

39: 鉄筋コンクリート造連層耐力壁の 構造詳細と部材種別に係る基準の 整備に資する検討

研究分担者

京都大学

東京大学

名古屋工業大学

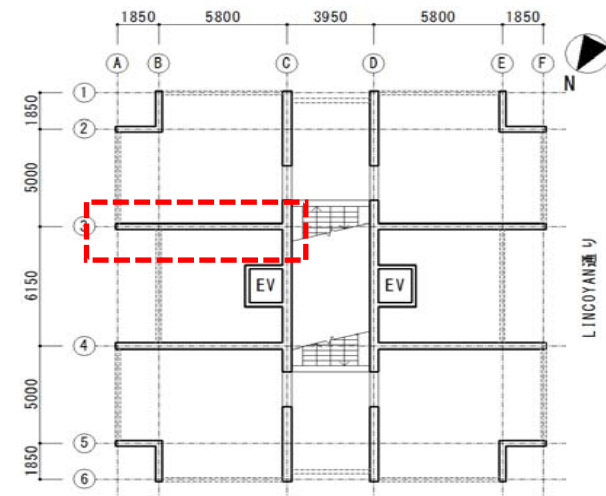
豊橋技術科学大学

共同研究者

建築研究所

研究背景

- **曲げ降伏型耐震壁の変形性能**
 - － 部材ランク評価における保証設計(せん断余裕度)の意義
 - 中高層では軸方向応力度が重要
 - 曲げ圧縮破壊の防止
 - － 以下の諸量の変形性能に与える影響は不明
 - 曲げ、せん断、軸応力度レベル
 - 壁板のせん断補強筋量
 - 端部のせん断(拘束)補強筋量
 - 耐震壁の対称性
 - 地震力の多方向性
- **規準改定と地震被害事例**
 - － 2010年RC規準・同解説の改定
 - 1次設計では損傷制御
 - 2次設計の詳細に関しては指針がない
 - － 2010年チリ地震における被害事例
 - 曲げ降伏型耐震壁の圧縮破壊



目的

断面配筋および加力条件がRC造連層耐震壁の変形性能に与える影響に関する調査

- ① 端部拘束域の断面形状と補強量が耐震壁の靱性に与える影響に関する実験調査(京都大学)
- ② 端部拘束域の断面形状と補強量が非対称断面の耐震壁の靱性に与える影響に関する実験調査(名古屋工業大学, 豊橋技術科学大学)
- ③ 曲げ降伏型耐震壁の靱性に対する多方向地震力の影響に関する実験調査(東京大学)

調査の方針

- I) 問題点の把握と実験データベースの構築
- II) 連層耐震壁試験体を用いた構造実験の実施
- III) 解析モデルの構築と数値解析
- IV) 各種設計式の提案

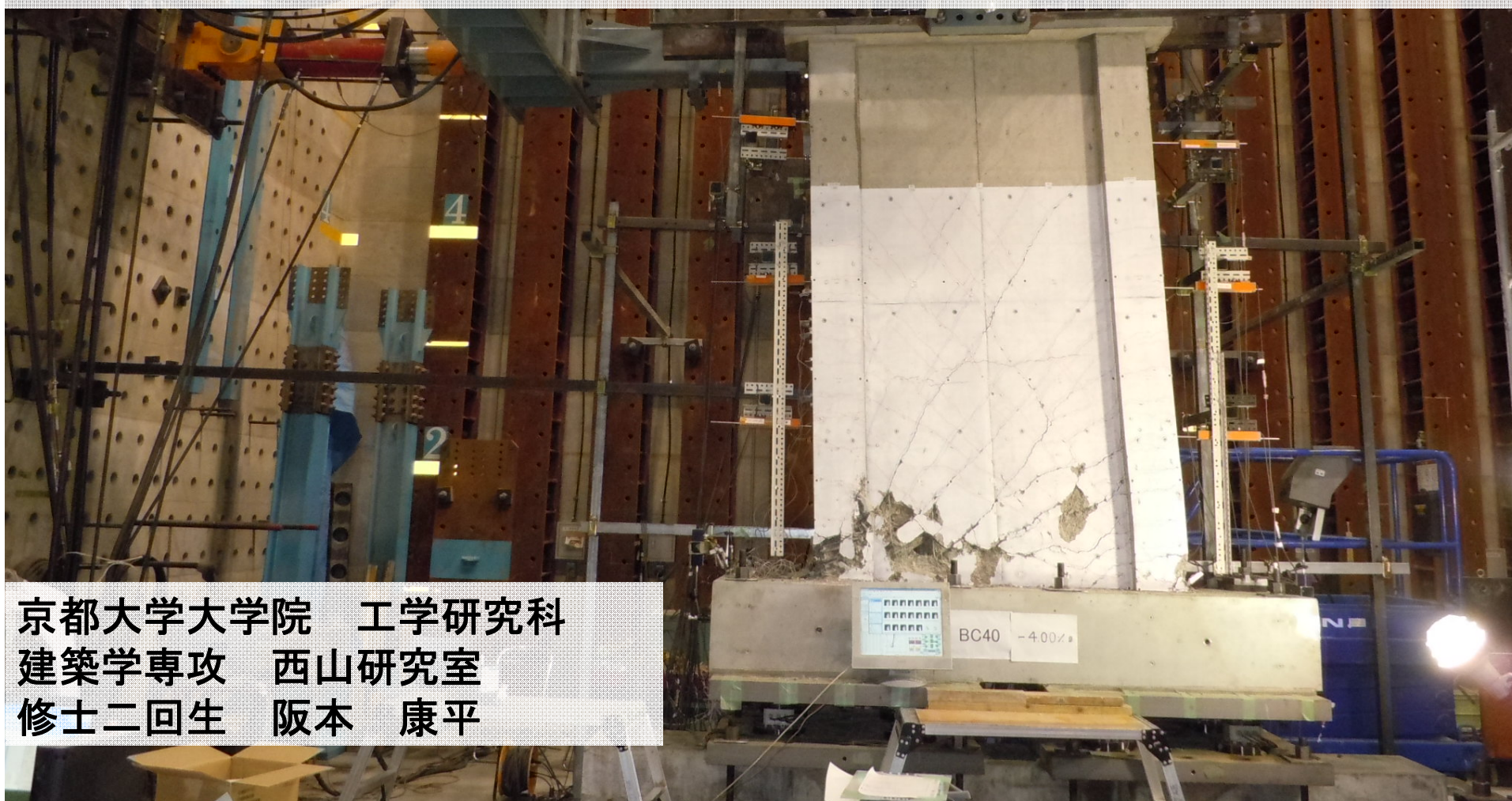
2011年度 実験以外の調査と期待される成果

- **実験以外の調査内容**
 - I) データベースの構築
 - AIJ耐震壁WGとの連携
 - III) 解析モデルの構築
 - FEMモデルの構築と改善(拘束コンクリート)
 - 断面解析モデルの改善
 - IV) 各種設計式の提案
 - WAランク実現可能な詳細のメカニズム特定
- **期待される成果**
 - － WAランクに相当する耐震壁詳細の存在確認
 - － 重要変数特定に必要なデータベースの作成
 - － 解析モデル(FEM・断面解析)の構築

①

端部拘束域の断面形状と補強量が
左右対称な耐震壁の靱性に与える影響
(京都大学)

枠柱の有無がRC造連層耐震壁の 耐震性能に及ぼす影響



京都大学大学院 工学研究科
建築学専攻 西山研究室
修士二回生 阪本 康平

2.研究背景・研究目的 部材ランク

構造技術解説書：構造特性係数 D_s 値を部材ランクにより算出

耐力壁の種別		WA	WB	WC	WD
共通条件		せん断破壊をするおそれがないこと			左記以外
τ_u/F_c 上限	一般	0.2	0.25	-	
	壁式構造	0.1	0.125	0.15	

委員会※により部材ランクと終局変形角の関係が検討されている。
(WA部材が終局変形角 $R_u \geq 1.5\%$ 程度ではないか....)

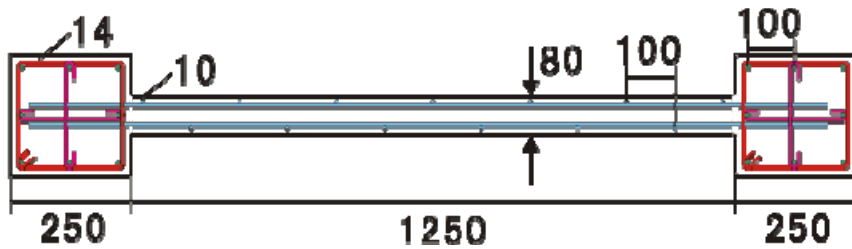
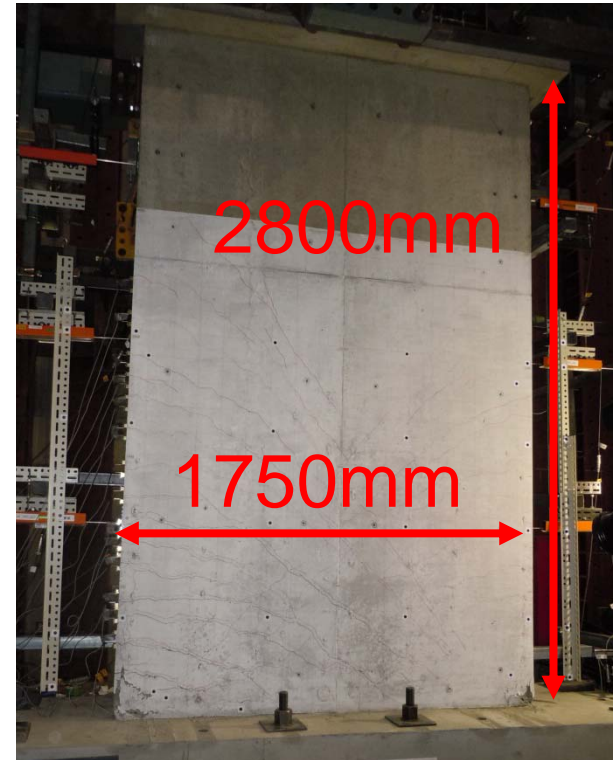
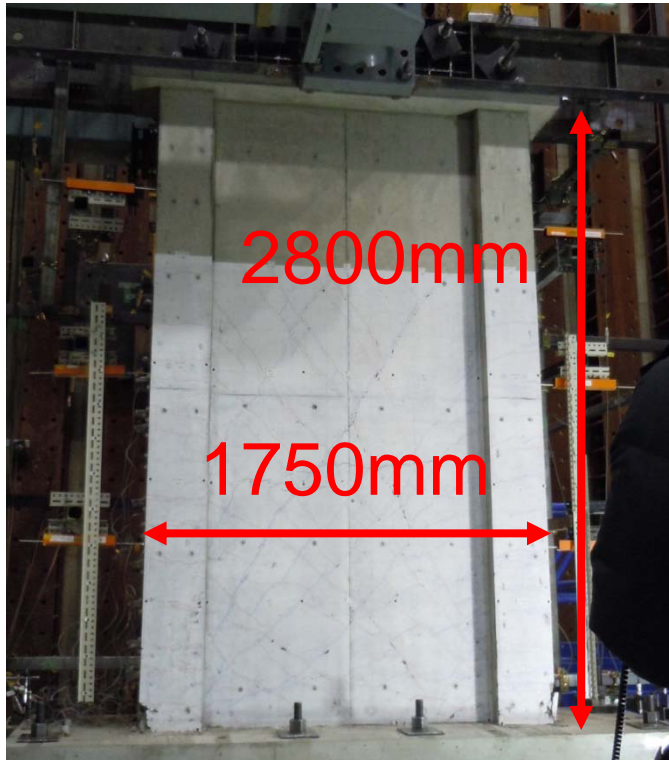
※AIJ応答スペクトルによる耐震設計小委員会

