

# 女川原子力発電所2号炉 初期剛性低下の要因とその影響に関する耐震実験について

---

平成30年7月5日  
東北電力株式会社

# 審査会合における指摘事項

No	審査会合日	項目	説明資料
32	2017年12月26日 第537回審査会合	地震観測記録の傾向分析における剛性低下の傾向について、本件に関する実験等を含め剛性低下の要因を踏まえた考察を加え整理して提示すること。	3. 耐震実験まとめ
34	2017年12月26日 第537回審査会合	本件に関する実験等について、適合性審査に必要な検討内容とそれ以外の検討内容、例えば審査以降も継続して研究を実施していく内容とを区分、整理した上で、適合性審査に必要な検討内容についてはその結果を速やかに提示すること。	後日説明予定(2018年8月)
35	2017年12月26日 第537回審査会合	繰り返し作用する地震力が剛性低下に与える影響について、試験結果のうち加力ステップにおける剛性低下に対する考察を適切に加え再整理して提示すること。	3. 耐震実験まとめ
40	2017年12月26日 第537回審査会合	地震による事前損傷が終局耐力に与える影響に関する耐震実験について、P59の図に設計基準強度及び実強度からJEAG式に基づき設定したスケルトンカーブを重ねて提示するとともに、2,000 $\mu$ までのスケルトンカーブの傾きについての比較及び考察を提示すること。	2. 耐震実験 2.2 耐震実験[2]
41	2017年12月26日 第537回審査会合	乾燥収縮が終局耐力に与える影響に関する耐震実験について、試験体に用いている骨材が実機と異なることを踏まえて、実験の女川原子力発電所2号炉への適用性を整理して提示すること。	2. 耐震実験 2.4 耐震実験結果の実機への適用性
42	2017年12月26日 第537回審査会合	乾燥収縮が終局耐力に与える影響に関する耐震実験について、P66の図に設計基準強度からJEAG式に基づき設定したスケルトンカーブを重ねて提示すること。	2. 耐震実験 2.3 耐震実験[3]
43	2017年12月26日 第537回審査会合	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について、耐震実験3の方が建設当初からの剛性低下量と整合する根拠を提示すること。	3. 耐震実験まとめ
44	2017年12月26日 第537回審査会合	乾燥収縮しやすい試験体を用いた場合の地震による事前損傷が終局耐力に与える影響について、検討の方針、内容、結果及び考察を提示すること。	2. 耐震実験 2.3 耐震実験[3] 3. 耐震実験まとめ
49	2017年12月26日 第537回審査会合	地震による事前損傷が終局耐力に与える影響及び乾燥収縮が終局耐力に与える影響に係る耐震実験結果の設計への反映方針について提示すること。	3. 耐震実験まとめ

## 1. 全体概要

## 2. 耐震実験

- 2.1 耐震実験[1] 耐震壁に対する繰返し地震力の影響
- 2.2 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
- 2.3 耐震実験[3] 乾燥収縮が終局耐力に与える影響
- 2.4 耐震実験結果の実機への適用性
- 2.5 乾燥収縮等が初期剛性や終局耐力等に与える影響に関する文献について

## 3. 耐震実験まとめ

# 1. 全体概要

## 2. 耐震実験

- 2.1 耐震実験[1] 耐震壁に対する繰返し地震力の影響
- 2.2 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
- 2.3 耐震実験[3] 乾燥収縮が終局耐力に与える影響
- 2.4 耐震実験結果の実機への適用性
- 2.5 乾燥収縮等が初期剛性や終局耐力等に与える影響に関する文献について

## 3. 耐震実験まとめ

# 全体フロー図における耐震実験の位置づけ

## 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地震等に対する建屋の振動特性の把握
- 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)
- 繰返し地震力の影響の有無(耐震実験[1])
- 支持地盤の剛性低下の有無

### 【共通して使用しているコンクリート材料の影響検討】

- 実機コンクリート圧縮強度の設計基準強度との比較
- 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(耐震実験[2])
- 乾燥収縮が終局耐力に与える影響確認(耐震実験[3])



地震応答解析モデルの策定



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ばらつき評価等)

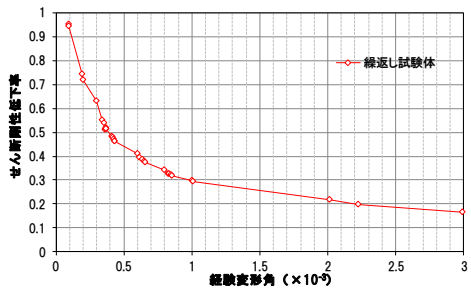
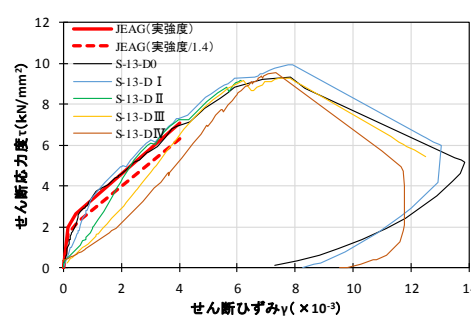
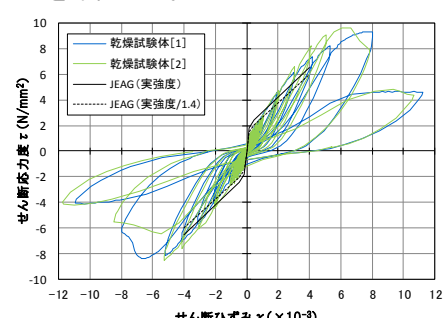
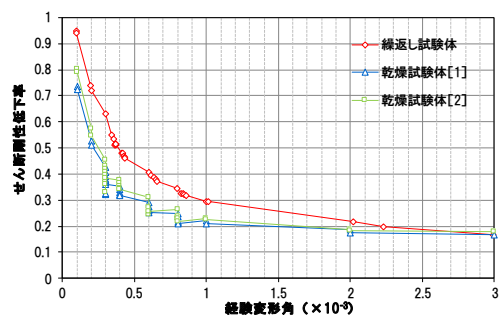


オペフロ上部耐震補強工事

# 耐震実験の全体像

	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	[2017.12.26審査会合説明]	[2017.12.26審査会合説明]	[2017.12.26審査会合説明]
	<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>➢ 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ヶ月間空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>
			[今回追加説明]
		[今回追加説明]	<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>

# 耐震実験の全体像

	耐震実験[1]	耐震実験[2]	耐震実験[3]
<p>成果 (実験毎)</p>	<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> 
<p>成果 (各実験の比較)</p>	<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)時の女川2号炉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>		
<p>耐震実験結果の まとめ</p>	<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>➢ 女川2号炉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>		

## 1. 全体概要

## 2. 耐震実験

- 2.1 耐震実験[1] 耐震壁に対する繰返し地震力の影響
- 2.2 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
- 2.3 耐震実験[3] 乾燥収縮が終局耐力に与える影響
- 2.4 耐震実験結果の実機への適用性
- 2.5 乾燥収縮等が初期剛性や終局耐力等に与える影響に関する文献について

## 3. 耐震実験まとめ



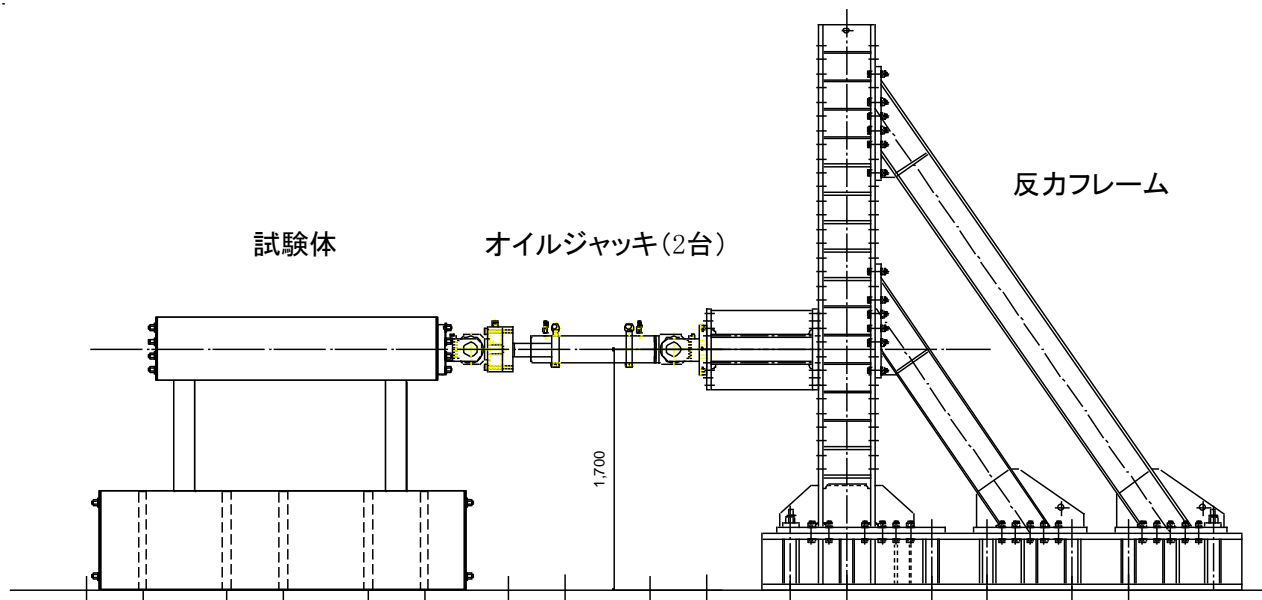
# 耐震壁に対する繰返し地震力の影響（1）

## ■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。

## ■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[1]によって確認を行った。



実験の概要

## 耐震壁に対する繰返し地震力の影響 (2)

### ■耐震実験[1]の概要

耐震実験にあたっては、**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

# 耐震壁に対する繰返し地震力の影響 (3)

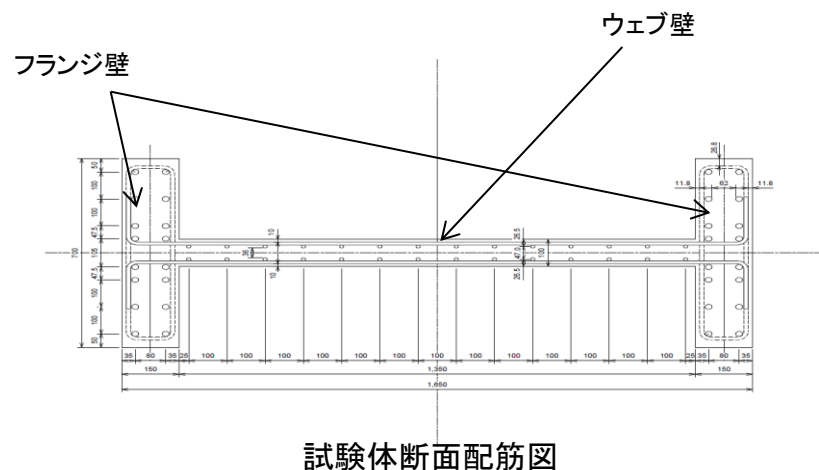
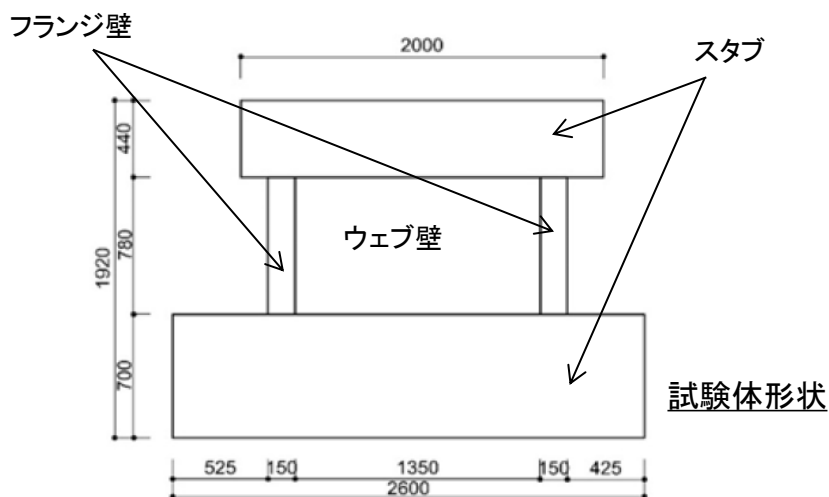
■実験の主な特徴

【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や画像処理によるひび割れ分布の把握も実施している。



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		応力制御
(単位: mm)		

鉄筋 種別・使用部位	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (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		繰返し試験体	
圧縮強度※	(N/mm <sup>2</sup> )	28.3	
材齢	(day)	39	
ヤング係数	(kN/mm <sup>2</sup> )	31.7	
ポアソン比		0.203	

※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。(設計基準強度: 21N/mm<sup>2</sup>)

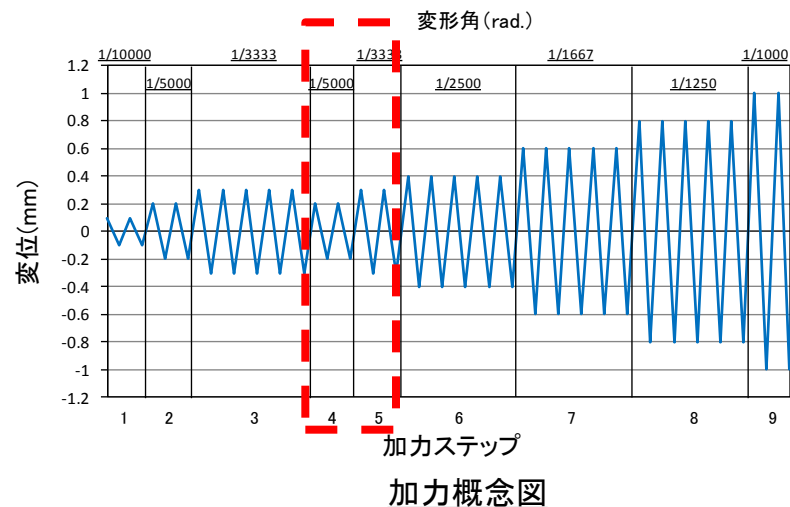
# 耐震壁に対する繰返し地震力の影響 (4)

## ■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 $R$ (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	



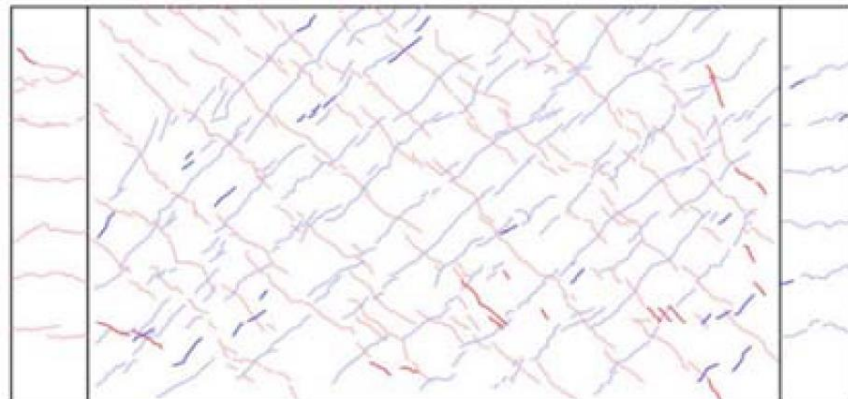
# 耐震壁に対する繰返し地震力の影響 (5)

## ■実験結果(ひび割れ図)



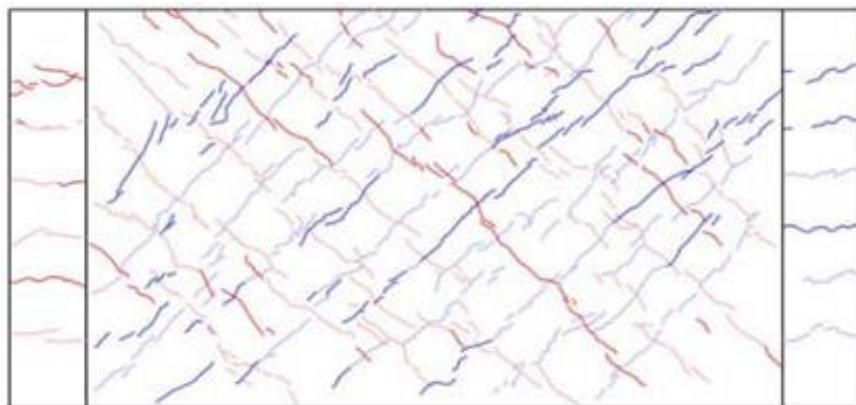
せん断すべり破壊している。

最終破壊時写真



ひび割れの大半はせん断ひび割れ

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。

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



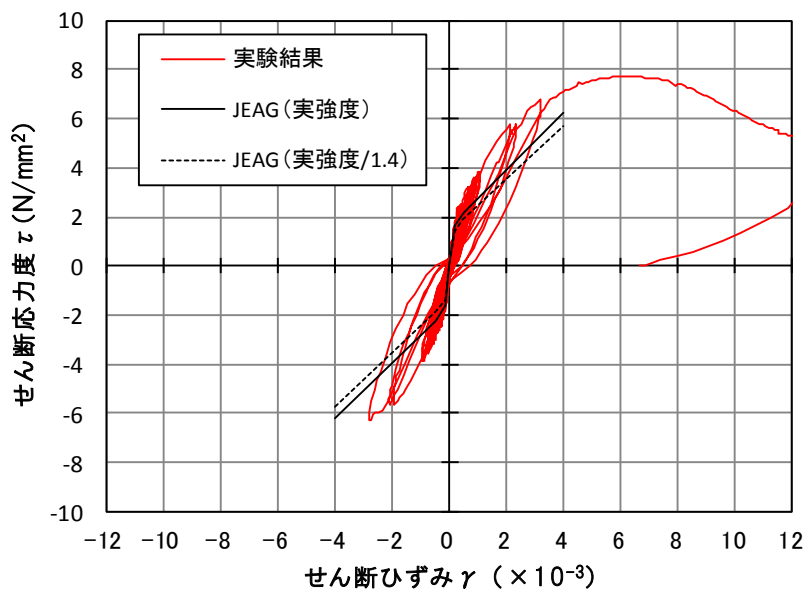
# 耐震壁に対する繰返し地震力の影響 (6)

## ■ 実験結果の特徴① (JEAG式との比較)

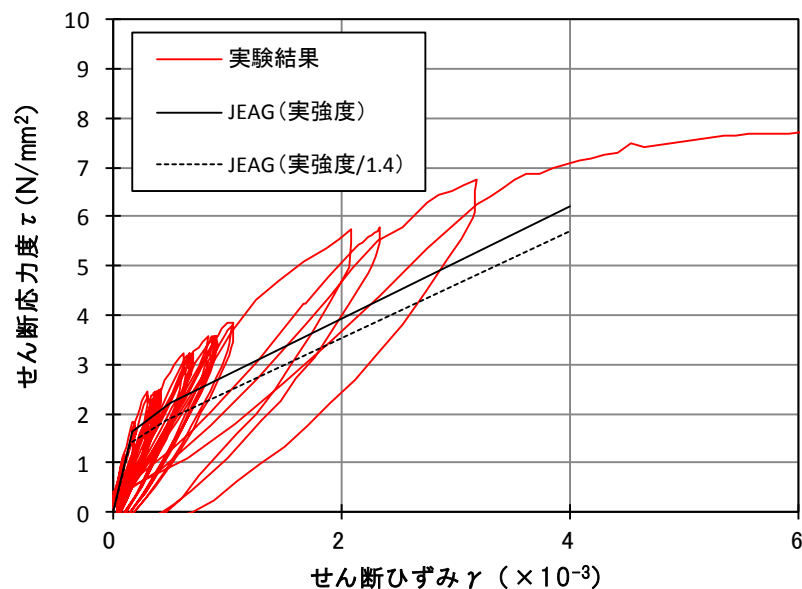
- ① 試験結果は、初期剛性部分、原子力施設建屋の基準地震動Ssに対する評価基準値(せん断ひずみ:  $2.0 \times 10^{-3}$ )付近、また、終局耐力(せん断ひずみ:  $4.0 \times 10^{-3}$ )付近全ての部分において、**設計で用いている評価式(JEAG式\*1)に対し実験結果の耐力は上回る結果となった。**
- ② インナーループによる繰返し加力\*2や主要変形角での5回の繰返し加力を実施した結果、上記のとおりJEAG式を上回ることから、**事前損傷が評価基準値付近の耐力や終局耐力に与える影響は小さいことを確認した。**

\*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。

\*2: 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、事前加力の変形量は大きくないものの、事前加力一本加力の耐震実験とみなすことができる。



繰返し試験体の耐震実験結果(荷重-変形関係)

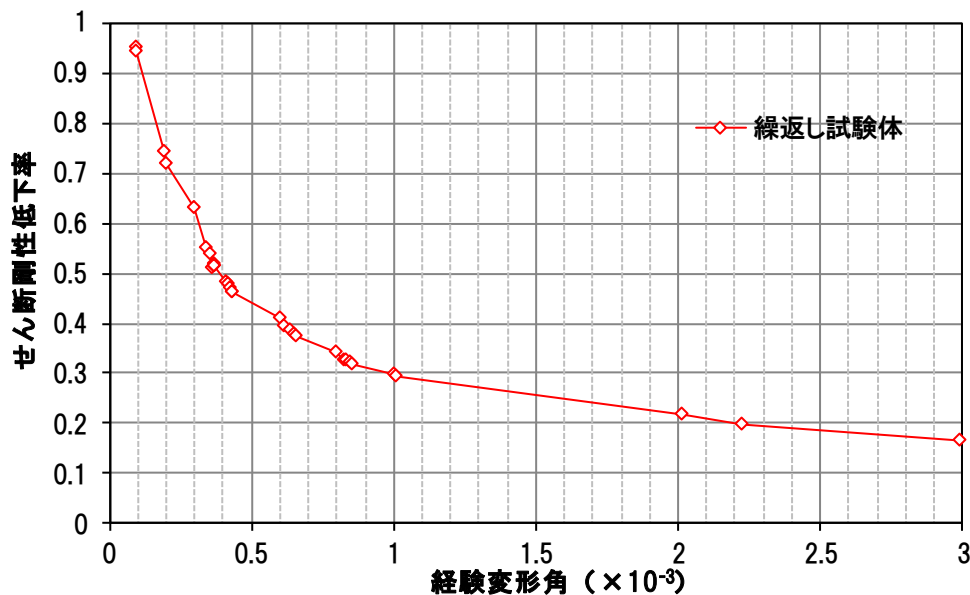


繰返し試験体の耐震実験結果(荷重-変形関係)  
正側拡大図

# 耐震壁に対する繰返し地震力の影響 (7)

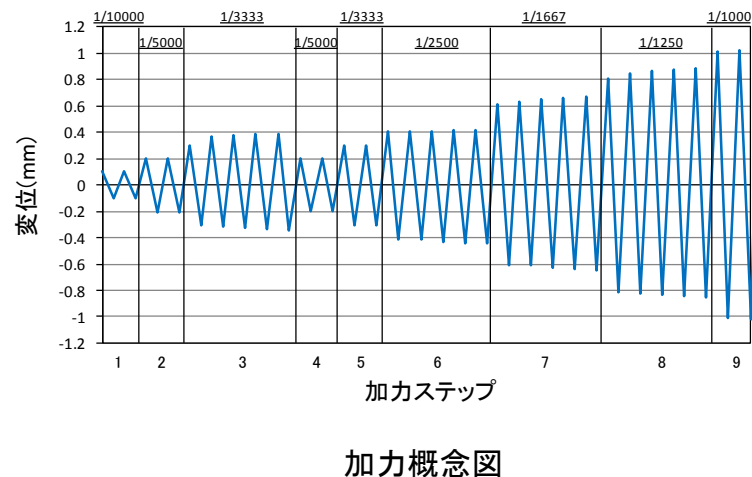
## ■ 実験結果の特徴②(繰返しの影響)

