

|                       |                   |
|-----------------------|-------------------|
| 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-24-0014_改0 |
| 提出年月日                 | 2021年7月12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 (指摘事項に対する回答)

---

2021年7月12日  
東北電力株式会社

# 目次

---

## 1. 前回審査会合の指摘事項と回答方針

## 2. 指摘事項に対する回答

2.1 指摘事項に対する回答①

2.2 指摘事項に対する回答②

2.3 指摘事項に対する回答③

## 3. まとめ

# 1. 前回審査会合の指摘事項と検討概要

| No. | 実施日                     | 指摘事項   |
|-----|-------------------------|--|
| 1   | 令和3年4月27日<br>第970回 審査会合 | 弾性設計用地震動に対する許容限界を明確にするとともに、許容限界に対する設計結果を説明すること。また、既工認実績のない許容限界を用いる場合には、妥当性を説明すること。 |

## ■ 検討概要

弾性設計用地震動 $S_d$ に対する評価方針の検討にあたっては、既工認と同様の許容限界を用いており、

- ①「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」に基づく方針の確認
- ②初期剛性低下を考慮していることを踏まえた許容限界の検討

を踏まえて、評価方針を決定する。

また、弾性設計用地震動 $S_d$ に対しては、短期許容応力度設計として設計を実施しており、

- ③弾性設計用地震動 $S_d$ に対する応答と3.11地震応答の比較

として、弾性設計用地震動 $S_d$ に対する設計結果としての応答(せん断ひずみ)と3.11地震のシミュレーション解析結果との比較を行う。

## 2.1 指摘事項に対する回答①

### ①「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」に基づく方針の確認

- 弾性設計用地震動Sdに対する評価においては、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」に基づき、おおむね弾性範囲であることを確認する。
- この場合、「弾性範囲の設計」とは、施設を弾性体とみなして応力解析を行い、施設各部の応力を許容限界以下に留めることをいう。また、この場合、上記の「許容限界」とは、必ずしも厳密な弾性限界ではなく、局部的に弾性限界を超える場合を容認しつつも施設全体としておおむね弾性範囲に留まり得ることをいうとされている。
- おおむね弾性範囲であることについては、発生する応力に対して、建築基準法等の安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度を許容限界と設定する。



- 弾性設計用地震動Sdによる評価対象(耐震Sクラス)は、原子炉建屋原子炉棟の耐震壁、使用済燃料プール、中央制御室しゃへい壁、中央制御室待避所遮蔽、(緊急時対策所遮蔽(剛性低下は考慮していない)) であり、それぞれ対象となる部位が弾性設計用地震動Sdに対して、発生する応力がRC-N規準に基づく短期許容応力度に収まることを確認する。

## 2.2 指摘事項に対する回答②

### ②初期剛性低下を考慮していることを踏まえた許容限界の検討

- 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)が大きくなることに対して、耐震実験により以下のことを確認している。
  - 耐震実験[2]から、事前加力(地震による事前損傷)によって非線形状態にあるRC壁であっても、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 $4.0 \times 10^{-3}$ )の耐力には影響を与えず、未加力のRC壁と同等の挙動を示すことを確認している。
  - 耐震実験[3]から、コンクリートの乾燥収縮等によって初期剛性低下の状態にあるRC壁であっても、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 $4.0 \times 10^{-3}$ )の耐力には影響を与えず、剛性低下状態にないRC壁と同等の信頼性が確保されることを確認している。
- 一方で、「実用発電用原子炉に係る新規規制基準の考え方について(原子力規制委員会, 平成30年12月19日改訂)」では、弾性設計用地震動Sdによる評価の位置づけとして、以下のとおり記載されている。

基準地震動に対する施設の安全機能保持をより高い精度で確認するため、別途、弾性設計用地震動を設定し、この弾性設計用地震動による地震力に対し施設全体としておおむね弾性範囲に留まっていることを確認することとしている。 構造物の弾性設計では、地震入力と構造物の応答は比例関係にあり、算定される応答値の精度も比較的高い。一般的に構造物の弾性限界と終局強度の間には大きな差があり、弾性設計された構造物は、弾性設計で考慮した地震動を超える地震動に対しても余裕をもった設計となり、これにより基準地震動による弾塑性解析結果の信頼性を担保し、安全機能の保持を高い精度で確認できる。

- 以上のことから、剛性低下の現象が評価基準値付近の挙動の信頼性に与える影響はないことを踏まえると、剛性低下を考慮する必要のない建物と同等の設計(応力に対する弾性設計)を実施していれば、弾性設計用地震動Sdによる評価の『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。

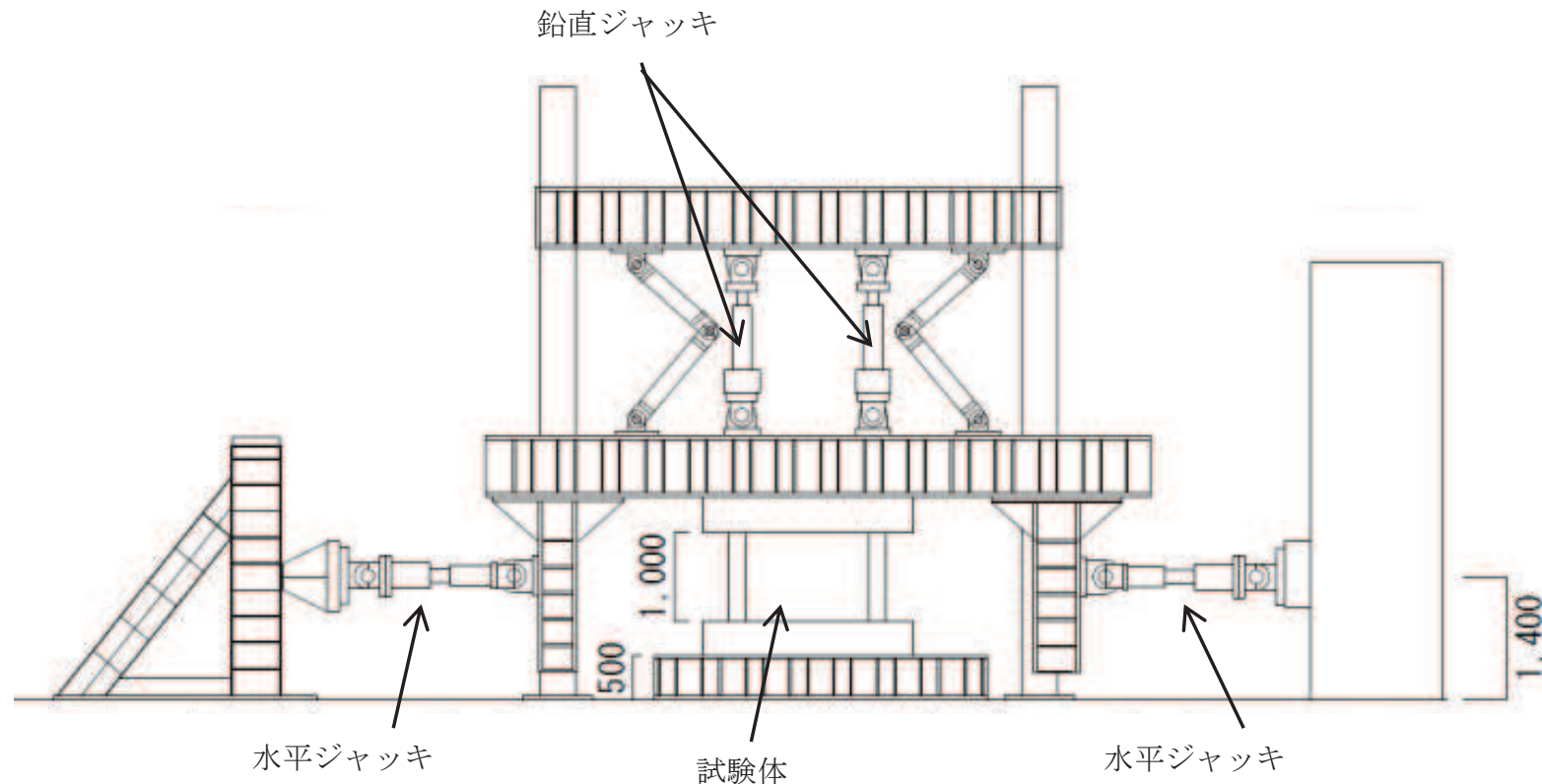
## 耐震実験[2]の結果について(全体概要)(1)

### ■ 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

- ・耐震実験[2]では、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**について耐震実験で確認する。



実験の概要

## 耐震実験[2]の結果について(全体概要)(2)

### ■耐震実験[2]の概要

- ・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実験[2]を行った。
  - ・耐震実験にあたっては、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: $2.0 \times 10^{-3}$ )の約3倍の変形量(層間変形角: $6.0 \times 10^{-3}$ )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。

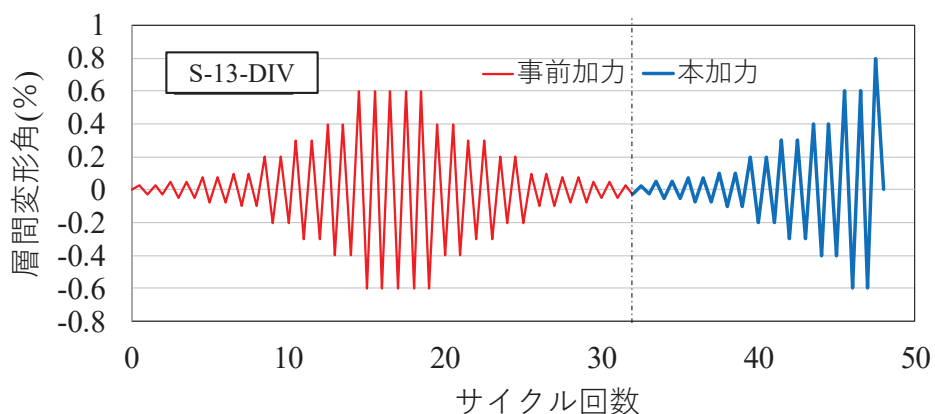
# 耐震実験[2]の結果について(全体概要)(3)

事前加力で与えるせん断変形角(損傷の大きさ)

| 損傷度 | せん断変形角                | 備考   |
|-----|-----------------------|--|
| I   | $0.75 \times 10^{-3}$ | (参考)2号炉原子炉建屋の応答レベル<br>2005年宮城県沖地震: $0.1 \times 10^{-3}$ 程度<br>2011年東北地方太平洋沖地震<br>オペフロ下部: $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3}$ 程度<br>オペフロ上部: $0.6 \times 10^{-3}$ 程度 |
| II  | $2.0 \times 10^{-3}$  | JEAG4601-1991に示される耐震壁の<br>評価基準値  |
| III | $4.0 \times 10^{-3}$  | JEAG4601-1991に示される耐震壁の<br>終局点  |
| IV  | $6.0 \times 10^{-3}$  |  |

加力スケジュール

|                 |                 |            | S-13-D0 | S-13-D I | S-13-D II | S-13-D III | S-13-DIV |
|-----------------|-----------------|------------|---------|----------|-----------|------------|----------|
| 加力              | 目標部材角           | 層間変形       | サイクル数   |          |           |            |          |
|                 | R(rad.)         | mm         | 回       |          |           |            |          |
| 事前加力            | $\pm 0.25/1000$ | $\pm 0.25$ |         | 2        | 2         | 2          | 2        |
|                 | $\pm 0.50/1000$ | $\pm 0.50$ |         | 2        | 2         | 2          | 2        |
|                 | $\pm 0.75/1000$ | $\pm 0.75$ |         | 5        | 2         | 2          | 2        |
|                 | $\pm 1/1000$    | $\pm 1.0$  |         |          | 2         | 2          | 2        |
|                 | $\pm 2/1000$    | $\pm 2.0$  |         |          | 5         | 2          | 2        |
|                 | $\pm 3/1000$    | $\pm 3.0$  |         |          |           | 2          | 2        |
|                 | $\pm 4/1000$    | $\pm 4.0$  |         |          |           | 5          | 2        |
|                 | $\pm 6/1000$    | $\pm 6.0$  |         |          |           |            | 5        |
|                 | $\pm 4/1000$    | $\pm 4.0$  |         |          |           |            | 2        |
|                 | $\pm 3/1000$    | $\pm 3.0$  |         |          |           | 2          | 2        |
|                 | $\pm 2/1000$    | $\pm 2.0$  |         |          |           | 2          | 2        |
|                 | $\pm 1/1000$    | $\pm 1.0$  |         |          | 2         | 2          | 2        |
|                 | $\pm 0.75/1000$ | $\pm 0.75$ |         |          | 2         | 2          | 2        |
|                 | $\pm 0.50/1000$ | $\pm 0.50$ |         | 2        | 2         | 2          | 2        |
| $\pm 0.25/1000$ | $\pm 0.25$      |            | 2       | 2        | 2         | 2          |          |
| 本加力             | $\pm 0.25/1000$ | $\pm 0.25$ | 2       | 2        |           |            |          |
|                 | $\pm 0.50/1000$ | $\pm 0.50$ | 2       | 2        |           |            |          |
|                 | $\pm 0.75/1000$ | $\pm 0.75$ | 2       | 2        |           |            |          |
|                 | $\pm 1/1000$    | $\pm 1.0$  | 2       | 2        |           |            |          |
|                 | $\pm 2/1000$    | $\pm 2.0$  | 2       | 2        |           |            |          |
|                 | $\pm 3/1000$    | $\pm 3.0$  | 2       | 2        |           |            |          |
|                 | $\pm 4/1000$    | $\pm 4.0$  | 2       | 2        |           |            |          |
|                 | $\pm 6/1000$    | $\pm 6.0$  | 2       | 2        |           |            |          |
|                 | $\pm 8/1000$    | $\pm 8.0$  | 押切      | 押切       |           |            |          |