研究目的

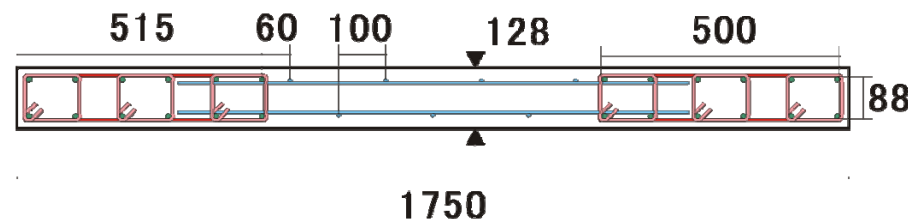
枠柱の無い耐震壁の端部拘束手法の確立と、耐震壁の終局変形角の予測を目的とし、枠柱の有無と端部のせん断補強筋量が曲げ降伏型耐震壁の変形性能に与える影響を調べた。

3. 実験概要 試験体

「**枠柱の有無**」と「せん断補強筋量」をパラメータとした4体（縮尺40%）



BCシリーズ

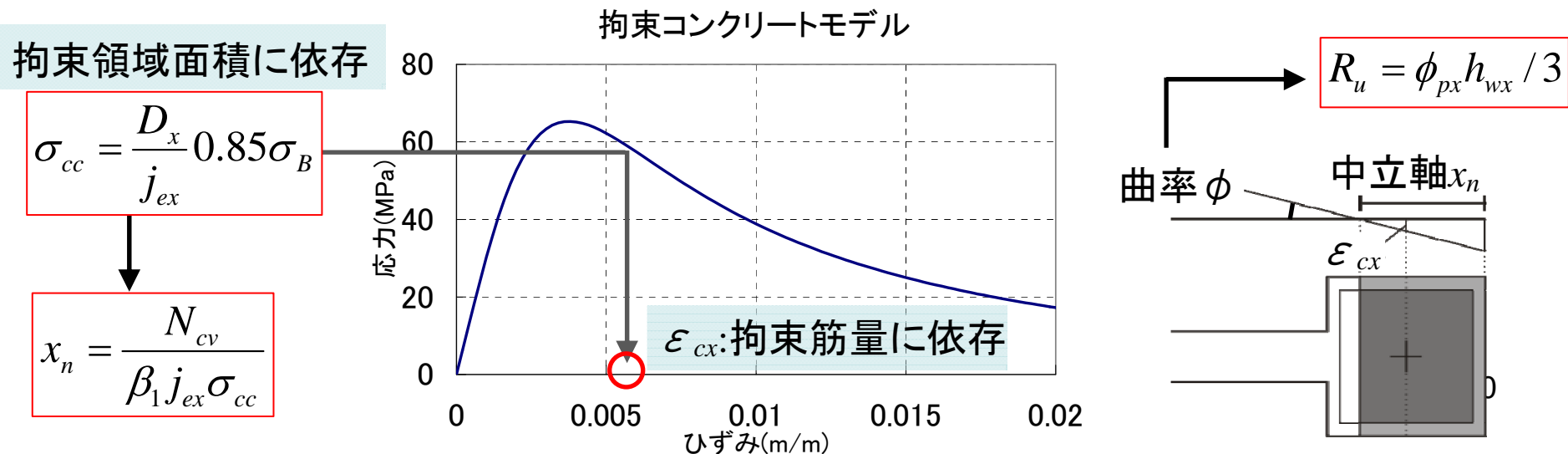


NCシリーズ

4.実験概要 せん断補強筋量の設計方法

靱性指針では終局変形角を以下により計算している。

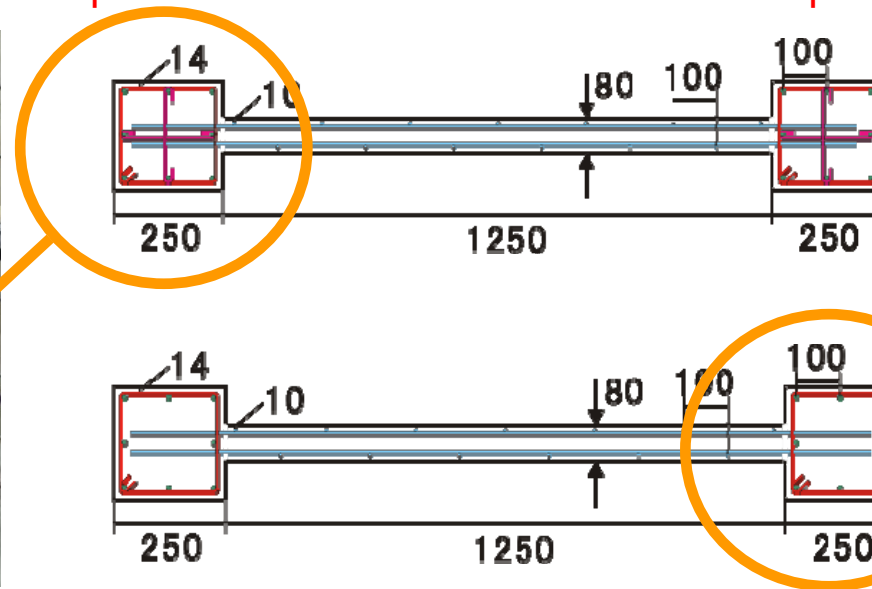
- ① 枠柱カバー剥落時のコアコンクリートが負担する圧縮応力度 σ_{cc} を求める。
 - ② 曲げ耐力時のコンクリートへの圧縮力を計算し、中立軸 x_n を求める。
 - ③ 拘束コンクリートの応力-ひずみ関係から σ_{cc} 時のひずみ ε_{cx} を求める。
 - ④ 枠柱中心のひずみが ε_{cx} として中立軸を用いて曲率を求める。
 - ⑤ ヒンジ領域を壁全せいの1/3として曲率から終局変形角 R_u を求める。
- ⇒ 部材ランクWAを意識し、 R_u の基準を1.5%として設計した。



5.実験概要 BCシリーズ

「**枠柱の有無**」と「**せん断補強筋量**」をパラメータとした4体(縮尺40%)

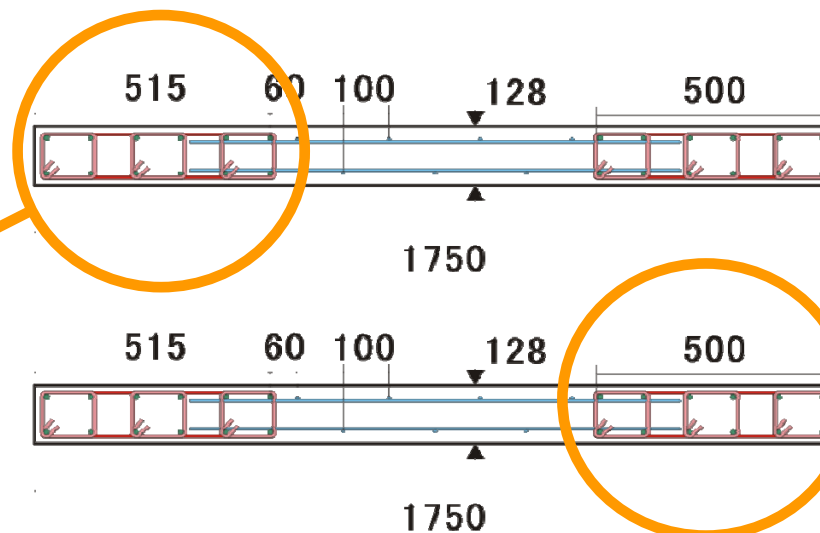
		BC40	BC80
枠柱	断面・主筋	250×250mm, 8-D10【0.91%】	
	横補強筋	3-D6@40【0.95%】	2-D6@80【0.32%】
壁板	壁厚・壁筋	80mm	
	縦・横筋	D6@100千鳥【0.40%】	
部材ランク		WA【 $\tau_u/F_c=0.04$ 】	
設計目標		$R_p > 1.5\%$ (2.4%)	$R_p < 1.5\%$ (1.3%)



