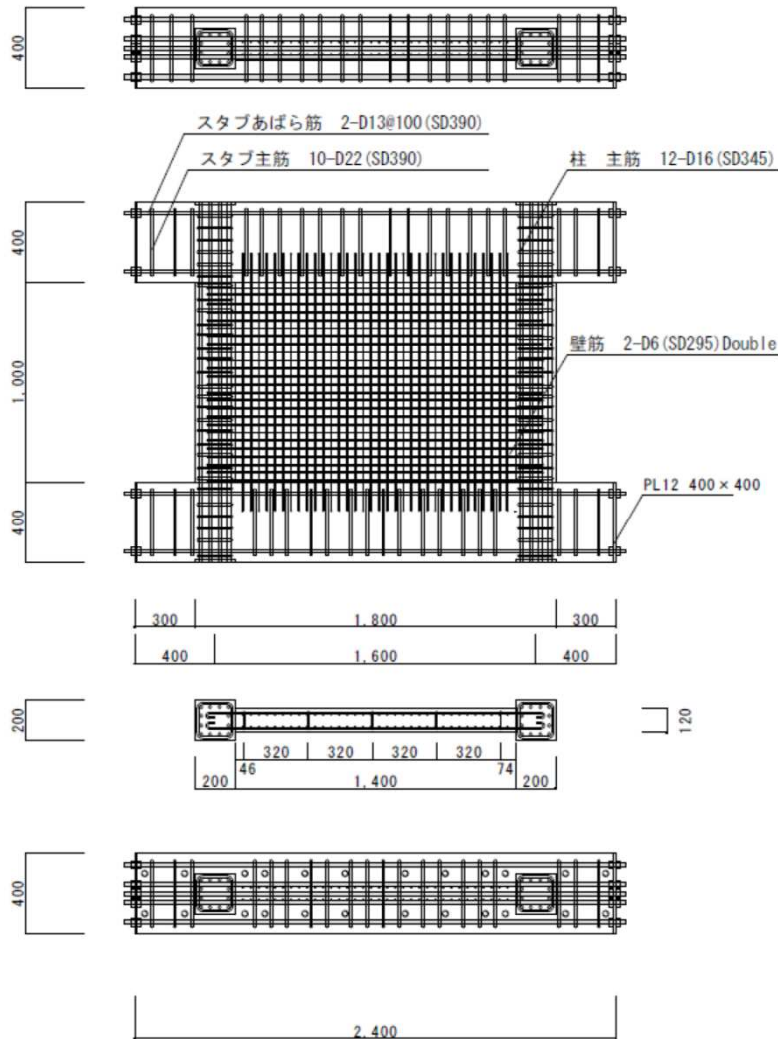


図1 試験体配筋図

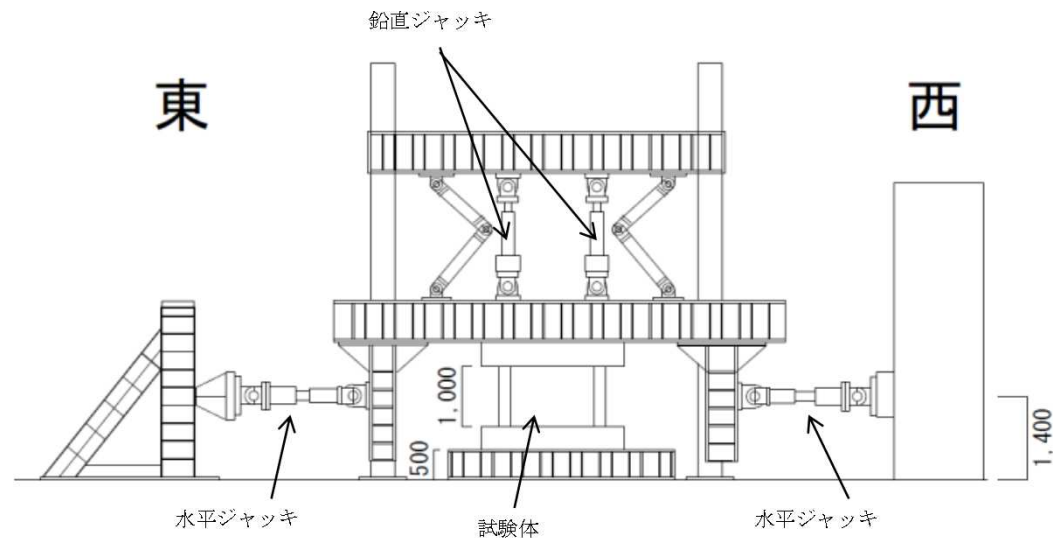


図2 加力装置図



### 3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響 地震による事前損傷が終局耐力に与える影響(耐震実験[2]による確認) (4)

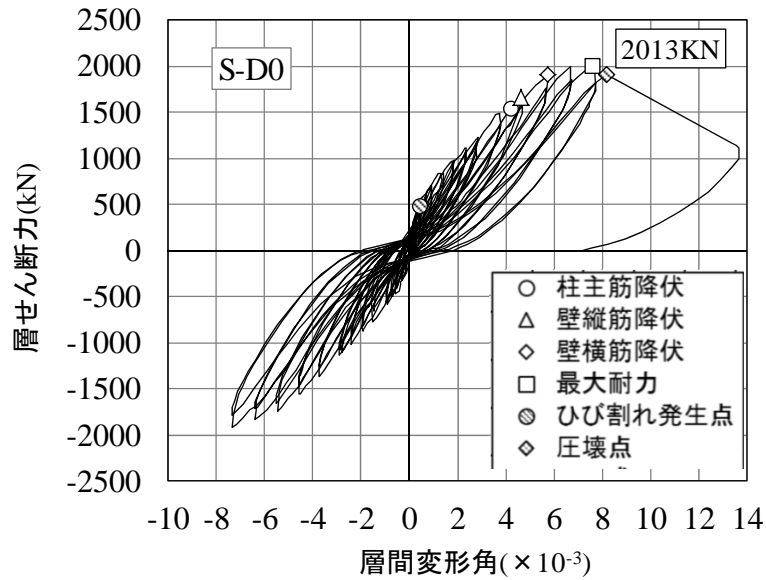


図1 試験体S-D0の荷重-変形関係

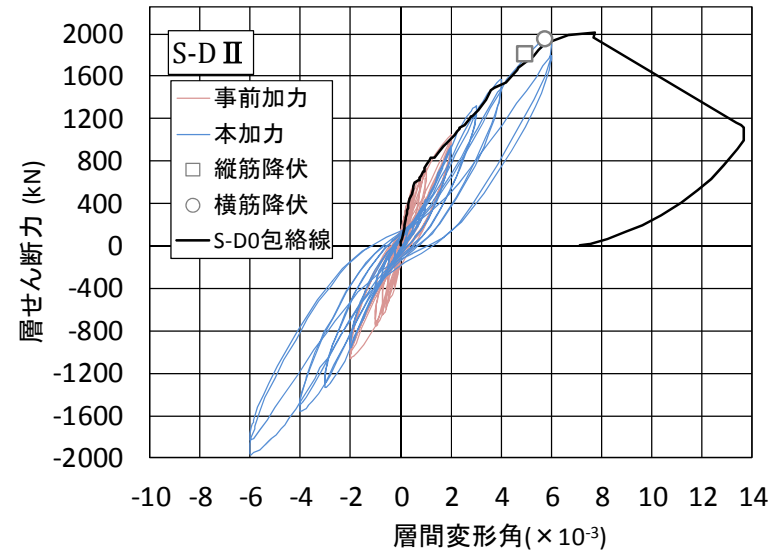


図3 試験体S-D IIの荷重-変形関係

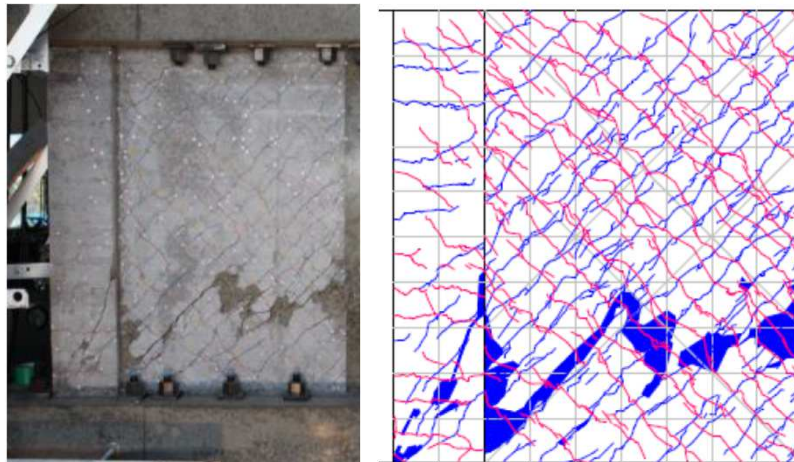


図2 試験体S-D0 最終破壊時写真・ひび割れ図

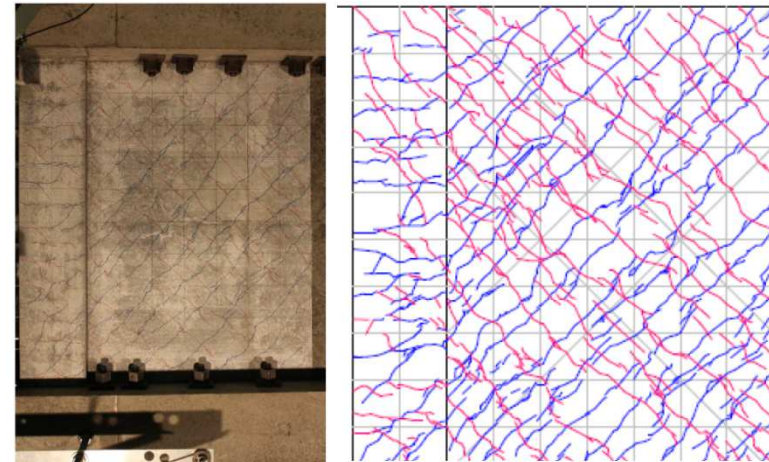


図4 試験体S-D II 0.6 × 10<sup>-3</sup>時写真・ひび割れ図

### 3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響

#### 地震による事前損傷が終局耐力に与える影響(耐震実験[2]による確認) (5)

##### ■実験結果の特徴

- ・原子力施設建屋の基準地震動 $S_s$ に対する評価基準値(せん断ひずみ: $2 \times 10^{-3}$ )の約3倍の事前損傷(層間変形角: $6 \times 10^{-3}$ )を与えたケースも含め、**全てのケースで終局耐力は無損傷の試験体と同等となる結果が得られた。**
- ・事前損傷度合いとして、3.11地震による2号炉原子炉建屋オペフロ下部の応答を上回る変形量(層間変形角: $0.75 \times 10^{-3}$ )を与えたケース、および、原子力施設建屋の基準地震動 $S_s$ に対する評価基準値(せん断ひずみ: $2 \times 10^{-3}$ )並を与えたケースは、**本加力においても、評価基準値(せん断ひずみ: $2 \times 10^{-3}$ )付近での耐力低下は認められなかった。**