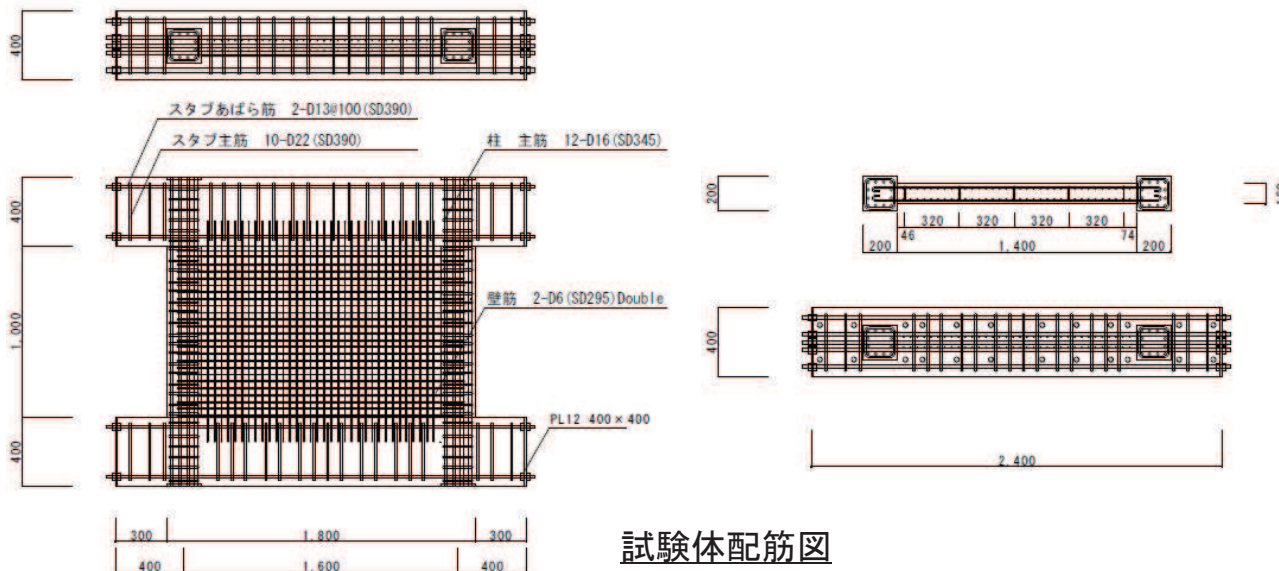
加力概念図



# 耐震実験[2]の結果について(全体概要)(4)

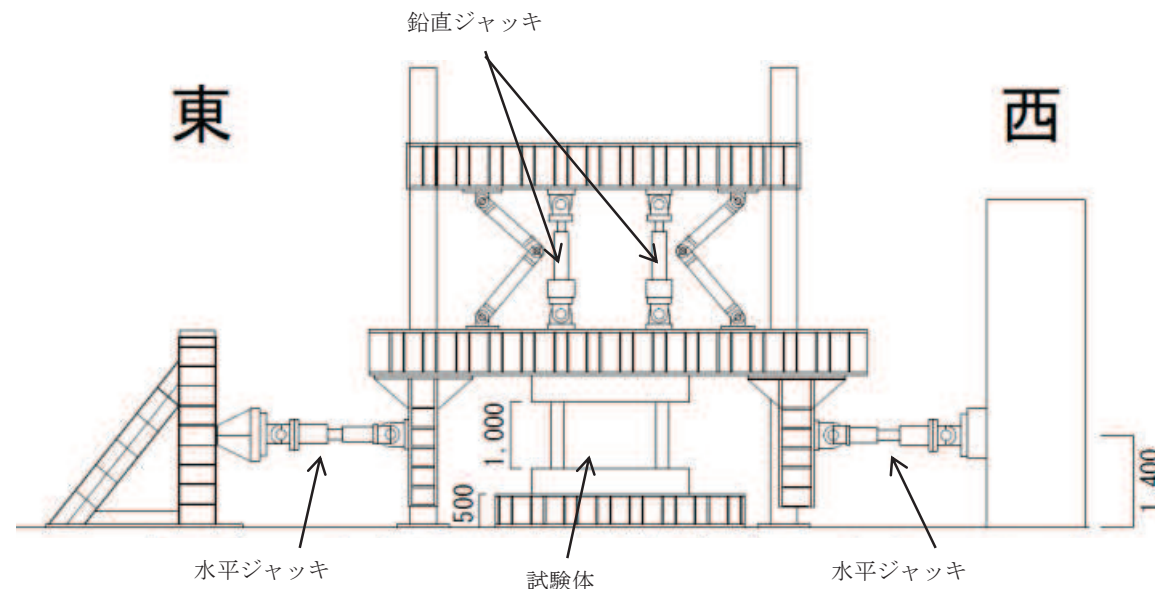
試験体諸元

|     |                               | 耐震実験[2]            |
|-----|-------------------------------|--------------------|
| 壁   | 壁高さ(mm)                       | 1000               |
|     | 全長(mm)                        | 1800               |
|     | 壁厚(mm)                        | 120                |
|     | 縦筋                            | D6@40(SD295)Double |
|     | 縦筋比(%)                        | 1.32               |
|     | 横筋                            | D6@40(SD295)Double |
|     | 横筋比(%)                        | 1.32               |
| 柱   | コンクリート強度 $F_c(N/mm^2)$        | 27                 |
|     | せん断スパン比                       | 0.29               |
|     | 断面 $b \times D(mm \times mm)$ | 200 × 200          |
| スタブ | 主筋                            | 12-D16(SD345)      |
|     | 帯筋                            | 2-D10(SD345)@60    |
|     | 断面 $b \times D(mm \times mm)$ | 400 × 400          |
|     | あばら筋                          | 2-D10(SD390)@100   |



コンクリートの圧縮強度試験結果

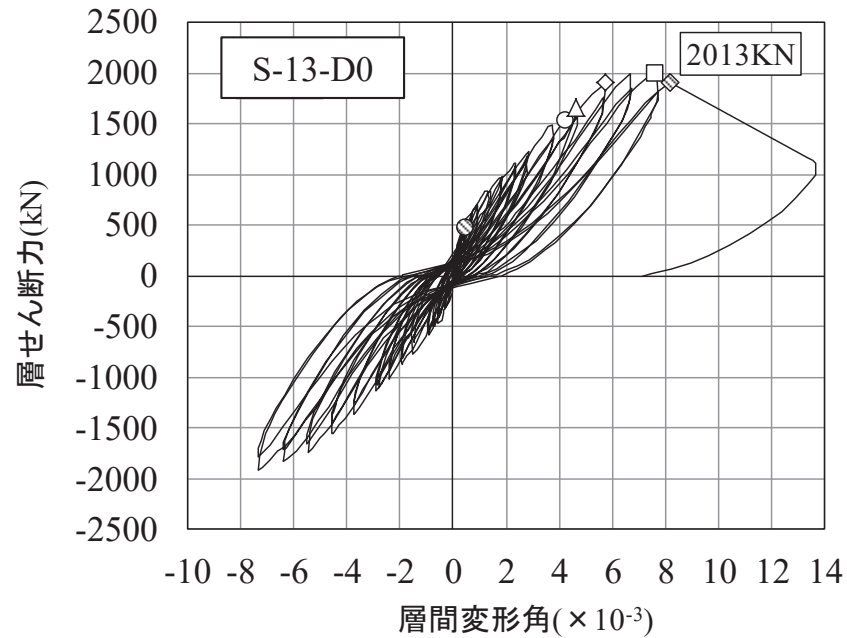
| コンクリート圧縮試験結果      |                               | No1  | No2  | No3  | 平均   |
|-------------------|-------------------------------|------|------|------|------|
| S-13-D0           | 材齢(日)                         | 61   |      |      |      |
|                   | 圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )      | 41.0 | 39.9 | 39.6 | 40.2 |
|                   | 圧縮強度時歪( $\mu$ )               | 2550 | 2312 | 2365 | 2409 |
|                   | ヤング係数( $\times 10^4 N/mm^2$ ) | 2.96 | 3.21 | 3.67 | 3.28 |
| S-13-DI           | 材齢(日)                         | 79   |      |      |      |
|                   | 圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )      | 41.6 | 40.8 | 41.3 | 41.2 |
|                   | 圧縮強度時歪( $\mu$ )               | 2315 | 2275 | 2357 | 2316 |
|                   | ヤング係数( $\times 10^4 N/mm^2$ ) | 3.36 | 3.41 | 3.65 | 3.47 |
| S-13-DII<br>, DIV | 材齢(日)                         | 107  |      |      |      |
|                   | 圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )      | 42.2 | 42.2 | 41.2 | 41.9 |
|                   | 圧縮強度時歪( $\mu$ )               | 2262 | 2262 | 2132 | 2219 |
|                   | ヤング係数( $\times 10^4 N/mm^2$ ) | 3.46 | 3.02 | 3.28 | 3.25 |
| S-13-DIII         | 材齢(日)                         | 87   |      |      |      |
|                   | 圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )      | 41.7 | 41.8 | 40.4 | 41.3 |
|                   | 圧縮強度時歪( $\mu$ )               | 2482 | 2332 | 2620 | 2478 |
|                   | ヤング係数( $\times 10^4 N/mm^2$ ) | 3.21 | 3.61 | 3.44 | 3.42 |



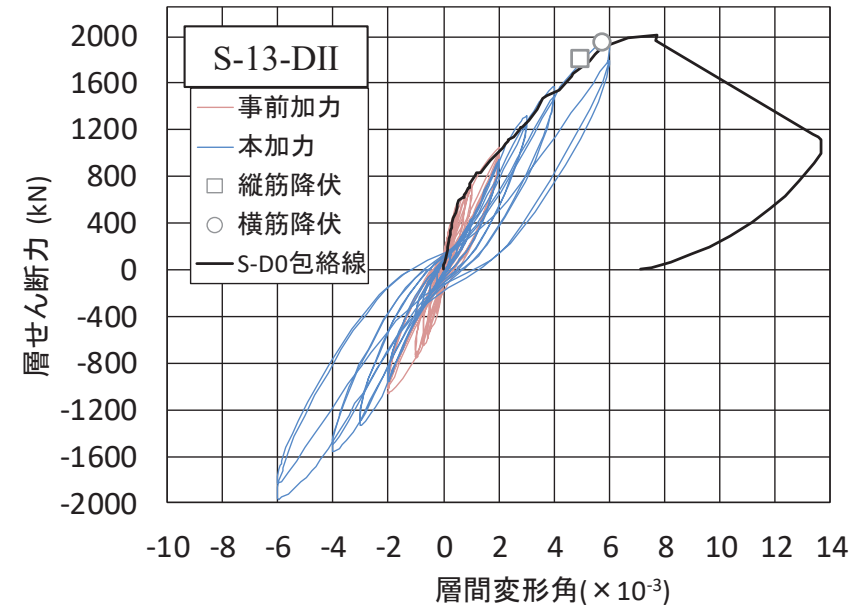
加力装置図

※コンクリートの圧縮強度は、試験体のコンクリート打設時にコンクリートコアを製作・封緘養生とし、加力実験時に合わせて圧縮強度試験を実施した結果。

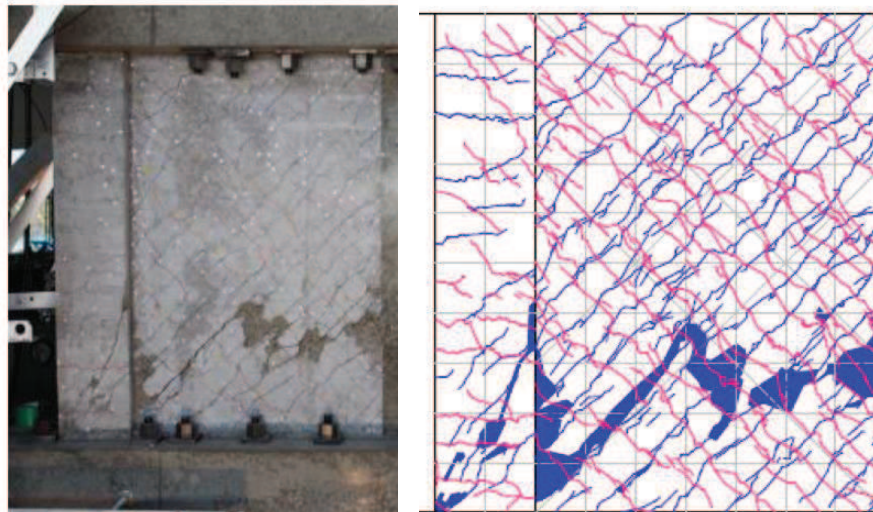
## 耐震実験[2]の結果について(実験結果)(1)