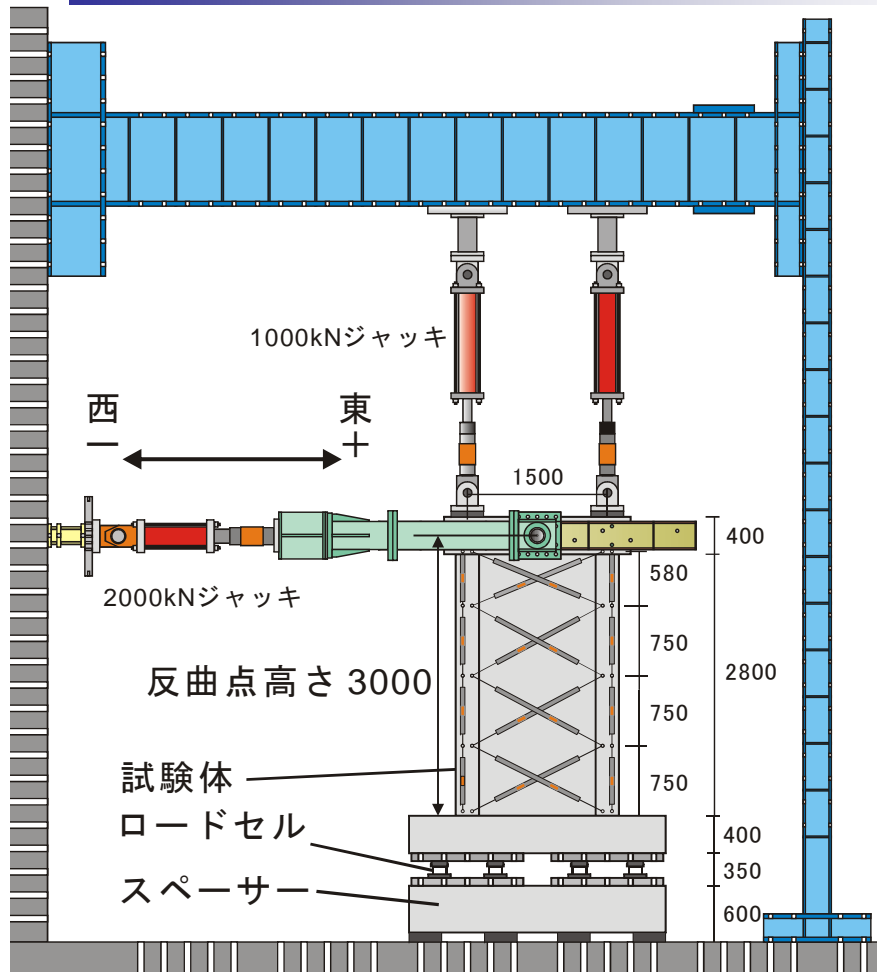
6. 実験概要 NCシリーズ

「枠柱の有無」と「せん断補強筋量」をパラメータとした4体（縮尺40%）

		NC40	NC80
枠柱	断面・主筋	128 × 520mm, 12-D10 【1.29%】	
	横補強筋	4-D6@40 【2.47%】	4-D6@80 【1.24%】
壁板	壁厚・壁筋	128mm	
	縦・横筋	D6@100千鳥 【0.25%】	
部材ランク		WA 【 $\tau_u/F_c=0.06$ 】	
設計目標		$R_p > 1.5\%$ (1.7%)	$R_p < 1.5\%$ (1.0%)



7.実験概要 載荷装置

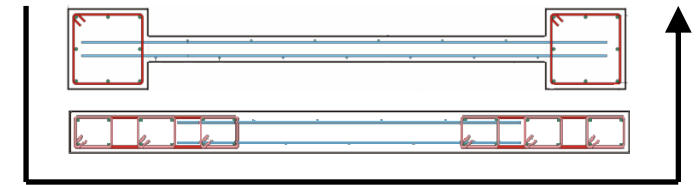


- ・せん断スパン比: 1.7
→ せん断余裕度 1.3
- ・軸力: 一定軸力 1500kN
(軸力比 柱断面: 0.2)

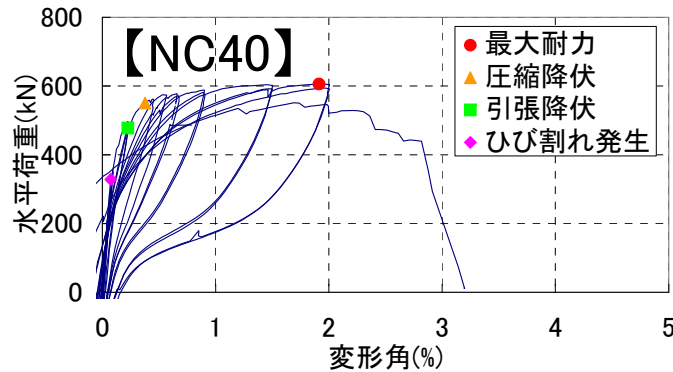
コンクリート	圧縮強度 (MPa)
BC	59.5
NC	52.5

鉄筋	降伏応力 (MPa)
D6	387
D10	377

8. 実験結果 損傷状況



ひび割れ観測面

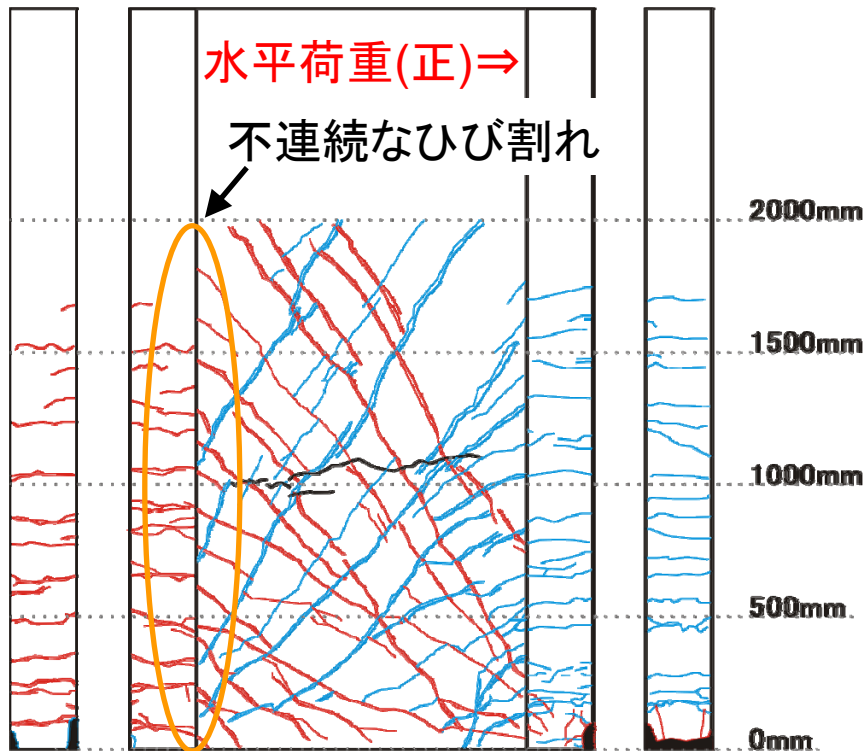


R=0.10% 引張縁に**曲げ**ひび割れ

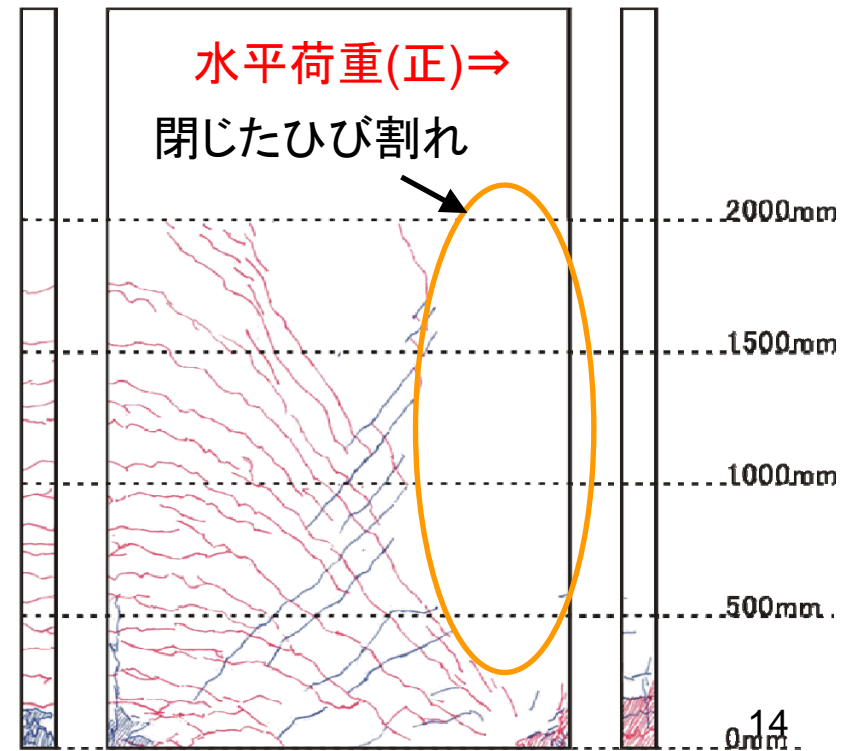
R=0.25% 壁板に**せん断**ひび割れ

R=1.00% 脚部に縦方向の**圧縮**ひび割れ

赤: 正荷重(→)ひび割れ 青: 負荷荷(←)ひび割れ

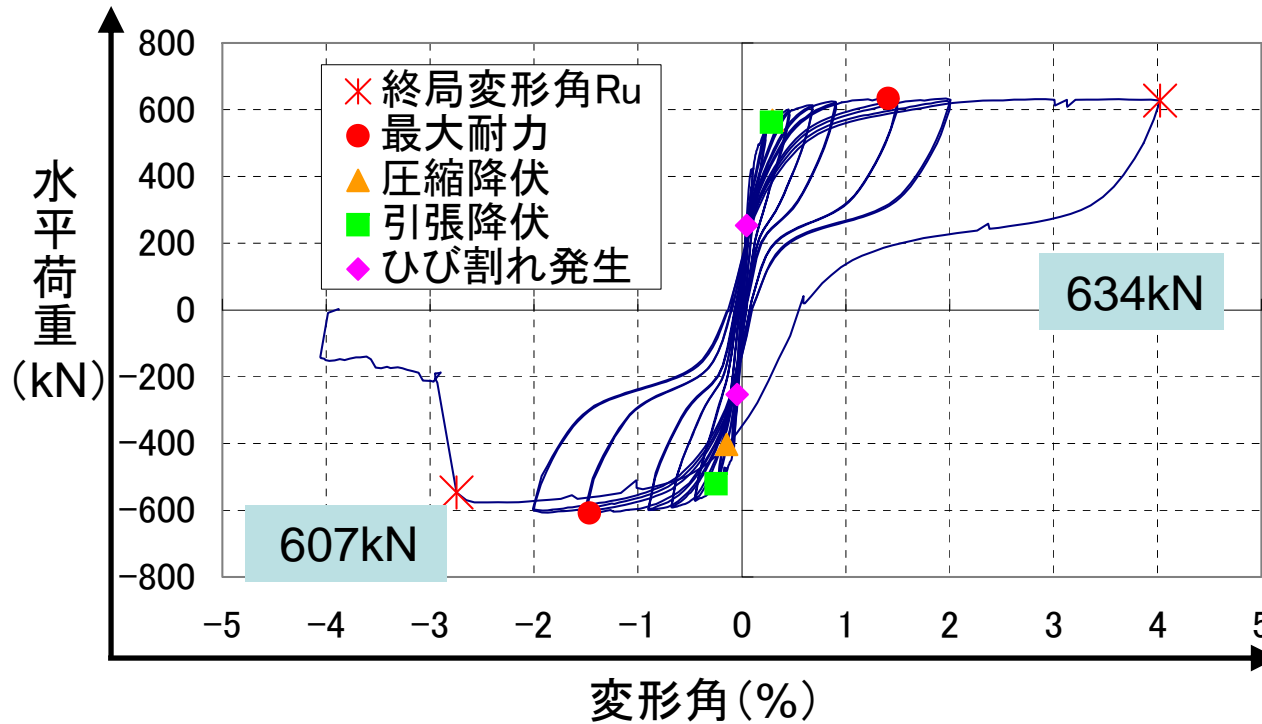


BC40 +0.005% (ピーク時)