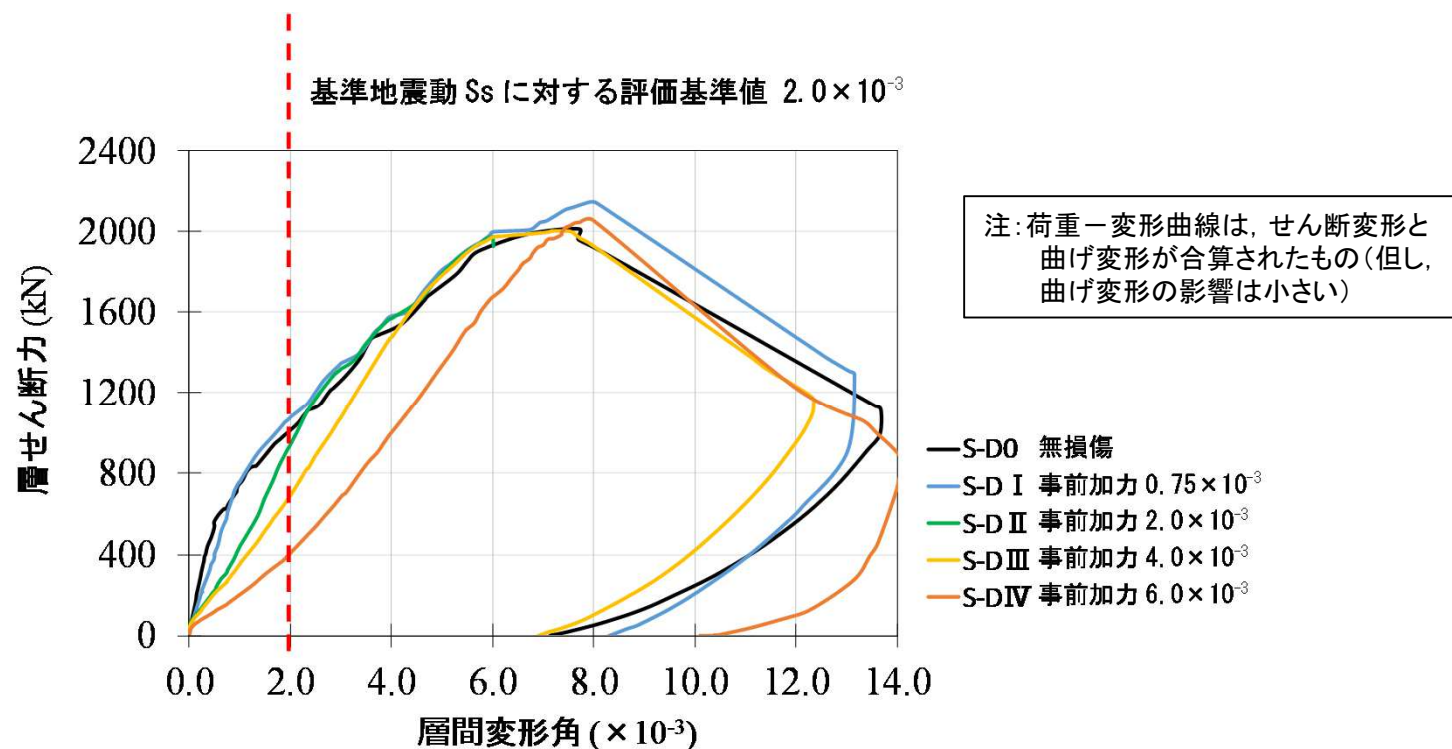


図 事前損傷が終局耐力に与える影響に関する耐震壁実験結果(荷重-変形関係)

地震による事前損傷が、設計で使用しているスケルトンカーブ(JEAG式)の評価基準値や終局耐力に与える影響は小さいことを確認した。

### 3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響 乾燥収縮が終局耐力に与える影響(文献レビュー)

- 過去の耐震実験をデータベース化した検討で、初期の剛性低下の傾向を指摘している国立研究開発法人建築研究所建築研究資料No.175 (2016))では、合わせてせん断終局強度式と耐震壁の実験結果の比較検討を行っている。その結果、初期の剛性低下が認められる試験体を含め、せん断終局強度については、既往の評価式を上回る傾向となっていることを指摘している。
- 耐震壁ではなく、せん断補強筋のない梁を対象としているが「初期ひび割れの有無がRCはりの変形およびせん断耐力に及ぼす影響」(江原他(2009))では、乾燥収縮ひび割れを有する梁の斜めひび割れ発生荷重は、乾燥の影響を考慮しない既往式に対し15%~30%低下したものの、その一方で最大荷重は、計算値よりも大きいことを指摘している。

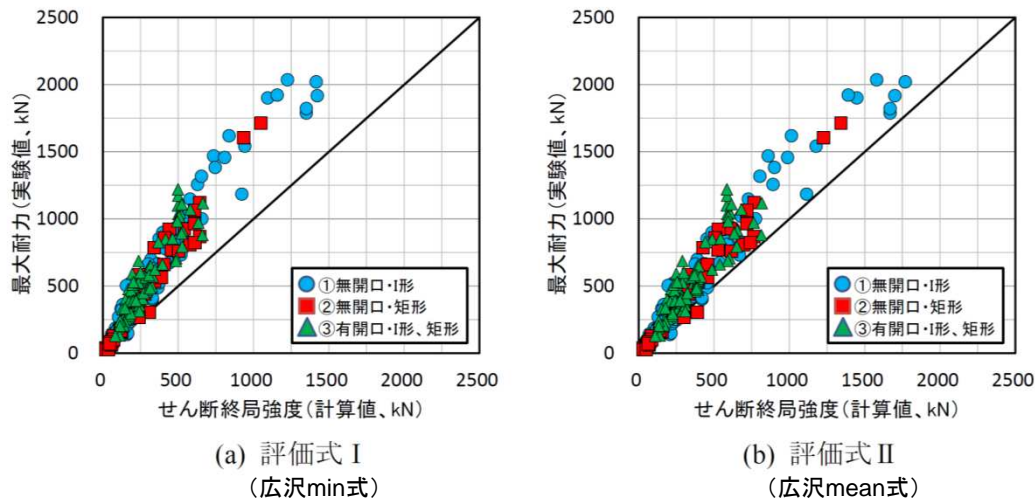


図1 せん断終局強度の実験値と計算値の比較

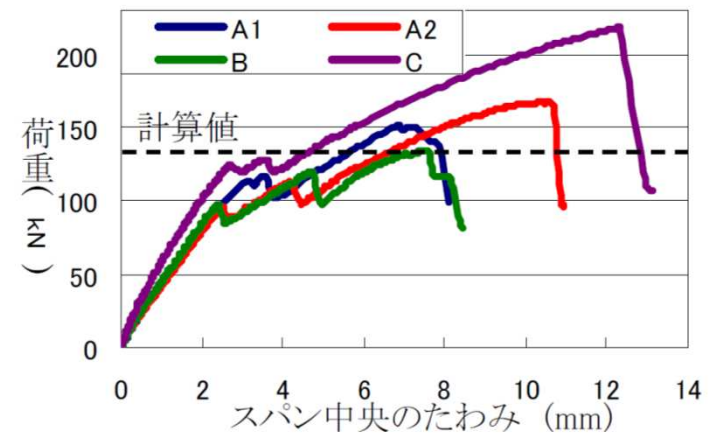


図2 荷重とたわみの関係

- 乾燥収縮の影響を受けたRC構造物の終局強度は既往式を上回る例があることを確認した。

### 3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響 乾燥収縮が終局耐力に与える影響(耐震実験[3]による確認) (1)

#### ■概要

- ・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するために、乾燥させた耐震壁の静的加力実験を実施した。なお、試験体の大きさ・形状や配筋などは耐震実験[1]と全く同じである。

#### ■耐震壁実験の特徴

- ・耐震実験に当たっては、女川2号炉原子炉建屋の3.11地震に対する応答結果や原子力発電所の耐震壁の特徴を、試験体の製作や加力方法に反映した。
- ・主な特徴は以下のとおり。
  - ✓ 耐震壁の鉄筋量については原子力発電所建屋並の鉄筋比を配置(約1.4%)
  - ✓ 原子力発電所の耐震壁は曲げ変形よりもせん断変形が支配的なため、せん断変形が卓越する試験体の形状・加力方法とした。
  - ✓ 使用骨材(粗骨材)は、比較的収縮しやすい骨材(埼玉県川越市産(豆砂利)を使用した。
  - ✓ コンクリートを打設し、型枠を外した後、約3ヶ月間気中に放置し、壁部分を乾燥させた。実験時の乾燥収縮率は約800 $\mu$ (ダミー試験体での計測結果)であった。
  - ✓ 一方、女川のコンクリートと同一調合の試験体による乾燥収縮迅速試験およびJISによる長さ試験の評価値では約700 $\mu$ 程度となっており、コンクリート材料の収縮率として概ね整合する状態で実験を実施した。
  - ✓ 特に微小変形レベルでの精度確保が可能な装置を用い、微小変形レベル(せん断ひずみ $0.1 \times 10^{-3}$ , 2005年宮城県沖地震による原子炉建屋オペフロ下部の応答程度)から繰返し加力を実施した(最大5サイクル)。
  - ✓ 耐震実験[1]と同じく、アコースティックエミッションの測定等も実施。