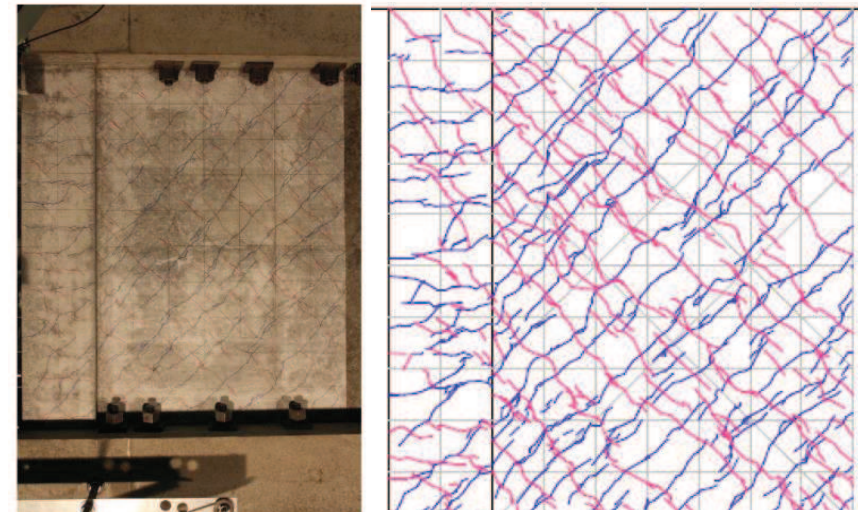
試験体S-13-D0の荷重-変形関係



試験体S-13-DIIの荷重-変形関係



試験体S-13-D0 最終破壊時写真・ひび割れ図

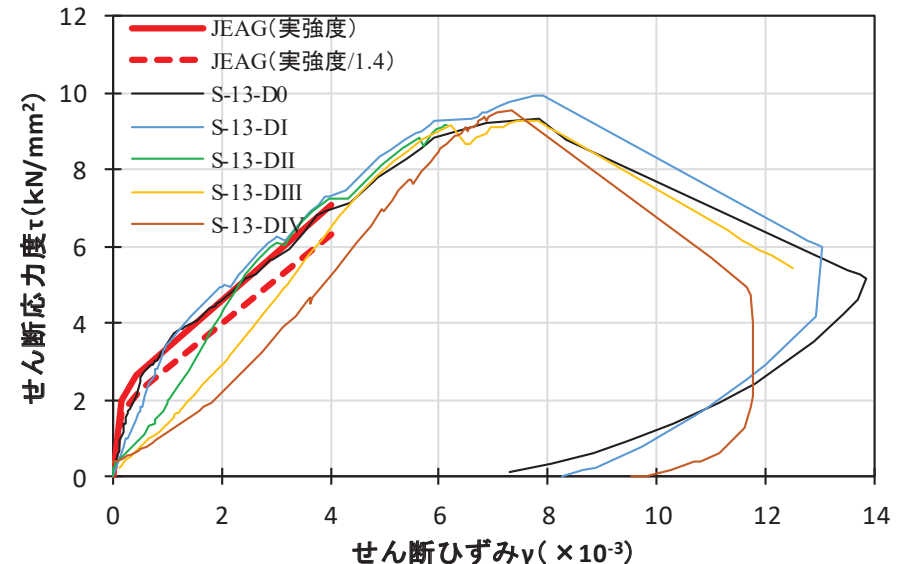
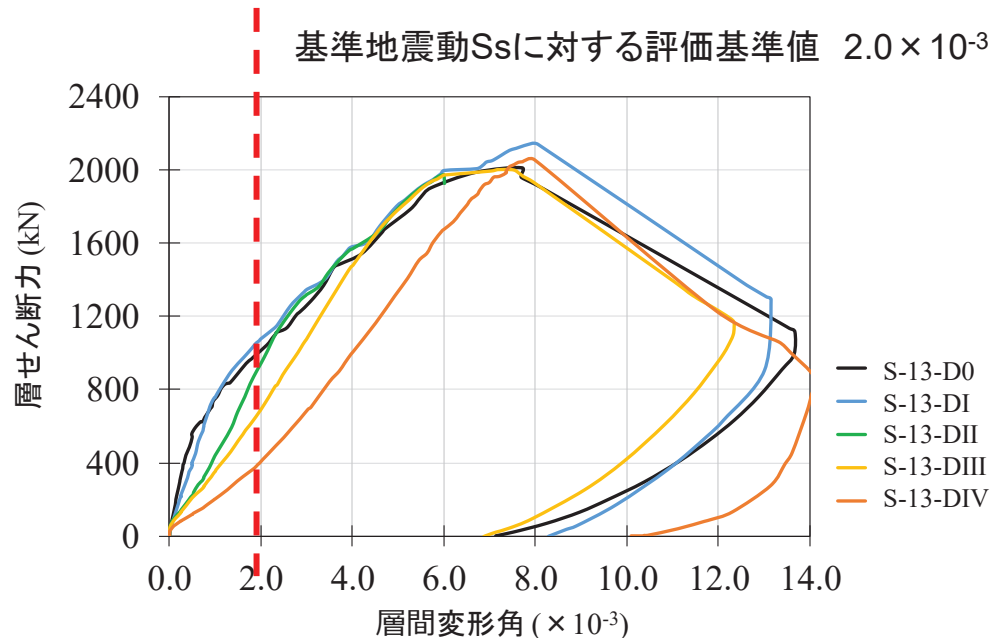


試験体S-13-DII 0.6 × 10⁻³時写真・ひび割れ図

## 耐震実験[2]の結果について(実験結果)(2)

## ■ 実験結果の特徴

- ・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: $2.0 \times 10^{-3}$ )の約3倍の事前損傷(層間変形角: $6.0 \times 10^{-3}$ )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Ssに対する評価基準値(せん断ひずみ: $2.0 \times 10^{-3}$ )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: $2.0 \times 10^{-3}$ )付近での耐力低下は認められなかった。**



## 事前損傷が終局耐力に与える影響に関する耐震実験結果(荷重-変形関係)

注: 荷重-変形曲線は、せん断変形と曲げ変形が合算されたもの(但し、曲げ変形の影響は小さい)

\* JEAG式によるスケルトンカーブは、現場封緘養生供試体の圧縮強度試験結果(S-13-D0)に基づき作成。また、設計基準強度相当(1/1.4)も合わせて示す。  
設計基準強度相当として1/1.4としているのは、「日本原子力学会標準 原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準:2015(一般社団法人 日本原子力学会)」による。

## ■ 耐震実験[2]のまとめ

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)の終局耐力に与える影響は小さいことを確認した。また、損傷度 I, II では、JEAG式に対して、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: $2.0 \times 10^{-3}$ )での耐力低下は認められなかった。

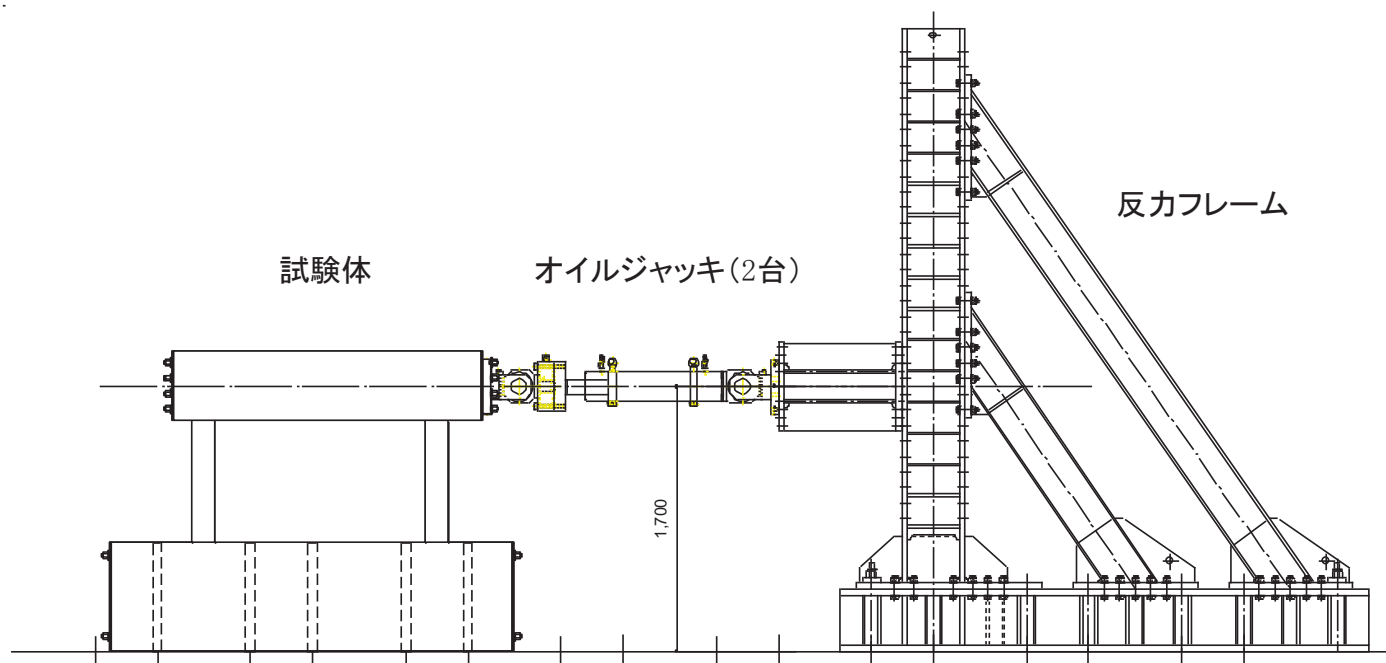
## 耐震実験[3]の結果について(実験概要)(1)

## ■ 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

- ・耐震実験[3]では、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**によって、終局耐力等が設計で用いている評価式(JEAG式)とどういった関係になるかについて確認する。



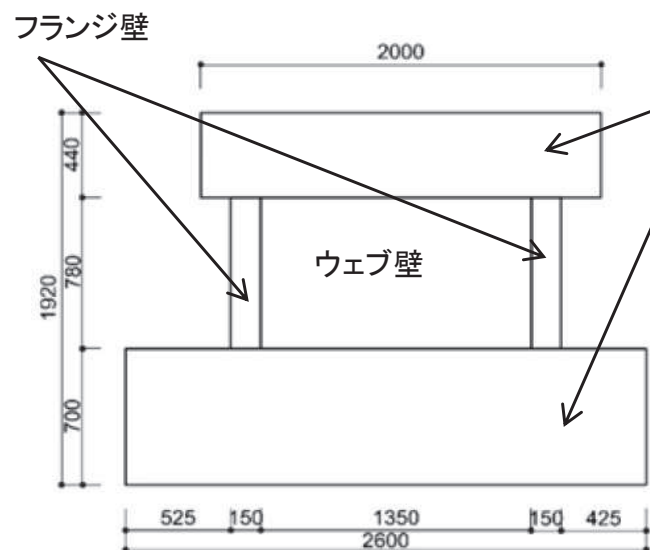
実験の概要

## 耐震実験[3]の結果について(実験概要)(2)

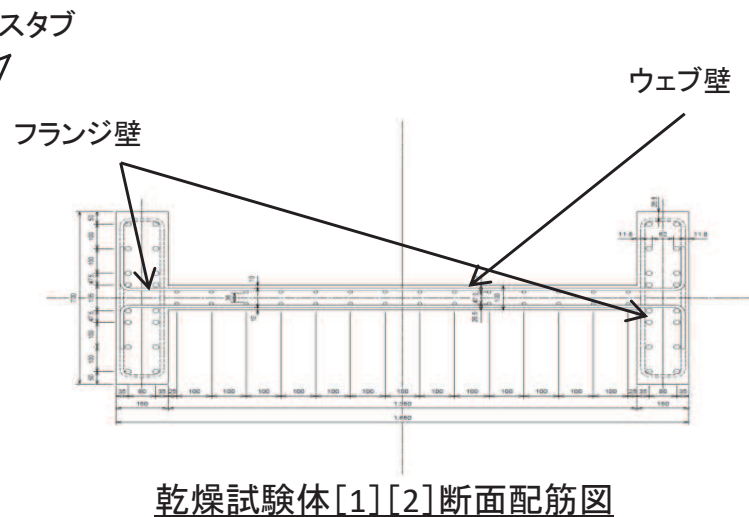
### ■耐震実験[3]の概要

- ・耐震実験にあたっては、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。
- ・耐震実験[3]の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。**
  - ✓ 試験体は、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試験体(乾燥試験体[1])と、さらに5ヶ月間乾燥させた試験体(乾燥試験体[2])の2体とした。**
  - ✓ 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年宮城県沖の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)。**

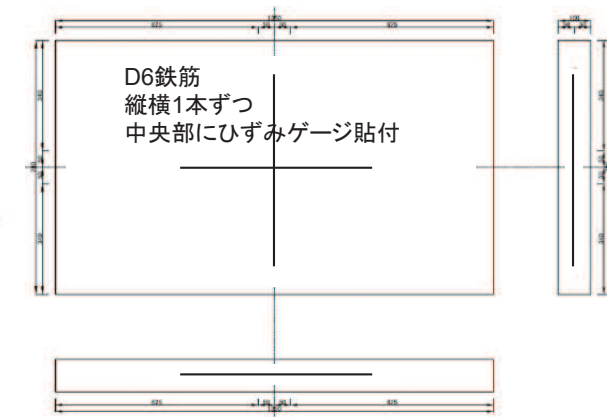
## 耐震実験[3]の結果について(実験概要)(3)