NC40 +0.006% (ピーク時)

9. 実験結果 BC40 (柱有り せん断補強量: 多)

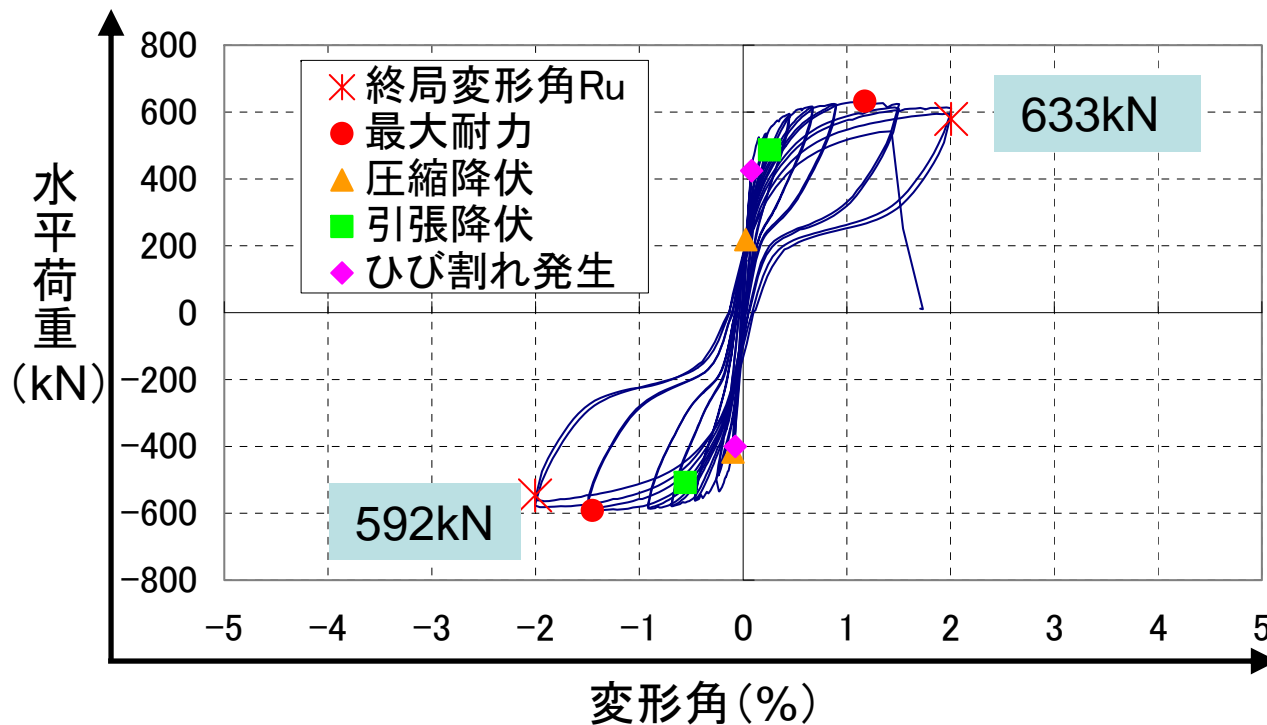


載荷後の写真

壁縦筋の座屈	$R = \pm 1.5\%$
柱主筋の座屈	$R = +4.0\%$
水平耐力低下	$R = \pm 4.0\%$ サイクル負側
終局変形角	$exp Ru = 4.0\%$
靱性指針 $Ru (Exp/Cal)$	$cal Ru = 2.4\% (1.67)$



10.実験結果 BC80 (柱有り せん断補強量:少)



柱脚の圧壊

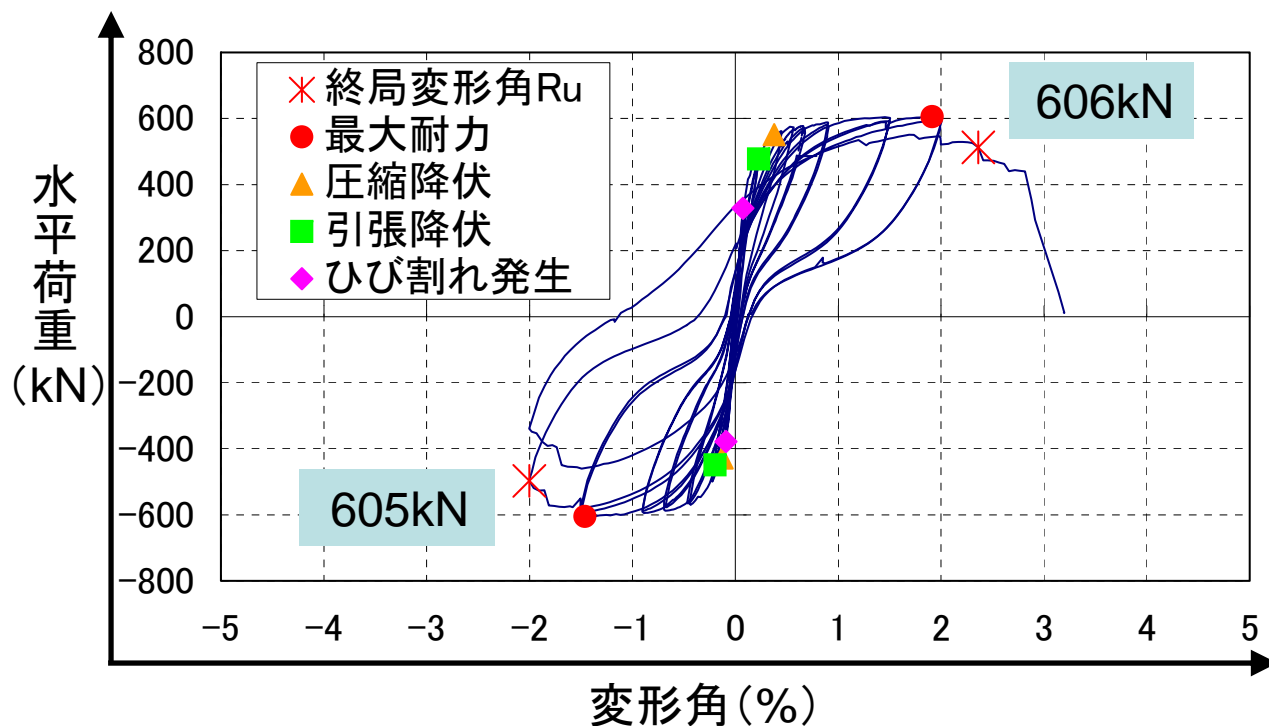
載荷後の写真

壁縦筋の座屈	$R = \pm 1.0\%$
柱主筋の座屈	$R = \pm 1.5\%$
水平耐力低下	$R = \pm 4.0\%$ サイクル正側
終局変形角	$exp R_u = 2.0\%$
靱性指針 R_u (Exp/Cal)	$cal R_u = 1.3\% (1.55)$



主筋の座屈

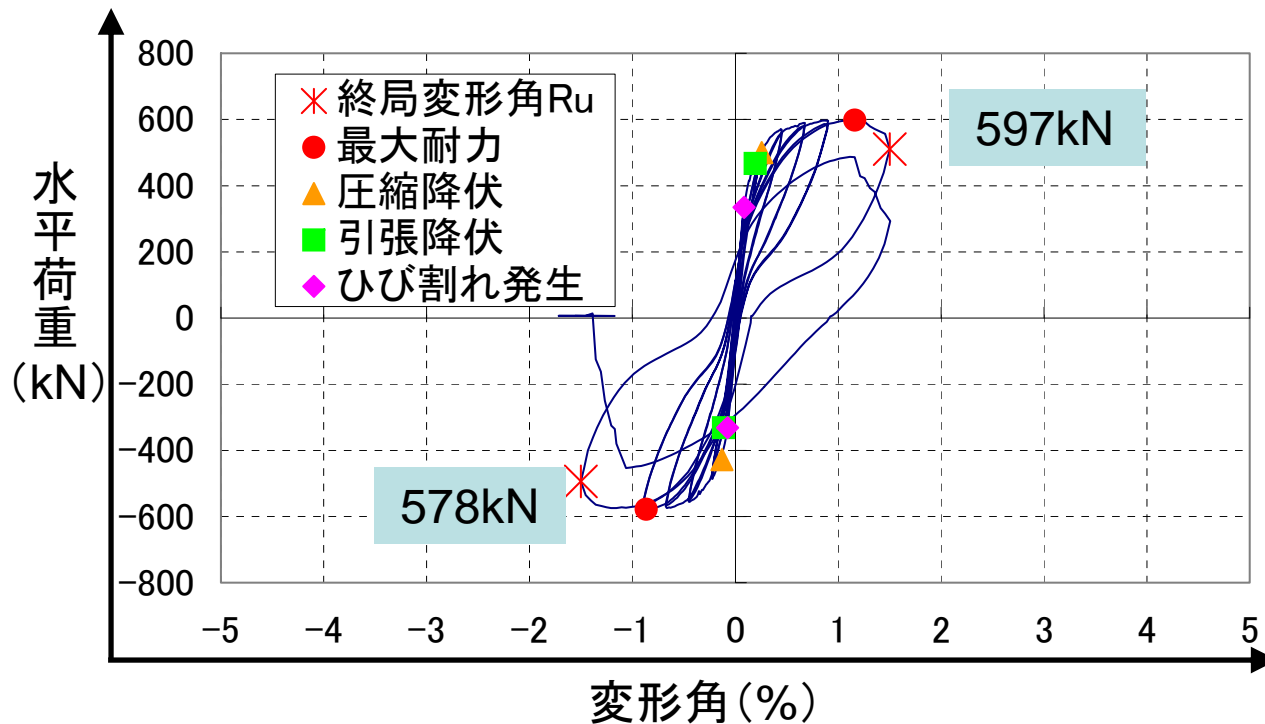
11. 実験結果 NC40 (柱無し せん断補強量: 多)



壁縦筋の座屈	$R=+2.8\%$
柱主筋の座屈	$R=+2.8\%$
水平耐力低下	$R=\pm 4.0\%$ サイクル正側
終局変形角	$exp R_u=2.4\%$
靱性指針 R_u (Exp/Cal)	$cal R_u=1.7\%(1.38)$



12. 実験結果 NC80 (柱無し せん断補強量:少)