### 3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響 乾燥収縮が終局耐力に与える影響(耐震実験[3]による確認) (2)

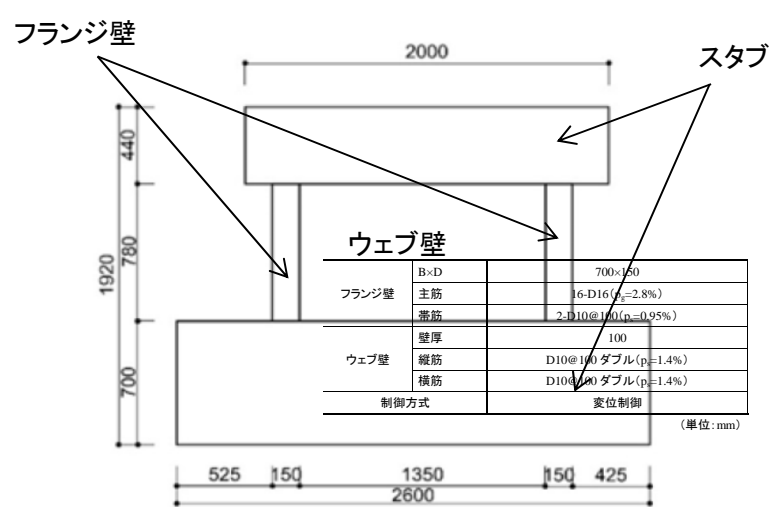


図1 乾燥試験体形状

表1 試験体諸元

フランジ壁	B×D	700×150
	主筋	16-D16 ( $p_g=2.8\%$ )
	帯筋	2-D10@100 ( $p_s=0.95\%$ )
ウェブ壁	壁厚	100
	縦筋	D10@100ダブル ( $p_s=1.4\%$ )
	横筋	D10@100ダブル ( $p_s=1.4\%$ )
制御方式		変位制御
(単位: mm)		

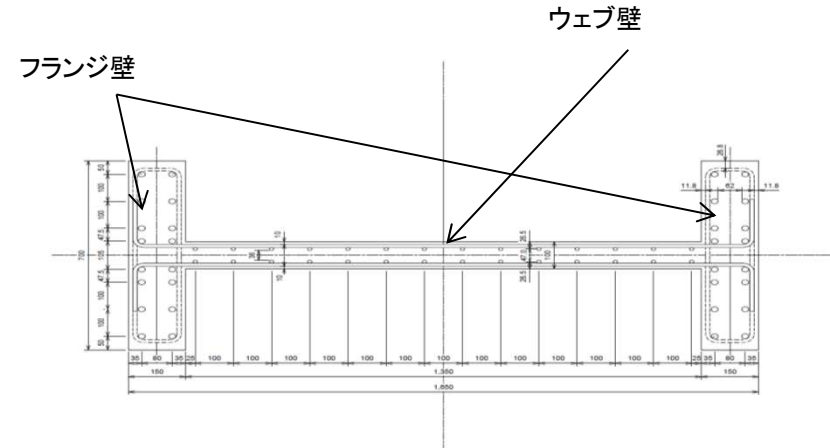


図2 乾燥試験体断面配筋図

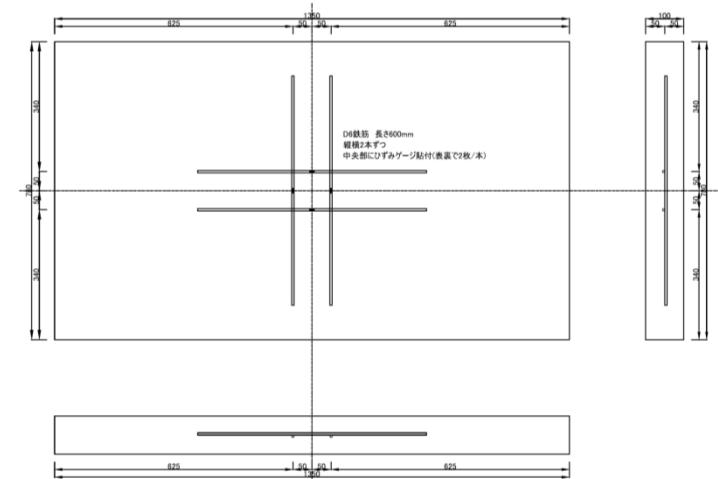


図3 ダミー試験体概要

### 3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響 乾燥収縮が終局耐力に与える影響(耐震実験[3]による確認) (3)

**■加力の特徴**

- ・初期加力として、変形角 $R=1/10000\text{rad}$  ( $0.1 \times 10^{-3}$ ) および $1/5000\text{rad}$  ( $0.2 \times 10^{-3}$ ) で2サイクルの繰り返し加力を実施した後に、微小変形レベルでの繰り返し加力時の剛性の低下傾向を確認するために、 $R=1/1000\text{rad}$  ( $1.0 \times 10^{-3}$ ) までの主要変形角に対して5サイクル繰り返し加力を実施し、 $R=1/1000\text{rad}$  ( $1.0 \times 10^{-3}$ ) 以降は2サイクルの繰り返し加力とした。
- ・また、経験した変形角よりも小さい変形角(インナーループ)での剛性低下挙動を検討することを目的として、加力ステップ4, 5としてインナーループとなる繰り返し加力を合計4サイクル実施した(表および図中の破線で囲んだ部分)。

表1 加力計画

変形角 R (rad.)	計測変位 $\delta$ (mm)	加力ステップ	加力サイクル数	備考
1/10000	0.1	1	2	2005年宮城県沖地震による原子炉建屋オペフロ下部の応答程度
1/5000	0.2	2	2	2011年東北地方太平洋沖地震による
1/3333	0.3	3	5	原子炉建屋オペフロ下部の
1/5000	0.2	4	2	応答程度
1/3333	0.3	5	2	
1/2500	0.4	6	5	
1/1667	0.6	7	5	
1/1250	0.8	8	5	
1/1000	1.0	9	2	
1/500	2.0	10	2	
1/333	3.0	11	2	
1/250	4.0	12	押切り	

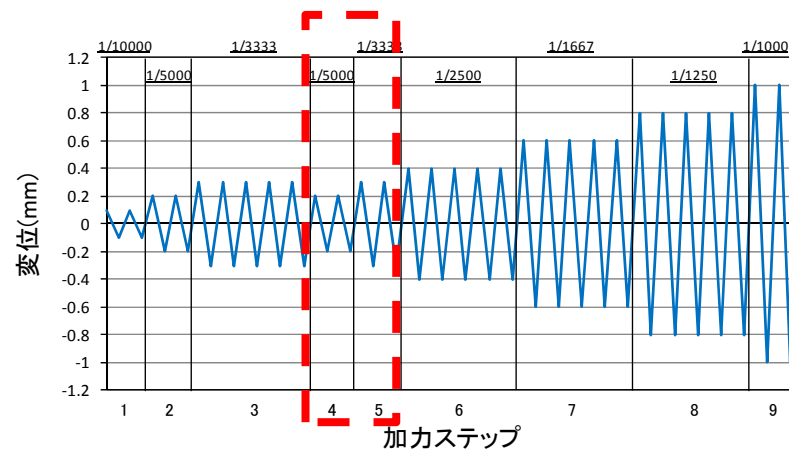


図1 加力概念図



### 3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響 乾燥収縮が終局耐力に与える影響(耐震実験[3]による確認) (4)



図1 乾燥試験体養生状況  
(ウェブ部:コンクリート打設後約一週間で脱型し, 期中養生,  
フランジ部:アルミテープにより密封養生)

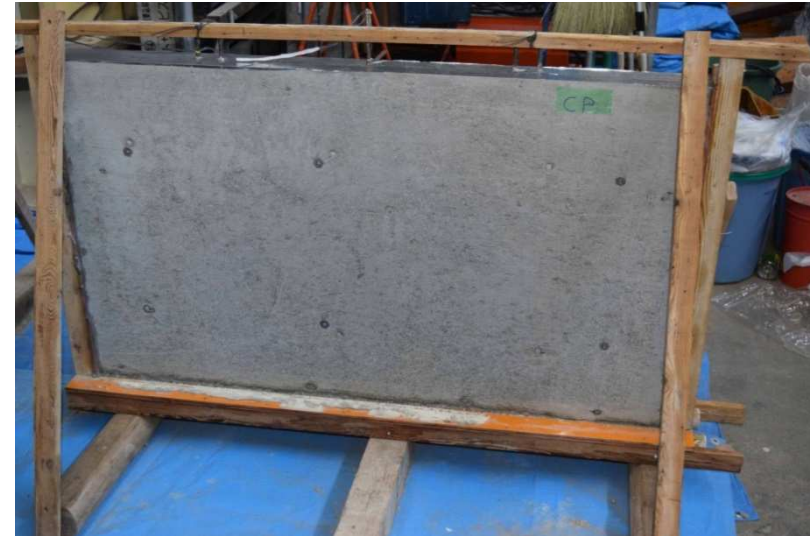


図2 ダミー試験体養生状況  
(コンクリート打設後約一週間で脱型し, 期中養生)