- ① インナーラッ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。
- 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。  
(繰返し部分の詳細結果は次頁に示す)

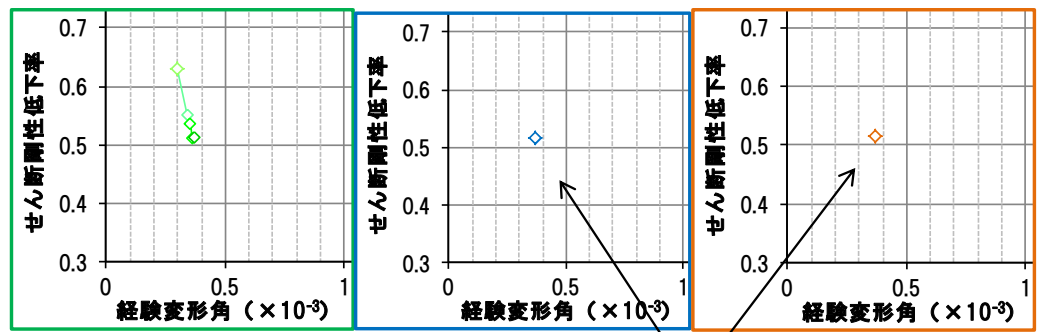


剛性低下率(せん断変形)

◇部分が繰返しステップ部分を示す



# 耐震壁に対する繰返し地震力の影響 (8)

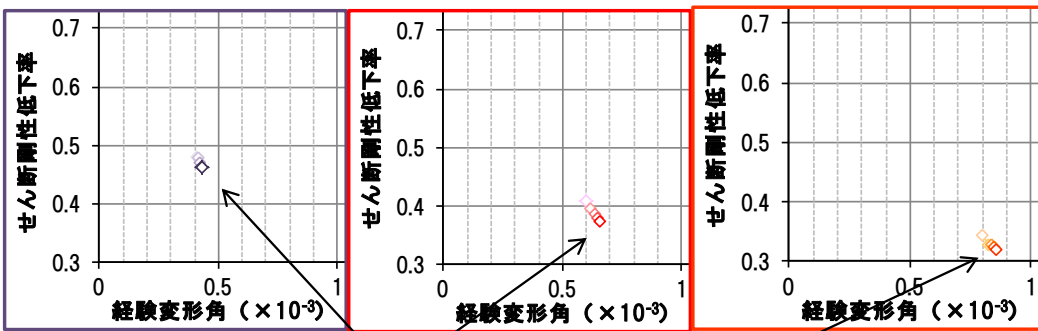


ステップ3

ステップ4

ステップ5

インナーloopとなる繰返し加力では、ほとんど剛性に变化がない



ステップ6

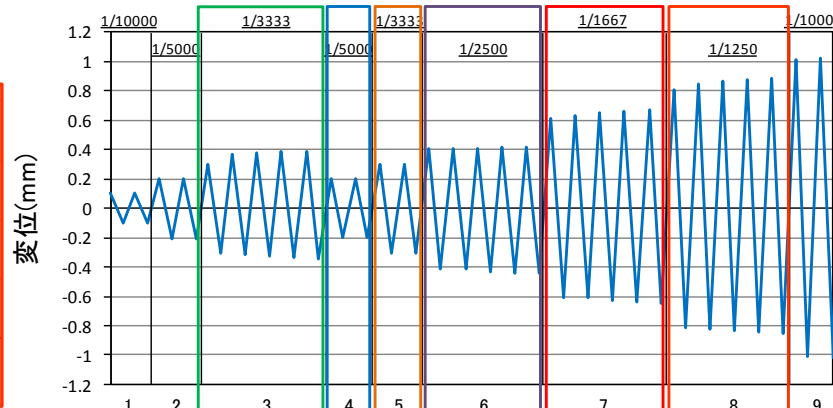
ステップ7

ステップ8

1回目より2回目の加力で多少剛性は低下するが、3回目以降では特に剛性低下の傾向は認められなかった

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变化は見られない。



加力ステップ

加力概念図

## ■耐震実験[1]のまとめ

本実験では、2005年宮城県沖の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。

また、インナーloop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. 全体概要

## 2. 耐震実験

- 2.1 耐震実験[1] 耐震壁に対する繰返し地震力の影響
- 2.2 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**
- 2.3 耐震実験[3] 乾燥収縮が終局耐力に与える影響
- 2.4 耐震実験結果の実機への適用性
- 2.5 乾燥収縮等が初期剛性や終局耐力等に与える影響に関する文献について

## 3. 耐震実験まとめ

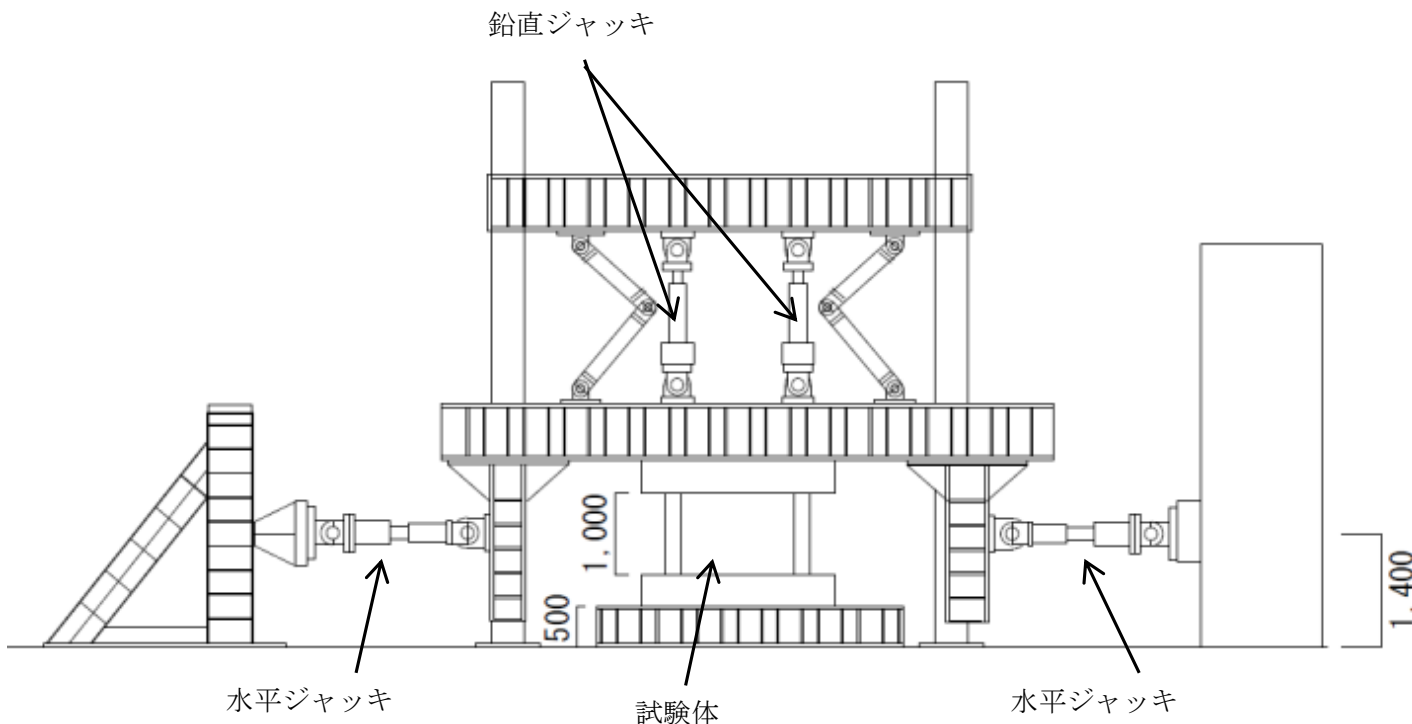
# 地震による事前損傷が終局耐力に与える影響（1）

## ■ 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

## 地震による事前損傷が終局耐力に与える影響（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。

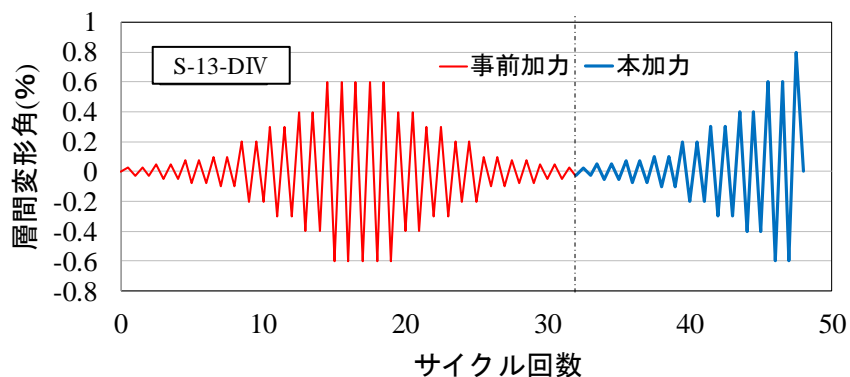
# 地震による事前損傷が終局耐力に与える影響 (3)

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 2005年宮城県沖地震: $0.1 \times 10^{-3}$ 程度 2011年東北地方太平洋沖地震 オペフロ下部: $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3}$ 程度 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評価基準値
III	$4.0 \times 10^{-3}$	JEAG4601-1991に示される耐震壁の終局点
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	サイクル数				
	R(rad.)	回				
事前加力	$\pm 0.25/1000$		2	2	2	2
	$\pm 0.50/1000$		2	2	2	2
	$\pm 0.75/1000$		5	2	2	2
	$\pm 1/1000$			2	2	2
	$\pm 2/1000$			5	2	2
	$\pm 3/1000$				2	2
	$\pm 4/1000$				5	2
	$\pm 6/1000$	0				5
	$\pm 4/1000$					2
	$\pm 3/1000$				2	2
	$\pm 2/1000$				2	2
	$\pm 1/1000$			2	2	2
	$\pm 0.75/1000$			2	2	2
	$\pm 0.50/1000$		2	2	2	2
$\pm 0.25/1000$		2	2	2	2	
本加力	$\pm 0.25/1000$	2	2			
	$\pm 0.50/1000$	2	2			
	$\pm 0.75/1000$	2	2			
	$\pm 1/1000$	2	2			
	$\pm 2/1000$	2	2			
	$\pm 3/1000$	2	2			
	$\pm 4/1000$	2	2			
	$\pm 6/1000$	2	2			
$\pm 8/1000$	押切	押切				

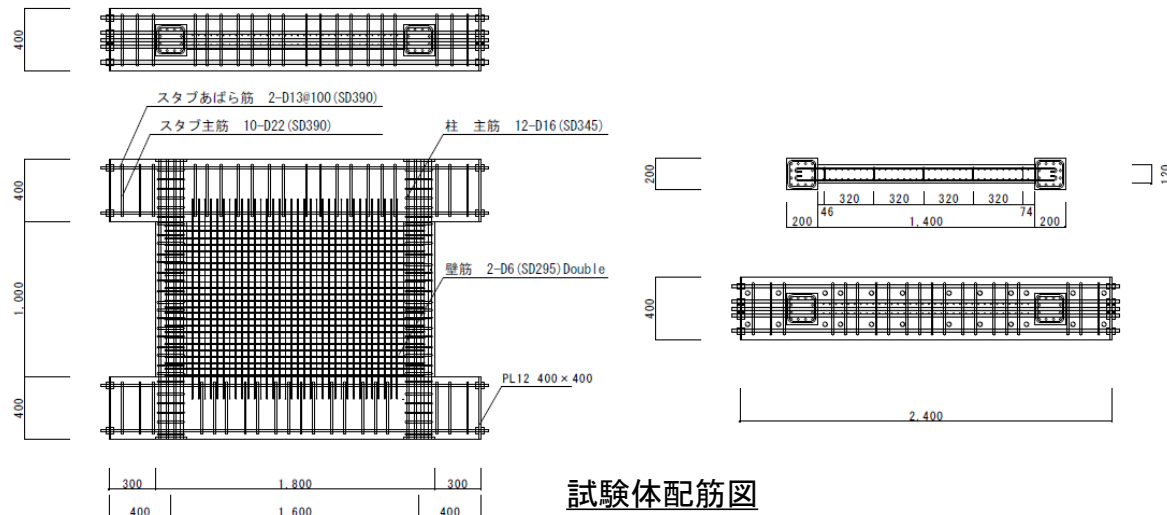


加力概念図

# 地震による事前損傷が終局耐力に与える影響 (4)

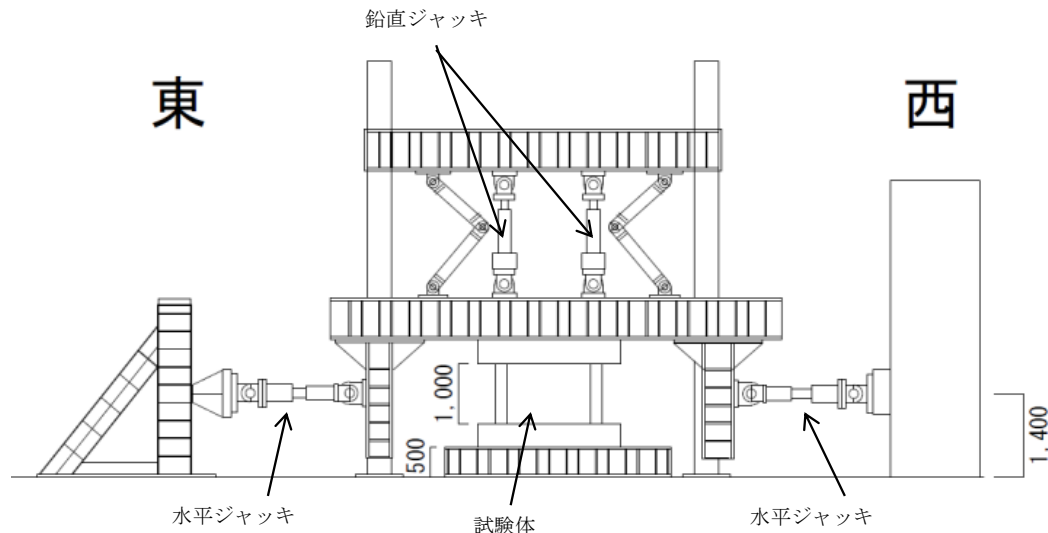
試験体諸元

		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
柱	横筋比(%)	1.32
	コンクリート強度 $F_c(N/mm^2)$	27
	せん断スパン比	0.29
スタブ	断面 $b \times D(mm \times mm)$	200 $\times$ 200
	主筋	12-D16(SD345)
	帯筋	2-D10(SD345)@60
壁	断面 $b \times D(mm \times mm)$	400 $\times$ 400
	主筋	12-D16(SD390)
	あばら筋	2-D10(SD390)@100



コンクリートの圧縮強度試験結果

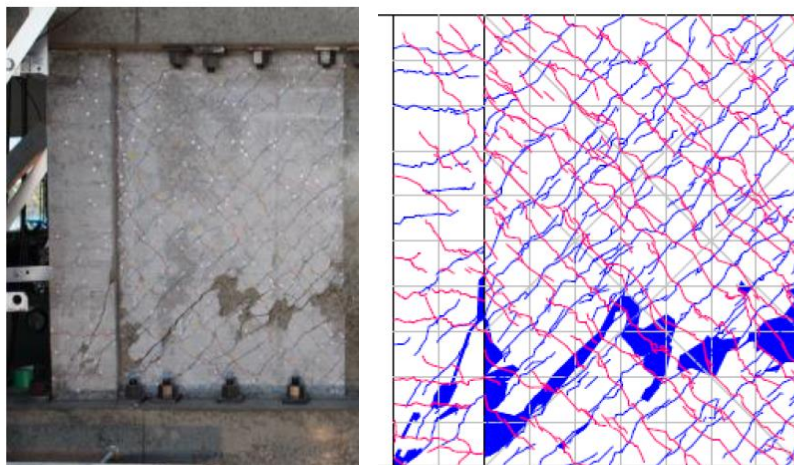
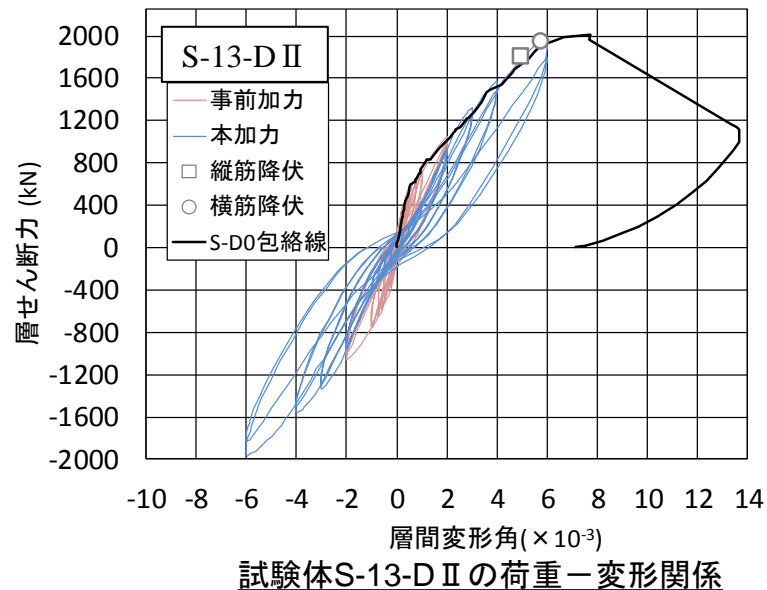
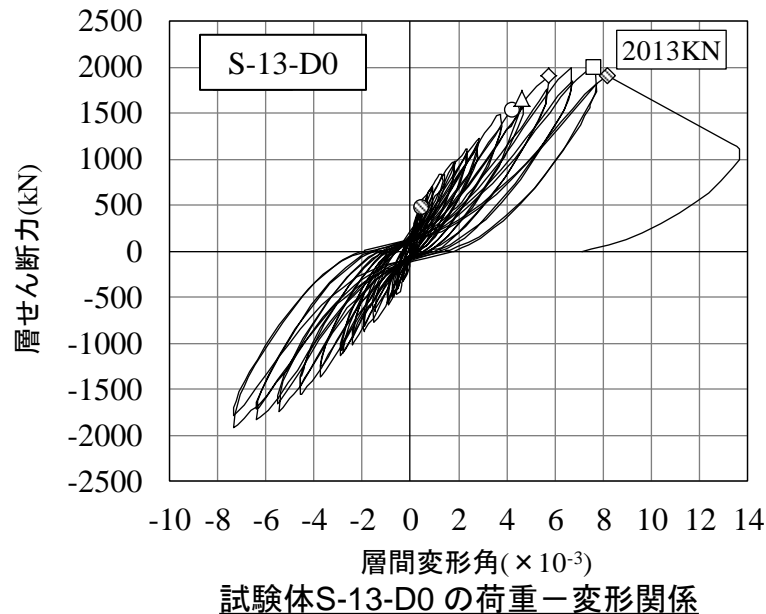
コンクリート圧縮試験結果		No1	No2	No3	平均
S-13-D0	材齢(日)	61			
	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	41.0	39.9	39.6	40.2
	圧縮強度時歪( $\mu$ )	2550	2312	2365	2409
	ヤング係数( $\times 10^4 N/mm^2$ )	2.96	3.21	3.67	3.28
S-13-D I	材齢(日)	79			
	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	41.6	40.8	41.3	41.2
	圧縮強度時歪( $\mu$ )	2315	2275	2357	2316
	ヤング係数( $\times 10^4 N/mm^2$ )	3.36	3.41	3.65	3.47
S-13-D II, 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-D III	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