乾燥試験体[1][2]形状



乾燥試験体[1][2]断面配筋図



ダミー試験体概要

## 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) |      |                           |

| 鉄筋<br>種別・使用部位   | 降伏点<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | ヤング係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| D10(SD295A) 壁筋  | 377                         | 183                            | 504                          |
| D10(SD295A) 柱主筋 | 371                         | 191                            | 532                          |
| コンクリート材料特性      |                             | 乾燥試験体[1]                       |                              |
| 圧縮強度※           | (N/mm <sup>2</sup> )        | 34.3                           |                              |
| 材齢              | (day)                       | 107                            |                              |
| ヤング係数           | (kN/mm <sup>2</sup> )       | 27.0                           |                              |
| ポアソン比           |                             | 0.181                          |                              |

※コンクリートの圧縮強度は、試験体のコンクリート打設時にコンクリートコアを製作・封緘養生とし、乾燥試験体[1]の加力実験時に合わせて圧縮強度試験を実施した結果。

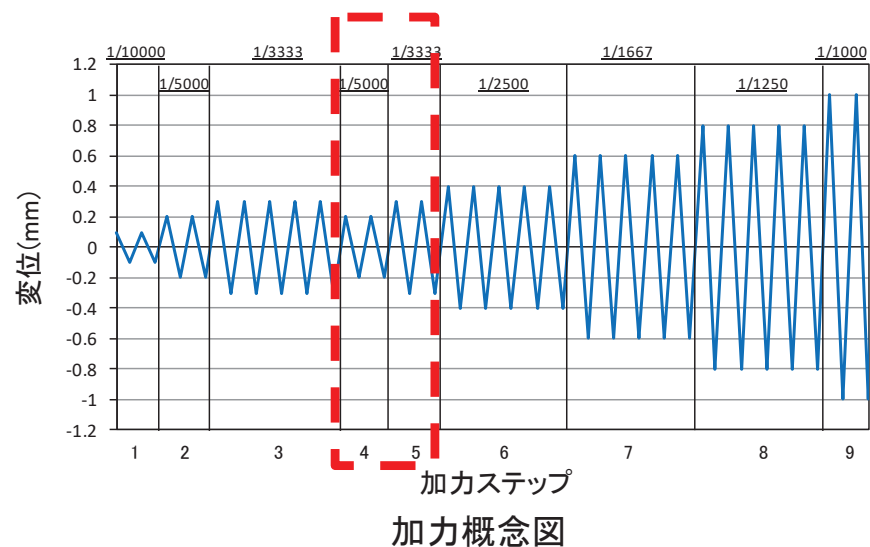
## 耐震実験[3]の結果について(実験概要)(4)

## ■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(表および図中の赤破線で囲んだ部分)。

## 加力計画

| 変形角<br>R(rad.) | 計測変位<br>$\delta$ (mm) | 加力<br>ステップ | 加力<br>サイクル<br>数 | 備考                                     |
|----------------|-----------------------|------------|-----------------|--|
| 1/10000        | 0.1                   | 1          | 2               | 2005年宮城県沖地震による<br>原子炉建屋オペフロ下部の<br>応答程度 |
| 1/5000         | 0.2                   | 2          | 2               | 2011年東北地方太平洋沖地<br>震による                 |
| 1/3333         | 0.3                   | 3          | 5               | 原子炉建屋オペフロ下部の<br>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             |  |



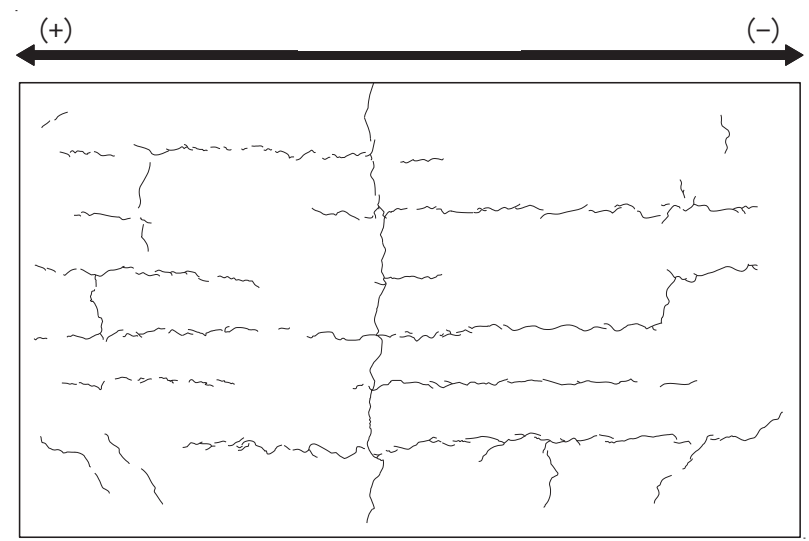
# 耐震実験[3]の結果について(実験概要)(5)



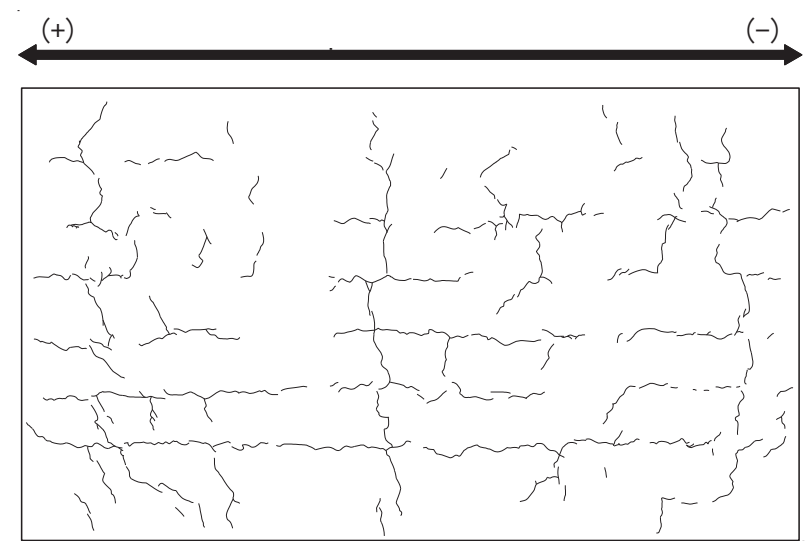
乾燥試験体[1]養生状況

(ウェブ部:コンクリート打設後約一週間で脱型し, 気中養生,  
フランジ部:アルミテープにより密封養生)

試験時における各試験体の収縮量の最大値  
【乾燥試験体[1]】 約200 $\mu$   
【乾燥試験体[2]】 約400 $\mu$



加力前における乾燥試験体[1]のひび割れ図



加力前における乾燥試験体[2]のひび割れ図

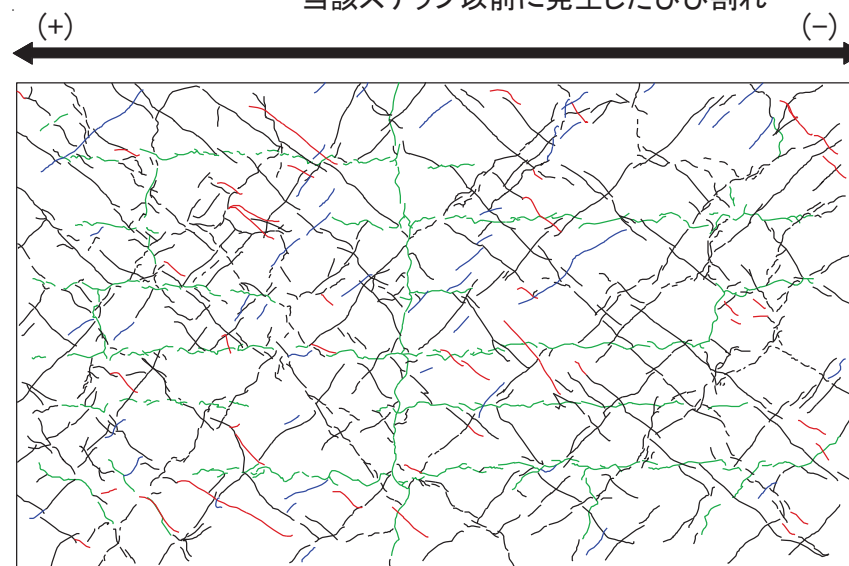


## 耐震実験[3]の結果について(実験結果)(1)

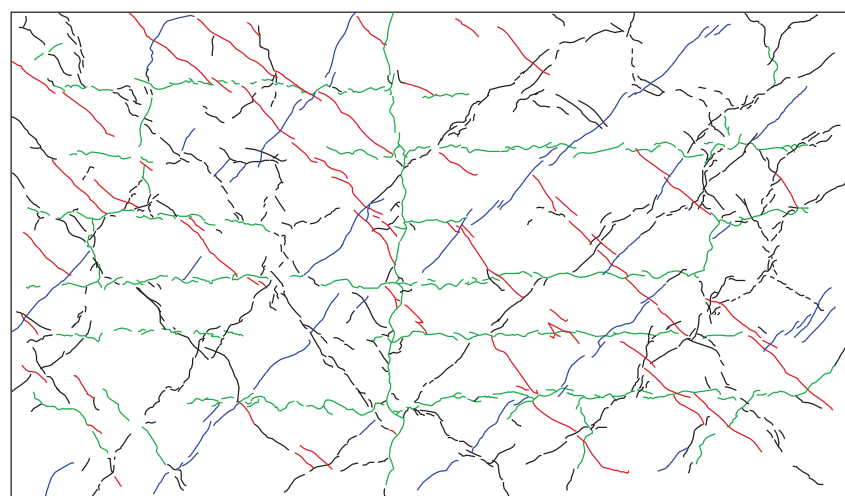
- 初期ひび割れ(乾燥収縮ひび割れ)
- 当該ステップで発生したひび割れ(正側加力)
- 当該ステップで発生したひび割れ(負側加力)
- 当該ステップ以前に発生したひび割れ



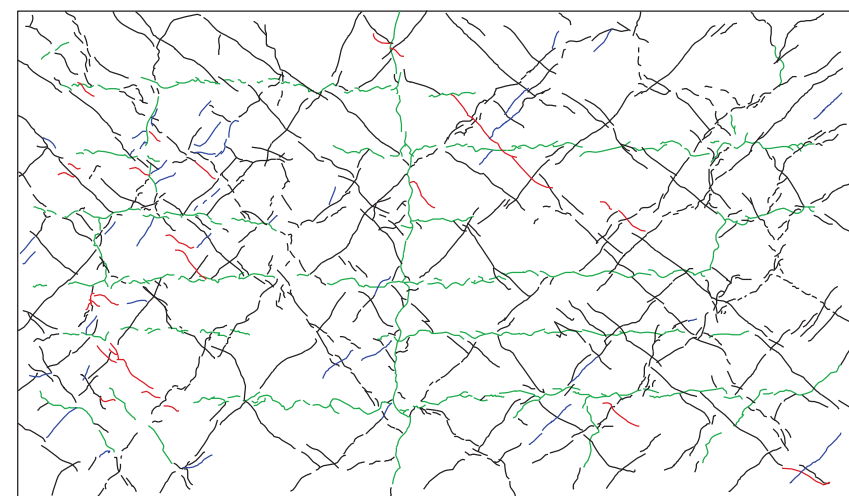
(+) 乾燥試験体[1] 最終破壊時写真 (-)



乾燥試験体[1] 最終破壊時ひび割れ図



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



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

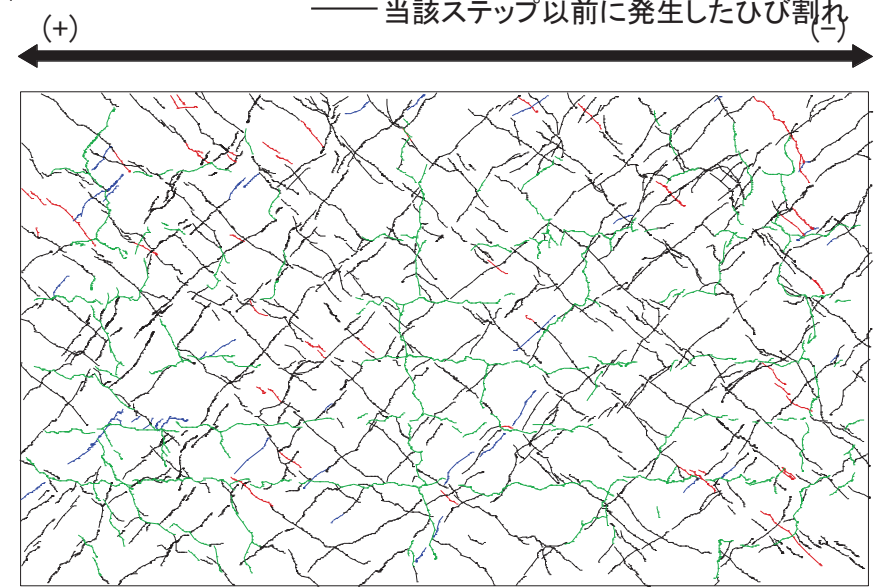
# 耐震実験[3]の結果について(実験結果)(2)