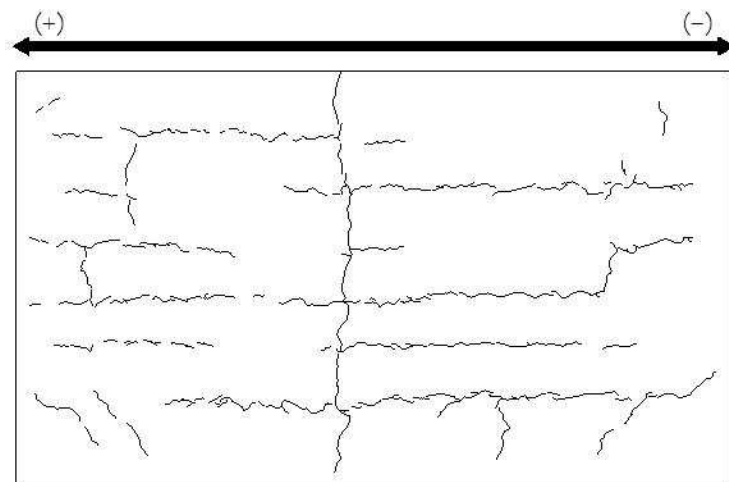


図3 加力前における乾燥試験体のひび割れ図

試験時における各試験体の収縮量の最大値  
【乾燥試験体】約200 $\mu$   
【ダミー試験体】約800 $\mu$



### 3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響 乾燥収縮が終局耐力に与える影響(耐震実験[3]による確認) (6)

#### ■ 実験結果の特徴

- ・初期の剛性については、設計で用いている評価式(JEAG式\*1)に対し、実験結果は4割程度低下した結果となった。
- ・一方、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: $2.0 \times 10^{-3}$ )付近や終局耐力付近(せん断ひずみ: $4.0 \times 10^{-3}$ )では、JEAG式に対し、実験結果の応力度は上回る結果となった。
- ・この結果は、文献レビュー結果(乾燥収縮の影響を受けたRC構造物の終局強度は既往式を上回る例があること)と整合している。

\*1: 現場封緘養生供試体の圧縮強度試験結果に基づき作成

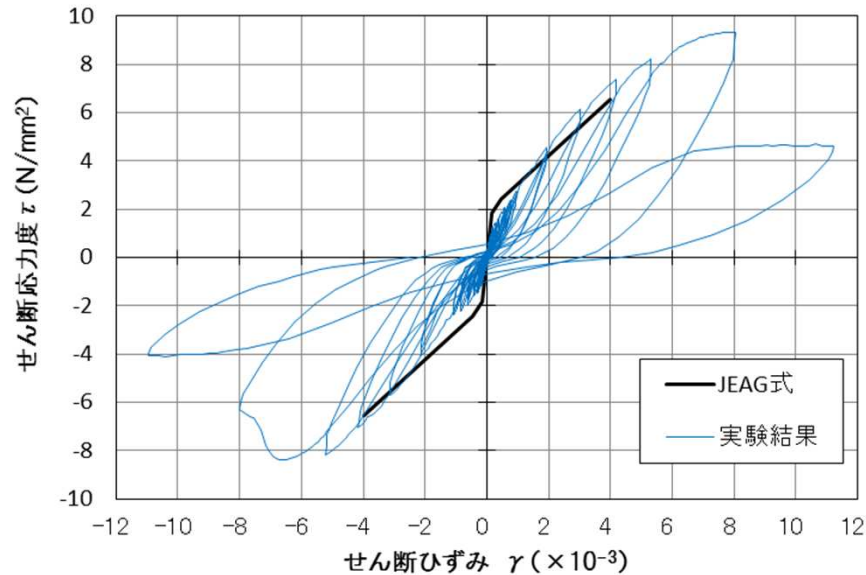


図1 乾燥試験体の耐震壁実験結果(荷重-変形関係)

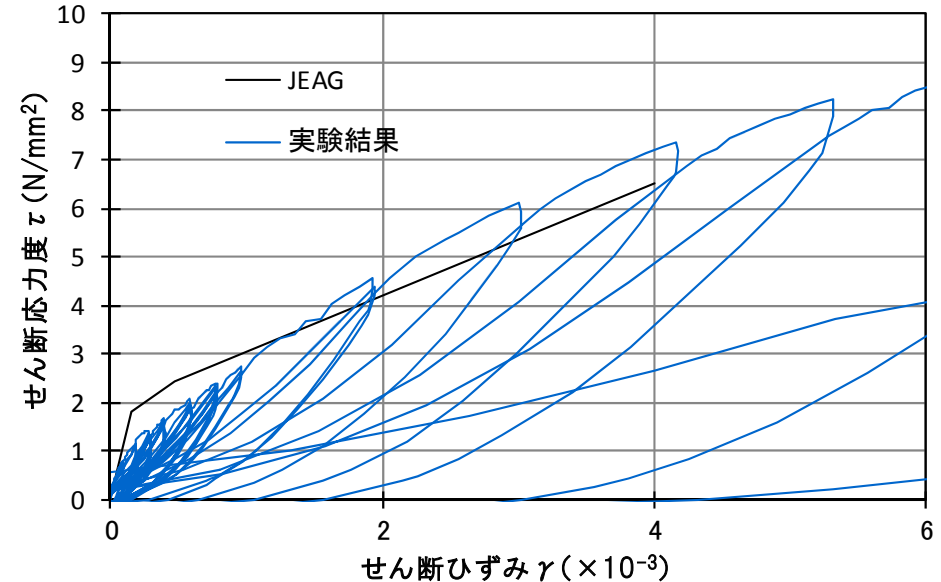


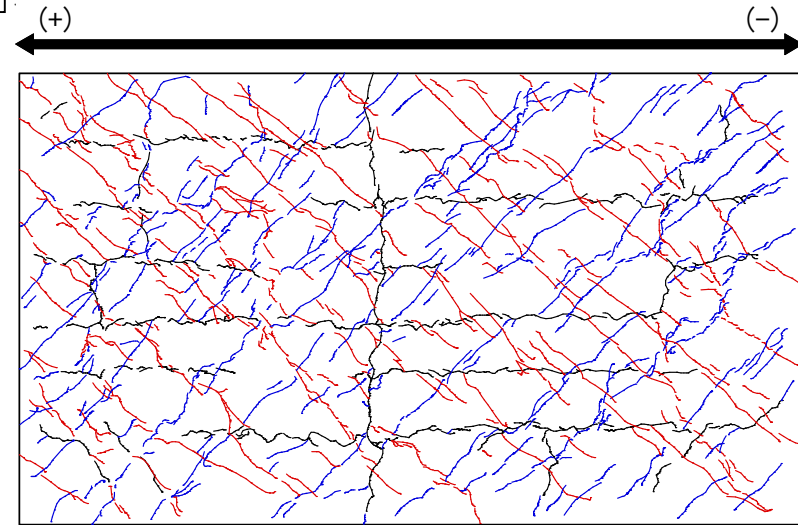
図2 乾燥試験体の耐震壁実験結果(荷重-変形関係)  
正側拡大図

### 3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響 乾燥収縮が終局耐力に与える影響(耐震実験[3]による確認) (7)

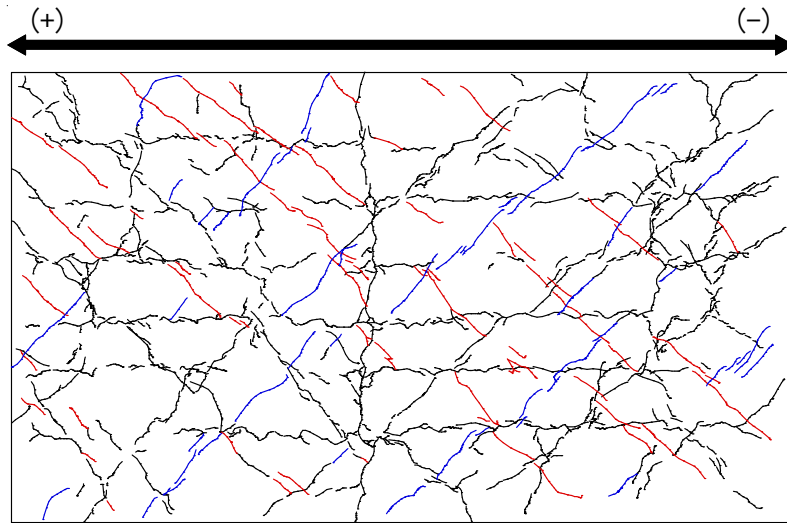
最終破壊形態やひび割れ分布は、耐震実験[1]と同じ傾向である。



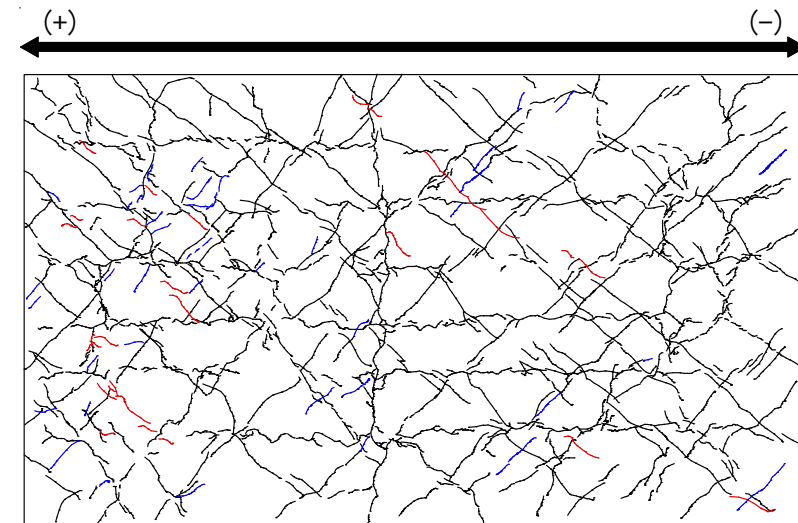
図● 最終破壊時写真



図● 最終破壊時ひび割れ図



1/500rad. ( $2.0 \times 10^{-3}$ )におけるひび割れ図



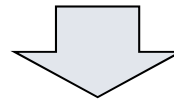
1/250rad. ( $4.0 \times 10^{-3}$ )におけるひび割れ図