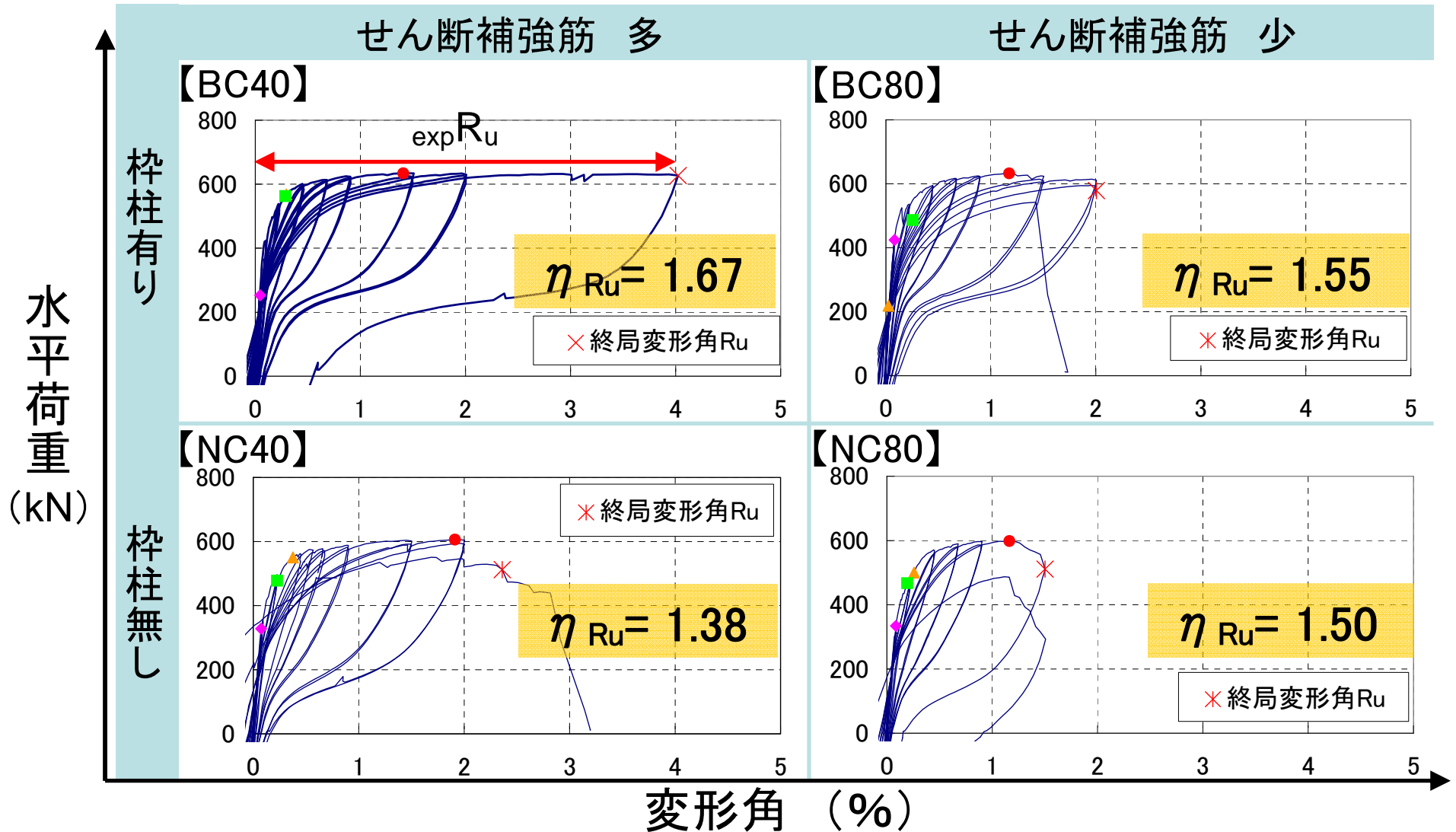


壁縦筋の座屈	$R = -1.5\%$
柱主筋の座屈	$R = -1.5\%$
水平耐力低下	$R = \pm 1.5\%$ サイクル負側
終局変形角	$exp R_u = 1.5\%$
靱性指針 R_u (Exp/Cal)	$cal R_u = 1.0\% (1.50)$



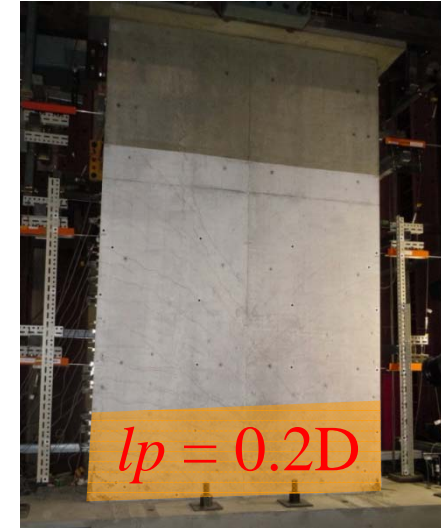
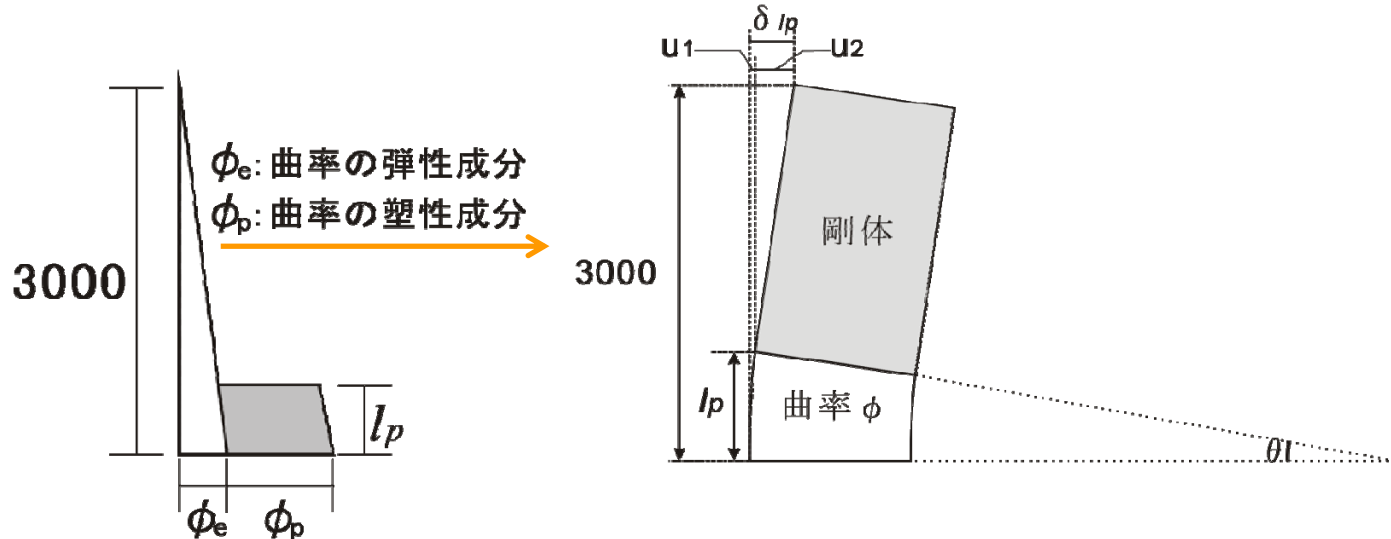
13. 実験結果 Q-R関係のまとめ

せん断補強筋量と枠柱の有無が終局変形角に大きく影響した。
靱性指針により概ね終局変形角を予想できた。(実験/計算≒1.5)



16. 曲げ解析 変形角の計算

曲げ解析で水平荷重—変形角関係を模擬する。



弾性たわみ δ_e + 曲げ変形による変位 $\delta_p \Rightarrow R_f(\%) = \frac{\delta_e + \delta_p}{3000} \times 100$

$$\delta_e = \frac{Q(3000)^3}{3EI} \quad \delta_p = u_1 + u_2 = \frac{1}{2}\phi(l_p)^2 + \phi(l_p)(3000 - l_p)$$

実験での主筋のひずみ分布や、変位計による曲率分布から曲げ変形が卓越する塑性ヒンジ領域を l_p を $0.2D(350\text{mm})$ と仮定して解析を行った。

D: 断面せい 1750mm

17. 曲げ解析 材料モデル

断面解析を以下のモデルを用いて行う。

材料モデル

鉄筋：完全弾塑性

無拘束コンクリート：Popovicsモデル

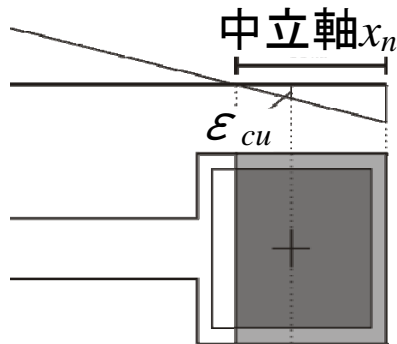
拘束コンクリート：孫・崎野モデル

コンクリート終局ひずみ ϵ_{cu}

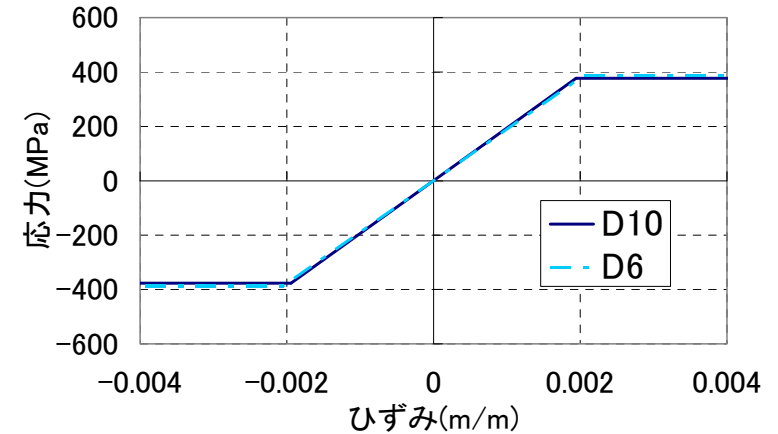
$$\epsilon_{cu} = 0.004 + 1.4 \rho_s f_{yh} \epsilon_{sm} / f'_{cc}$$

出典：Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R.