乾燥試験体[2]の最終破壊形態やひび割れ分布は、乾燥試験体[1]と同じ傾向である。

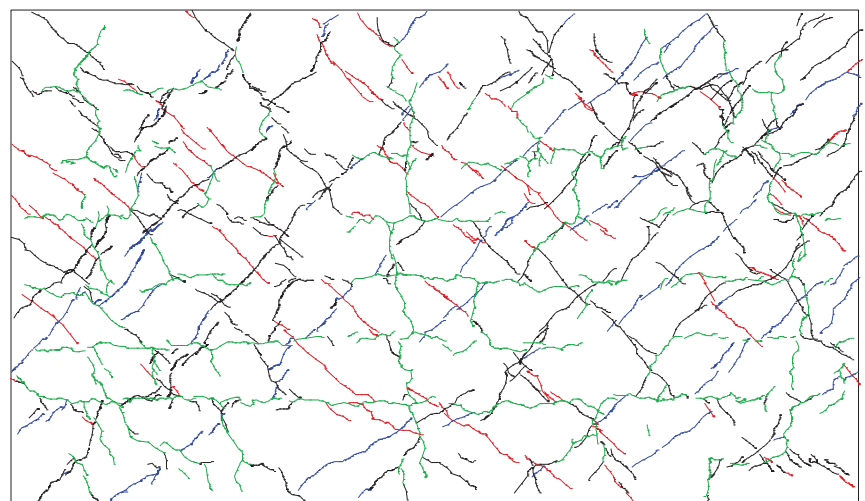
- 初期ひび割れ(乾燥収縮ひび割れ)
- 当該ステップで発生したひび割れ(正側加力)
- 当該ステップで発生したひび割れ(負側加力)
- 当該ステップ以前に発生したひび割れ



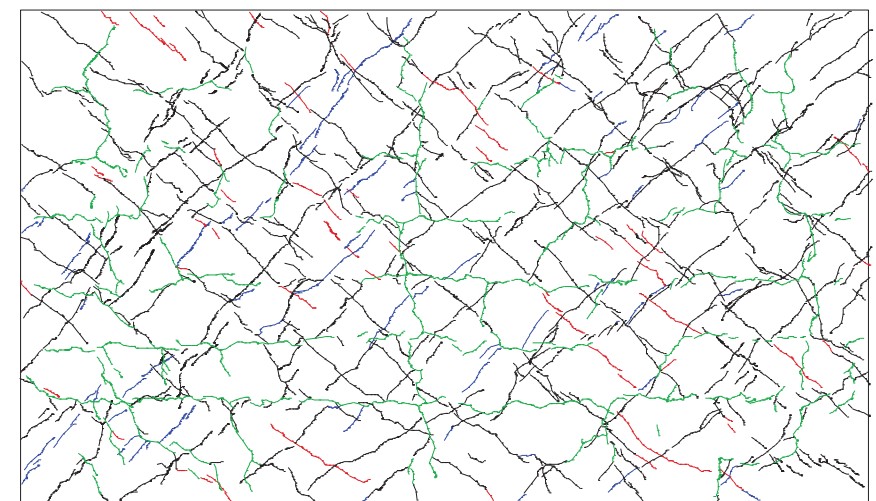
乾燥試験体[2] 最終破壊時写真



乾燥試験体[2] 最終破壊時ひび割れ図



乾燥試験体[2] 1/500rad. ( $2.0 \times 10^{-3}$ )におけるひび割れ図



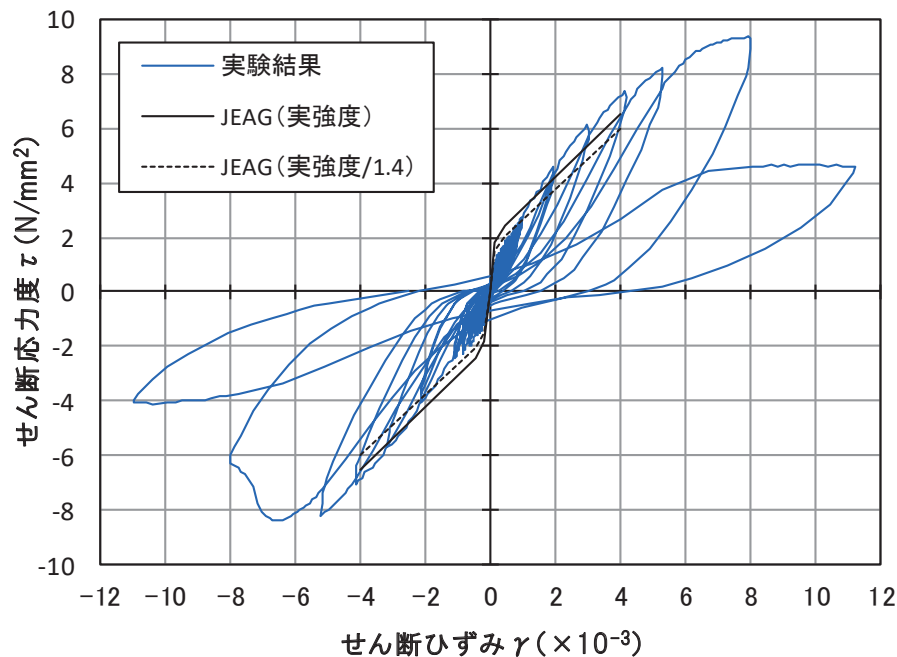
乾燥試験体[2] 1/250rad. ( $4.0 \times 10^{-3}$ )におけるひび割れ図

## 耐震実験[3]の結果について(実験結果)(3)

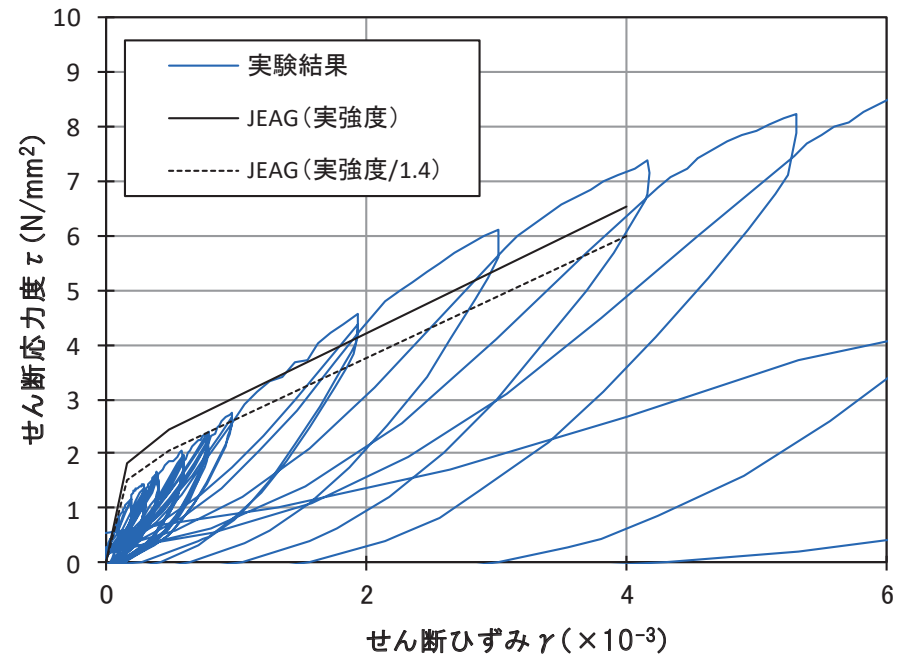
## ■実験結果の特徴(乾燥試験体[1])

- ・初期の剛性については、設計で用いている評価式(JEAG式\*<sup>1</sup>)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 $S_s$ 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(せん断ひずみ: $4.0 \times 10^{-3}$ )付近では、JEAG式に対し、実験結果の耐力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。
- ・インナーラップによる繰返し加力や主要変形角での5回の繰返し加力を実施した結果、上記のとおりJEAG式を上回ることから、乾燥した試験体でも、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。

\* 1: JEAG式によるスケルトンカーブは、現場封緘養生供試体の圧縮強度試験結果に基づき作成。また、設計基準強度相当(1/1.4)も合わせて示す。設計基準強度相当として1/1.4としているのは、「日本原子力学会標準 原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準:2015(一般社団法人 日本原子力学会)」による。



乾燥試験体[1]の耐震実験結果(荷重-変形関係)

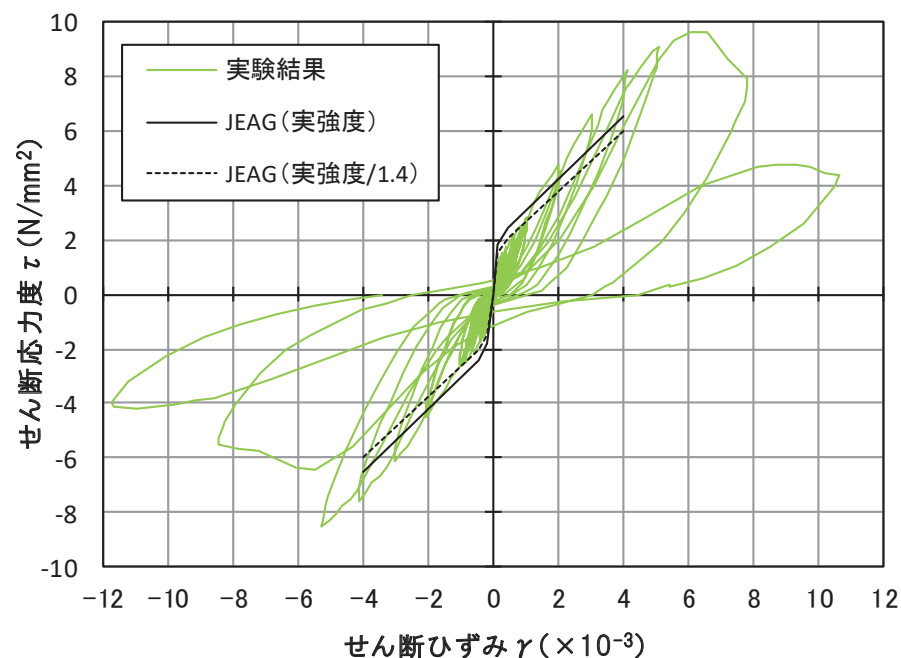
乾燥試験体[1]の耐震実験結果(荷重-変形関係)  
正側拡大図

## 耐震実験[3]の結果について(実験結果)(4)

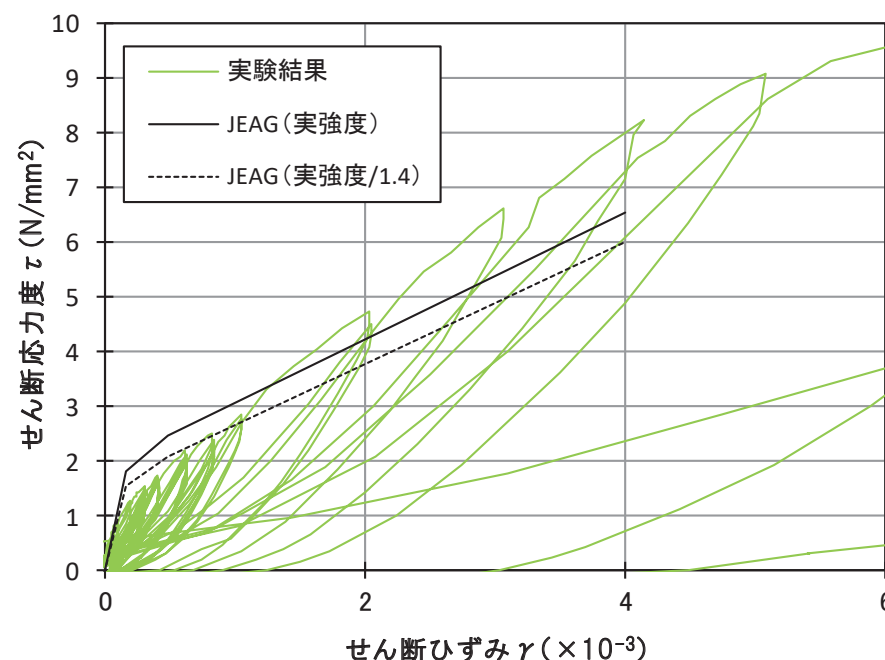
## ■ 実験結果の特徴(乾燥試験体[2])

- ・初期の剛性については、設計で用いている評価式(JEAG式\*<sup>1</sup>)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 $S_s$ 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(せん断ひずみ: $4.0 \times 10^{-3}$ )付近では、JEAG式に対し、実験結果の耐力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。
- ・インナーループによる繰返し加力や主要変形角での5回の繰返し加力を実施した結果、上記のとおりJEAG式を上回ること、また、既実施の乾燥試験体[1]の結果と比較すると、初期の剛性も含め、各サイクルでの荷重-変形関係は同等であることから、さらに乾燥した試験体でも、乾燥試験体[1]と同様に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。

\* 1: JEAG式によるスケルトンカーブは、現場封緘養生供試体の圧縮強度試験結果に基づき作成。また、設計基準強度相当(1/1.4)も合わせて示す。設計基準強度相当として1/1.4としているのは、「日本原子力学会標準 原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準:2015(一般社団法人 日本原子力学会)」による。