### 3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響 検討結果

#### ■ 検討結果

設計よりもさらに初期剛性が低下した2つの要因(地震による影響と乾燥収縮による影響)が、終局耐力に与える影響について耐震実験を行い確認した。その結果、

- ①地震による事前損傷が、設計で使用しているスケルトンカーブ(JEAG式)の評価基準値や終局耐力に与える影響は小さいことを確認した。
- ②乾燥収縮の影響については、初期の剛性は既往式より低下するものの、終局耐力や評価基準値付近では上回ることを確認した。また、この結果は、文献レビュー結果(乾燥収縮の影響を受けたRC構造物の終局強度は既往式を上回る例があること)と整合している。



以上の検討結果を、基準地震動 $S_s$ に適用する地震応答解析モデルの策定に反映する。

#### 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響の確認

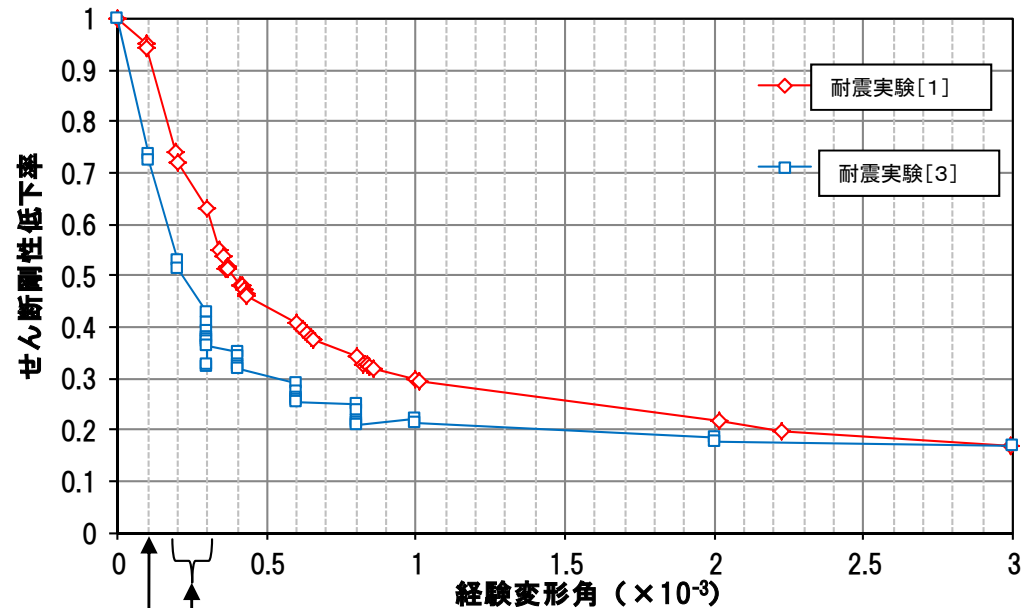
- 地震力による事前損傷が終局耐力に与える影響確認(耐震壁実験[2]による影響確認)
- 乾燥収縮が終局耐力に与える影響確認(耐震壁実験[3]による影響確認)

### 3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響

## 耐震実験を踏まえた剛性低下の要因分析についての考察

### 乾燥試験体と乾燥を受けていない試験体の比較

- 先に示した耐震実験[1]と耐震実験[3]は、同じ形状の耐震壁の試験体で鉄筋量も同じ1.4%、加力方法、サイクルも基本的には同じである。違いとしては耐震壁の乾燥の有無であり、耐震実験[1]はコンクリート打設後約4週間型枠をつけたまま養生し、型枠脱型後、1週間後に試験を実施しており、ほぼ乾燥収縮を受けていない状況にある。
- そのため、耐震実験[1]と耐震実験[3]とは、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く、また、主要地震(2005年宮城県沖地震や3.11地震)時の女川2号炉原子炉建屋の剛性低下量(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。
- このことから、女川的设计よりもさらに初期剛性が低下した要因として、3.11地震等の影響に加え、コンクリートの乾燥収縮の影響が重畳したことを支持する結果となっている。



2005.8.16  
せん断ひずみ: 約  $0.1 \times 10^{-3}$

2011.3.11  
せん断ひずみ(オペフロ下): 約  $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3}$

◇部分が繰返しステップ部分を示す

図1 耐震実験[1], [3]の剛性低下率

#### 4. 2号炉原子炉建屋オペフロ上部耐震補強工事 フロー図における位置づけ

### 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

#### 初期剛性が設計より低下している要因の検討(主な検討項目)

##### 【3.11地震等による影響検討】

- 実機の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(構造的影響評価)
- 支持地盤の剛性低下の有無
- 繰返し地震力の影響の有無(耐震実験[1]による確認)

##### 【共通して使用しているコンクリート材料の影響検討】

- コンクリート圧縮強度の低下の有無
- 乾燥収縮が初期の剛性に与える影響(文献レビュー)
- 実機の乾燥収縮状態等の把握



#### 初期剛性低下の要因が終局耐力等を与える影響の確認

- 地震力による事前損傷が終局耐力に与える影響確認(耐震壁実験[2]による影響確認)
- 乾燥収縮が終局耐力に与える影響確認(耐震壁実験[3]による影響確認)



オペフロ上部耐震補強工事



地震応答解析モデルの策定

## 4. 2号炉原子炉建屋オペフロ上部耐震補強工事 耐震補強工事の概要

71

### ■工事の目的

・2号炉原子炉建屋のオペフロ階から屋上階(オペフロ上部)については、基準地震動 $S_s$ の増大に伴い、評価結果の裕度が小さくなったことから、せん断耐力を向上させることを目的として、耐震補強工事を実施している。

### ■耐震補強工事の主な特徴

- ・補強は、 $S_s$ に対する応答が大きいNS方向の両耐震壁(C通, J通)と, EW方向のうち付属建屋の重量の影響で応答が大きい耐震壁(4通り)について実施した。
- ・オペフロ階～クレーン階部分については、既設躯体は、RC造耐震壁とSRC造柱で構成されているため、補強方法としては、SRC造柱間に新たにRC造壁を付加した(追設耐震壁)。
- ・クレーン階～屋上階部分については、既設躯体は、RC造耐震壁とS造間柱と梁で構成されており、RC造壁を付加することは難しいことから、既設S造部を活用して新たにS造のブレースを付加することとした(追設ブレース)。