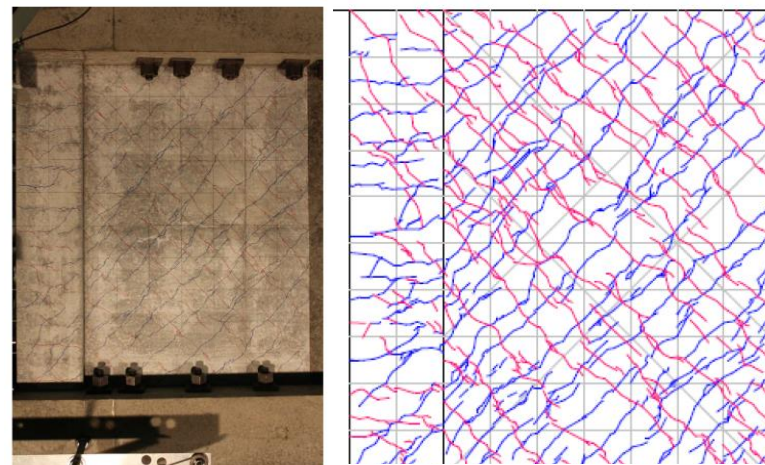
加力装置図

※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。

# 地震による事前損傷が終局耐力に与える影響 (5)



試験体S-13-D0 最終破壊時写真・ひび割れ図



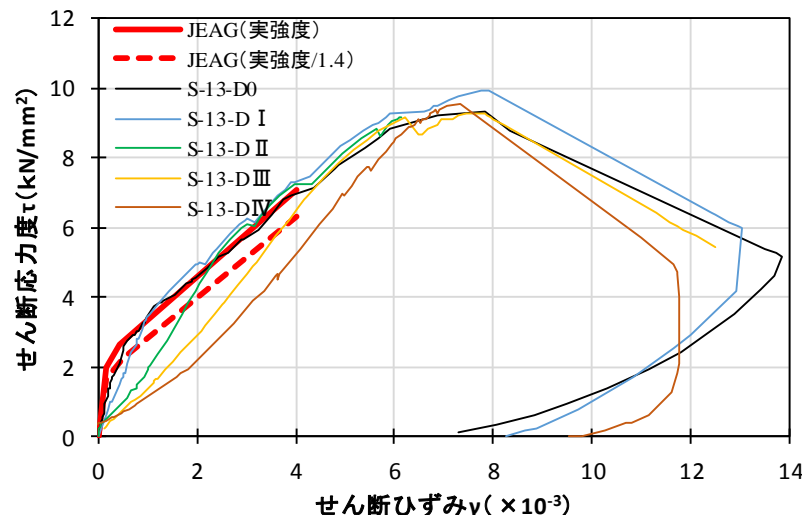
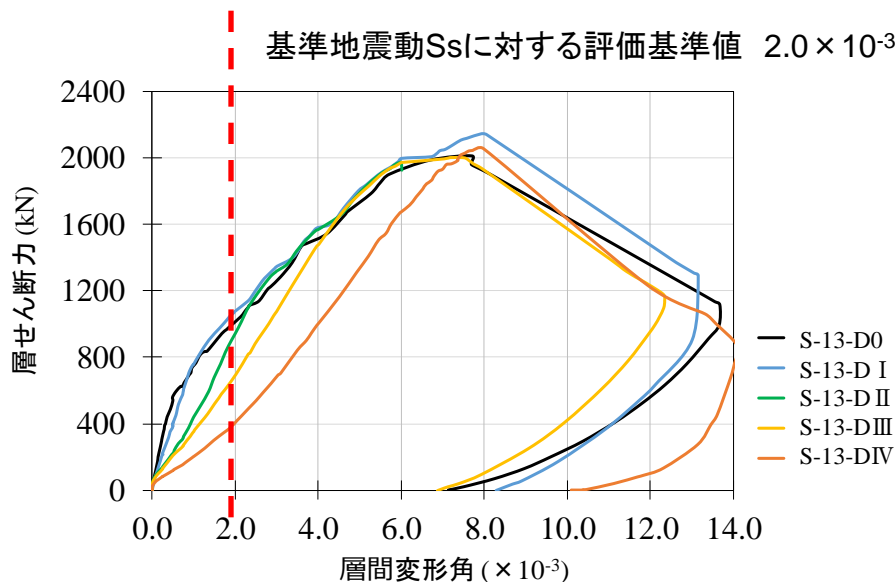
試験体S-13-D II  $0.6 \times 10^{-3}$ 時写真・ひび割れ図



# 地震による事前損傷が終局耐力に与える影響 (6)

## ■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: $2.0 \times 10^{-3}$ )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 $S_s$ 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。**



\* 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。

## 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)

## ■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 $S_s$ 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。

# 地震による事前損傷が終局耐力に与える影響 (7)

## ■耐震実験[2]補足検討の概要

- ・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。
- ・ここでは、耐震実験[2]の補足的な検討として、鉄筋量を変えた場合の実験を実施した。
  
- ・耐震実験にあたっては、耐震実験[2]と同様の方法とし、変更した点は、鉄筋量を耐震実験[2]の半分の量とした。
- ・主な特徴は以下のとおり。
  - ✓ 試験体の鉄筋量については、耐震実験[2]の1.32%(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設定)に対して、半分の鉄筋比0.66%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4試験体に対し試験を実施した。
  - ✓ 事前損傷度合いとしては、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: $2.0 \times 10^{-3}$ )から、その約3倍の変形量(層間変形角: $6.0 \times 10^{-3}$ )までの計3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]では、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(損傷度 I 層間変形角: $0.75 \times 10^{-3}$ )を実施しているが、実験結果から無損傷試験体とほとんど差が無かったことから、補足検討ではこのケースは実施していない。



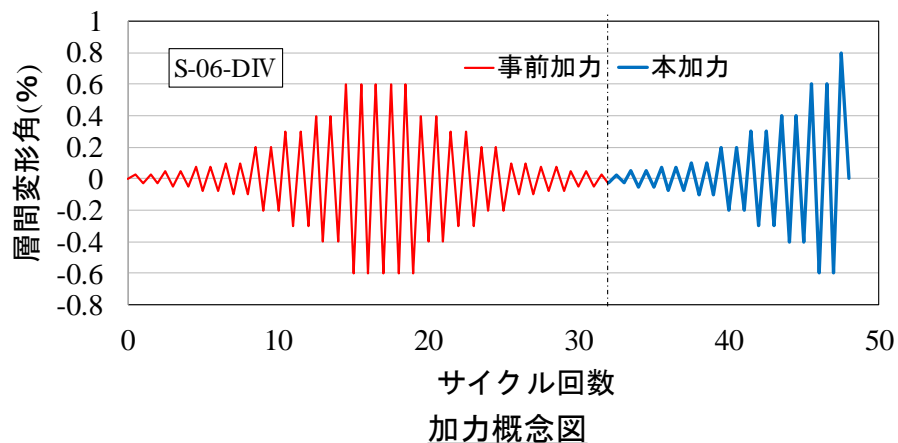
# 地震による事前損傷が終局耐力に与える影響 (8)

事前加力で与えるせん断変形角(損傷の大きさ)

加力スケジュール

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 2005年宮城県沖地震: $0.1 \times 10^{-3}$ 程度 2011年東北地方太平洋沖地震 オペフロ下部: $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3}$ 程度 オペフロ上部: $0.6 \times 10^{-3}$ 程度 <b>補足検討では実施せず</b>
II	$2.0 \times 10^{-3}$	JEAG4601-1991に示される耐震壁の 評価基準値
III	$4.0 \times 10^{-3}$	JEAG4601-1991に示される耐震壁の 終局点
IV	$6.0 \times 10^{-3}$	

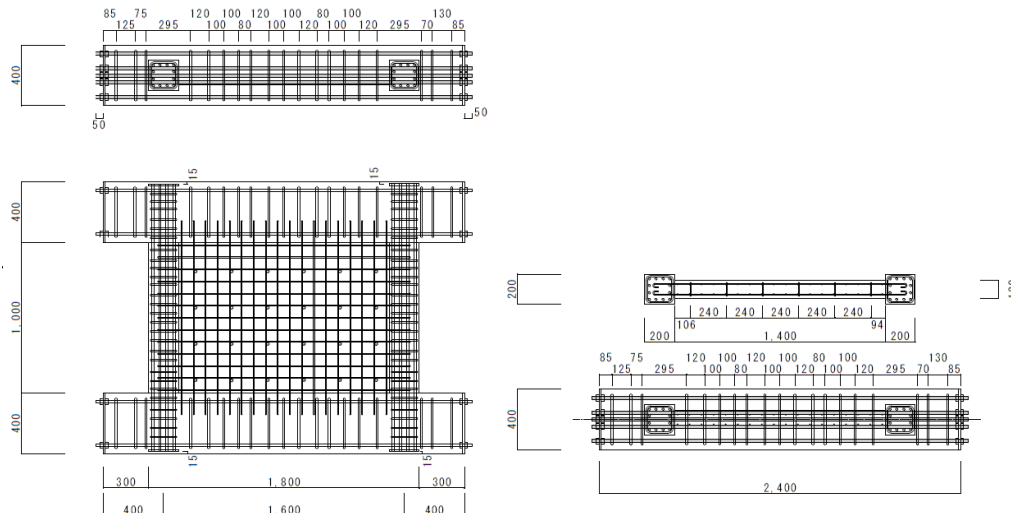
			S-06-D0	S-06-D II	S-06-D III	S-06-DIV
加力	目標部材角	層間変形	サイクル数			
	R(rad.)	mm	回			
事前加力	$\pm 0.25/1000$	$\pm 0.25$	0	2	2	2
	$\pm 0.50/1000$	$\pm 0.50$		2	2	2
	$\pm 0.75/1000$	$\pm 0.75$		2	2	2
	$\pm 1/1000$	$\pm 1.0$		2	2	2
	$\pm 2/1000$	$\pm 2.0$		5	2	2
	$\pm 3/1000$	$\pm 3.0$			2	2
	$\pm 4/1000$	$\pm 4.0$			5	2
	$\pm 6/1000$	$\pm 6.0$				5
	$\pm 4/1000$	$\pm 4.0$				2
	$\pm 3/1000$	$\pm 3.0$				2
	$\pm 2/1000$	$\pm 2.0$				2
	$\pm 1/1000$	$\pm 1.0$			2	2
	$\pm 0.75/1000$	$\pm 0.75$			2	2
	$\pm 0.50/1000$	$\pm 0.50$			2	2
$\pm 0.25/1000$	$\pm 0.25$		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	



# 地震による事前損傷が終局耐力に与える影響 (9)

試験体諸元

		耐震実験[2]	耐震実験[2]補足検討
壁	壁高さ(mm)	1000	1000
	全長(mm)	1800	1800
	壁厚(mm)	120	120
	縦筋	D6@40(SD295)Double	D6@80(SD295)Double
	縦筋比(%)	1.32	0.66
	横筋	D6@40(SD295)Double	D6@80(SD295)Double
	横筋比(%)	1.32	0.66
柱	コンクリート強度 $F_c(N/mm^2)$	27	27
	せん断スパン比	0.29	0.29
スタブ	断面 $b \times D(mm \times mm)$	200 × 200	200 × 200
	主筋	12-D16(SD345)	12-D16(SD345)
	帯筋	2-D10(SD345)@60	2-D10(SD345)@60
	あばら筋	2-D10(SD390)@100	2-D10(SD390)@100

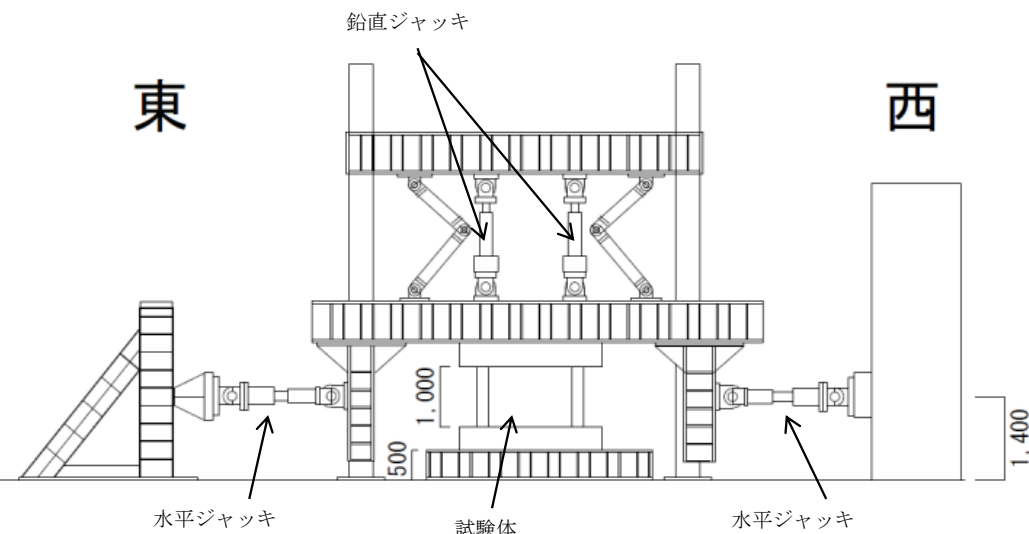


試験体配筋図

コンクリートの圧縮強度試験結果

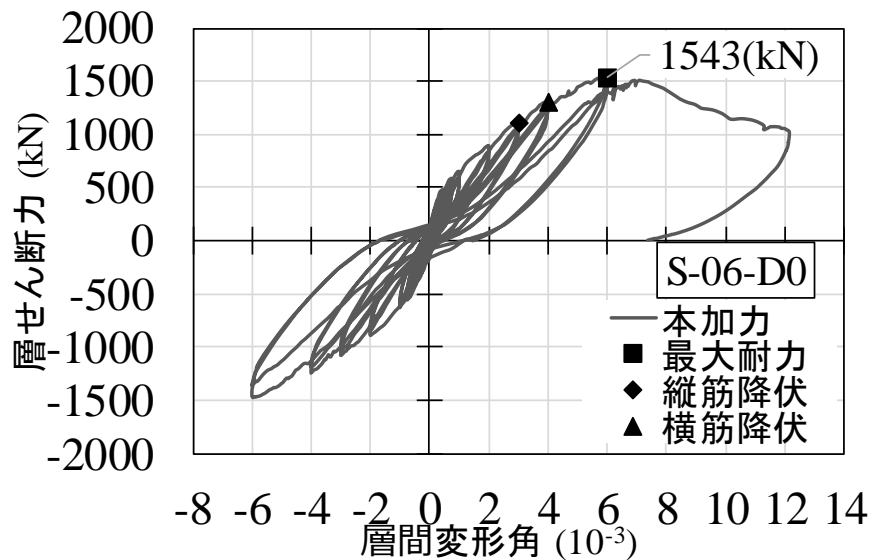
コンクリート圧縮試験結果		No1	No2	No3	平均
S-06-D0	材齢(日)	55			
	圧縮強度( $N/mm^2$ )	31.1	32.5	32.7	32.1
	圧縮強度時歪( $\mu$ )	2093	2043	2168	2101
	ヤング係数( $\times 10^4 N/mm^2$ )	2.91	3.31	2.88	3.03
S-06-D II	材齢(日)	67			
	圧縮強度( $N/mm^2$ )	34.7	32.8	32.1	33.2
	圧縮強度時歪( $\mu$ )	2330	2268	2168	2255
	ヤング係数( $\times 10^4 N/mm^2$ )	2.84	2.74	2.83	2.80
S-06-D III	材齢(日)	72			
	圧縮強度( $N/mm^2$ )	32.3	30.6	32.7	31.9
	圧縮強度時歪( $\mu$ )	2113	2028	2041	2060.3333
	ヤング係数( $\times 10^4 N/mm^2$ )	3.01	3.04	3.43	3.16

※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。

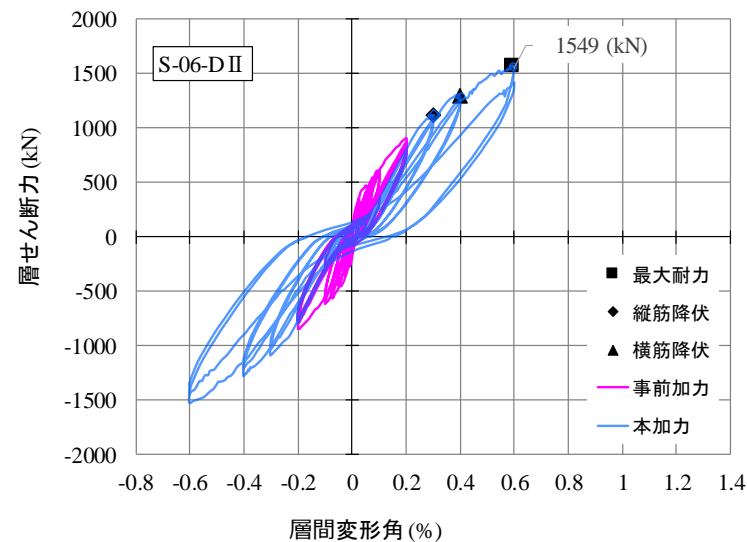


加力装置図

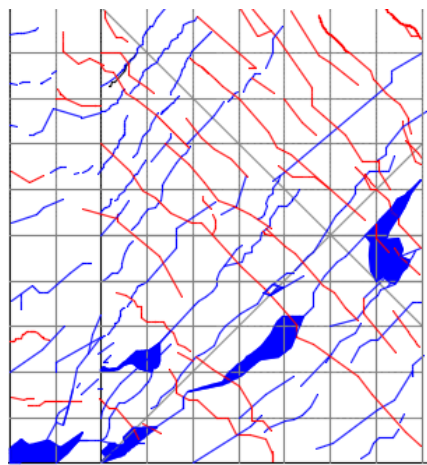
# 地震による事前損傷が終局耐力に与える影響 (10)



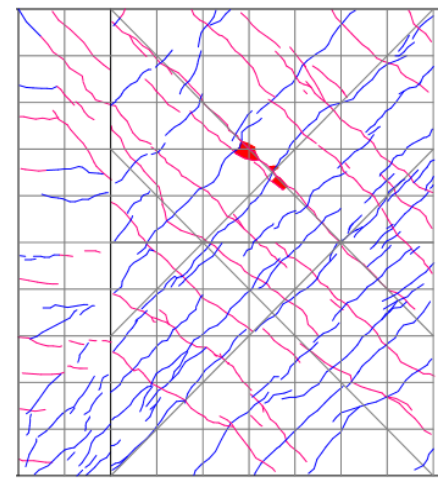
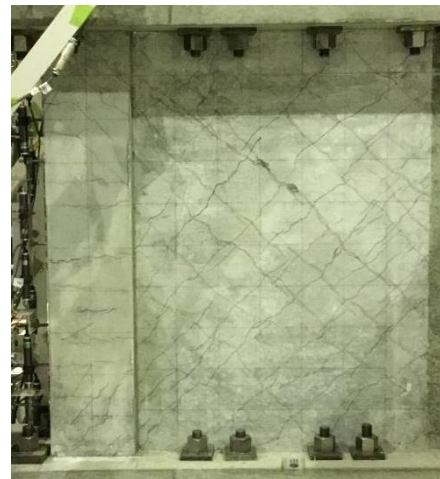
試験体S-06-D0 の荷重—変形関係



試験体S-06-D II の荷重—変形関係



試験体S-06-D0 最終破壊時写真・ひび割れ図



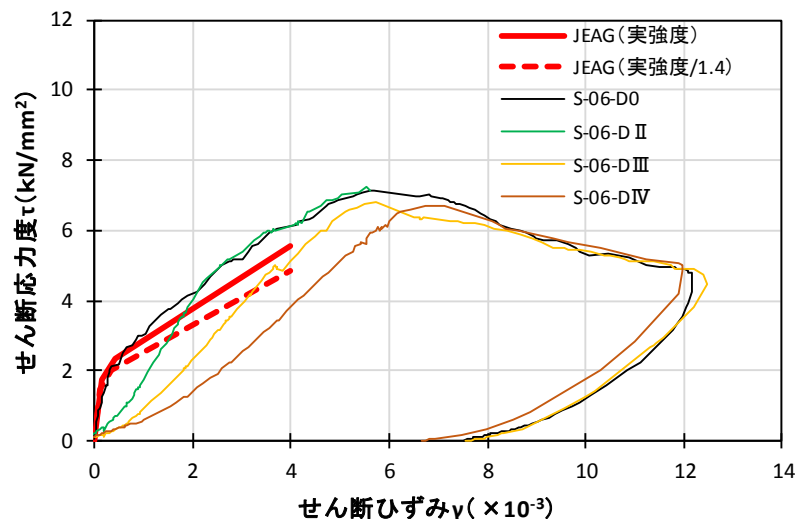
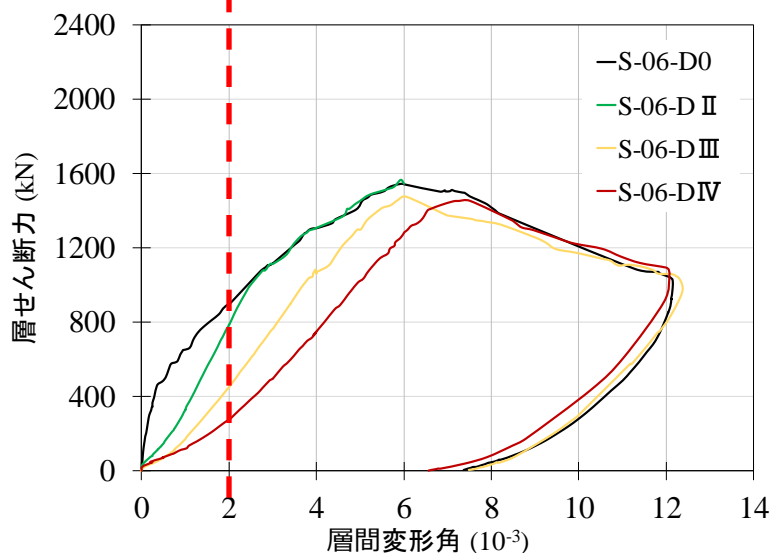
試験体S-06-D II 0.6 × 10<sup>-3</sup>時写真・ひび割れ図

## 2. 耐震実験 2.2 耐震実験[2]補足検討

## 地震による事前損傷が終局耐力に与える影響 (11)

## ■実験結果の特徴

- 鉄筋量を半分とした耐震実験の結果、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概ね同等となる結果が得られた。
- 事前損傷度合いとして、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: $2.0 \times 10^{-3}$ )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ほとんど認められなかった。

基準地震動 $S_s$ に対する評価基準値  $2.0 \times 10^{-3}$ 

\* 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-06-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。

## 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)

## ■耐震実験[2]補足検討のまとめ

耐震実験[2]の補足検討として、鉄筋量を半分にしたケースを実施した結果を踏まえても、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、損傷度ⅡではJEAG式に対して、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: $2.0 \times 10^{-3}$ )付近での耐力低下は認められなかったことを確認した。

## 1. 全体概要

## 2. 耐震実験

- 2.1 耐震実験[1] 耐震壁に対する繰返し地震力の影響
- 2.2 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
- 2.3 耐震実験[3] 乾燥収縮が終局耐力に与える影響
- 2.4 耐震実験結果の実機への適用性
- 2.5 乾燥収縮等が初期剛性や終局耐力等に与える影響に関する文献について