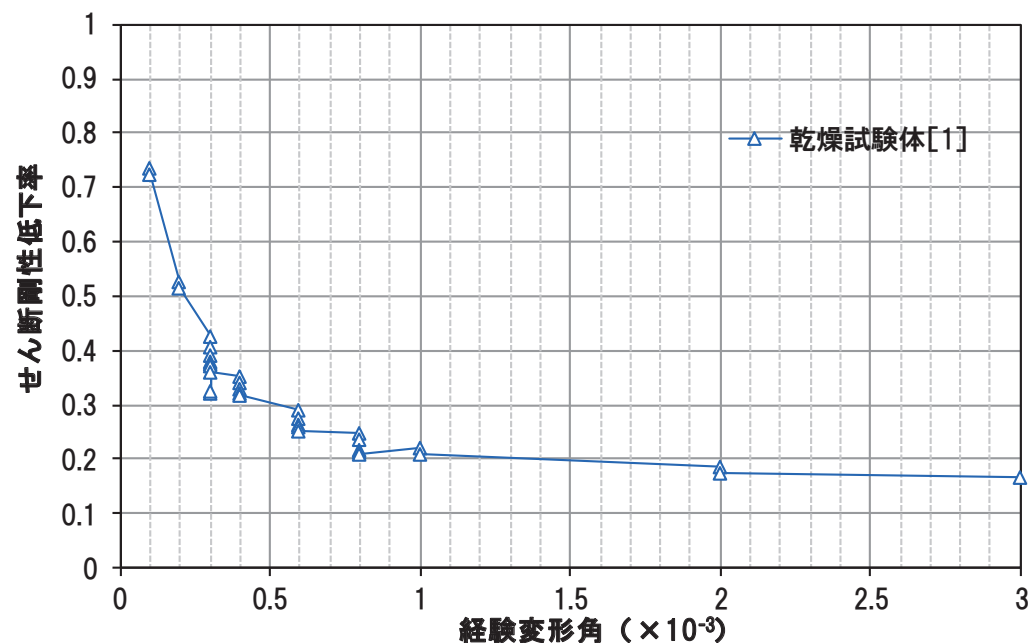
乾燥試験体[2]の耐震実験結果(荷重-変形関係)

乾燥試験体[2]の耐震実験結果(荷重-変形関係)  
正側拡大図

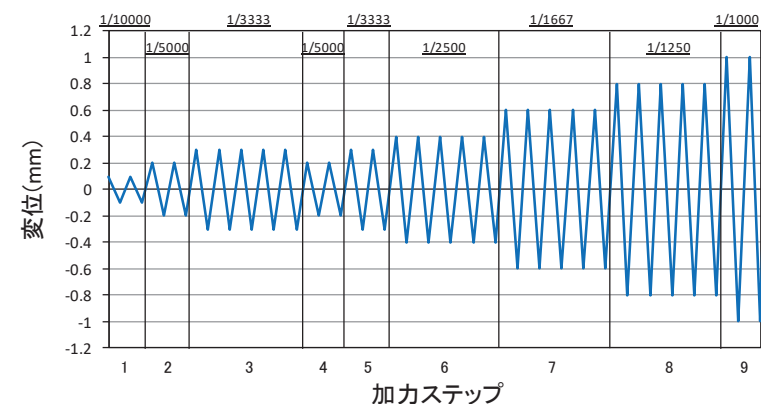
## 耐震実験[3]の結果について(実験結果)(5)

## ■実験結果の特徴②(繰返しの影響)(乾燥試験体[1])

- ①インナーラップとなる繰返し加力では、せん断剛性はわずかながら低下するものの、顕著な低下は確認されなかった。
- 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回目以降は顕著な低下は確認されなかった。
- ③加力ステップ1～3を事前加力、ステップ4以降を本加力としてみた場合、加力ステップ3と5の剛性低下率の比較から、同じ変形量による事前損傷を受けた場合でもほとんど剛性に变化は見られない。



乾燥試験体[1]の剛性低下率(せん断変形)



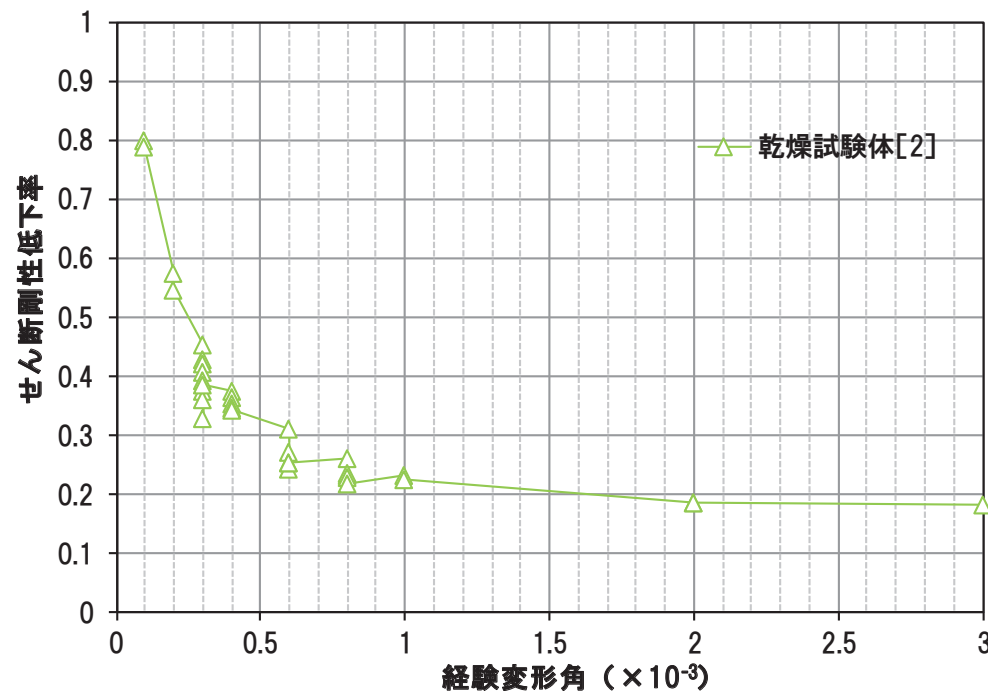
加力概念図

△部分が繰返しステップ部分を示す

## 耐震実験[3]の結果について(実験結果)(6)

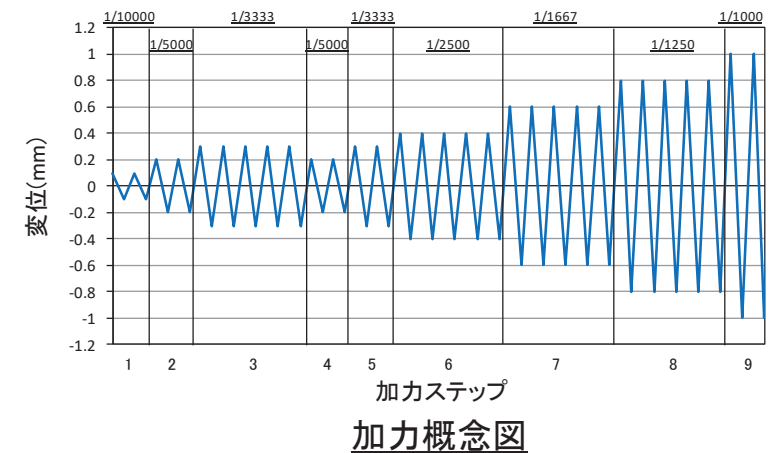
## ■実験結果の特徴②(繰返しの影響)(乾燥試験体[2])

- ①インナーloopとなる繰返し加力では、せん断剛性はわずかながら低下するものの、顕著な低下は確認されなかった。
- 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回目以降は顕著な低下は確認されなかった。
- ③加力ステップ1~3を事前加力、ステップ4以降を本加力としてみた場合、加力ステップ3と5の剛性低下率の比較から、同じ変形量による事前損傷を受けた場合でもほとんど剛性に変化は見られない。  
(繰返し部分の詳細結果は次頁に示す)

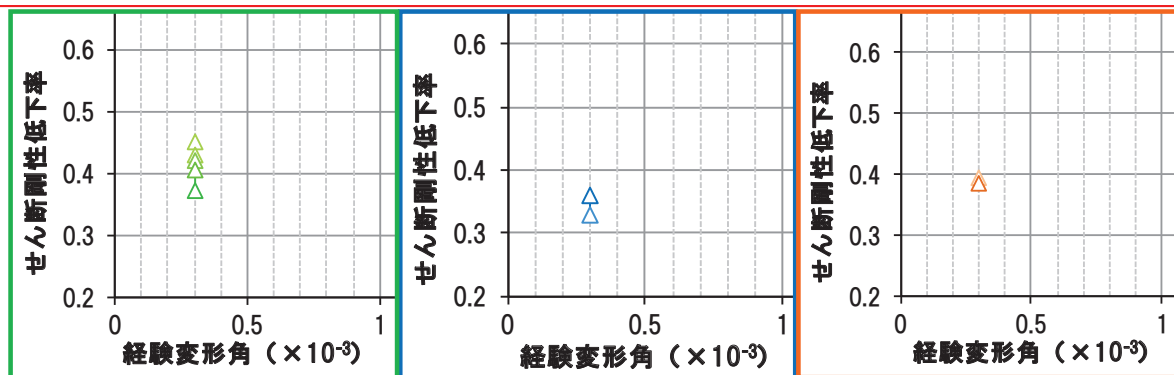


乾燥試験体[2]の剛性低下率(せん断変形)

△部分が繰返しステップ部分を示す



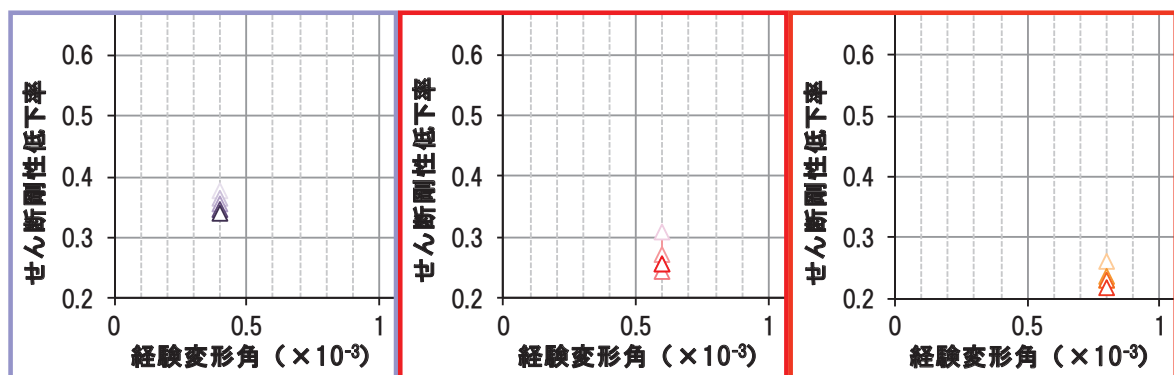
## 耐震実験[3]の結果について(実験結果)(7)



ステップ3

ステップ4

ステップ5



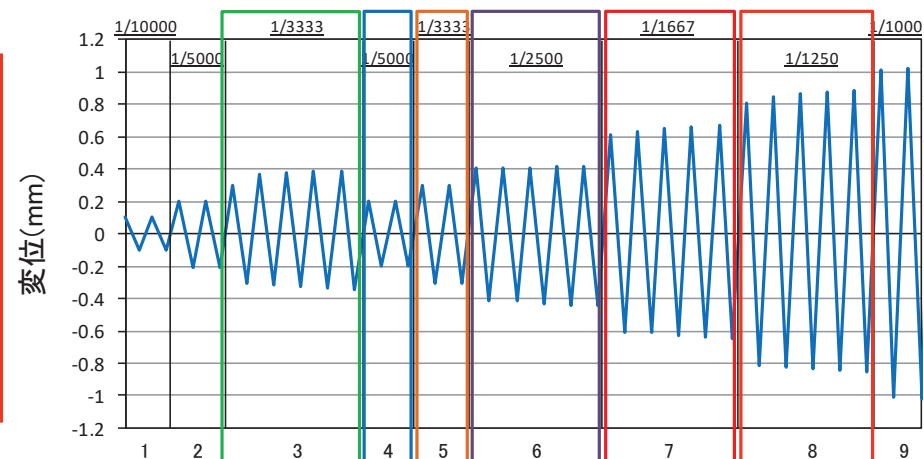
ステップ6

ステップ7

ステップ8

乾燥試験体[2] 剛性低下率(せん断変形)(拡大図)

加力ステップ1~3を事前加力, ステップ4以降を本加力としてみた場合, 加力ステップ3と5の剛性低下率の比較から, 同じ変形量による事前損傷を受けた場合でもほとんど剛性に変化は見られない。

加力ステップ  
加力概念図

## ■耐震実験[3]のまとめ

- ・乾燥収縮の影響を受けた試験体は, 初期の剛性については, JEAG式に対し4割程度低下した結果となったものの, 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:  $2.0 \times 10^{-3}$ )付近や終局耐力(せん断ひずみ:  $4.0 \times 10^{-3}$ )付近では, JEAG式に対し, 実験結果の耐力は上回る結果となった。また, 繰返し加力が剛性低下へ与える影響について, 有意な低下は認められなかった。
- ・また, インナーループによる繰返し加力や主要変形角での5回の繰返し加力の結果, 乾燥し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。