### ■耐震実験による有効性の事前確認

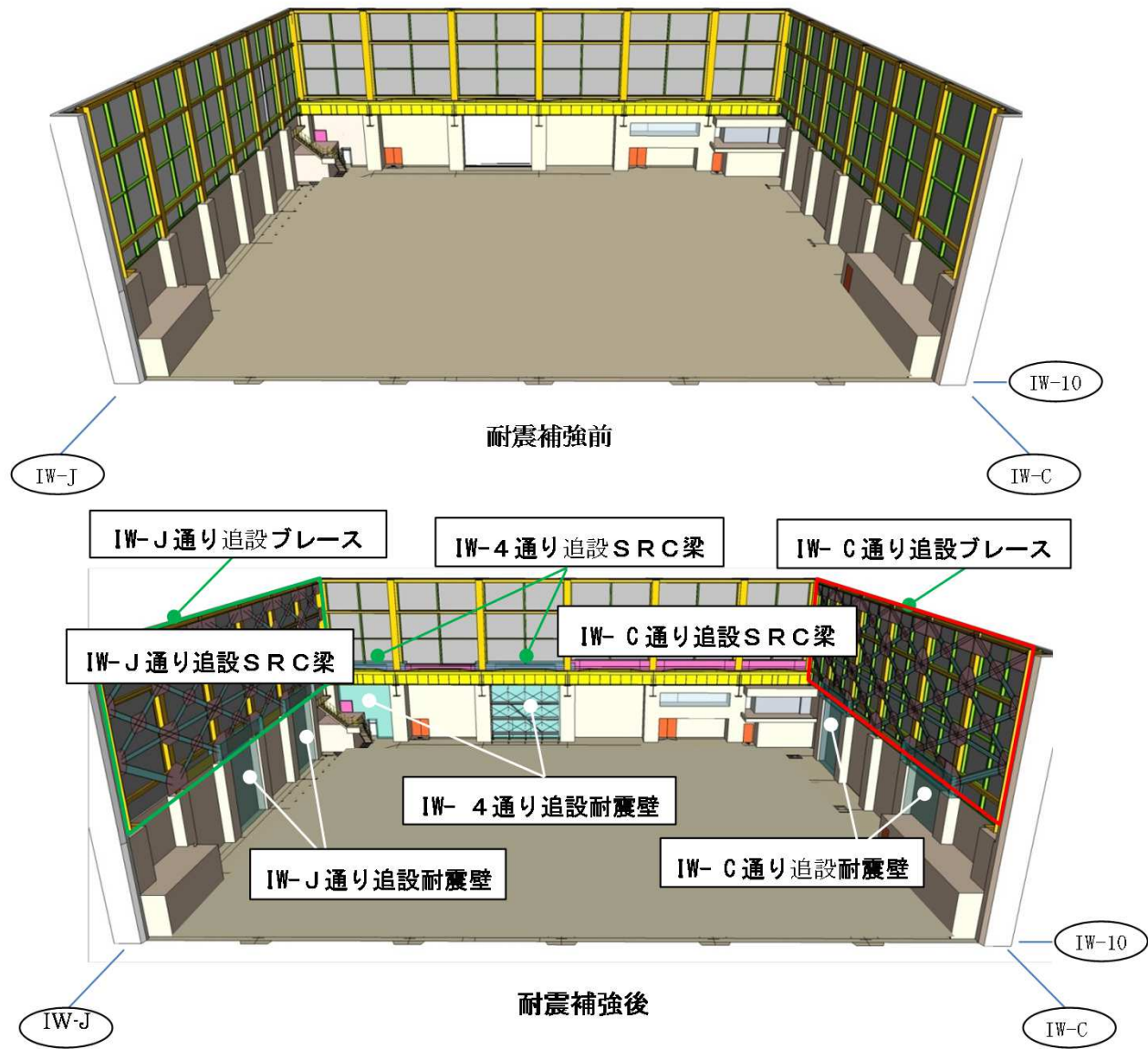
工事に先立って、追設耐震壁の有効性を確認するための耐震実験を実施している。



鉄骨ブレース追設  
RC耐震壁増設  
耐震補強工事状況



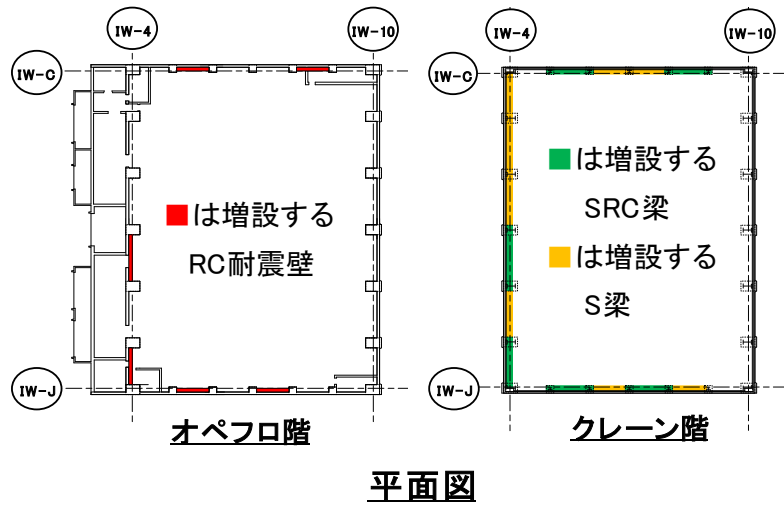
#### 4. 2号炉原子炉建屋オペフロ上部耐震補強工事 耐震補強工事の概要 (イメージ図)



耐震補強工事概要(北面より)

#### 4. 2号炉原子炉建屋オペフロ上部耐震補強工事

### 耐震補強工事の概要(追設耐震壁の位置, 追設ブレースの概要)



オペフロ階とクレーン階をつなぐS梁, SRC梁について

- ・追設耐震壁に上部からの力がスムーズに伝達するように、追設耐震壁間等には追設S梁、追設耐震壁上部には追設SRC梁を設置している。
- ・また、追設SRC梁は、追設耐震壁を四辺拘束とすることも目的として設置している。

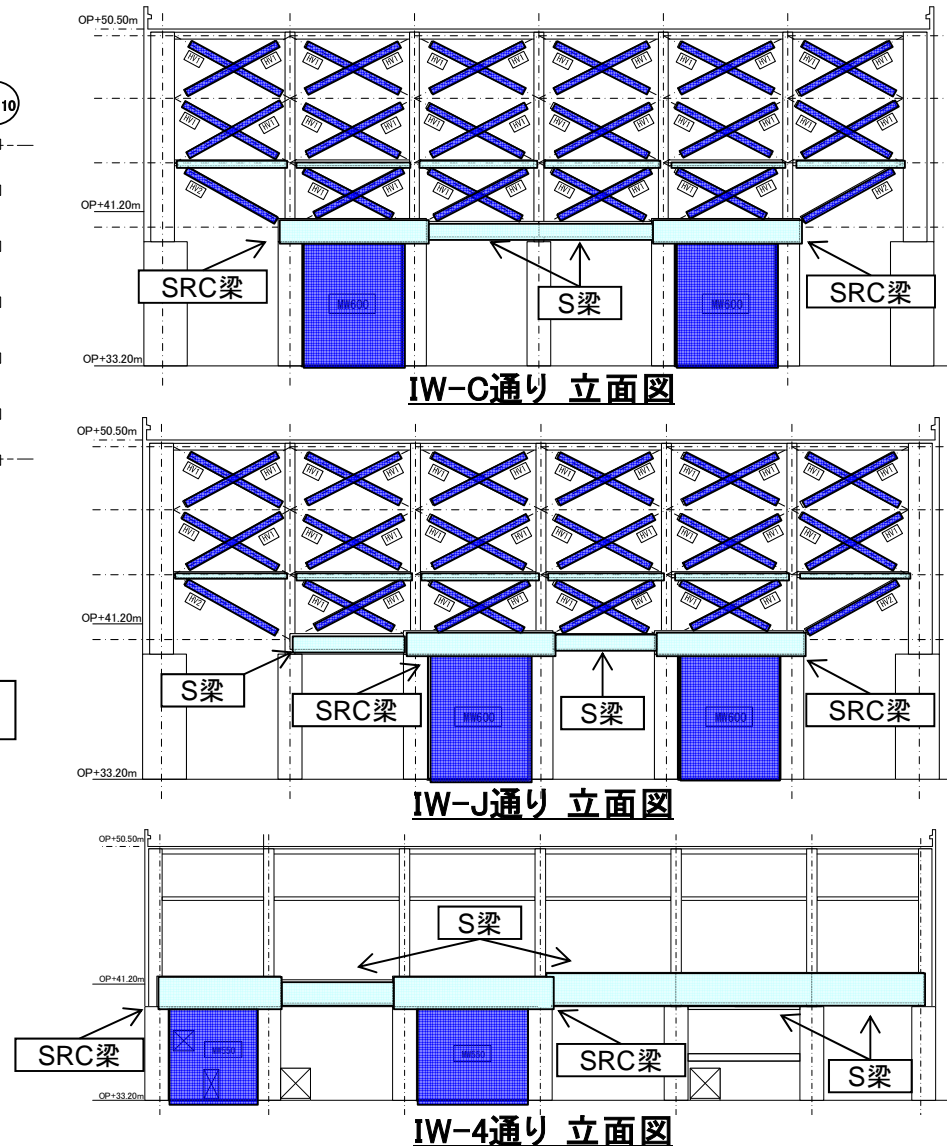


図1 オペフロ上部耐震補強工事概要

#### 4. 2号炉原子炉建屋オペフロ上部耐震補強工事 耐震補強工事の有効性確認(1)

##### ■ 耐震補強工事前後の保有水平耐力の比較

- 耐震補強工事前後について、クレーン階およびオペフロ階の保有水平耐力を比較した。
- 耐震補強工事前に比べて、NS方向では、クレーン階で約58%、オペフロ階で約36%、EW方向では、オペフロ階で約18%、保有水平耐力が向上している。

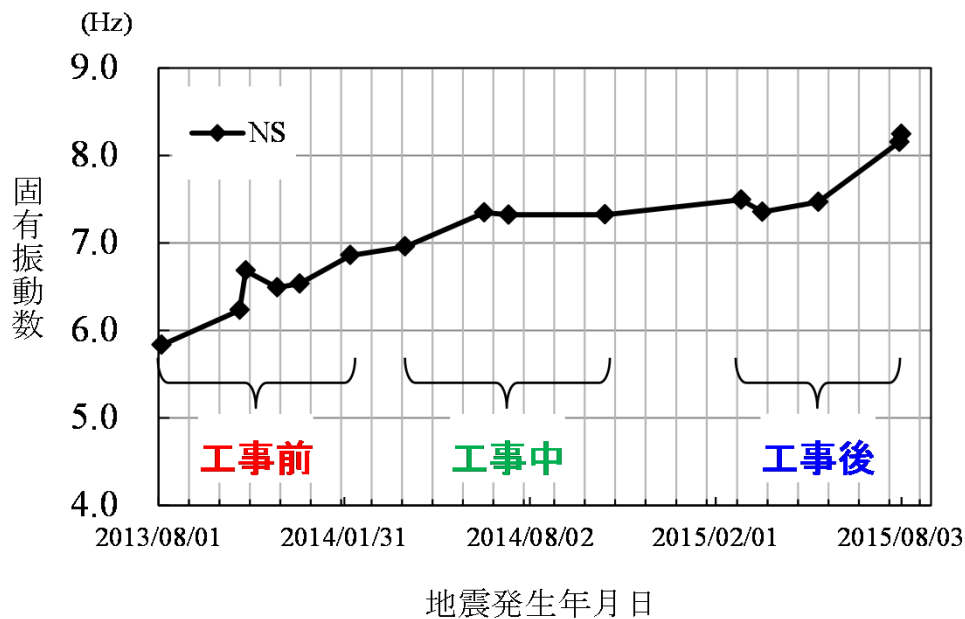
表1 耐震補強前後の保有水平耐力の比較

階	方向	保有水平耐力 $Q_u$ (kN)		補強後 $\Sigma Q_u$ (kN)
		既設躯体	補強部材	
クレーン階	NS	106,422	61,200	167,622
	EW	133,625	—	133,625
オペフロ階	NS	187,974	67,060	255,034
	EW	194,132	35,044	229,176

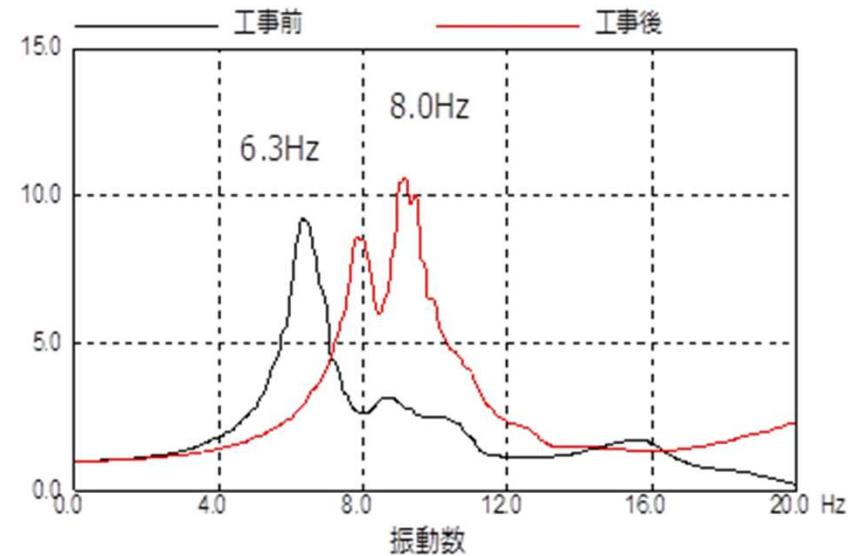
## 4. 2号炉原子炉建屋オペフロ上部耐震補強工事 耐震補強工事の有効性確認(2)