## 3. 耐震実験まとめ

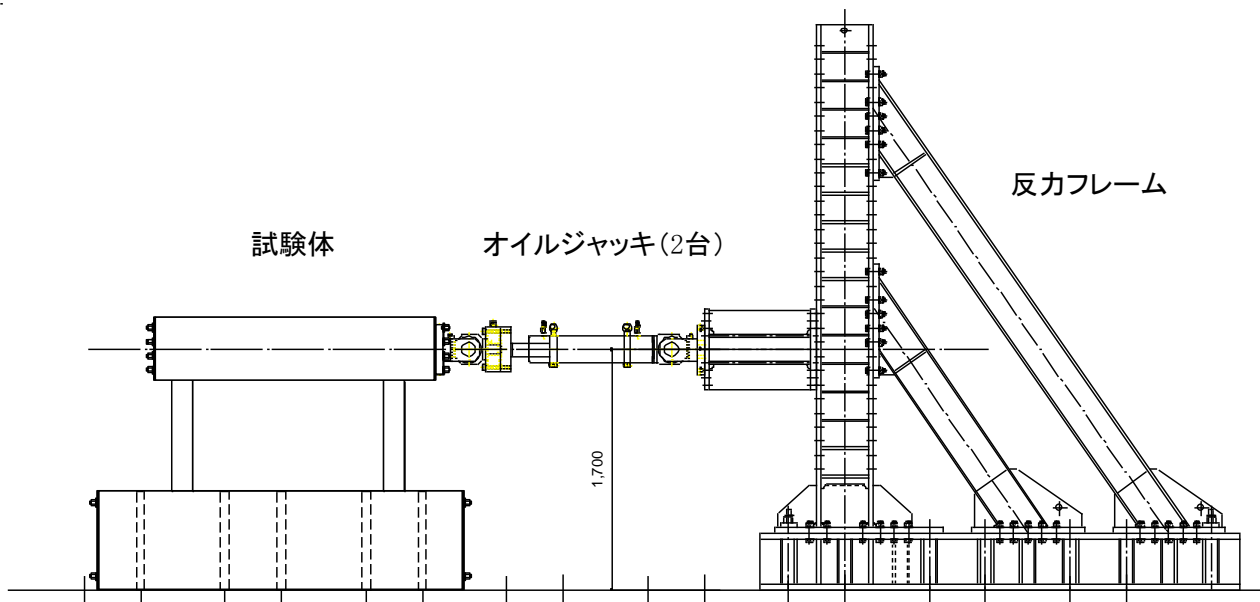
# 乾燥収縮が終局耐力に与える影響（1）

## ■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

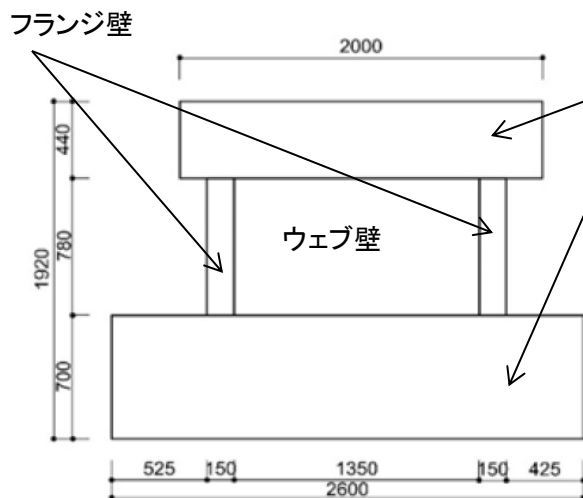
## 乾燥収縮が終局耐力に与える影響（2）

### ■耐震実験[3]の概要

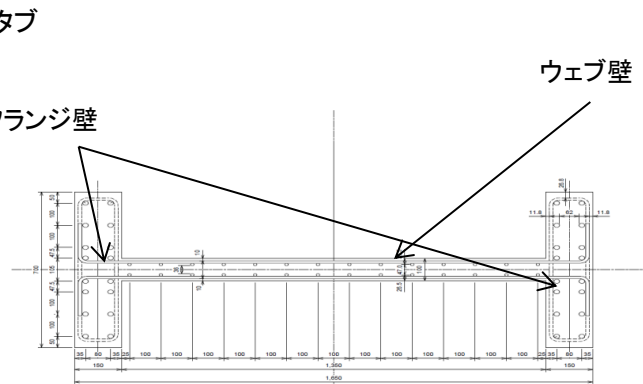
- ・耐震実験にあたっては、女川2号炉原子炉建屋の3.11地震に対する応答結果や原子力発電所の耐震壁の特徴を、試験体の製作や加力方法に反映した。なお、試験体の大きさ・形状や配筋などは耐震実験[1]と全く同じである。
- ・耐震実験[3]の主な特徴は以下のとおり。
  - ✓ 耐震壁の鉄筋量については原子力発電所建屋並の鉄筋比を配置(約1.4%)
  - ✓ 原子力発電所の耐震壁は曲げ変形よりもせん断変形が支配的なため、せん断変形が卓越する試験体の形状・加力方法とした。
  - ✓ 使用骨材(粗骨材)は、比較的収縮しやすい骨材(埼玉県川越市産(豆砂利)を使用した。
  - ✓ コンクリートを打設し、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(乾燥試験体[1])。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[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。



# 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (3)



乾燥試験体[1]形状



乾燥試験体[1]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( $\rho_g=2.8\%$ )
	帯筋	2-D10@100( $\rho_s=0.95\%$ )
ウェブ壁	壁厚	100
	縦筋	D10@100ダブル( $\rho_s=1.4\%$ )
	横筋	D10@100ダブル( $\rho_s=1.4\%$ )
制御方式	変位制御	
(単位:mm)		

鉄筋 種別・使用部位	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (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。



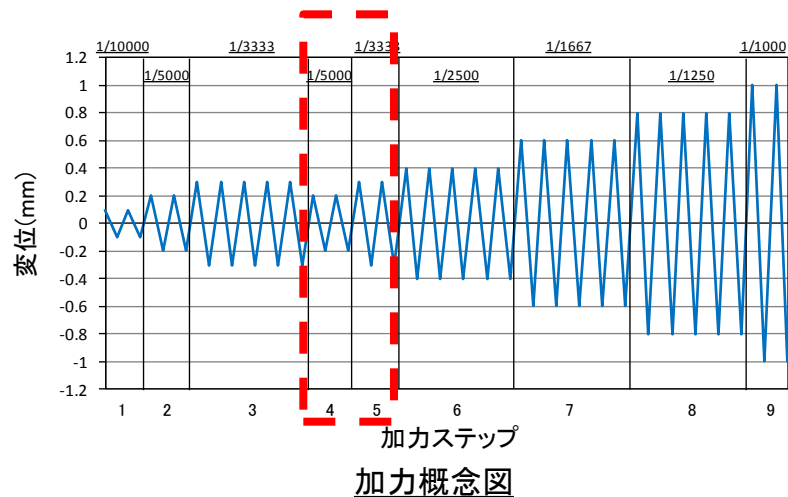
# 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (4)

## ■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 $R$ (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	

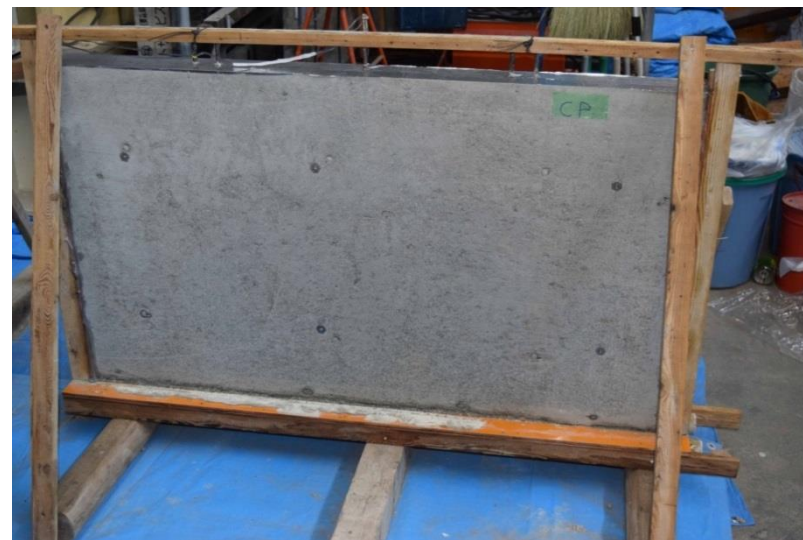


# 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (5)



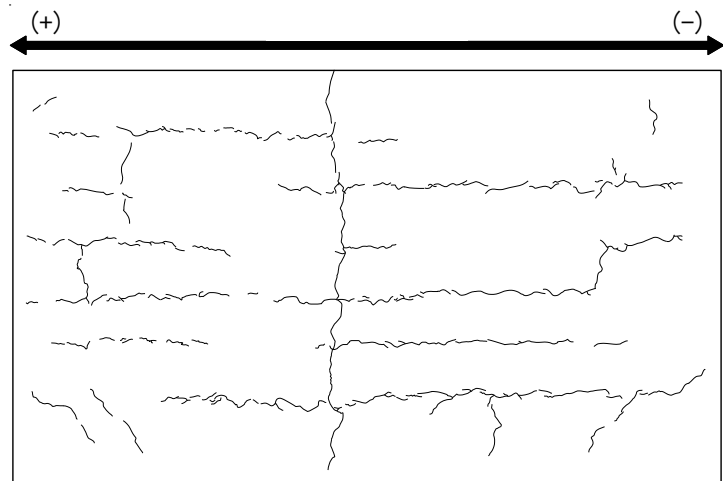
乾燥試験体[1]養生状況

(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)



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, 気中養生)



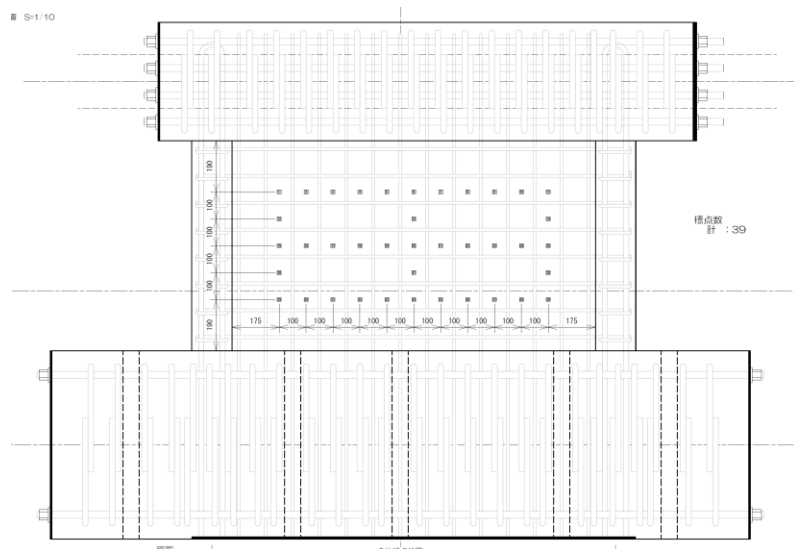
加力前における乾燥試験体[1]のひび割れ図

試験時における各試験体の収縮量の最大値  
【乾燥試験体[1]】約200 $\mu$   
【ダミー試験体】約800 $\mu$

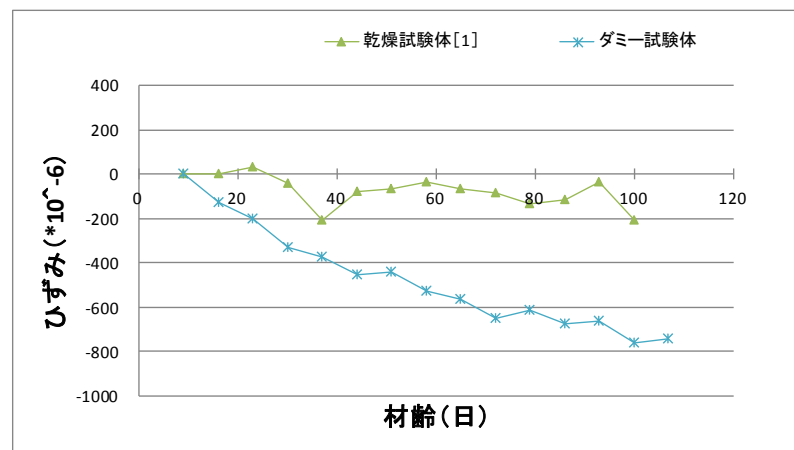
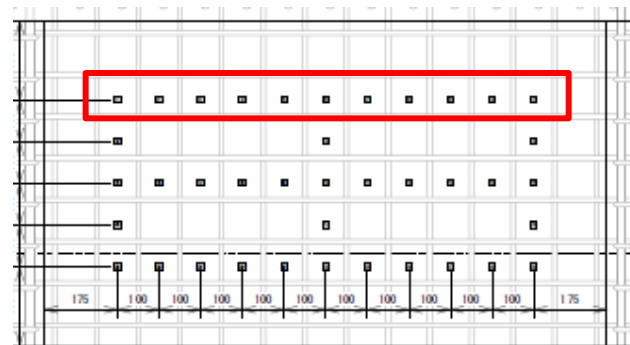
# 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (6)

## ■試験体の乾燥状況

コンクリート表面の乾燥収縮量の測定にあたっては、コンタクトゲージを用いた。コンクリート打設から100日経過時点で、ダミー試験体の乾燥収縮量は約800 $\mu$ 程度であった。女川サイトで用いているコンクリート材料による乾燥収縮率は700 $\mu$ 程度であり、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による評価値と概ね整合している。



コンタクトゲージ測定点



コンタクトゲージによるひずみ計測結果(例)

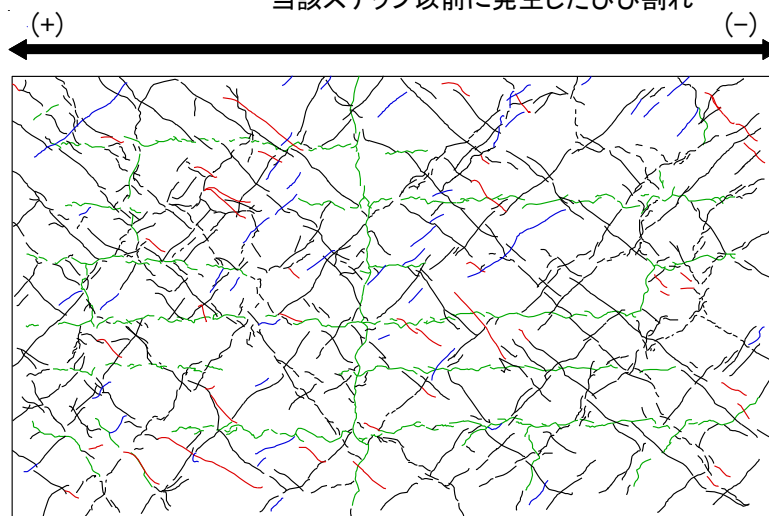
# 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (7)

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。

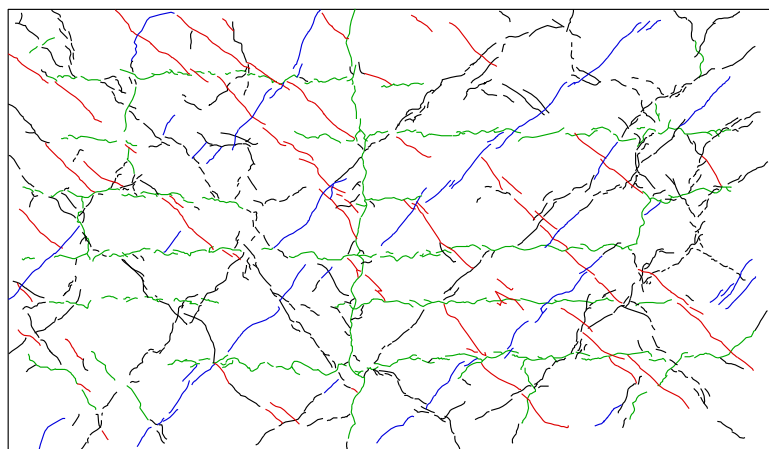
- 初期ひび割れ(乾燥収縮ひび割れ)
- 当該ステップで発生したひび割れ(正側加力)
- 当該ステップで発生したひび割れ(負側加力)
- 当該ステップ以前に発生したひび割れ



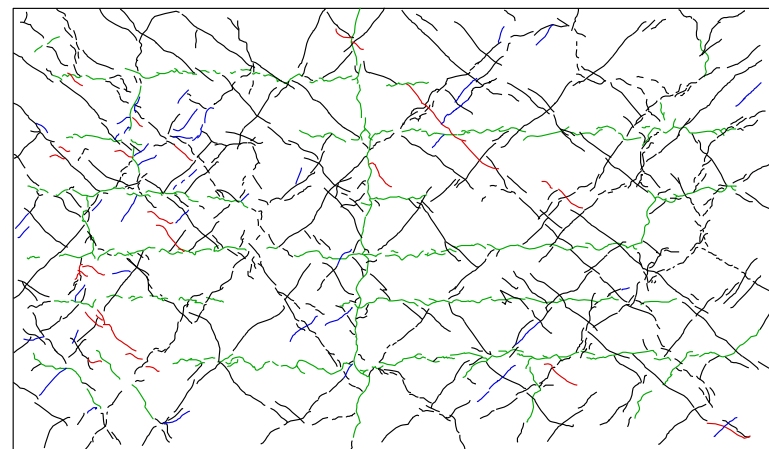
(+) 乾燥試験体[1] 最終破壊時写真 (-)



(+) 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



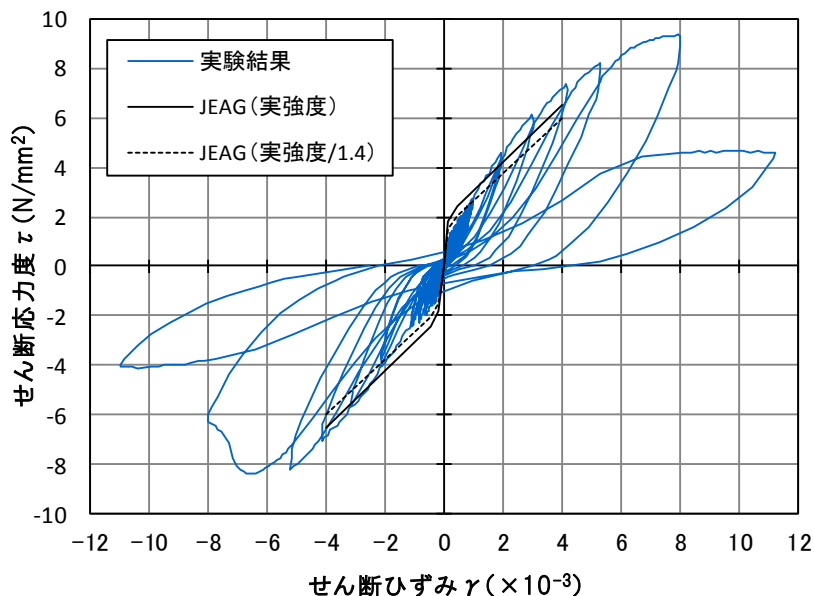
乾燥試験体[1] 1/250rad. ( $4.0 \times 10^{-3}$ )におけるひび割れ図

# 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (8)

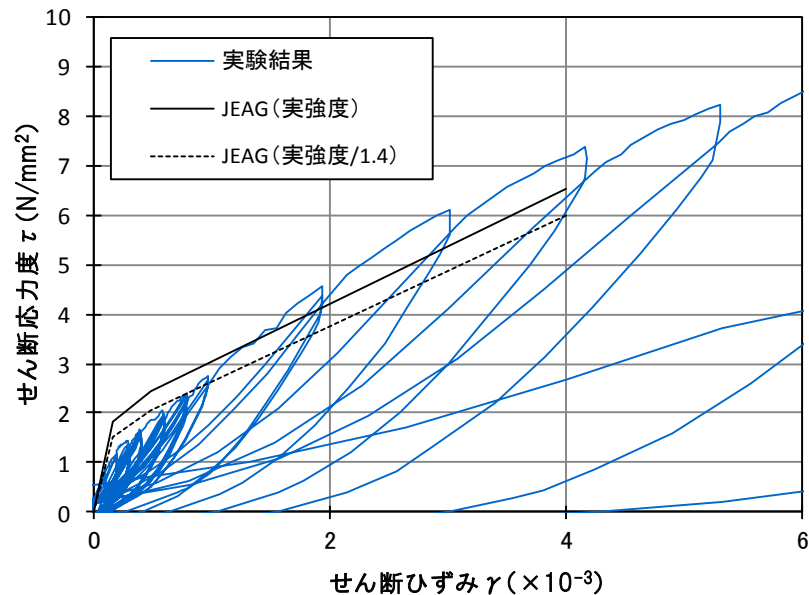
## ■実験結果の特徴①(JEAG式との比較)

- ・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式を上回ることから、乾燥した試験体でも、耐震実験[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)



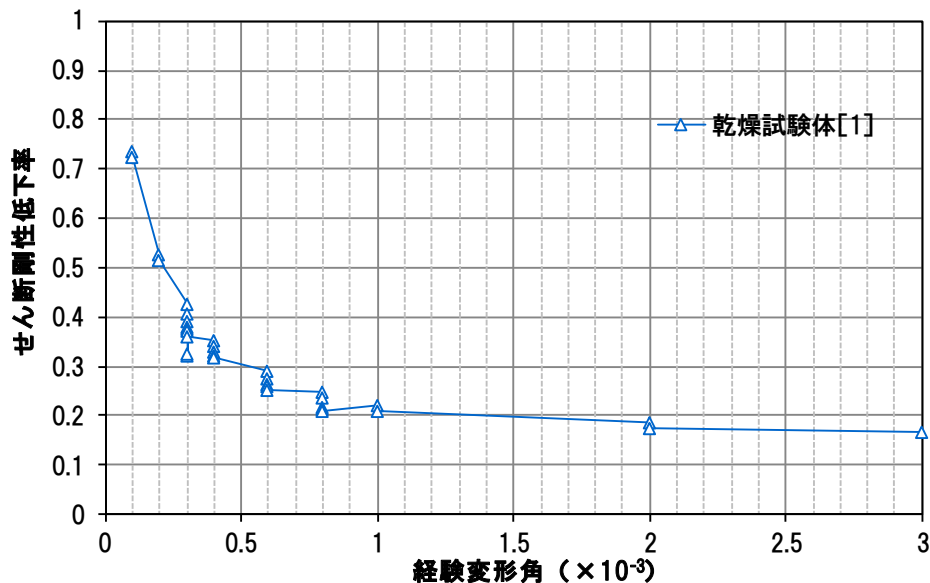
乾燥試験体[1]の耐震実験結果(荷重-変形関係)  
正側拡大図



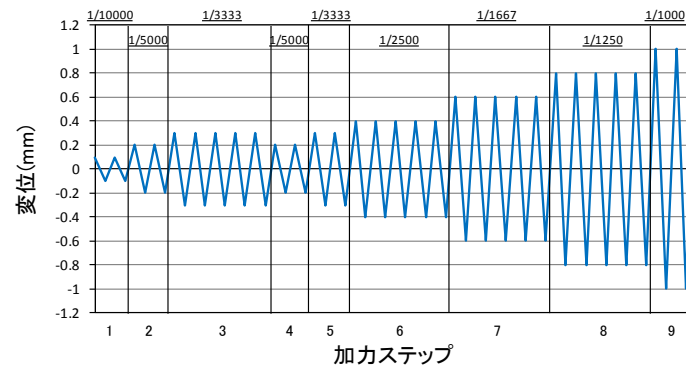
# 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (9)