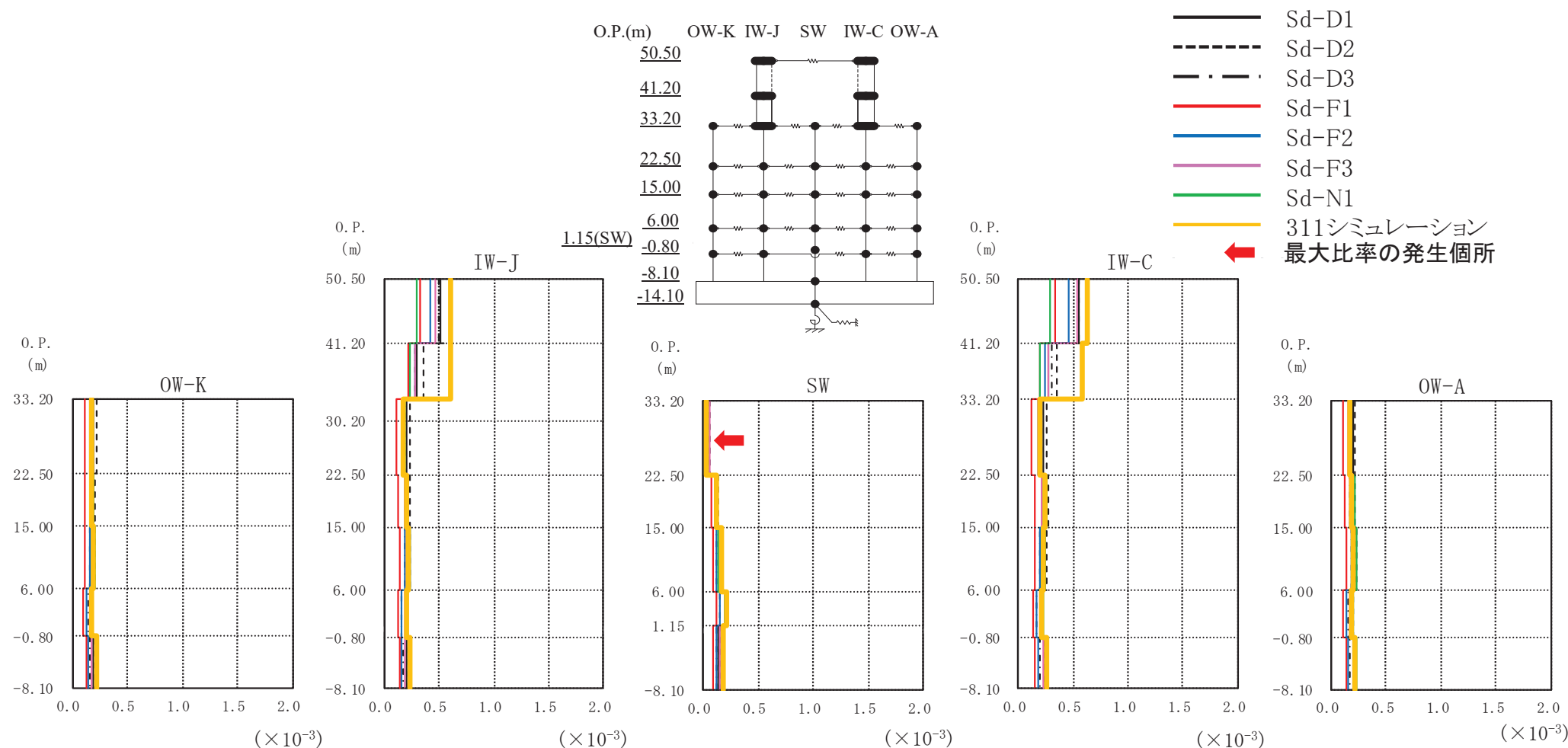
## 2.3 指摘事項に対する回答③

- 弾性設計用地震動Sdに対する応答(せん断ひずみ)と3.11地震シミュレーション解析による応答との比較を行う。
- 3.11地震の地震後健全性の評価として、シミュレーション解析結果や地震後の点検結果に基づき建屋は初期剛性が低下しているものの概ね弾性範囲であり、鉄筋が弾性範囲であることを確認している。
- 比較の結果、弾性設計用地震動Sdに対する応答は、3.11地震応答とおおむね同等以下である。なお、一部、弾性設計用地震動Sdに対する応答が3.11地震応答を上回るが、3.11地震での最大応答せん断ひずみよりも小さいことがわかる。



## 弾性設計用地震動Sdに対する応答と3.11地震シミュレーションの比較(1)

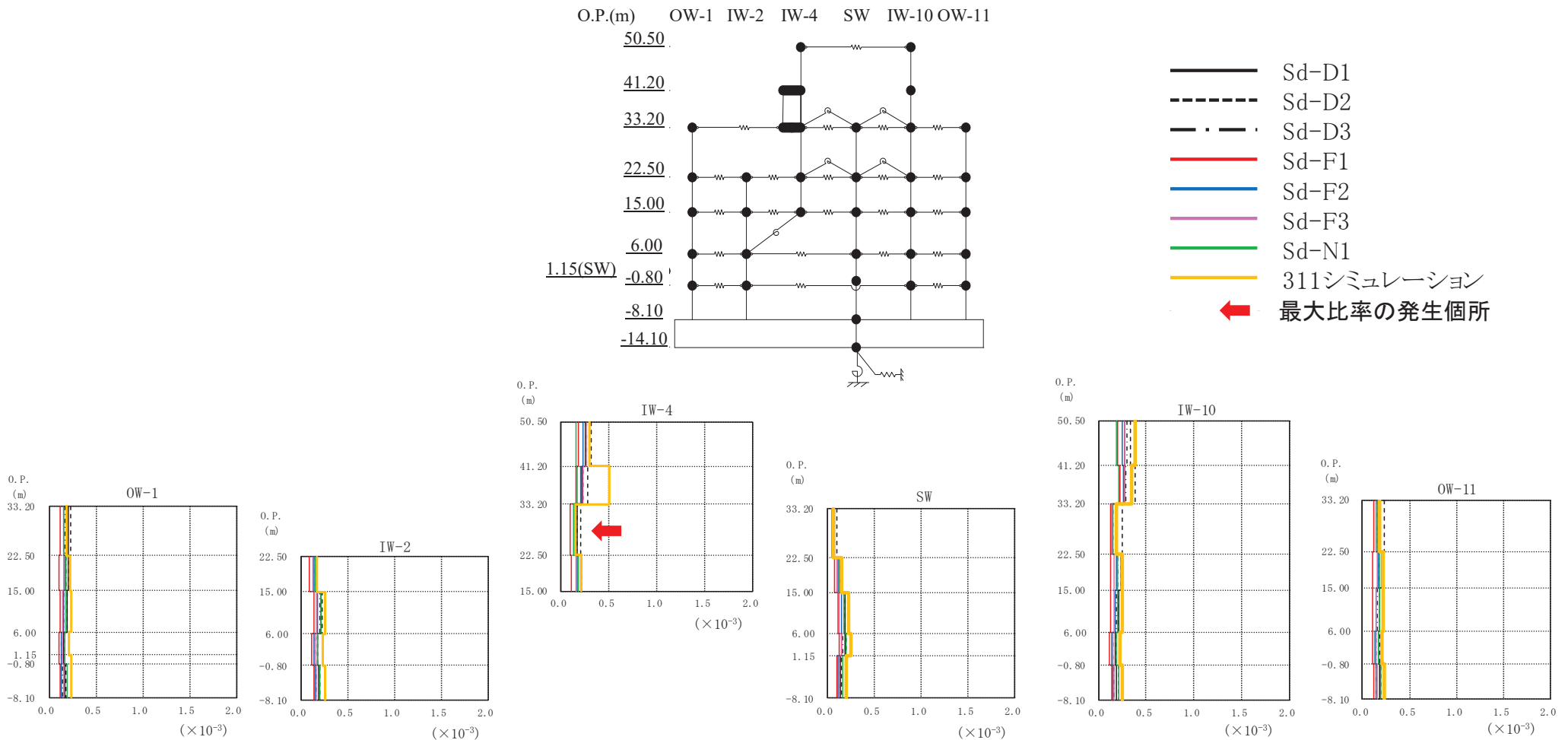
- 原子炉建屋(NS方向)における, 弾性設計用地震動Sdに対する最大応答せん断ひずみと3.11地震のシミュレーション解析で得られた最大応答せん断ひずみの比較を示す。
- 一部, 弾性設計用地震動Sdによる応答が, 3.11地震の応答を上回るものの最大でも1.7倍程度であり, せん断ひずみの値は3.11地震での最大応答せん断ひずみ $0.63 \times 10^{-3}$ よりも十分小さいこと, また, 全体としておおむね3.11地震の応答が大きい。



弾性設計用地震動Sdに対する応答と3.11地震応答の比較(原子炉建屋, NS方向, 最大応答せん断ひずみ)

## 弾性設計用地震動Sdに対する応答と3.11地震シミュレーションの比較(2)

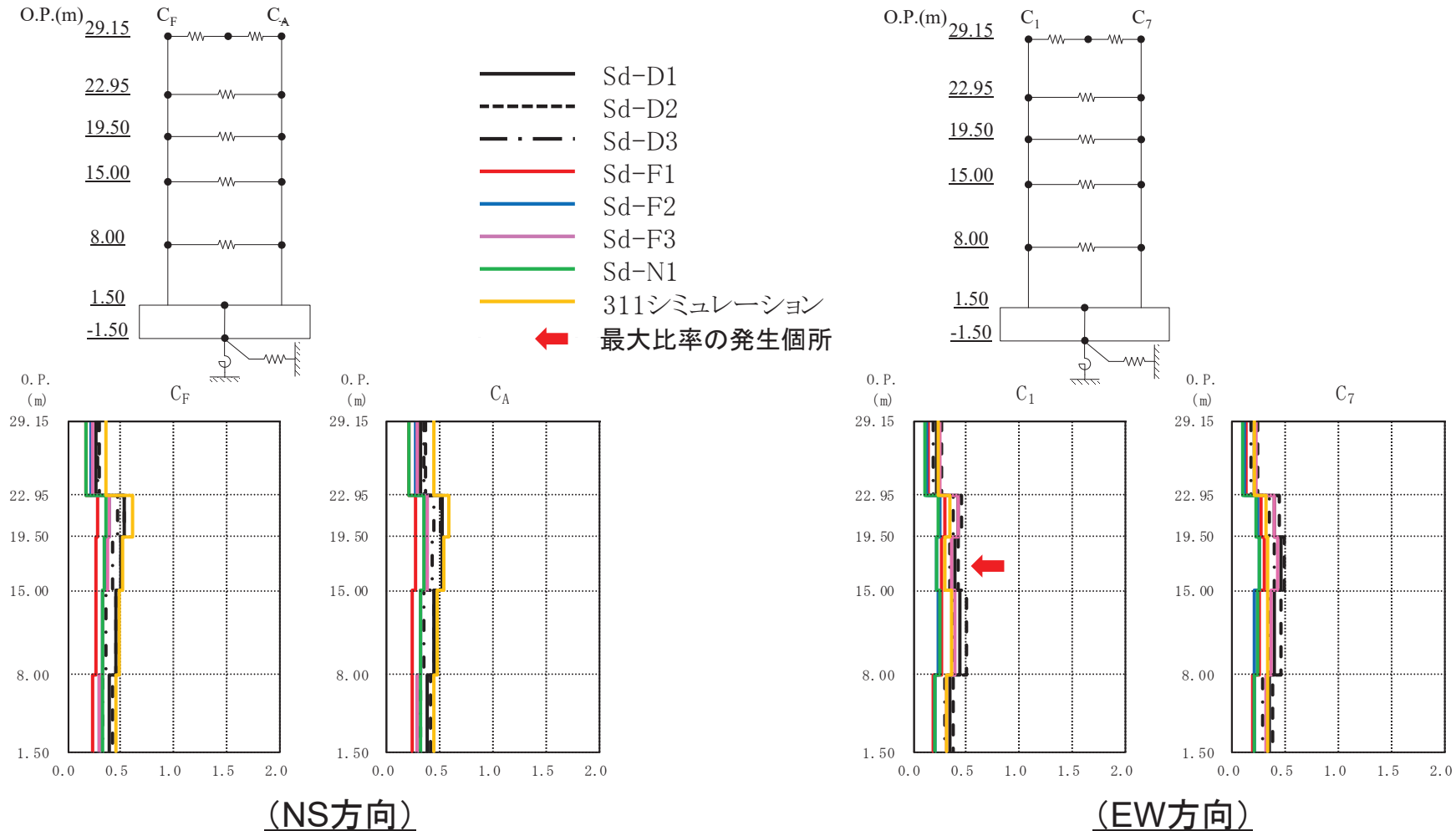
- 原子炉建屋(EW方向)における、弾性設計用地震動Sdに対する最大応答せん断ひずみと3.11地震のシミュレーション解析で得られた最大応答せん断ひずみの比較を示す。
- 一部、弾性設計用地震動Sdによる応答が、3.11地震の応答を上回るものの最大でも1.3倍程度であり、せん断ひずみの値は3.11地震での最大応答せん断ひずみ $0.63 \times 10^{-3}$ よりも十分小さいこと、また、全体としておおむね3.11地震の応答が大きい。



弾性設計用地震動Sdに対する応答と3.11地震応答の比較(原子炉建屋, EW方向, 最大応答せん断ひずみ)

## 弾性設計用地震動Sdに対する応答と3.11地震シミュレーションの比較(3)

- 制御建屋における，弾性設計用地震動Sdに対する最大応答せん断ひずみと3.11地震のシミュレーション解析で得られた最大応答せん断ひずみの比較を示す。
- NS方向は，全ての軸，階で3.11地震の応答が，弾性設計用地震動Sdによる応答を上回る。
- EW方向は，弾性設計用地震動Sdによる応答が，3.11地震の応答を上回るものの最大でも1.4倍程度であり，せん断ひずみの値は3.11地震での最大応答せん断ひずみ $0.61 \times 10^{-3}$ よりも十分小さい。