### ■地震観測記録による剛性の変化の確認

- ・工事の有効性を確認するために、工事前、工事中、工事後の地震観測記録を用いて、躯体の剛性がどのように変化したかについて確認を行った。固有振動数は工事前→工事中→工事後の順に大きく(剛に)なっている。また、工事前後の観測記録の振動数から算定される剛性の上昇は、1.6倍程度(NS方向)である。
- ・なお、地震応答解析モデルにおけるNS方向のせん断剛性の変化は、オペフロ階で約2.28倍、クレーン階で1.43倍で概ね整合する。



振動特性の変化



地震応答解析モデルの伝達関数 (屋上/3階)

図1 オペフロ上部耐震補強効果の確認結果例

## 5. 基準地震動Ssに適用する地震応答解析モデル フロー図における位置づけ

### 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

#### 初期剛性が設計より低下している要因の検討(主な検討項目)

##### 【3.11地震等による影響検討】

- 実機の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(構造的影響評価)
- 支持地盤の剛性低下の有無
- 繰返し地震力の影響の有無(耐震実験[1]による確認)

##### 【共通して使用しているコンクリート材料の影響検討】

- コンクリート圧縮強度の低下の有無
- 乾燥収縮が初期の剛性に与える影響(文献レビュー)
- 実機の乾燥収縮状態等の把握



#### 初期剛性低下の要因が終局耐力等を与える影響の確認

- 地震力による事前損傷が終局耐力に与える影響確認(耐震壁実験[2]による影響確認)
- 乾燥収縮が終局耐力に与える影響確認(耐震壁実験[3]による影響確認)



オペフロ上部耐震補強工事



地震応答解析モデルの策定

## 5. 基準地震動Ssに適用する地震応答解析モデル モデル策定の基本的考え(2号炉原子炉建屋)

### 3.4-1 策定モデルの概要(2号炉原子炉建屋) (コメントNo.4に対応)

■基準地震動Ssに適用する地震応答解析モデルについては、以下のとおり設定した。

#### 【スケルトンカーブ】

・3.11地震等によって設計よりもさらに初期剛性が低下した要因としては、3.11地震等の影響に加え、コンクリートの乾燥収縮の影響が重畳したものと考えられる。

・このうち、地震動による影響については、事前損傷がJEAG式の評価基準値や終局耐力付近の値に影響を与えないことを耐震実験で確認している。

・一方、乾燥収縮の影響を考慮した耐震実験において、初期剛性については3.11地震による建屋の応答と同様にJEAG式を下回るものの、JEAG式の評価基準値や終局耐力付近ではJEAG式を上回ることを確認している。この傾向は最近の他の研究機関による既往式との比較をした研究成果とも整合している。

・また、耐震実験では加力時の収縮率が約800 $\mu$ で、これは女川のコンクリートを用いた乾燥収縮迅速試験、長さ変化試験の評価値とほぼ同じ値であること、また、女川2号炉は建設から25年が経過し、乾燥状態としてはほぼ収束状態にある。

→したがって、今後の乾燥収縮の影響を考慮したとしても、スケルトンカーブはJEAG式をベースとし、初期部分を3.11地震による剛性低下分を考慮するように見直したものを採用することが適切である。

#### 【補強部材】

・オペフロ階～屋上階には耐震補強工事を実施していることから、追設ブレースおよび追設耐震壁をモデルに反映する。

#### 【RC減衰】

・女川2号炉の3.11地震、4.7地震に対するシミュレーション解析では、RC減衰は7%を採用することにより観測記録との整合性が良い結果が得られている。基準地震動Ssに対する地震応答解析モデルにおいては、設計における裕度を考慮し、RC減衰5%を採用する。

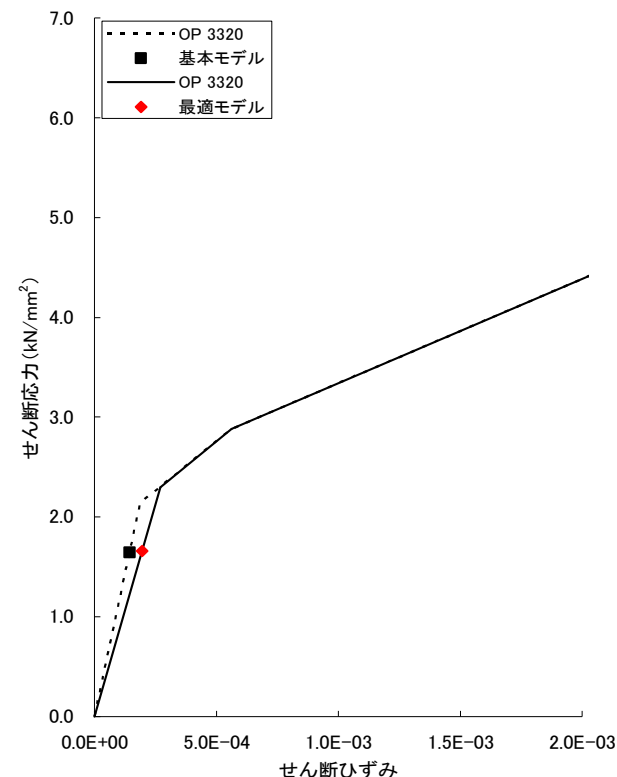


図1 スケルトンカーブの設定例  
(女川2号炉原子炉建屋 NS方向 2階 IW-C通)

# 5. 基準地震動Ssに適用する地震応答解析モデル 2号炉原子炉建屋のモデル諸元

## 3.4-1 策定モデルの概要(2号炉原子炉建屋)

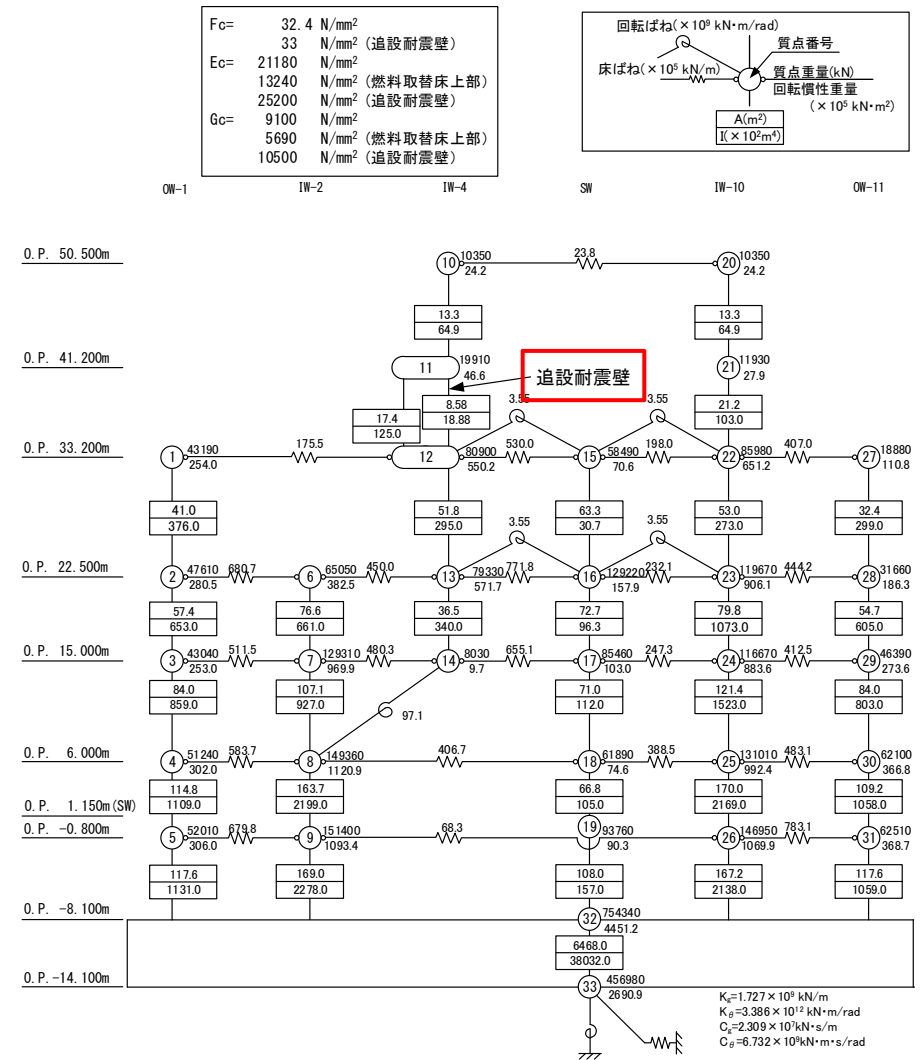
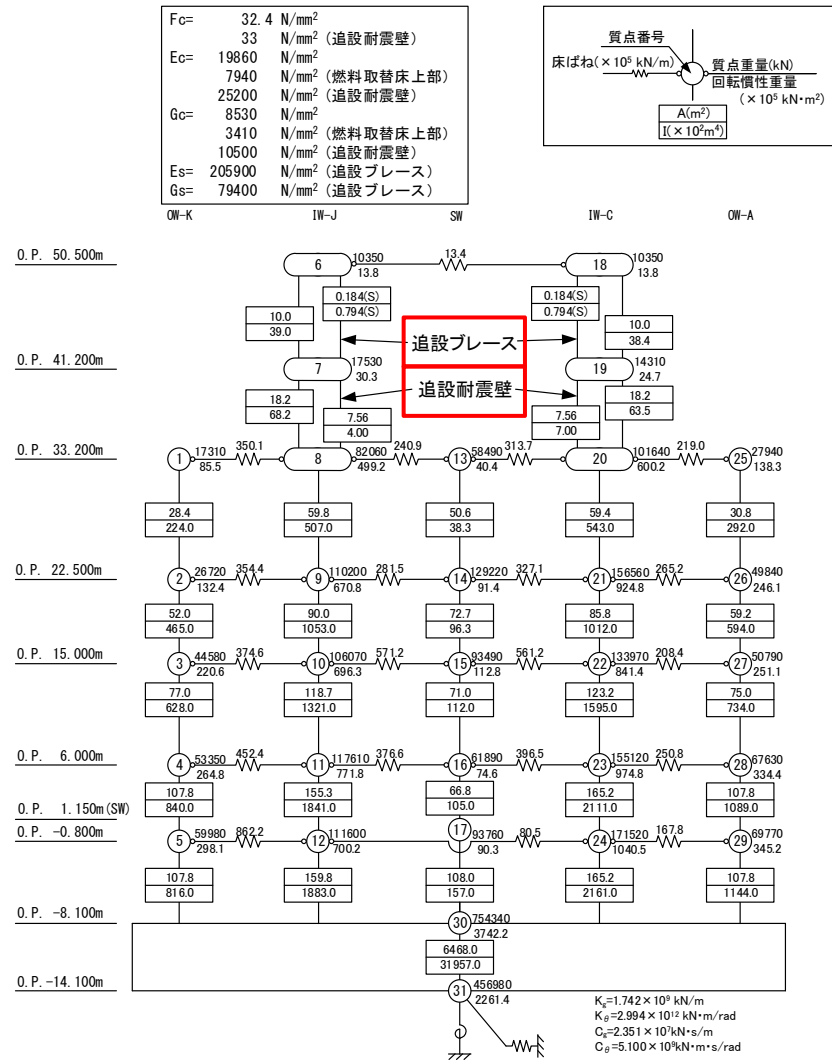