## ■実験結果の特徴②(繰返しの影響)

- 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变化は見られない。  
(繰返し部分の詳細結果は次頁に示す)



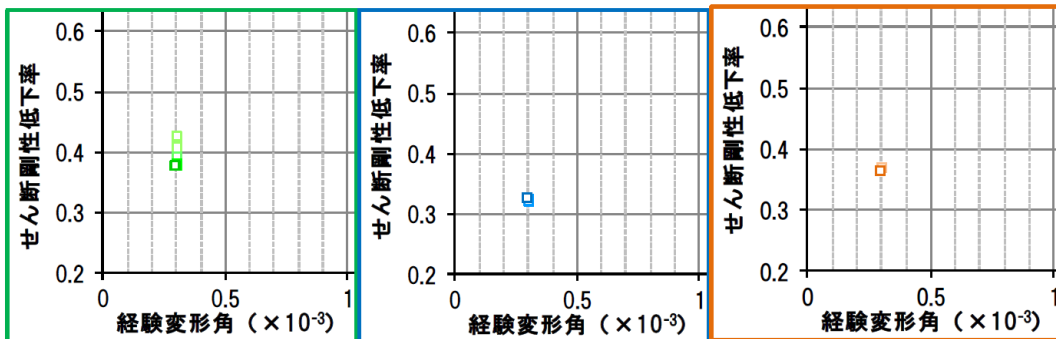
乾燥試験体[1]の剛性低下率(せん断変形)



加力概念図

△部分が繰返しステップ部分を示す

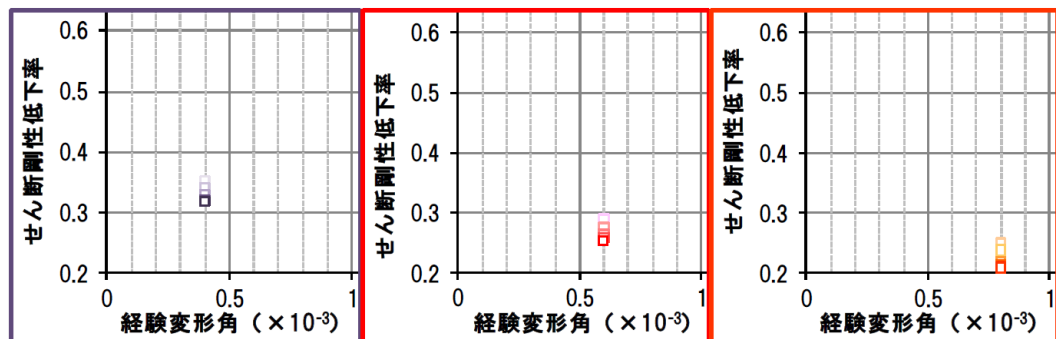
# 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (10)



ステップ3

ステップ4

ステップ5

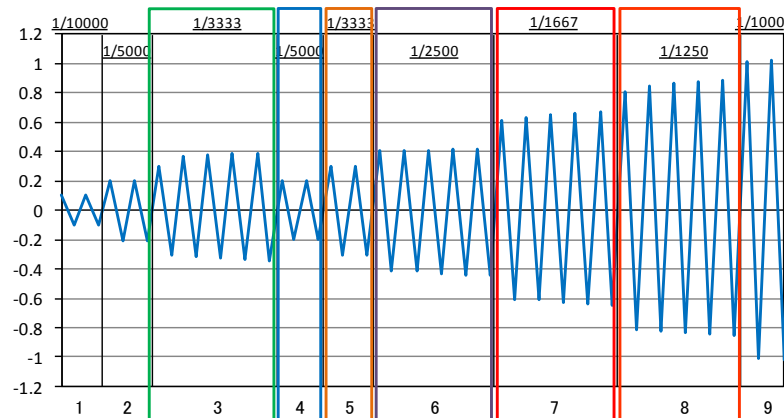


ステップ6

ステップ7

ステップ8

乾燥試験体[1]の剛性低下率(せん断変形)(拡大図)



加力ステップ  
加力概念図

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。

## ■耐震実験[3](乾燥試験体[1])のまとめ

- ・乾燥した試験体では, 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。**

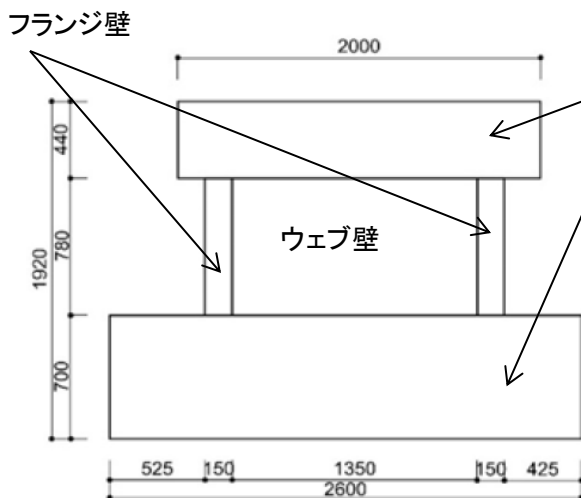
## 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (11)

### ■耐震実験[3](乾燥試験体[2])の概要

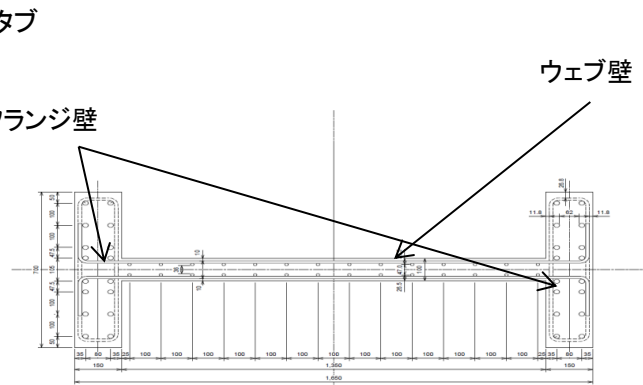
- ・乾燥収縮が耐震壁の初期の剛性や終局耐力に及ぼす影響について確認するために、3か月乾燥させた乾燥試験体[1]よりもさらに5か月程度乾燥させた耐震壁(乾燥試験体[2])の静的加力実験を実施した。なお、試験体の大きさ・形状や配筋などは乾燥試験体[1]と全く同じである。
- ・耐震実験[3](乾燥試験体[2])の主な特徴は以下のとおり。
  - ✓ 耐震壁の鉄筋量については**原子力発電所建屋並の鉄筋比を配置(約1.4%)**
  - ✓ 原子力発電所の耐震壁は曲げ変形よりもせん断変形が支配的なため、**せん断変形が卓越する試験体の形状・加力方法とした。**
  - ✓ **使用骨材(粗骨材)は、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。**
  - ✓ コンクリートを打設し、型枠を外した後、**約8ヶ月間気中に放置し、壁部分を乾燥させた。乾燥試験体[2]の実験時の乾燥収縮率は約1000 $\mu$ (ダミー試験体での計測結果)であり、約3か月間乾燥させた乾燥試験体[1]に比べて、200 $\mu$ 程度乾燥収縮率が進展した状態であった。**
  - ✓ 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[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。



# 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (12)



乾燥試験体[2] 形状



乾燥試験体[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 種別・使用部位	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (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][2]	
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。

## 2. 耐震実験 2.3 耐震実験[3]

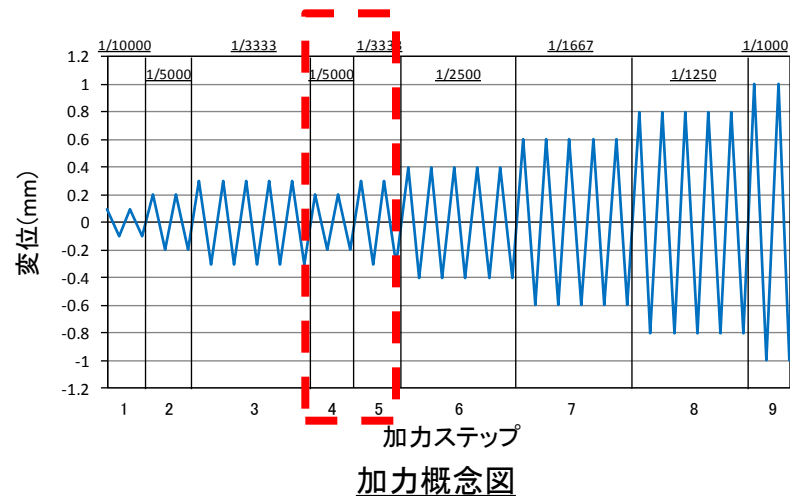
## 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (13)

## ■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 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	

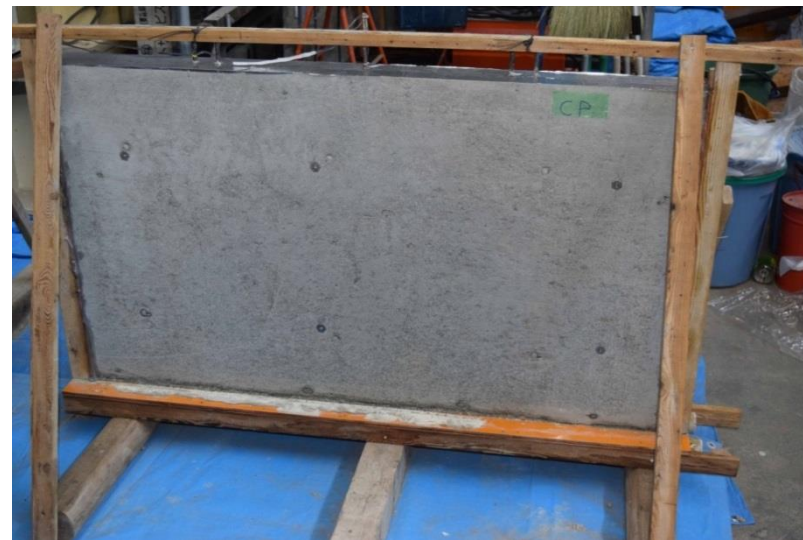


# 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (14)



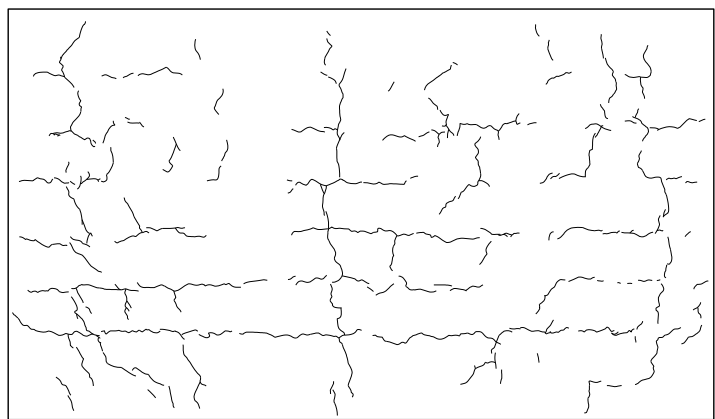
乾燥試験体[2]養生状況

(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)



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, 気中養生)



加力前における乾燥試験体[2]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[2]】 約400 $\mu$

【ダミー試験体】 約1000 $\mu$

(参考)乾燥試験体[1]実験時

【乾燥試験体[1]】 約200 $\mu$

【ダミー試験体】 約800 $\mu$



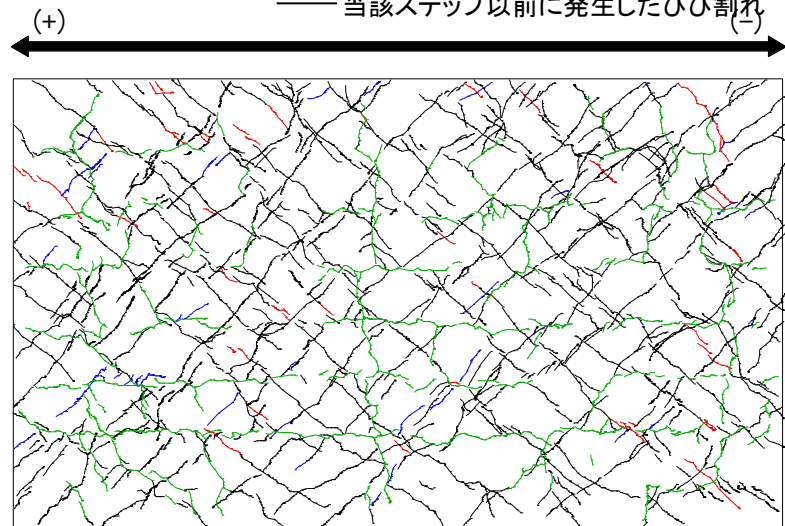
# 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (16)

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。

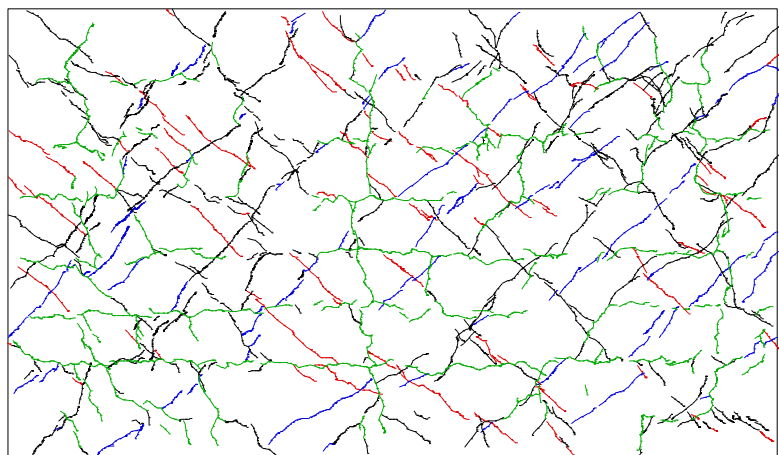
- 初期ひび割れ(乾燥収縮ひび割れ)
- 当該ステップで発生したひび割れ(正側加力)
- 当該ステップで発生したひび割れ(負側加力)
- 当該ステップ以前に発生したひび割れ



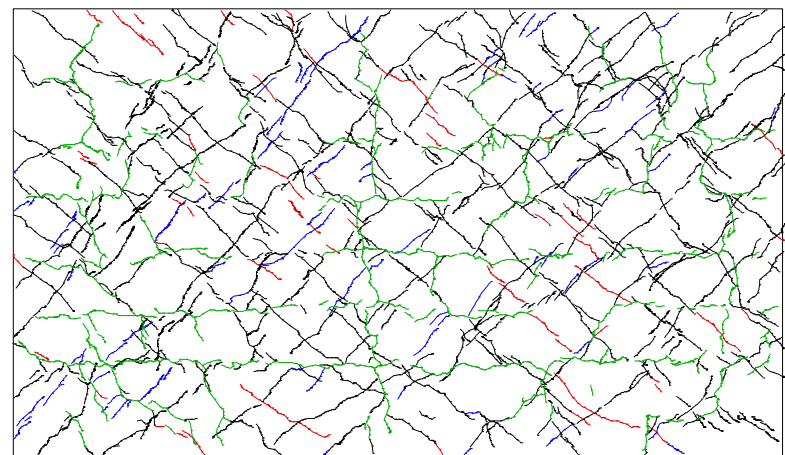
乾燥試験体[2] 最終破壊時写真



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

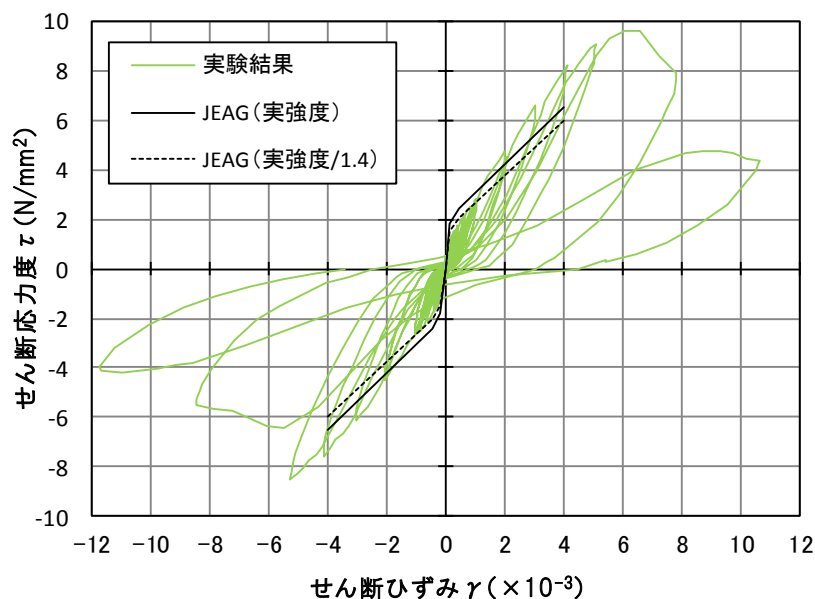


# 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (17)

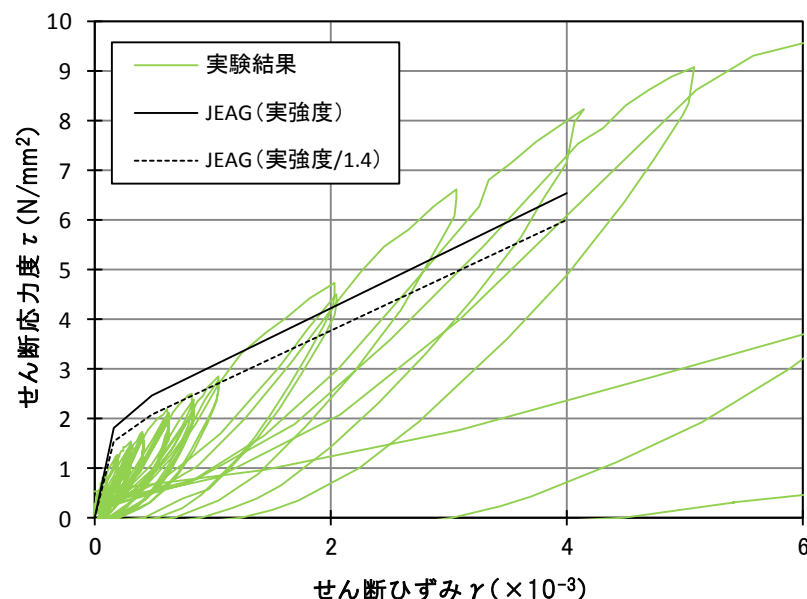
## ■実験結果の特徴

- ・初期の剛性については、設計で用いている評価式(JEAG式\*<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(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式を上回る結果、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]および耐震実験[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)

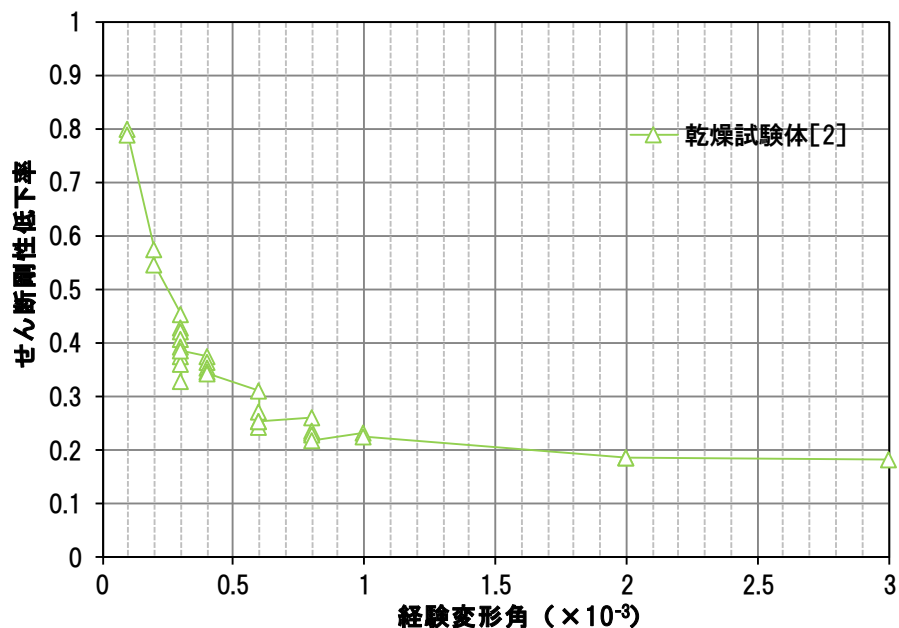


乾燥試験体[2]の耐震実験結果(荷重-変形関係)  
正側拡大図

# 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (18)

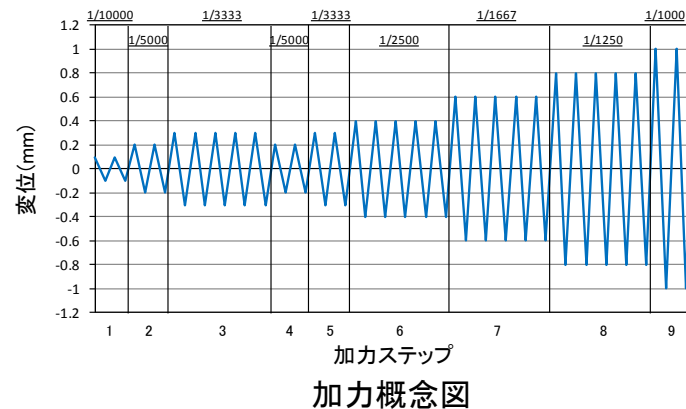
## ■実験結果の特徴②(繰返しの影響)

- ① インナーループとなる繰返し加力では、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。  
(繰返し部分の詳細結果は次頁に示す)