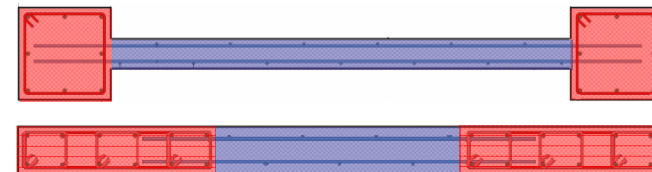
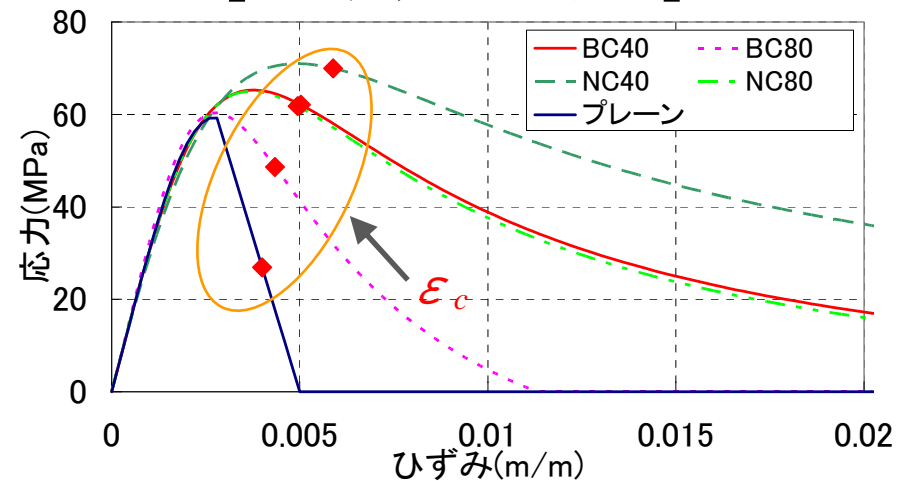
枠柱中心が ϵ_{cu} に達する変形角を
解析での終局変形角とする。



【鉄筋モデル】



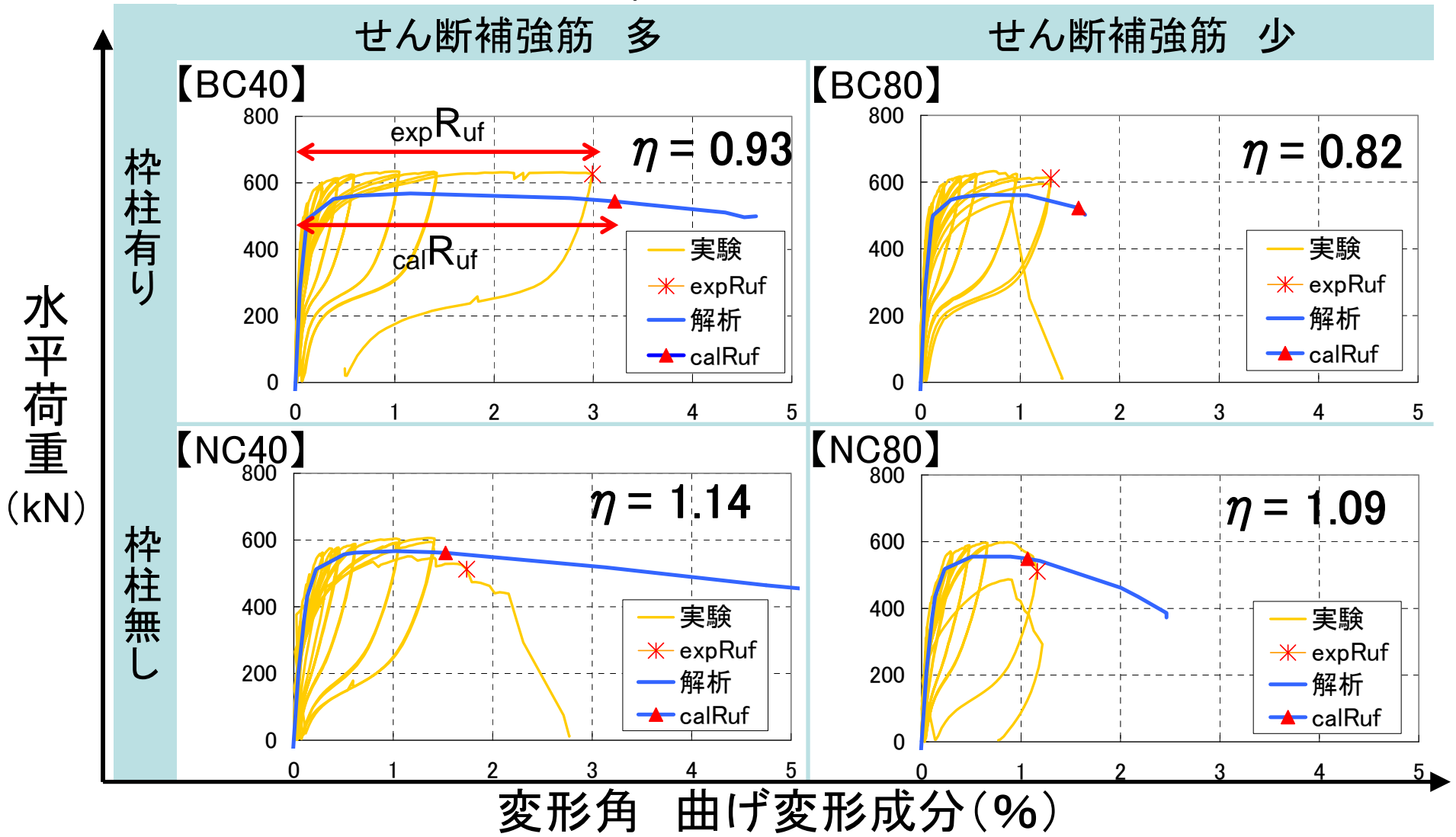
【コンクリートモデル】



拘束コンクリート (カバー含む)
 普通コンクリート

18. 曲げ変形の予測

断面解析による曲げ終局変形角 $calR_{uf}$ と実験値 $expR_{uf}$ を比較する。
 概ね精度良く評価できた。 $expR_{uf}/calR_{uf} = 0.82 \sim 1.14$



① 非対称耐震壁のまとめ

- 4体とも、終局時は曲げ圧壊型の破壊モードとなった。軸筋の座屈や破断のほか、枠柱が無い場合は壁の面外座屈が観察された。
- 端部領域のせん断補強筋量に従って、終局変形角が大きくなった。
- 靱性指針の考え方で、終局時変形角を凡そ予測できる。

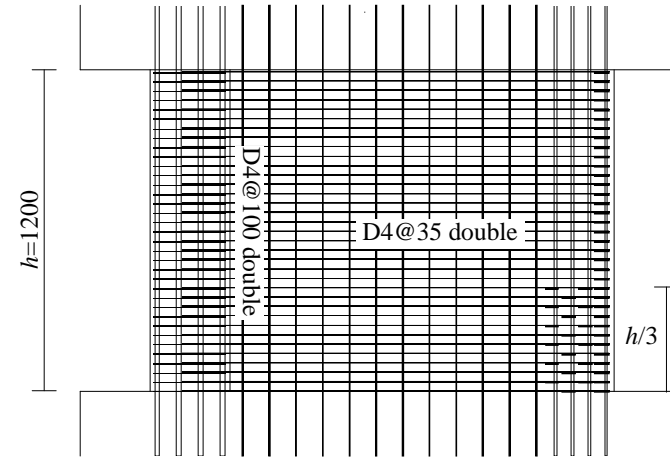
②

端部拘束域の断面形状と補強量が
非対称断面の耐震壁の靱性に与える影響
(名古屋工業大学, 豊橋技術科学大学)

試験体概要

試験体一覧

	名称	断面図
先行研究	NM3	
今回実施	C	
今回実施	N	
先行研究	PM3	
今回実施	P, PS	



配筋例(NM3)

コンクリート試験結果

試験体	圧縮強度	弾性係数
	N/mm ²	× 10 ³ N/mm ²
NM3、PM3	38.3	28.4
N、C、P、PS	45.3	31.8

鉄筋試験結果

試験体	呼名	降伏強度	引張強度	弾性係数
		N/mm ²	N/mm ²	× 10 ³ N/mm ²
NM3、PM3	D4	390	521	173
	D10	391	469	199
	D16	389	559	180
N、C、P、PS	D4	380	515	161
	D6	393	570	166
	D10	374	500	161
	D16	391	569	167

試験体概要 (パラメータ)

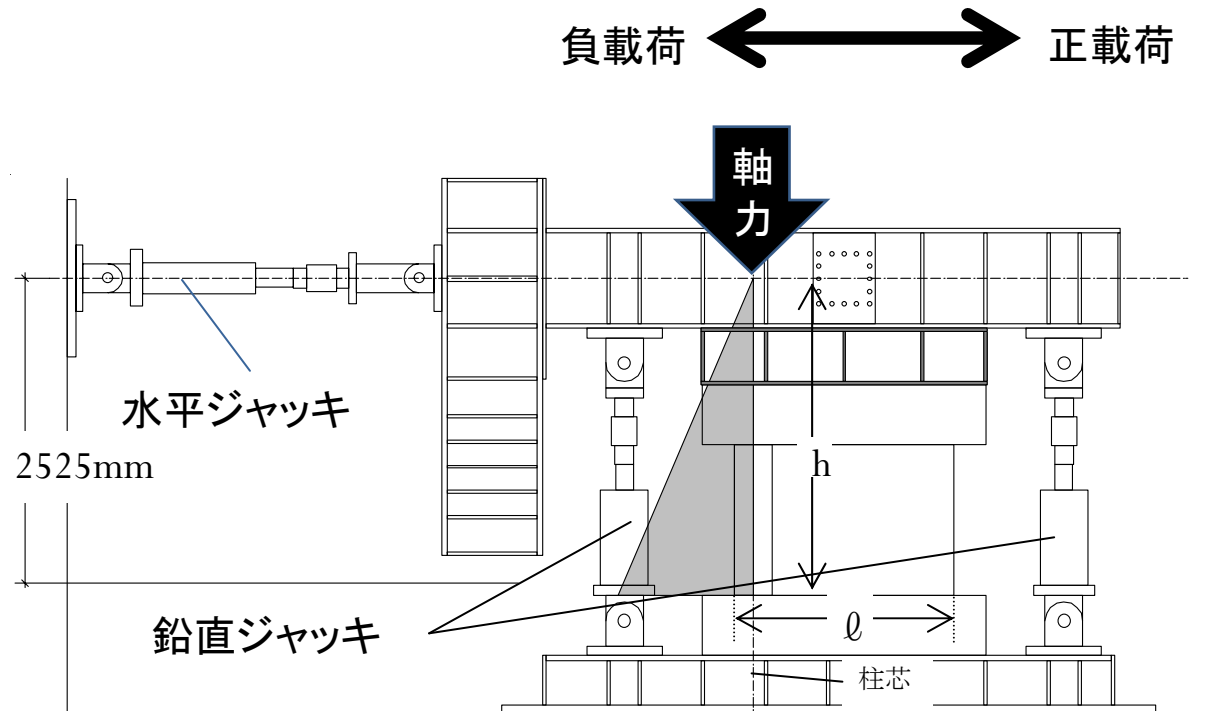
名称	断面図	パラメータ				
		柱型	拘束域長 拘束域高	直交壁	直交壁内 拘束域	直交壁 スリット
NM3 (先行研究)		無	$0.5x_n$ 1/3壁高	無		
C		有				
N			X_n 壁高			
PM3 (先行研究)				有	無	
P					有	無
PS					有	有