図1 女川2号炉原子炉建屋 地震応答解析モデル NS方向

図2 女川2号炉原子炉建屋 地震応答解析モデル EW方向

# 5. 基準地震動Ssに適用する地震応答解析モデル 基準地震動Ssに対する地震応答解析結果

- 策定した地震応答解析モデルを用いた**基準地震動Ss(基準地震動Ss-D2, 最大加速度1000ガル)**に対する地震応答解析を実施。
- 参考検討: 比較のため以下のモデルについても解析を実施。
  - ① 既工認モデル(初期剛性低下を考慮しないモデル)
  - ② RC減衰を5%から3.11地震のシミュレーション解析結果から得られた7%に変えた場合のモデル

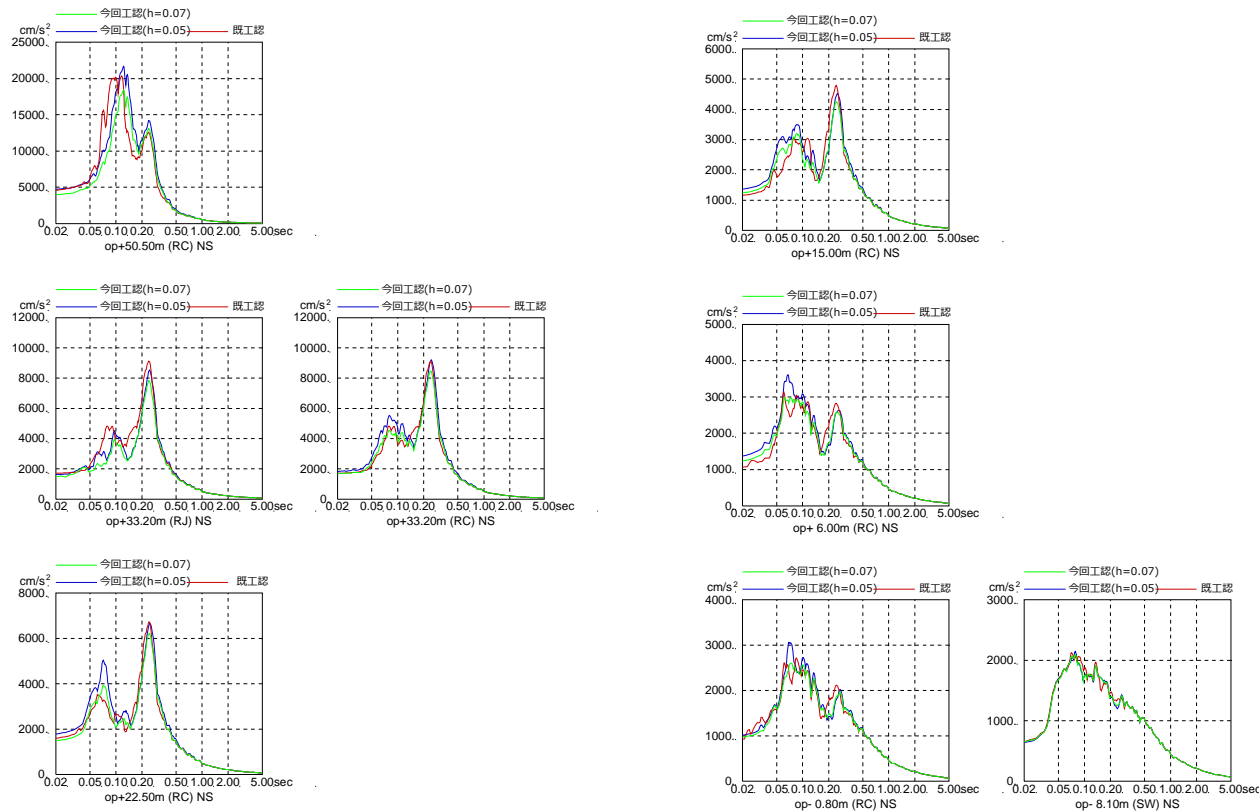


図1 基準地震動Ssに対する応答計算例(2号炉原子炉建屋)

## ■ 計算結果

- ・新たに策定した地震応答解析モデルと既工認モデルの応答結果を比較すると、女川の基準地震動Ss-D2は最大加速度が1000ガルであり短周期成分も大きい地震動のため、地震応答解析結果は第2折点を越える部分が多く、**結果的に初期の剛性の低下の有無は算定結果に大きな影響は与えない**ため、両者は同等の応答結果となった。
- ・また、RC減衰を5%から7%へ変えた場合、部分的なピークが低減する。RC減衰5%の採用は保守的な結果を与えている。



## (今後追而する主な検討内容) (1)

初期剛性低下の要因分析と、その要因が終局耐力に与える影響等を踏まえ基準地震動 $S_s$ に対する地震応答解析モデルの設定の考え方を示したが、今後設定した地震応答解析モデルの妥当性について更なる検討を加え、最終的にはばらつきの考慮など、基本設計として考慮すべき事項を設計体系としてとりまとめていく。

### 1. 現地における乾燥収縮状態把握のための調査のとりまとめ

女川原子力発電所の建屋がどのような乾燥収縮状態になっているのかを確認することを目的に、現在ひび割れ調査を実施しており、乾燥収縮ひび割れの多寡等についてとりまとめていく。

### 2. 建屋コンクリートの圧縮強度に関する追加調査

女川の実機のコンクリートについては設計基準強度を上回っていることを確認したが、顕著な経年的変化の有無についても、今後追加の調査を行い、確認していく。

### 3. 2号炉原子炉建屋オペフロ上部の振動特性に関する検討

2号炉原子炉建屋のオペフロ上部の応答は、JEAG式の第1折点を超過した変形レベルとなっているが、このレベルにおいても、JEAG式との乖離が認められる。オペフロ上部は、比較的薄い耐震壁が四辺に位置され、また、比較的薄い屋根スラブで大空間を構成しているという特徴を有しており、オペフロ下部のような厚い耐震壁や床が密に配置されたものと違いがある。剛性の設計からの乖離の要因として、このような構造的特徴を有した部分の評価方法の問題についても検討を行う。

### 4. 建屋の剛性低下が設備設計に与える影響に関する検討

3.11地震等に対する建屋のシミュレーション解析結果や、新たに策定した基準地震動 $S_s$ に対する地震応答解析モデルによる応答結果が設備設計に与える影響について評価し、建屋のモデルの策定やばらつき評価等における留意点などについて反映する。

## (今後追而する主な検討内容) (2)

### 5. 地震応答解析モデルに考慮するばらつき等に関する検討

#### 5.1 主要建屋の地震応答解析モデルの策定の考え方の検討・整理

今回設定した地震応答解析モデルは2号炉原子炉建屋で提案したものであるが、今後検討するオペフロ上部の検討結果も踏まえ、他の建屋についても、基本的に同様の考えで設定可能かどうかについて、各建屋の3.11地震に対する応答性状や構造的特徴も踏まえて検討する。

#### 5.2 女川原子力発電所建屋の乾燥状態と乾燥収縮の進行が建屋の剛性に与える影響の検討

女川2号炉については、建設から25年が経過し、乾燥状態としてはほぼ収束状態にあるものと考えられるが、建設時期の違う女川1号炉や3号炉の乾燥収縮ひび割れの傾向の比較、また、実機からのコア採取による乾燥時様態の評価などを実施し、乾燥状態について更なる検討を行う。さらに、乾燥収縮の更なる進行が構造特性に及ぼす影響についても検討し、必要な場合は、地震応答解析モデルのばらつき評価に反映する。

### 6. 弾性設計用地震動、静的地震力評価に用いる建屋モデルの検討

基準地震動 $S_s$ に対する建屋の評価基準値は建屋の変形評価になるが、一方、弾性設計用地震動や静的地震力に対しては、建屋は基本的には算定された応力に対する部材の健全性評価を行うことになる。こういった設計方法の違いなども考慮し、弾性設計用地震動や静的地震力に算定に適用する建屋モデルの策定について検討する。

### 7. 各構造部材の機能を踏まえた部材設計への反映事項の検討

コンクリート強度の低下は認められないことは確認しているが、一方で初期剛性が低下傾向にあるため、今後の地震において細かいひび割れは発生しやすい状態にあると考えられる。遮蔽機能を有する構造体の設計において、配慮すべき点の有無について検討を行う。