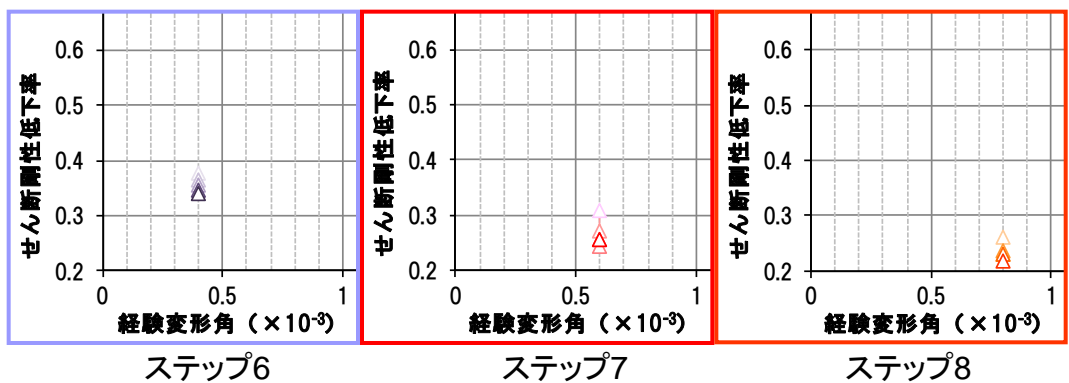
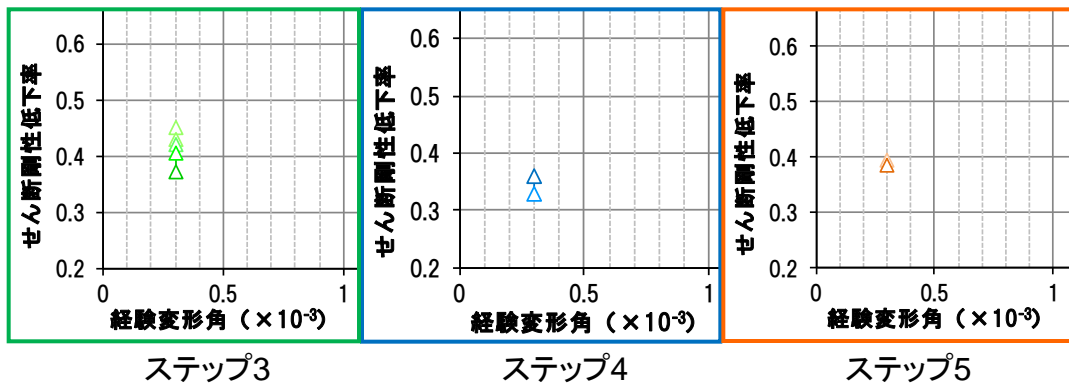
乾燥試験体[2]の剛性低下率(せん断変形)

△部分が繰返しステップ部分を示す



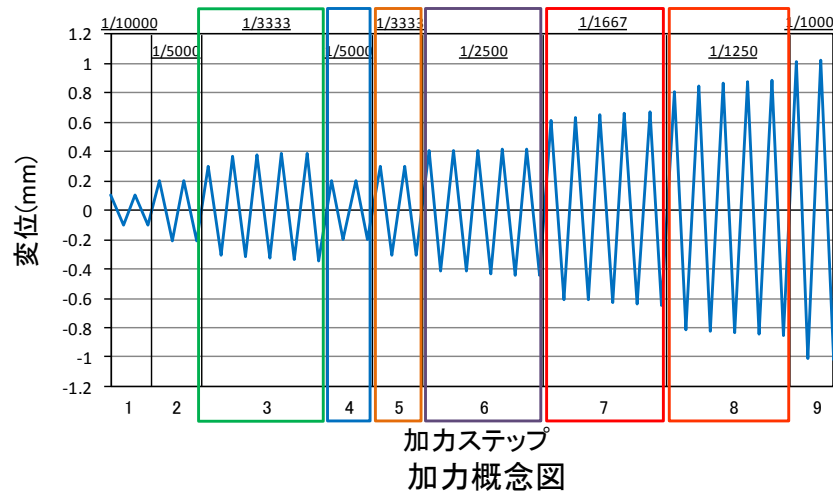


# 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (19)



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变化は見られない。

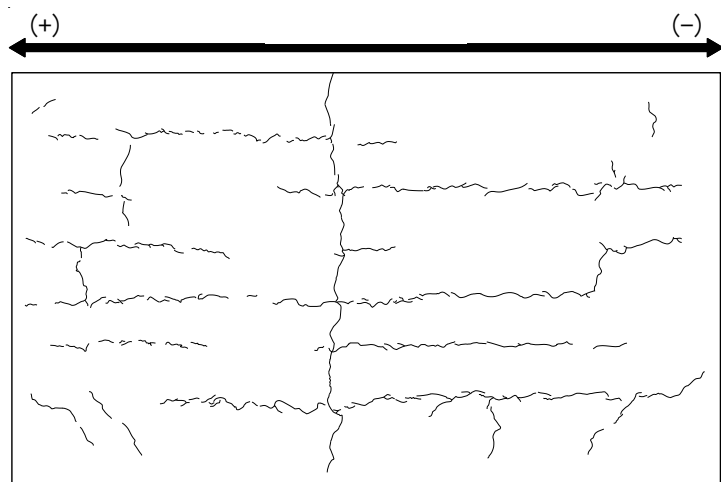


## ■耐震実験[3](乾燥試験体[2])のまとめ

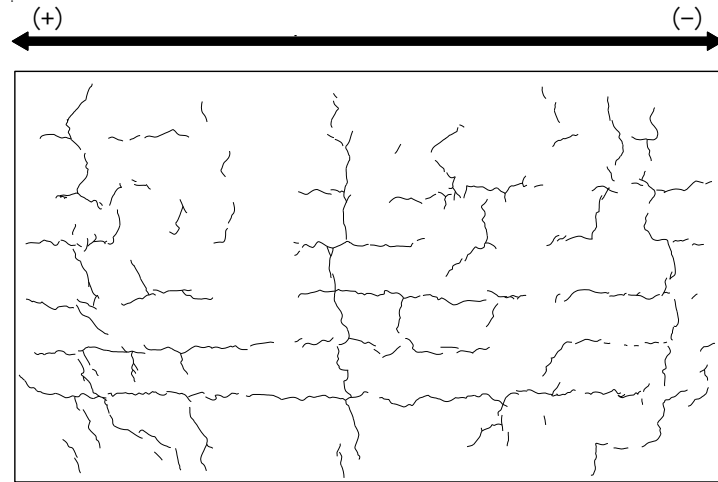
- ・さらに乾燥した試験体でも, 乾燥試験体[1]と同様に初期の剛性については, JEAG式に対し4割程度低下した結果となったものの, 原子力施設建屋の基準地震動 $S_s$ に対する評価基準値(せん断ひずみ: $2.0 \times 10^{-3}$ )付近や終局耐力(せん断ひずみ: $4.0 \times 10^{-3}$ )付近では, JEAG式に対し, 実験結果の耐力は上回る結果となった。また, 繰返し加力が剛性低下へ与える影響について, 有意な低下は認められなかった。
- ・また, インナーloopによる繰返し加力や主要変形角での5回の繰返し加力の結果, 既実施の乾燥試験体[1]の結果と比較すると, 初期の剛性も含めて各サイクルでの荷重-変形関係は同等であり, さらに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。

# 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (20)

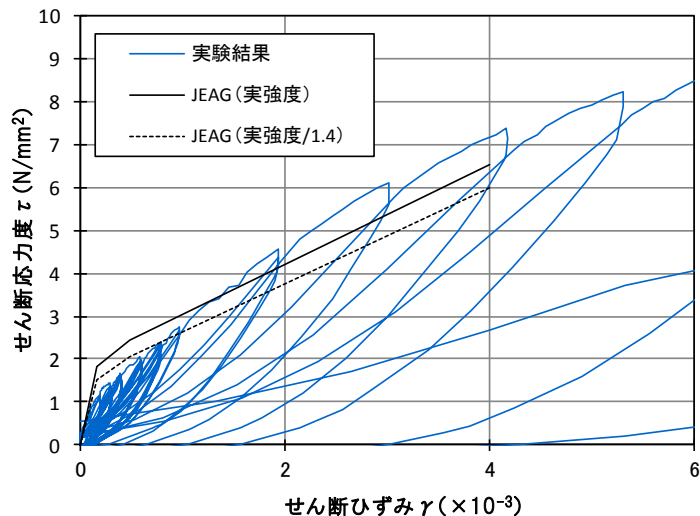
■ 乾燥試験体[1](約3か月養生)と乾燥試験体[2](約8か月養生)の比較(ひび割れ図, 荷重-変形関係)



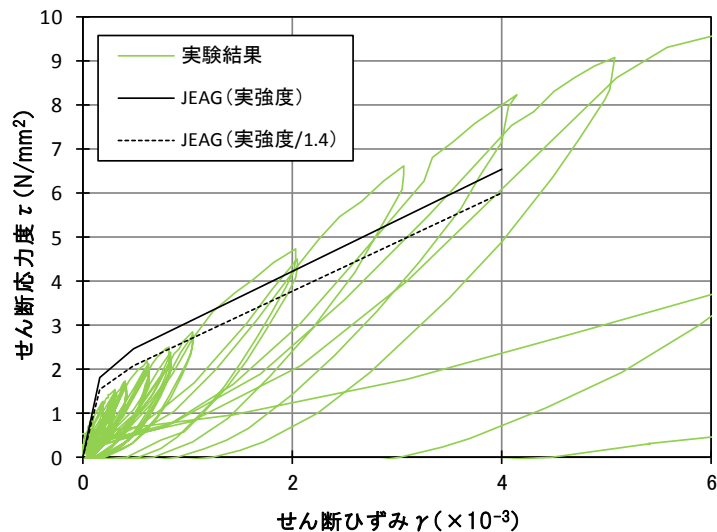
加力前における乾燥試験体[1]のひび割れ図



加力前における乾燥試験体[2]のひび割れ図



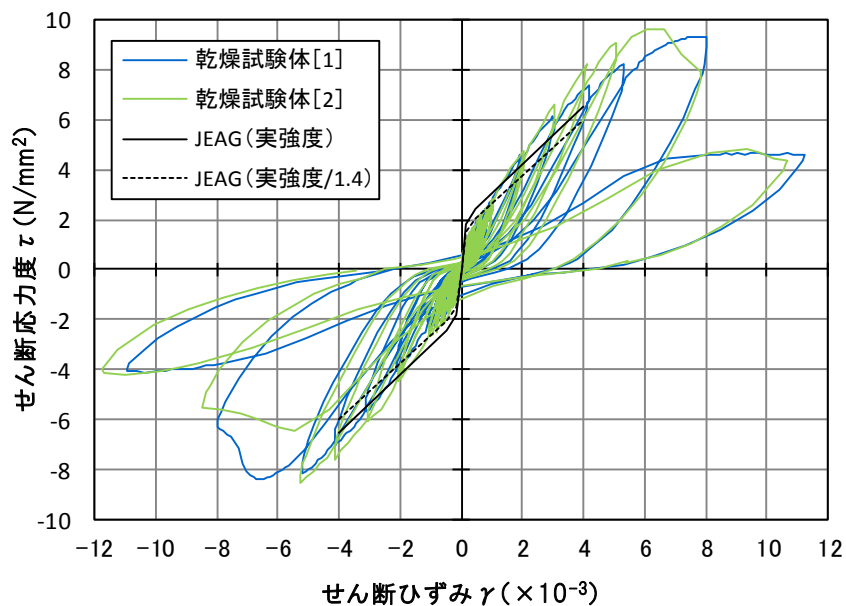
乾燥試験体[1]の耐震実験結果(荷重-変形関係)  
正側拡大図



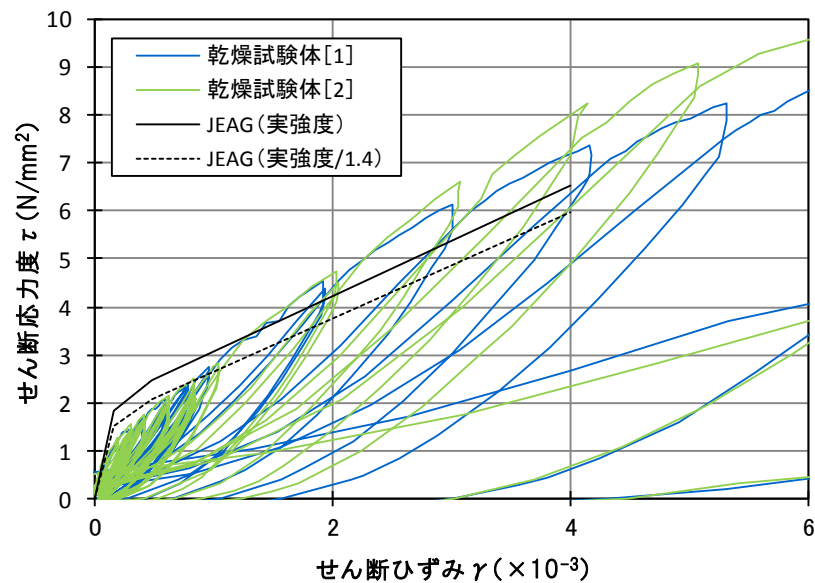
乾燥試験体[2]の耐震実験結果(荷重-変形関係)  
正側拡大図

# 乾燥収縮が終局耐力に与える影響 (21)

■ 乾燥試験体[1](約3か月養生)と乾燥試験体[2](約8か月養生)の比較(荷重－変形関係:重ねて比較)



耐震実験結果(荷重－変形関係)



耐震実験結果(荷重－変形関係)  
正側拡大図

## 1. 全体概要

## 2. 耐震実験

- 2.1 耐震実験[1] 耐震壁に対する繰返し地震力の影響
- 2.2 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
- 2.3 耐震実験[3] 乾燥収縮が終局耐力に与える影響
- 2.4 **耐震実験結果の実機への適用性**
- 2.5 乾燥収縮等が初期剛性や終局耐力等に与える影響に関する文献について

## 3. 耐震実験まとめ

# 目的

## ■目的

- ・乾燥収縮がコンクリート部材の終局耐力に与える影響を評価するための耐震実験では、乾燥収縮を意図的に発生させるために、実機に比べて乾燥収縮ひずみが多い骨材によるコンクリートで試験体を製作している。
- ・耐震実験結果の実機への適用性を確認するために、耐震実験の試験体と実機のコンクリート材料について乾燥収縮ひずみの計測試験を実施し、両者の特性を比較評価する。
- ・試験方法は、①コンクリートの長さ変化試験、②骨材の長さ変化試験 を実施した。

## 使用材料の一覧

耐震壁試験体の打設コンクリート

材料名		種類	品名等
セメント		普通ポルトランドセメント	住友大阪セメント(株)
骨材	細骨材	砕砂	山形県鶴岡市
		細砂	秋田県由利本荘市
	粗骨材	硬質砂岩	埼玉県川越産 豆砂利(10mm)
水		湖沼流水(秋田県由利本荘市)	
混和剤	AE 減水剤	標準形・I種	フローリック SV10

実機を対象としたコンクリート

材料名		種類	品名等
セメント		普通ポルトランドセメント	太平洋セメント(株)
混和材		フライアッシュⅡ種	東北発電工業(株)
骨材	細骨材	混合砂(砕砂+山砂)	女川産(砕砂), 大郷産(山砂)
	粗骨材	砕石 2005	女川産
水		上水道水(鹿島建設(株)技術研究所 西調布実験場内)	
混和剤	AE 減水剤	標準形・I種	ポノリス No.70

※細骨材混合比＝砕砂50:細砂50(質量比)

## コンクリートの調査

耐震壁試験体の打設コンクリート

呼び方	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )
武蔵菱光 2017	54.0	48.1	197	365	803	879

実機を対象としたコンクリート

調査 No.	W/B (%)	s/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	FA (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	備考
O-FB-00	48.1	42.0	178	311	59	723	1037	O2400PNN 相当
O-FB-13	37.2	37.0	184	416	79	591	1044	O2413PNN 相当
O-N-00	48.1	42.0	178	370	—	723	1037	O-FB-00 比較用
O-N-13	37.2	37.0	184	495	—	591	1044	O-FB-13 比較用

※実機の工事においては、同じ原仕様でも温度補正等のため異なる調査が存在するため、その中でW/C が最大であり乾燥収縮率が最も大きいと推定される調査およびW/C が最小であり乾燥収縮率が最も小さいことが予想される調査を選定し、また、フライアッシュを使用しない普通ポルトランドセメントコンクリートを比較対象とした。

## 試験方法(コンクリートの長さ変化試験)

### ■コンクリートの長さ変化試験

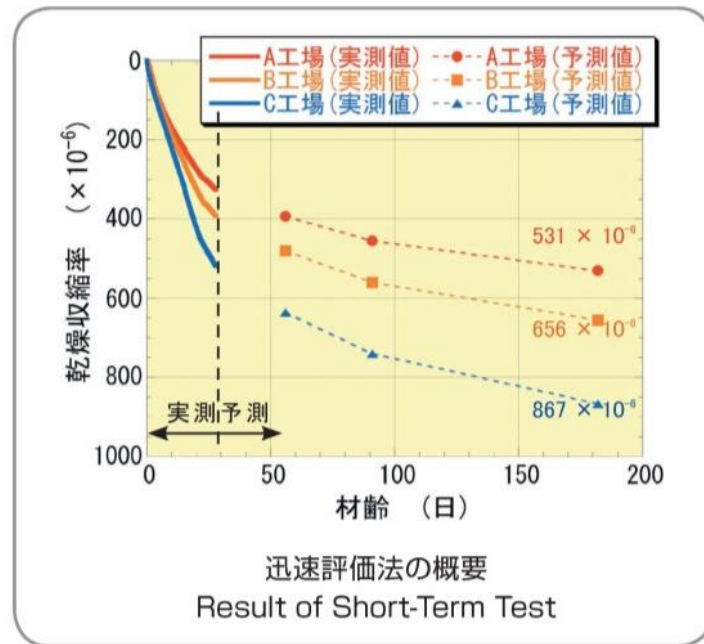
- ・試験方法は、鹿島建設が開発した「コンクリートの乾燥収縮迅速評価システム」とした。
- ・なお、実機を対象としたコンクリートについては、参考に「JIS A 1129-1 モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」によって長さ変化を測定した。

### コンクリートの乾燥収縮迅速評価システム 概要

#### 概要 Outline

5週間の短期間で長期のコンクリートの乾燥収縮率を判定する乾燥収縮迅速評価システム（以下、迅速評価法）を開発しました。これまで、コンクリートの乾燥収縮試験は、JIS A 1129（以下、JIS法）により行われてきましたが、最低6ヵ月間の試験期間が必要であり、試験結果を実際の工事に反映させることは難しい状況でした。工事着工前の試練りを利用して、短期間で判定できる迅速評価法を用いることにより、調合設計や使用材料の選定が可能となりました。乾燥収縮ひび割れが懸念される部位に、調合設計や使用材料の選定を行った乾燥収縮率の小さいコンクリートを使用することは、極めて効果的なひび割れ対策であるといえます。迅速評価法は、2007年1月に財団法人日本建築総合試験所の性能証明（第06-19号）を取得しています。

\* 本技術の適用は当社施工物件に限定しています。



※鹿島建設(株)技術研究所パンフレットから抜粋



# 試験方法(コンクリートの長さ変化試験)

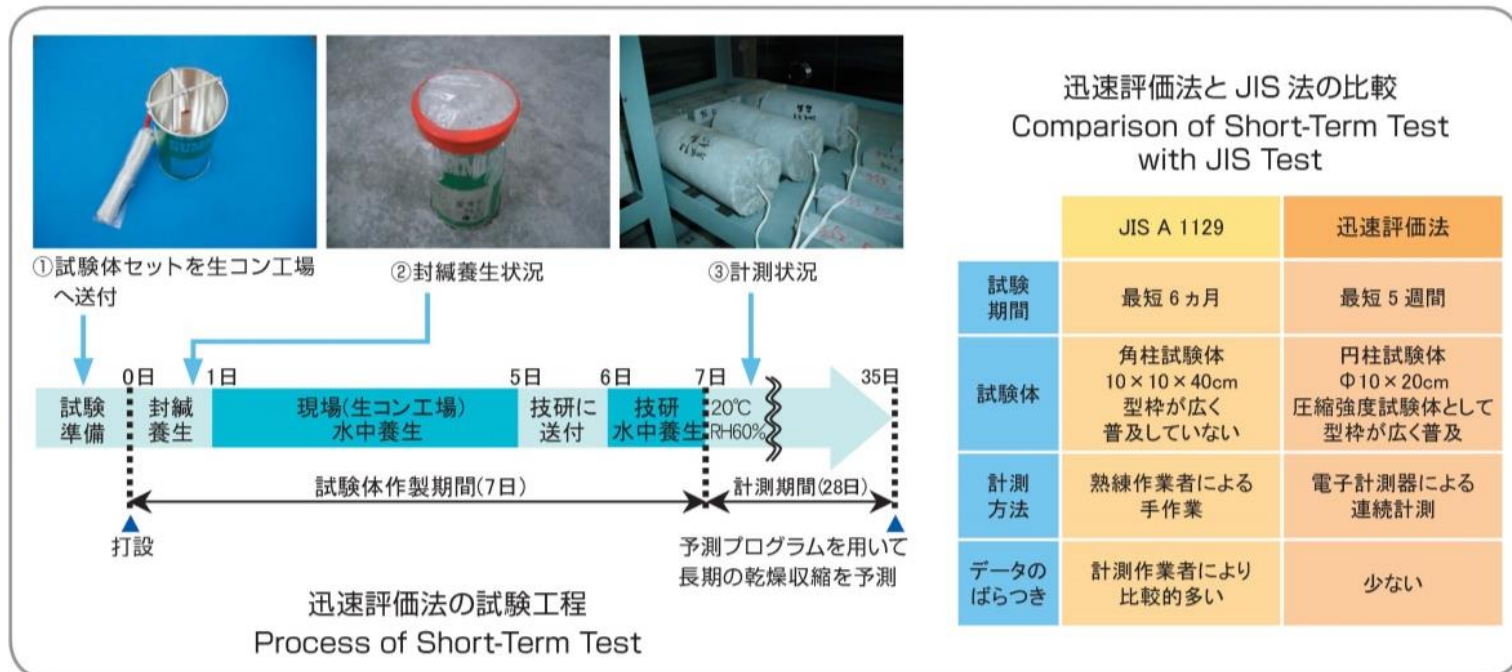
## ■コンクリートの長さ変化試験

- ・試験方法は、鹿島建設が開発した「コンクリートの乾燥収縮迅速評価システム」とした。
- ・なお、実機を対象としたコンクリートについては、参考に「JIS A 1129-1 モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」によって長さ変化を測定した。

### コンクリートの乾燥収縮迅速評価システム 特徴

#### 特徴 Characteristics

迅速評価法は、独自の予測プログラムにより短期間の計測データから長期の乾燥収縮率を判定するとともに、埋め込みひずみ計による自動計測を実施することにより、短期間かつ省力化を実現した試験方法です。