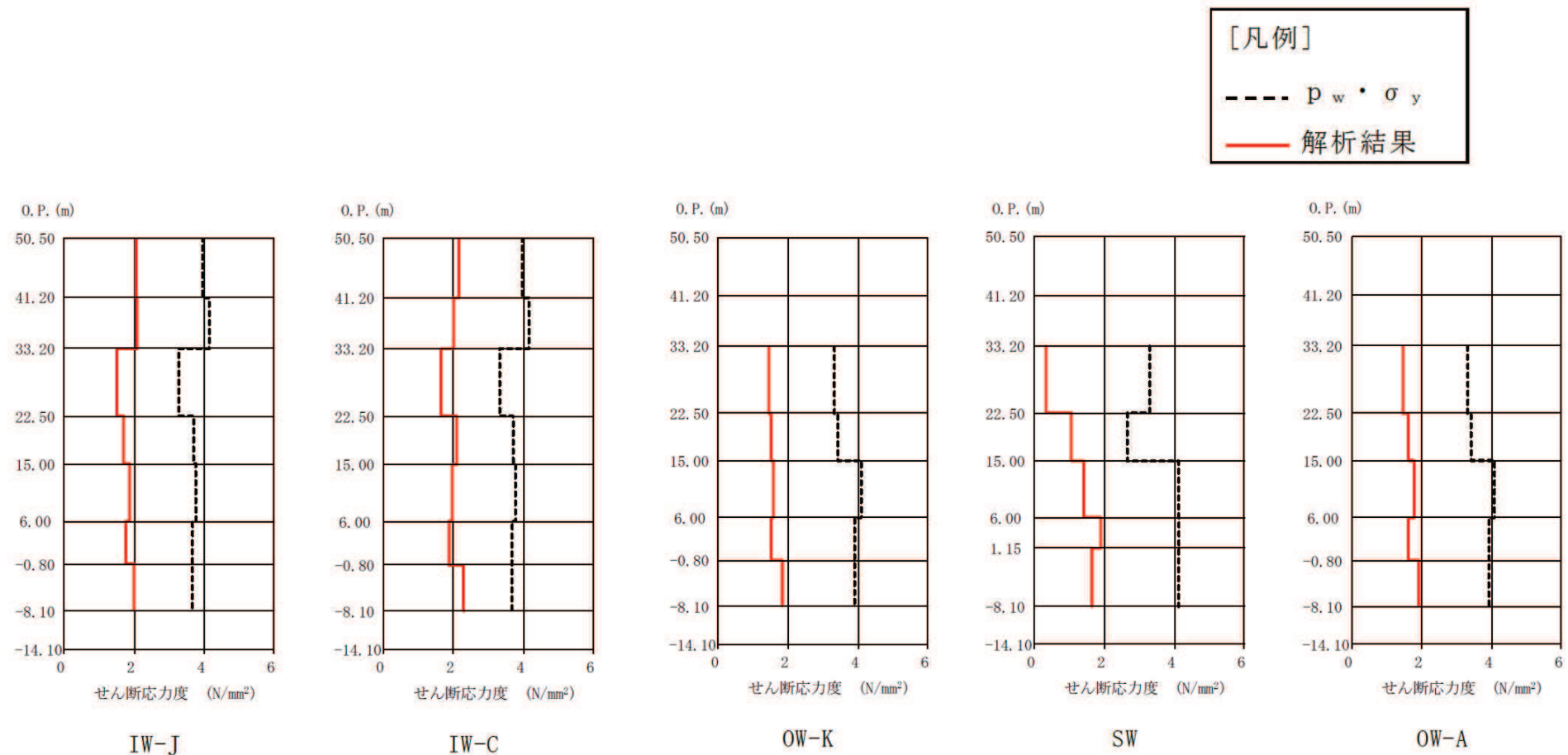


弾性設計用地震動Sdに対する応答と3.11地震応答の比較(制御建屋, 最大応答せん断ひずみ)

## 3.11地震シミュレーション解析による耐震壁の評価結果(1)

- 原子炉建屋(NS方向)について、3.11地震のシミュレーション解析により得られた各階のせん断応力度を解析モデルの軸ごとに、設計配筋量のみで負担できる短期許容せん断応力度( $p_w \cdot \sigma_y$ )と併せて示す。
- 各階のせん断応力度は、設計配筋量のみで負担できる短期許容せん断応力度以下である。

注記\*  $p_w$ :耐震壁の設計鉄筋比(タテ・ヨコ筋のうち鉄筋量の少ない方による値で、上限を1.2%とする。)  
 $\sigma_y$ :鉄筋の短期許容応力度(SD345:345N/mm<sup>2</sup>)

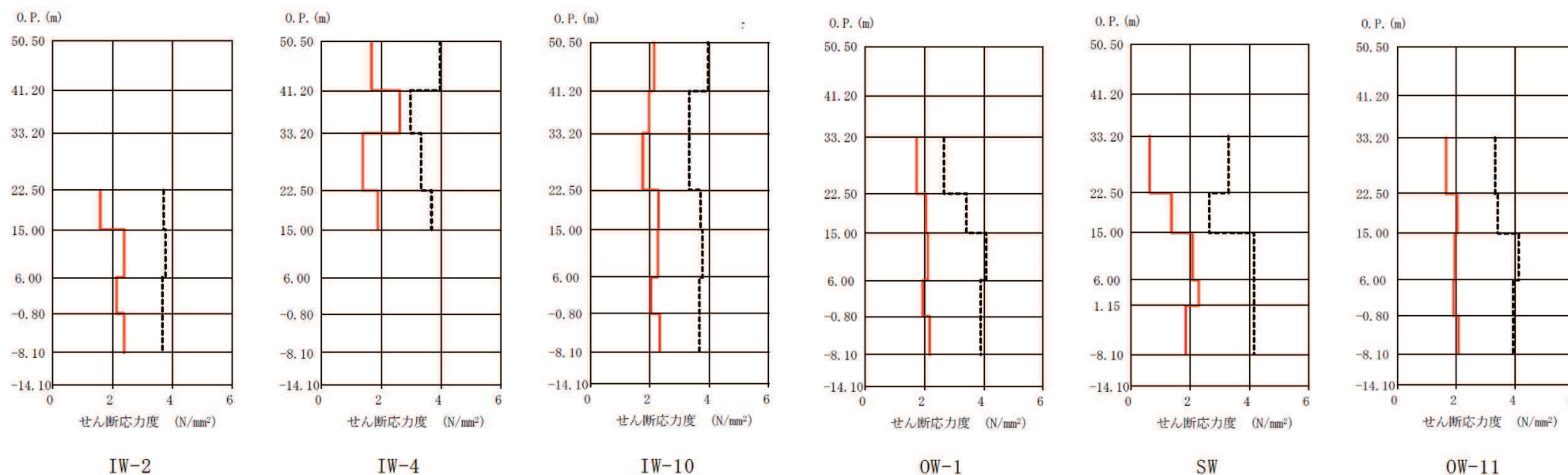
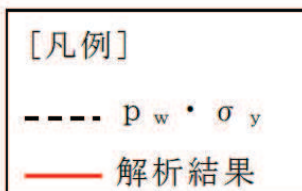


## 3.11地震時の耐震壁のせん断応力度(原子炉建屋, NS方向)

## 3.11地震シミュレーション解析による耐震壁の評価結果(2)

- 原子炉建屋(EW方向)について、3.11地震のシミュレーション解析により得られた各階のせん断応力度を解析モデルの軸ごとに、設計配筋量のみで負担できる短期許容せん断応力度( $p_w \cdot \sigma_y^*$ )と併せて示す。
- 各階のせん断応力度は、設計配筋量のみで負担できる短期許容せん断応力度以下である。

注記\*  $p_w$ :耐震壁の設計鉄筋比(タテ・ヨコ筋のうち鉄筋量の少ない方による値で、上限を1.2%とする。)  
 $\sigma_y$ :鉄筋の短期許容応力度(SD345:345N/mm<sup>2</sup>)

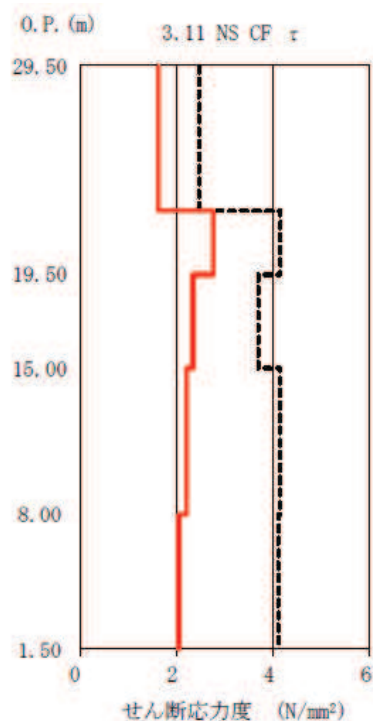
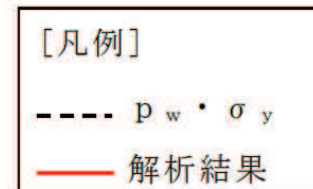


3.11地震時の耐震壁のせん断応力度(原子炉建屋, EW方向)

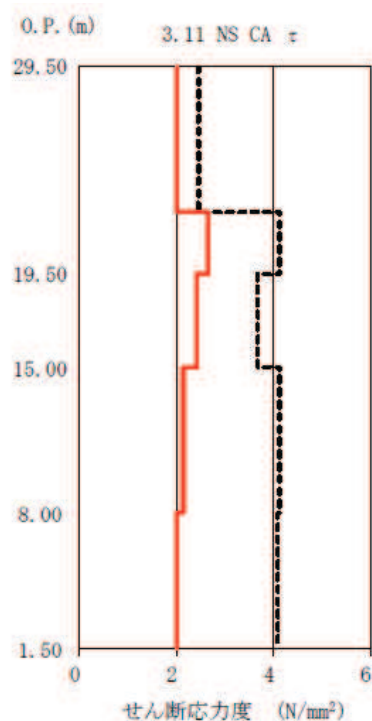
## 3.11地震シミュレーション解析による耐震壁の評価結果(3)

- 制御建屋について、3.11地震のシミュレーション解析により得られた各階のせん断応力度を解析モデルの軸ごとに、設計配筋量のみで負担できる短期許容せん断応力度 ( $p_w \cdot \sigma_y$ ) と併せて示す。
- 各階のせん断応力度は、設計配筋量のみで負担できる短期許容せん断応力度以下である。

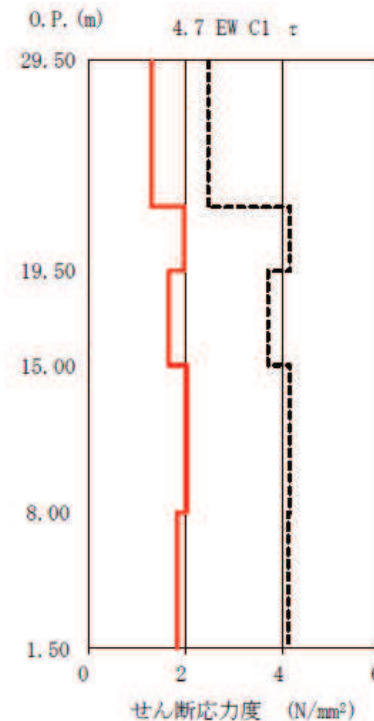
注記 \*  $p_w$ : 耐震壁の設計鉄筋比 (タテ・ヨコ筋のうち鉄筋量の少ない方による値で、上限を1.2%とする。)  
 $\sigma_y$ : 鉄筋の短期許容応力度 (SD345: 345N/mm<sup>2</sup>)



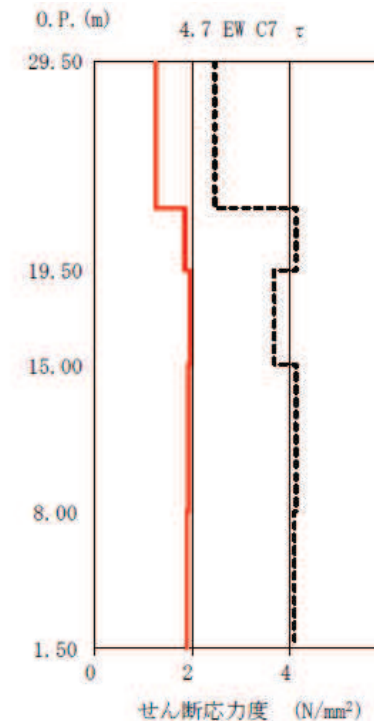
CF



CA



C1



C7

(NS方向)

(EW方向)

3.11地震時の耐震壁のせん断応力度(制御建屋)

### 3. まとめ

- 弾性設計用地震動 $S_d$ に対する評価方針の検討にあたって、
  - ①「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」に基づく方針の確認
  - ②初期剛性低下を考慮していることを踏まえた許容限界の検討を踏まえて、評価方針を検討した。
  
- 検討の結果、弾性設計用地震動 $S_d$ に対するせん断ひずみの許容限界を新たに検討する必要はないものと判断し、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」に基づき、おおむね弾性範囲であることを確認する方針とする。
  
- おおむね弾性範囲であることについては、発生する応力に対して、建築基準法等の安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度を許容限界と設定する。
  
- また、弾性設計用地震動 $S_d$ に対する設計結果としての応答(せん断ひずみ)と3.11地震のシミュレーション解析結果を比較し、おおむね同等以下であることを確認した。