載荷計画

□ 載荷装置

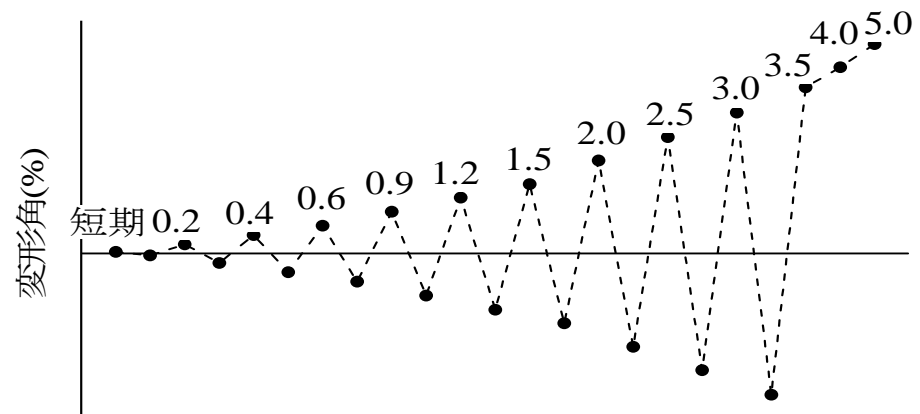
軸力比 : 0.2
(540kN)

シアスパン比 : 約1.5
($=h/\ell$)



□ 載荷プログラム

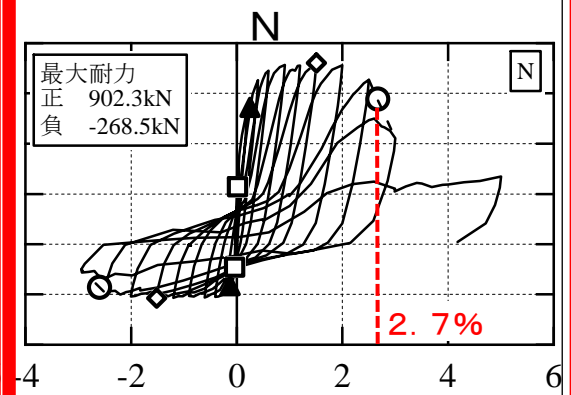
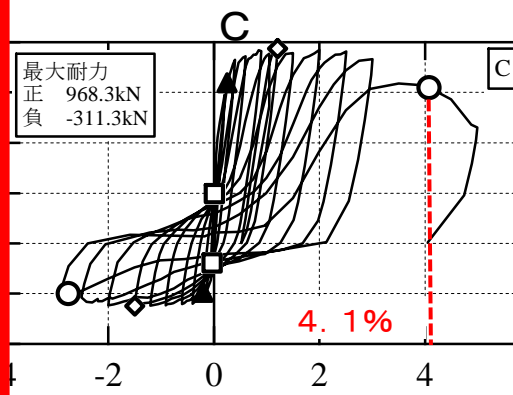
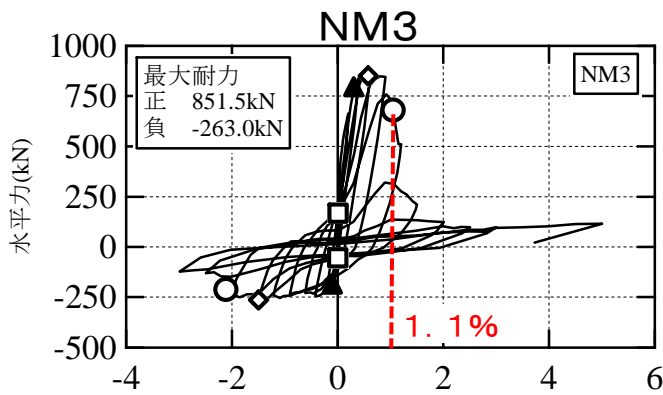
第一サイクル :
短期許容応力時の水平荷重



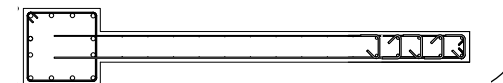
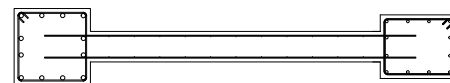
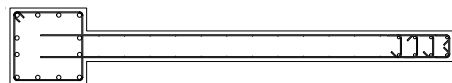
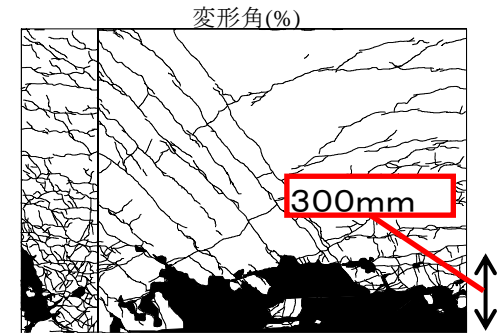
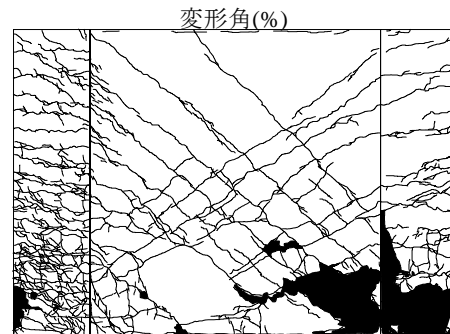
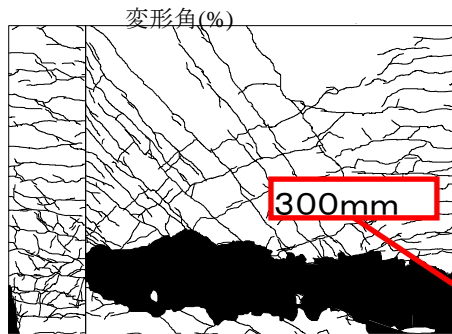
実験結果(荷重変形関係と破壊経過)

NM3

- ・変形角2.8%のサイクルで壁端部縦筋降伏と主筋降伏を確認
- ・変形角2.8%のサイクルで壁端部縦筋降伏と主筋降伏を確認
- ・80%耐力低下時の変形角は2.7%
- ・最終破壊状況における端部の剥落高さは約300mmであった



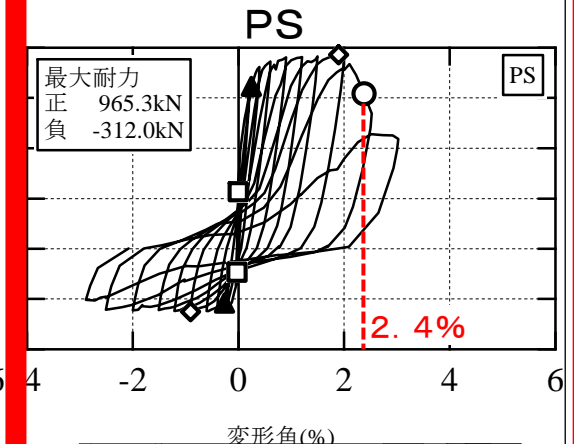
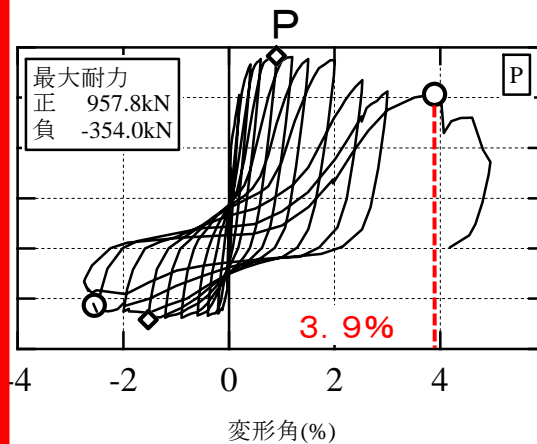
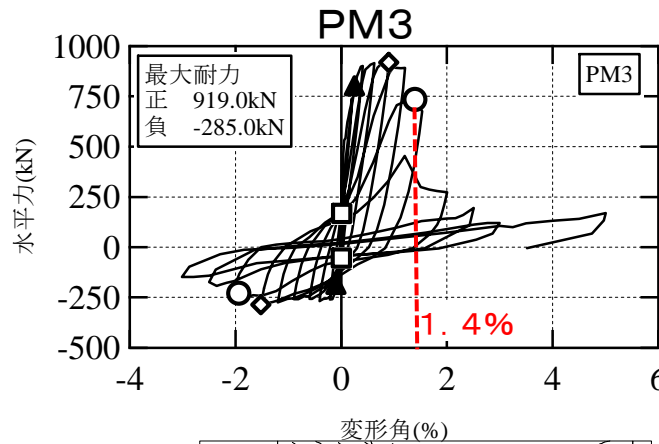
- : 初期ひび割れ
- ▲: 引張側主筋降伏
- ◇: 最大耐力
- : 耐力80%低下



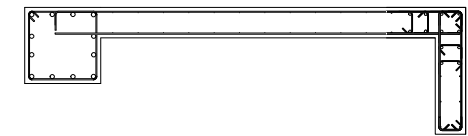
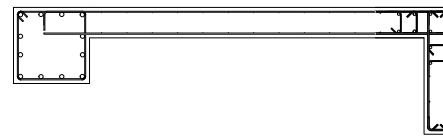
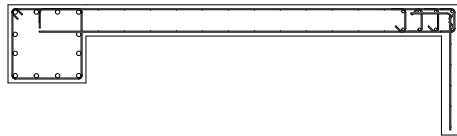
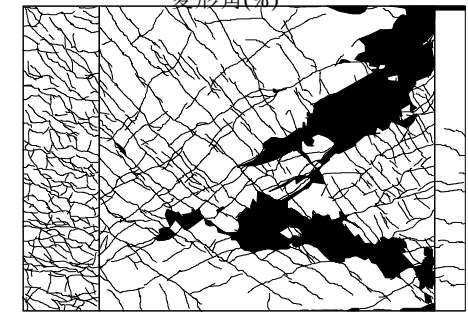
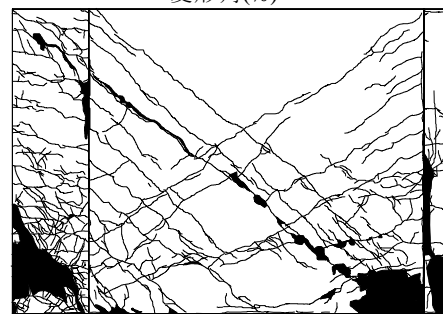
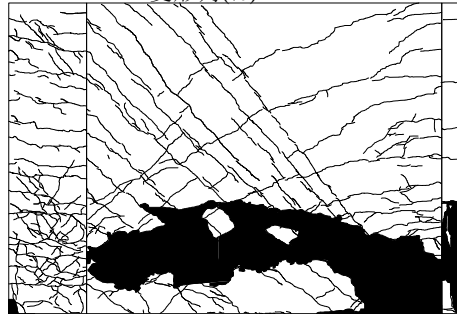
実験結果(荷重変形関係と破壊経過)