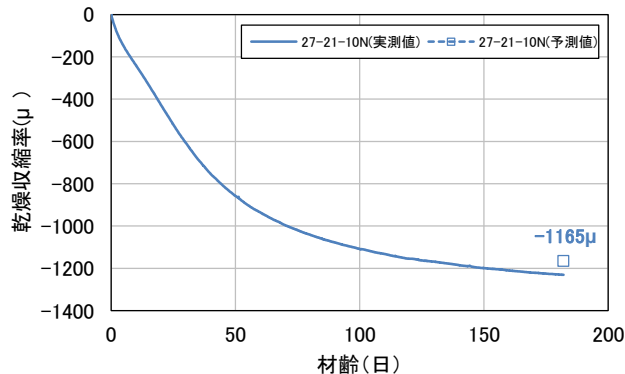


※鹿島建設(株)技術研究所パンフレットから抜粋

# 試験結果(コンクリートの長さ変化試験)

## ■耐震壁試験体

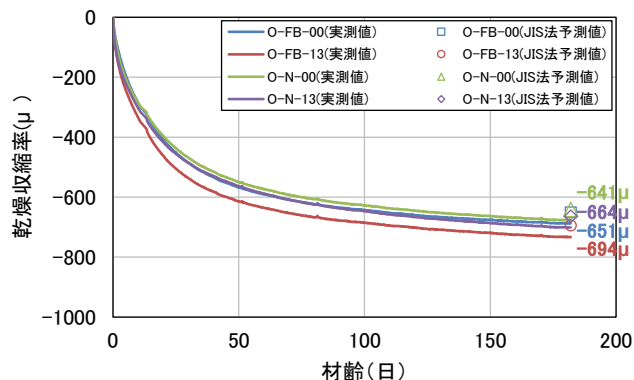
- 乾燥収縮迅速評価システムによる乾燥材齢182日までの実測値と、実測結果から予測したJIS A 1129-1における予測値を示す。JIS A 1129-1における予測値は、-1165 $\mu$ であった。



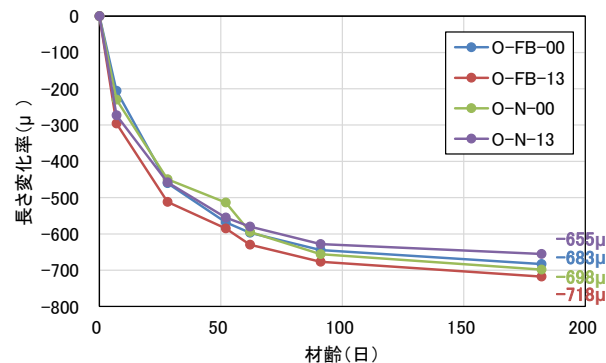
乾燥収縮率予測結果  
(耐震壁試験体の打設コンクリート)

## ■実機

- 乾燥収縮迅速評価システムによる乾燥材齢182日までの実測値と、実測結果から予測したJIS A 1129-1における予測値を示す。JIS A 1129-1における予測値は、O-FB-00で-651 $\mu$ 、O-FB-13で-694 $\mu$ 、O-N-00で-641 $\mu$ 、O-N-13で-664 $\mu$ であった。
- JIS A 1129-1によるコンクリートの乾燥材齢26週(182日)時点の長さ変化率は、O-FB-00で-683 $\mu$ 、O-FB-13で-718 $\mu$ 、O-N-00で-698 $\mu$ 、O-N-13で-655 $\mu$ であった。



乾燥収縮率予測結果 (実機を対象としたコンクリート)

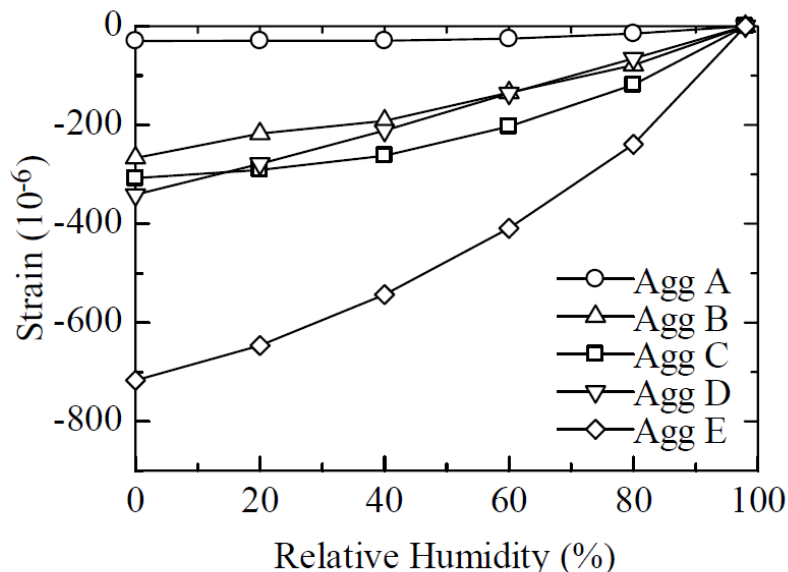


コンクリートの長さ変化率の経時変化 (実機を対象としたコンクリート)

## 試験方法(骨材の長さ変化試験)

### ■骨材の長さ変化試験

- ・コンクリートの乾燥収縮を把握するためには、コンクリートは骨材とセメントペーストの複合構造であることから、骨材自体の乾燥収縮特性を検討する必要がある。ここでは、粗骨材を対象として長さ変化の計測試験を行う。
- ・骨材の乾燥収縮計測は、**TMA(熱機械分析:Thermomechanical Analysis)**により実施した。TMAは ThermoMechanical Analysisの略語で、温度・湿度を制御してサンプルの長さ変化を計測できる装置である。建築の分野では、名古屋大学での実施例がある。
- ・サンプルサイズは8mm程度の立方体で、異方性をもつ骨材が多いので、3方向の長さ変化をそれぞれ測定した。サンプルの湿度が一定となるまで所定の温度・湿度を維持し、変位計により長さ変化を計測した。
- ・乾燥収縮量は、**温度を20°Cに固定し、湿度を段階的に低下(100%から0%へ、20%ステップ毎)させて収縮が収束した段階での収縮量を計測し、対応する湿度における乾燥収縮量とした。**乾燥収縮については異方性があるので、**3方向について計測した。**



TMAによる長さ変化等温線※

※五十嵐他「放射線照射環境下にあるコンクリートの物性変化に関する研究—その4 中性子・ガンマ線照射試験のための調査選定—」, 建築学会大会(北海道), 21657, 2013年8月

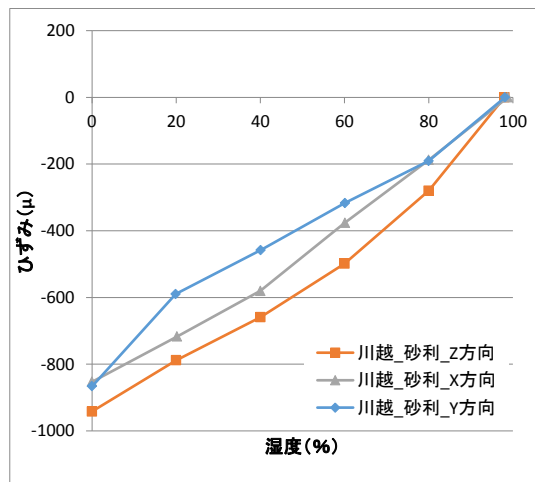
# 試験結果(骨材の長さ変化試験)

## ■耐震壁試験体

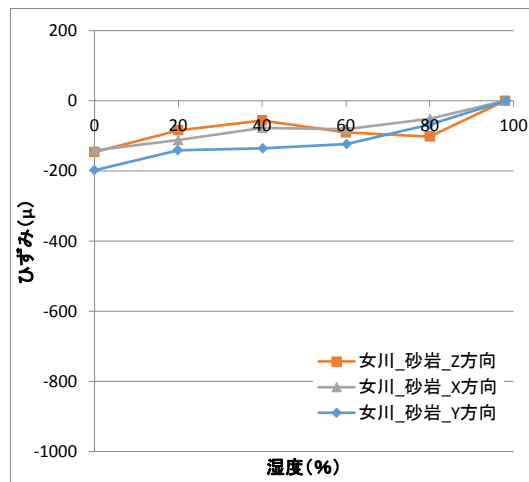
- 耐震壁試験体に用いた骨材(砂利)の最大乾燥収縮ひずみは、-900 $\mu$ 程度と非常に大きい値となった。

## ■実機

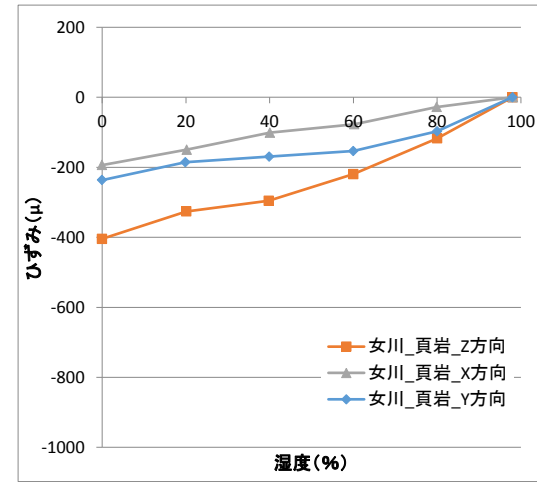
- 女川砂岩は最大乾燥収縮ひずみが-200 $\mu$ 以下で、女川頁岩は-200~-400 $\mu$ となった。女川の骨材は砂岩と頁岩の互層から採取し、砂岩の割合が多いので、女川骨材の最大乾燥収縮ひずみは-200 $\mu$ 程度であると考えられる。



TMAによる分析結果  
(耐震壁試験体のコンクリートの骨材)



(女川砂岩)



(女川頁岩)

TMAによる分析結果  
(実機を対象としたコンクリートの骨材)

## まとめ

### ■試験まとめ

- ・本検討では、耐震実験の試験体と実機のコンクリート材料の試験を実施して、乾燥収縮ひずみの比較評価を行い、両者の特性の違いを検討した。
- ・乾燥材齢26週(182日)時点のコンクリートの長さ変化は、実機が $-700\mu$ 程度であるのに対して、耐震壁試験体は $-1200\mu$ 程度であった。骨材の長さ変化は、実機が $-200\mu$ 程度であるのに対して、耐震壁試験体は $-900\mu$ 程度であった。
- ・上記の結果から、耐震壁試験体のコンクリートおよび骨材の長さ変化は、実機よりも大きい値を示している。このため、乾燥収縮がコンクリート部材の終局耐力に与える影響は耐震壁試験体に比べて実機の方が小さく、耐震実験結果の実機への適用性があると考えられる。

### コンクリートおよび骨材の長さ変化試験結果の概要

		耐震壁試験体	実機
コンクリート	試験方法 1* <sup>1</sup>	$-1200\mu$ 程度	$-700\mu$ 程度
	試験方法 2* <sup>2</sup>	—	$-700\mu$ 程度
骨材* <sup>3</sup>		$-900\mu$ 程度	$-200\mu$ 程度

\* 1:コンクリートの乾燥収縮迅速評価システムによる

\* 2:JIS A 1129-1 モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法による

\* 3:TMA(熱機械分析: Thermomechanical Analysis)による

## 1. 全体概要

## 2. 耐震実験

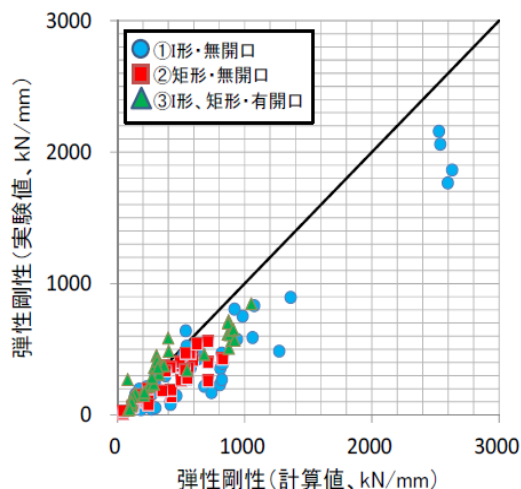
- 2.1 耐震実験[1] 耐震壁に対する繰返し地震力の影響
- 2.2 耐震実験[2] 地震による事前損傷が終局耐力に与える影響
- 2.3 耐震実験[3] 乾燥収縮が終局耐力に与える影響
- 2.4 耐震実験結果の実機への適用性
- 2.5 **乾燥収縮等が初期剛性や終局耐力等に与える影響に関する文献について**

## 3. 耐震実験まとめ



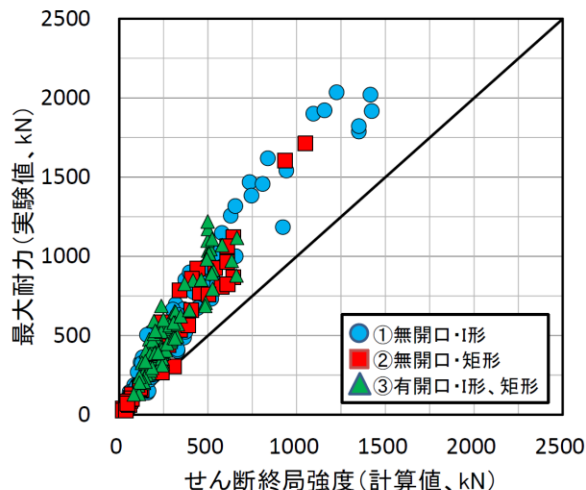
# 乾燥収縮の影響(文献レビュー) (1)

- ・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。
- ・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。

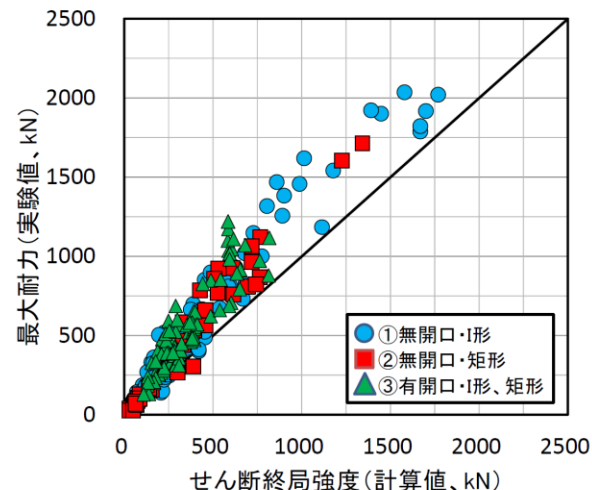


(a) 実験値と計算値の比較 (評価式 I)

耐震壁実験の実験値と計算値の  
弾性剛性の比較



(a) 評価式 I  
(廣沢min式)

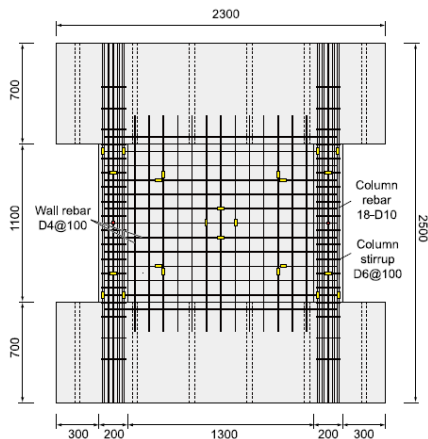


(b) 評価式 II  
(廣沢mean式)

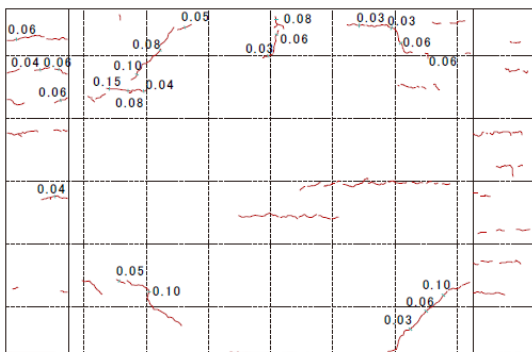
せん断終局強度の実験値と計算値の比較

# 乾燥収縮の影響(文献レビュー) (2)

・Sasano et al.(2018)は、RC耐震壁を模擬した試験体(厚さ80mm, 鉄筋比0.35%)を十分に乾燥させた後に面内せん断載荷試験を実施し、乾燥収縮がRC耐震壁の構造性能へ与える影響を実験的に確認している。実験結果から、乾燥収縮によって壁試験体の初期剛性は約5割程度に低下するが、変形が大きくなると剛性の差は小さくなり、終局耐力はほとんど影響を受けないことを述べている。



試験体概要



Front (right side is north)

Table 6 Load and displacement at significant stages of loading.

	Shear crack		Yielding of wall rebar		Bending crack		Yielding of column rebar		Ultimate strength	
	Load	Disp.	Load	Disp.	Load	Disp.	Load	Disp.	Load	Disp.
Sealed	435	0.37 (1/2970)	-464	-0.62 (1/1770)	-610	-1.46 (1/753)	889	3.95 (1/278)	980	5.02 (1/220)
Dry	273	0.435 (1/2530)	-362	-0.95 (1/1160)	562	1.94 (1/567)	804	3.88 (1/284)	942	5.51 (1/200)

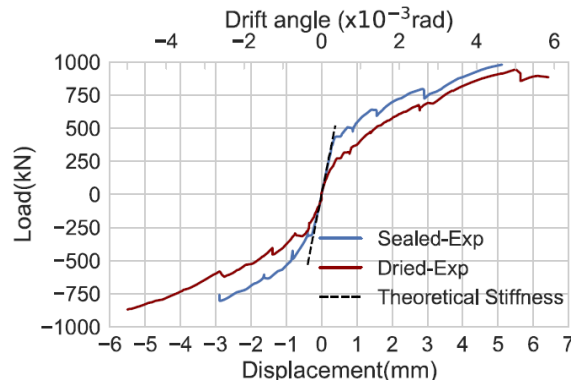
\*Values in brackets shows drift angle. (Unit of "Load": kN, Unit of "Disp.": mm)

Table 7 Stiffness of each cycle.

	Sealed	Dry	Theoretical stiffness*2	Dry / Sealed	Dry / Theoretical
Initial Stiffness (kN/mm)	1226	663	1330	0.54	0.50
Equivalent Stiffness (kN/mm)	1/800	459	333	0.73	0.25
	1/400	289	236	0.82	0.18
	1/200	196*1	165	0.84	0.12

\*1: Calculated by the least squares method of the load deformation relation from 0 kN to the failure (1/220)

\*2: Shape factor is calculated by the "AIJ standard for Lateral Load-carrying Capacity Calculation of Reinforced Concrete Structures (Draft)" (AIJ 2016)



各試験体の荷重-変形関係の比較

加力前における乾燥試験体のひび割れ図(乾燥期間:462日間)

※Sasano et al.(2018): Impact of Drying on Structural Performance of Reinforced Concrete Shear Walls, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 16, 210-232 に一部加筆

・耐震実験[3](鉄筋比1.4%)では、初期の剛性がJEAG式に対して4割程度低下していること、また、耐震実験[1](乾燥していない試験体)と耐震実験[3](乾燥している試験体)の剛性低下率の比較から、変形が大きくなると剛性低下率の差が小さくなっていくことを確認しており、論文の実験結果と整合している。

## 1. 全体概要

## 2. 耐震実験

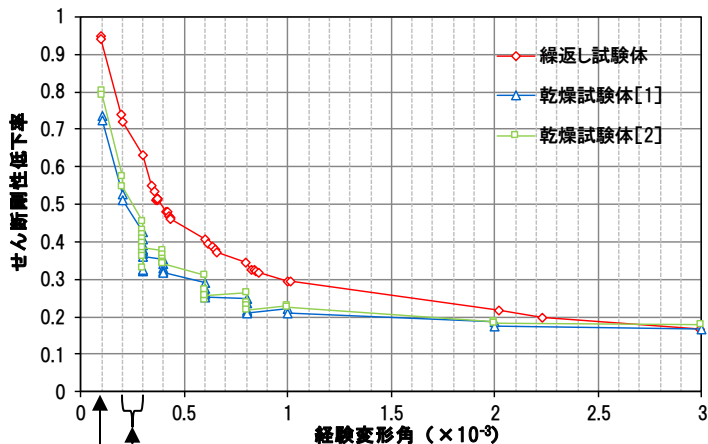
- 2.1 耐震実験[1] 耐震壁に対する繰返し地震力の影響
- 2.2 耐震実験[2] 地震による事前損傷が終局耐力に与える影響
- 2.3 耐震実験[3] 乾燥収縮が終局耐力に与える影響
- 2.4 耐震実験結果の実機への適用性
- 2.5 乾燥収縮等が初期剛性や終局耐力等に与える影響に関する文献について

## 3. 耐震実験まとめ

# 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(1)

## 乾燥試験体と乾燥を受けていない試験体の比較

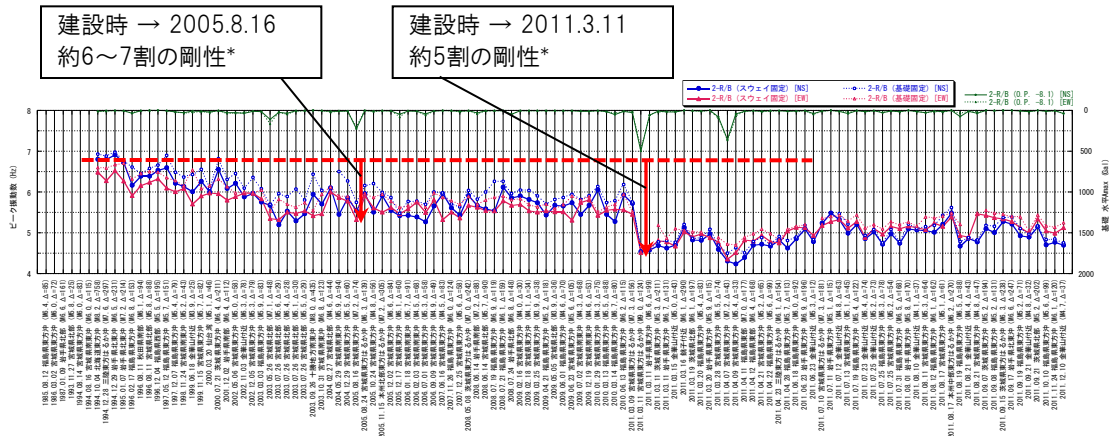
- 先に示した耐震実験[1]と耐震実験[3]は、同じ形状の耐震壁の試験体で鉄筋量も同じ1.4%，加力方法，サイクルも基本的には同じである。違いとしては耐震壁の乾燥の有無であり，耐震実験[1]はコンクリート打設後約4週間型枠をつけたまま養生し，型枠脱型後，1週間後に試験を実施しており，ほぼ乾燥収縮を受けていない状況にある。
- そのため，耐震実験[1]と耐震実験[3]とでは，剛性低下の傾向に違いが生じ，耐震実験[3]の方が初期の剛性低下量が大きく，また，主要地震(2005年宮城県沖地震や3.11地震)時の女川2号炉原子炉建屋の剛性低下量(建設当初からの剛性低下量)との整合性は耐震実験[3]の方が良い。
- このことから，設計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示す結果となっている。



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

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

剛性低下率の比較



## 固有振動数低下の傾向(水平方向)(女川2号炉原子炉建屋)

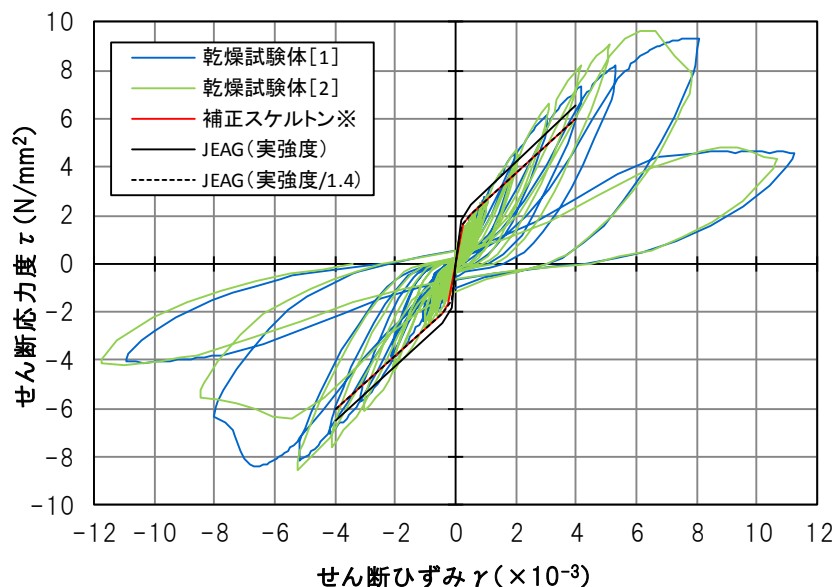
\*剛性 =  $(f(\text{地震後のピーク振動数}) / f_0(\text{建設時のピーク振動数}))^2$

# (参考)荷重－変形関係の比較

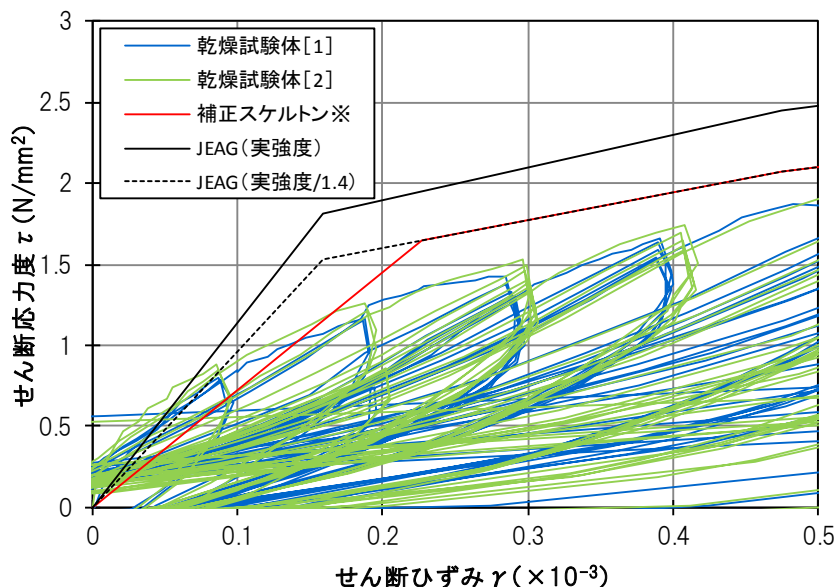
・耐震実験[3]の乾燥試験体[1]および[2]の荷重－変形関係と、設計基準強度相当としてJEAG式を1/1.4としたスケルトンカーブをベースに、さらに今回工認モデルで採用している初期剛性の補正係数(0.75倍: NS方向)を考慮したスケルトンカーブ(補正スケルトン)を重ねて示す。合わせて、せん断ひずみ $0.5 \times 10^{-3}$ までの領域を拡大して示す。

①乾燥試験体[1]および[2]は乾燥期間の違いがあるものの、ほぼ同等の初期剛性となっている。

②実験結果と補正スケルトンの比較から、せん断ひずみ $0.1 \times 10^{-3}$ と $0.2 \times 10^{-3}$ の加力サイクルの間に補正スケルトンが位置している。



耐震実験結果(荷重－変形関係)



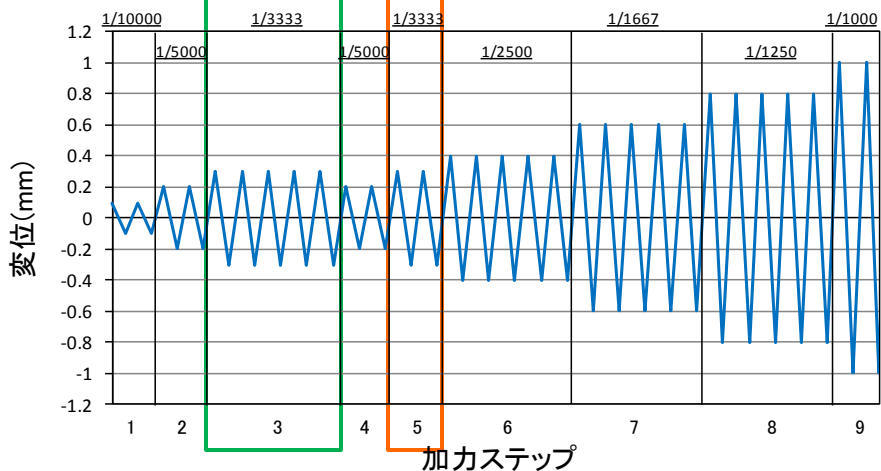
耐震実験結果(荷重－変形関係)  
正側拡大図

※補正スケルトン: 設計基準強度相当としてJEAG式を1/1.4としたスケルトンカーブをベースに、さらに今回工認モデルで採用している初期剛性の補正係数(0.75倍: NS方向)を考慮

# 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(2)

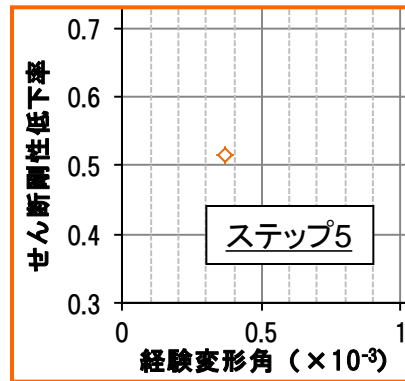
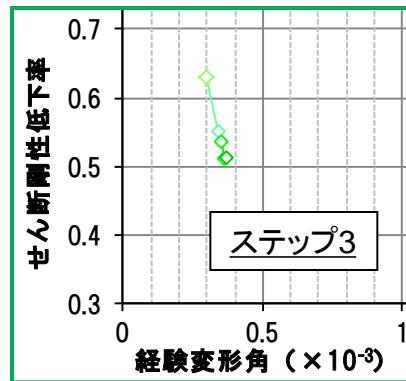
## 乾燥試験体と乾燥を受けていない試験体の比較

- 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。
- インナーloopで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。
- なお、この比較における事前損傷程度としては、 $0.3 \times 10^{-3}$ 程度の変形角であるが、さらに変形が進んだ場合には、ひび割れが多くなり、乾燥収縮による応力は解放されその影響は小さくなるため、耐震実験[2]とほぼ同様の傾向になると考えられる。(耐震実験[1]と耐震実験[3]の $2.0 \times 10^{-3}$ の変形角でのひび割れ図から同等のひび割れ発生状況であることが確認できる。)

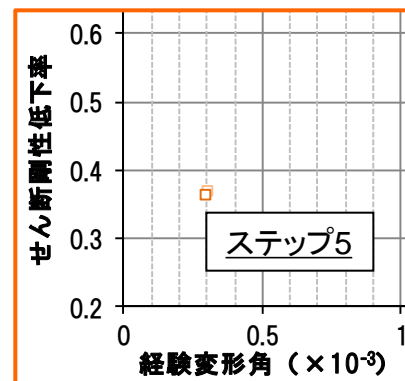
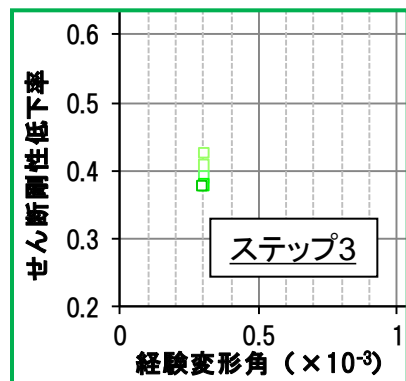


加力概念図

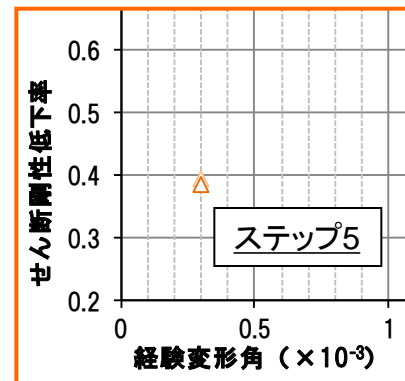
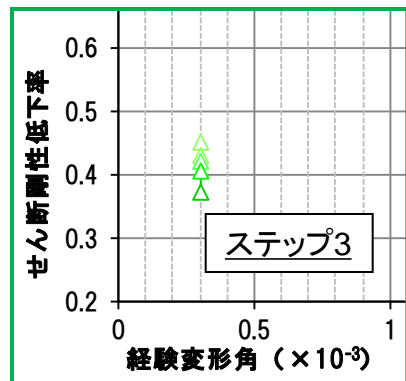
繰返し試験体



乾燥試験体[1]



乾燥試験体[2]

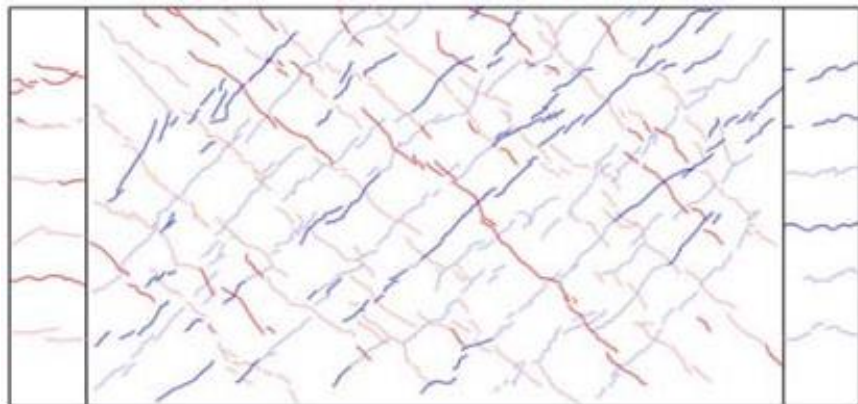


剛性低下率の比較



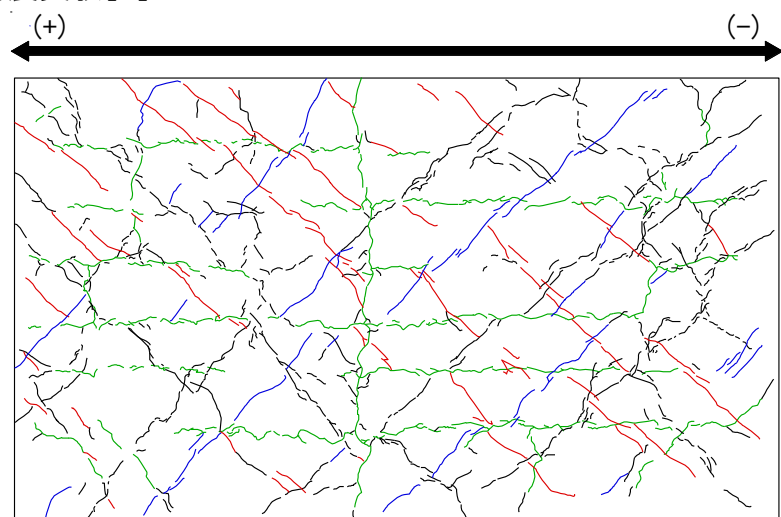
# (参考) $2.0 \times 10^{-3}$ におけるひび割れ図の比較

## ■耐震実験[1]

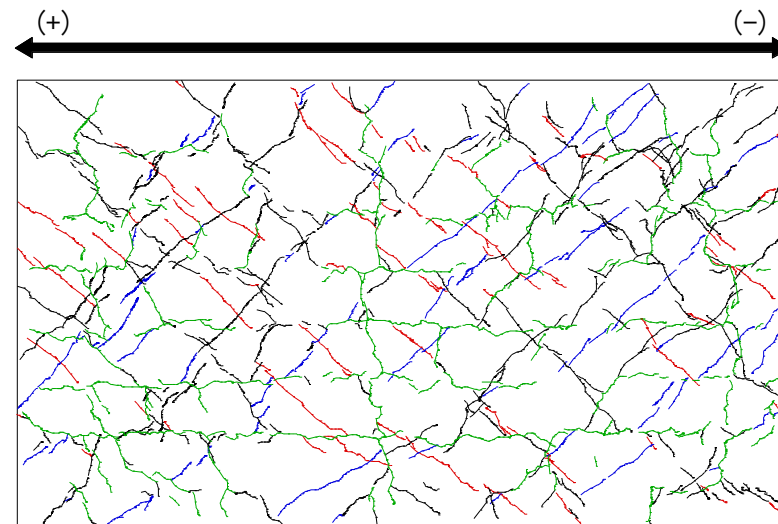


繰返し試験体 1/500rad. ( $2.0 \times 10^{-3}$ )におけるひび割れ図

## ■耐震実験[3]



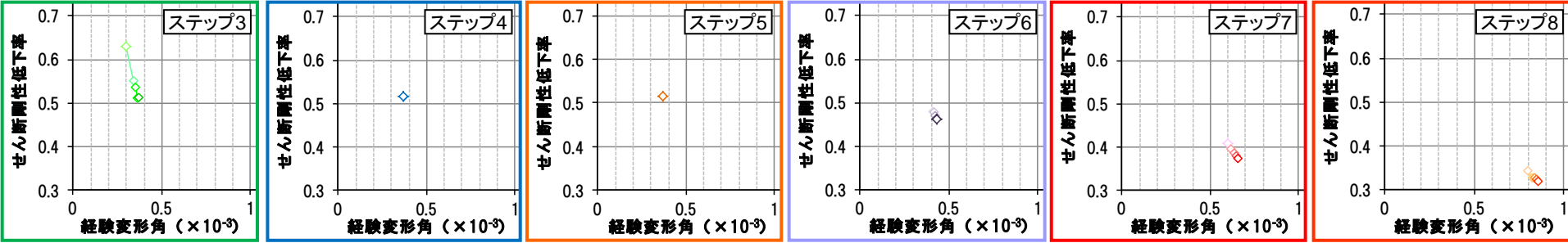
乾燥試験体[1] 1/500rad. ( $2.0 \times 10^{-3}$ )におけるひび割れ図



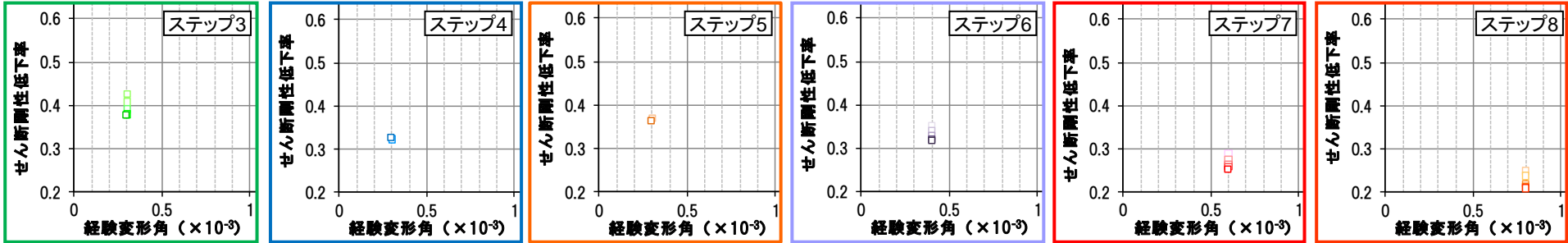
乾燥試験体[2] 1/500rad. ( $2.0 \times 10^{-3}$ )におけるひび割れ図

# (参考)各ステップのせん断剛性低下率の比較

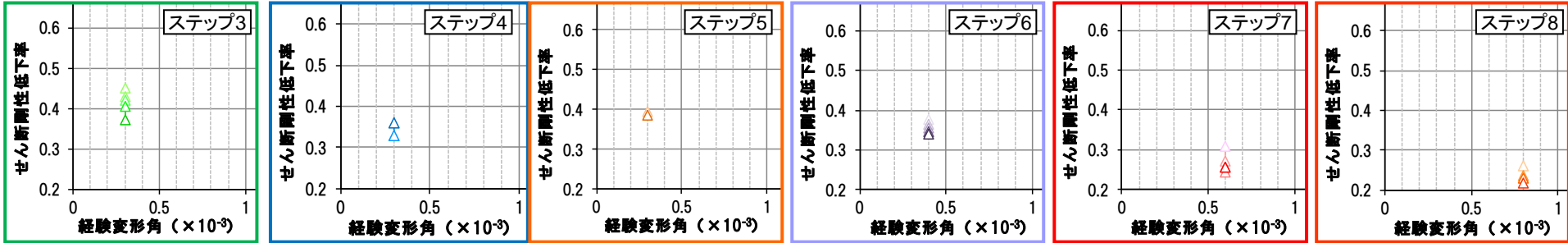
■耐震実験[1]繰返し試験体(応力制御)



■耐震実験[3]乾燥試験体[1](変位制御)



■耐震実験[3]乾燥試験体[2](変位制御)



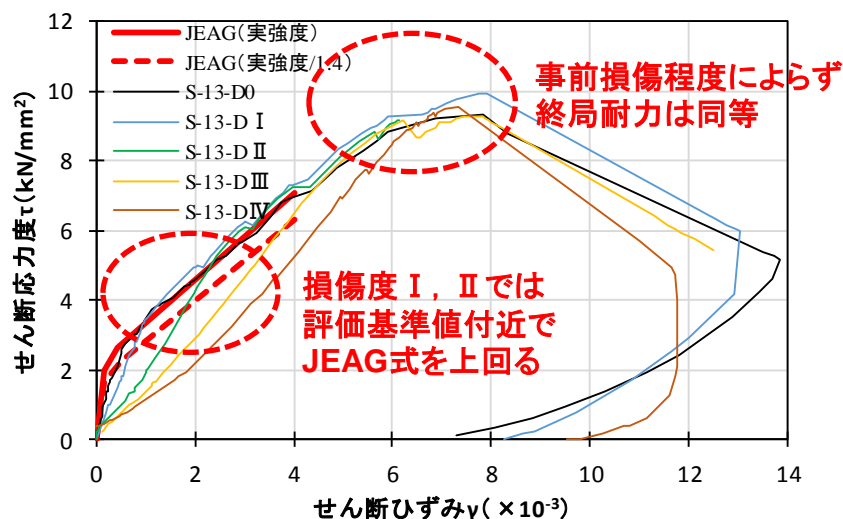
# 耐震実験を踏まえた終局耐力への影響についての考察

## ■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

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。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  $S_s$  に対する評価基準値(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。

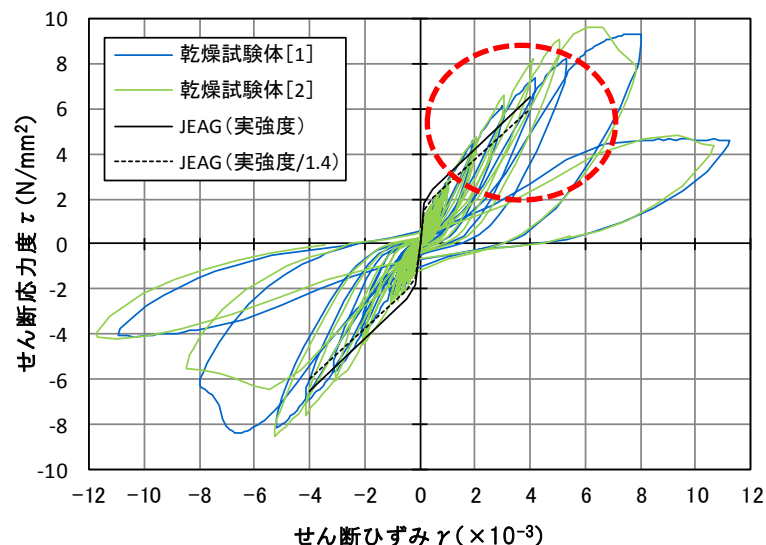
## ■耐震実験[3] 乾燥収縮が終局耐力に与える影響

乾燥収縮の影響については、約3か月乾燥させた乾燥試験体[1]では、初期の剛性はJEAG式より低下するものの、評価基準値付近や終局耐力付近では上回ることを確認した。さらに乾燥させた乾燥試験体[2](約8か月乾燥)でも、その傾向は同様であった。



耐震実験[2] 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)

評価基準値付近, 終局耐力付近ではJEAG式を上回る



耐震実験[3] 乾燥収縮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)

## 耐震実験結果のまとめ

### ■耐震実験[1]耐震壁に対する繰返し地震力の影響

- 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。
- 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。

### ■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

- 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。
- 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 $S_s$ に対する評価基準値(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。

### ■耐震実験[3]乾燥収縮が終局耐力に与える影響

- 乾燥した試験体では、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。
- 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。
- 乾燥期間をパラメータとした乾燥試験体[1]と乾燥試験体[2]の比較から、初期の剛性も含めて各サイクルでの荷重-変形関係は同等であり、さらに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。

### ■耐震実験[1]と耐震実験[3]の比較

- 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。
- 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。

- 繰返し加力による有意な剛性低下は認められなかった。
- 女川2号炉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。
- 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 $S_s$ に対する評価基準値(せん断ひずみ: $2.0 \times 10^{-3}$ )付近の耐力や終局耐力に与える影響は小さい。