PM3

- ・変形角2.5%のサイクルで直交壁上部の圧縮側端部縦筋の剥離が進行し耐力が低下
- ・変形角4.0%の時の変形履歴壁上部の縦筋の剥離が進行し耐力が急激に低下
- ・変形角耐力低下時の変形角が-0.9%コンクリートの剥落が進行し圧縮側端部拘束域の
- ・変形角9.0%確認サイクルで直交壁上部のせん断破壊を発生し耐力が急激に低下し耐力を終了



- : 初期ひび割れ
- ▲: 引張側主筋降伏
- : 最大耐力
- : 耐力80%低下



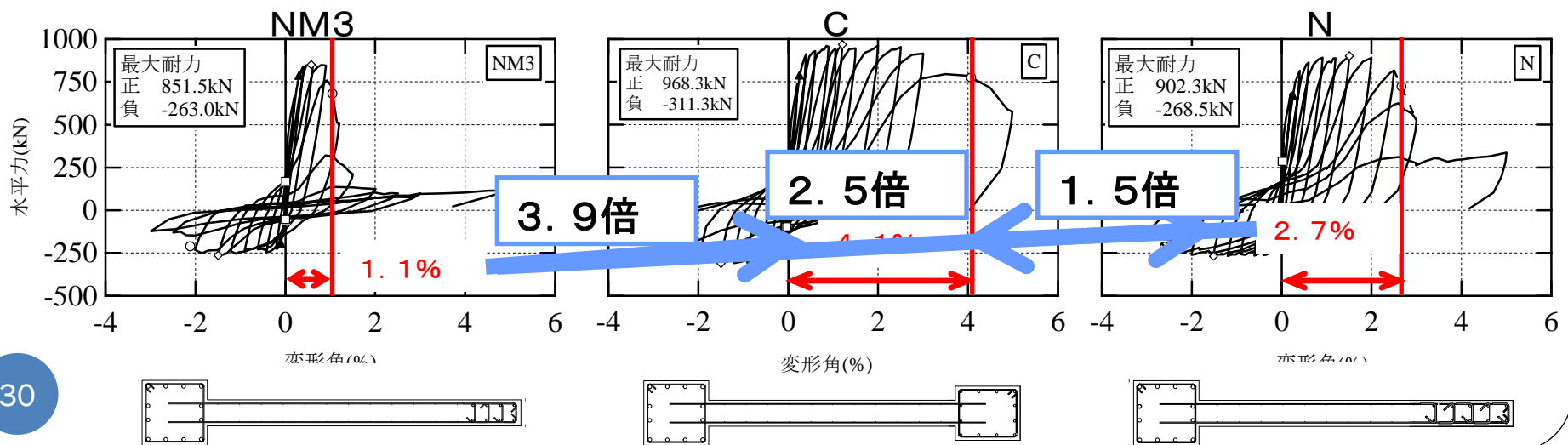
実験結果(パラメータの比較)

□端部柱型の有無

圧縮側端部に柱型を設けることで変形性能が向上することを確認した。

□端部拘束域断面積(拘束筋量)

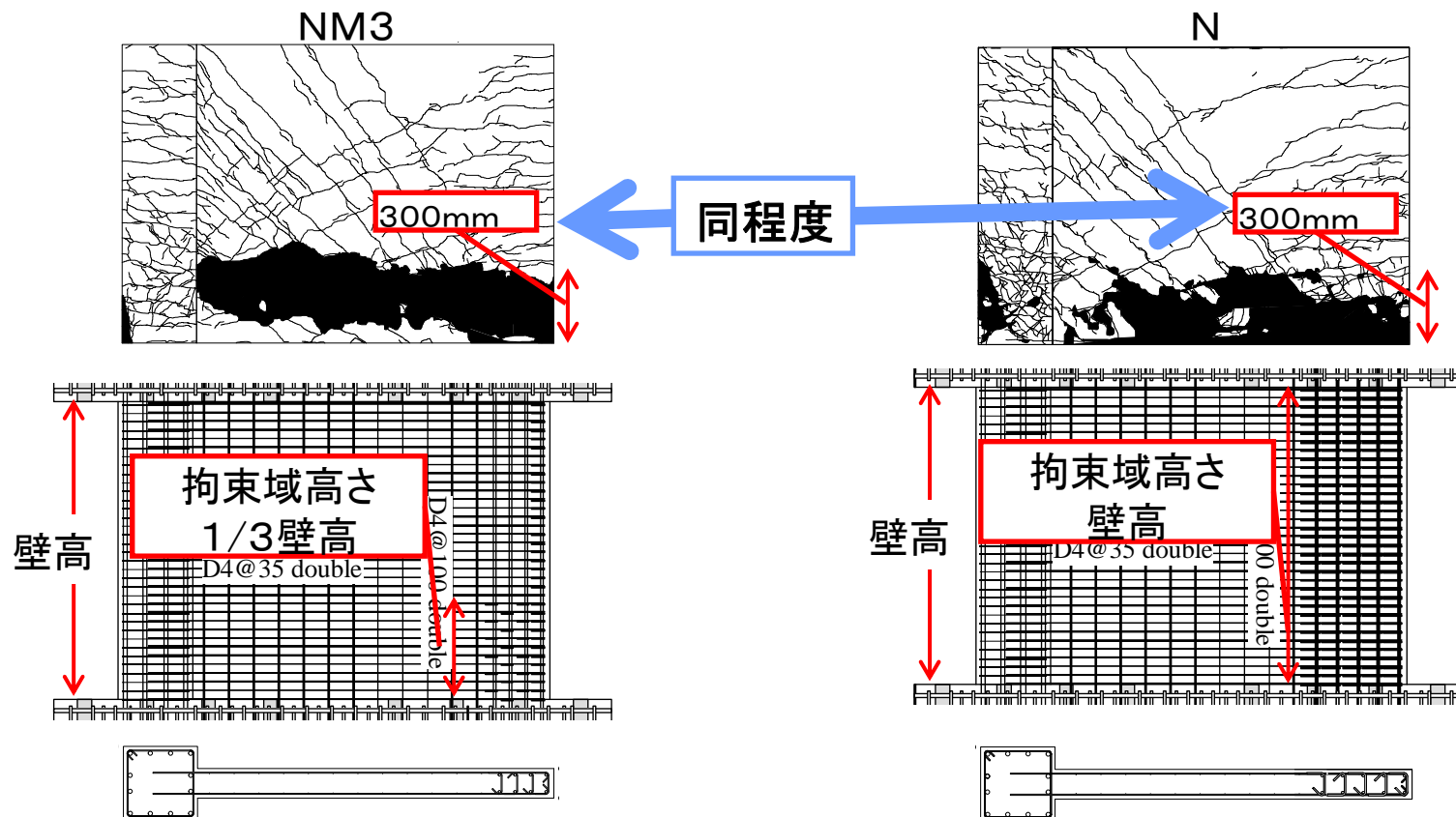
端部の拘束域断面積と拘束筋量が大きいほど変形性能が大きいことを確認した。



実験結果(パラメータの比較)

□拘束域高さ

拘束域高さは変形性能に影響しなかった。



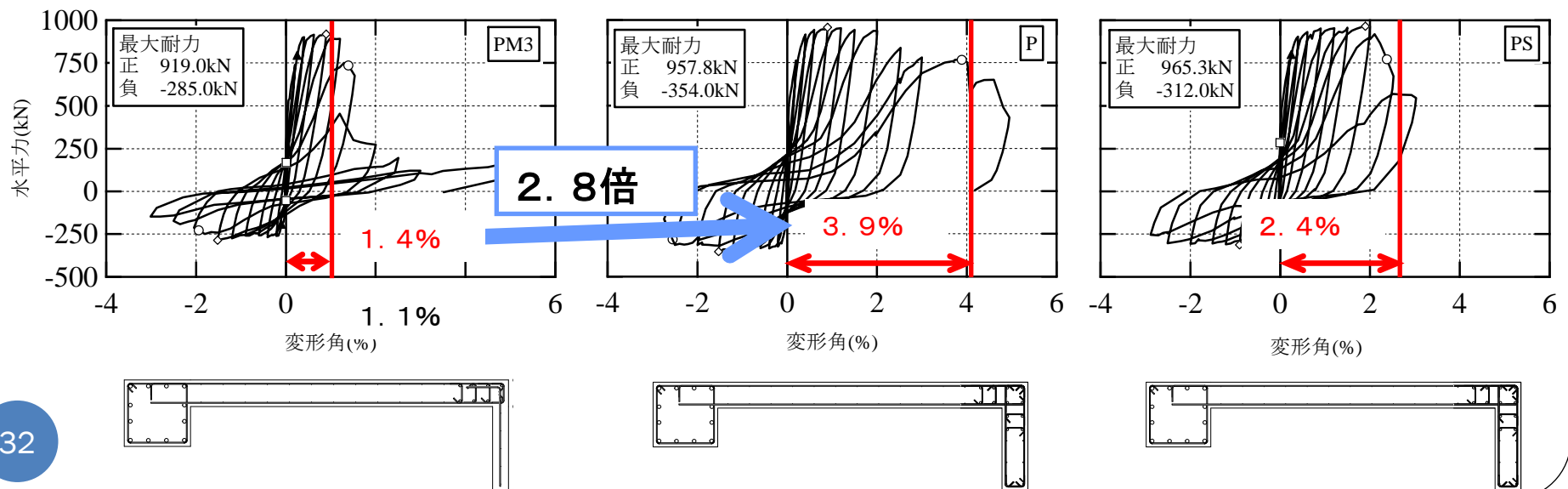
実験結果(パラメータの比較)

□直交壁内拘束域の有無

直交壁内に拘束域を設けることで変形性能が向上することを確認した。

□直交壁スリットの有無

スリットを設けた試験体PSはスリット部のコンクリートが圧壊したため試験体Pよりも早期に耐力低下した。



② 非対称耐震壁のまとめ

- 圧縮側端部に柱型を設けることで変形性能が向上することを確認した。
- 端部の拘束域断面積と拘束筋量が大きいほど変形性能が大きいことを確認した。
- 拘束域高さは変形性能に影響しなかった。
- 直交壁内に拘束域を設けることで変形性能が向上することを確認した。
- スリットを設けた試験体PSはスリット部のコンクリートが圧壊したため試験体Pよりも早期に耐力低下した。

③

曲げ降伏型耐震壁の靱性に対する
多方向地震力の影響
(東京大学)

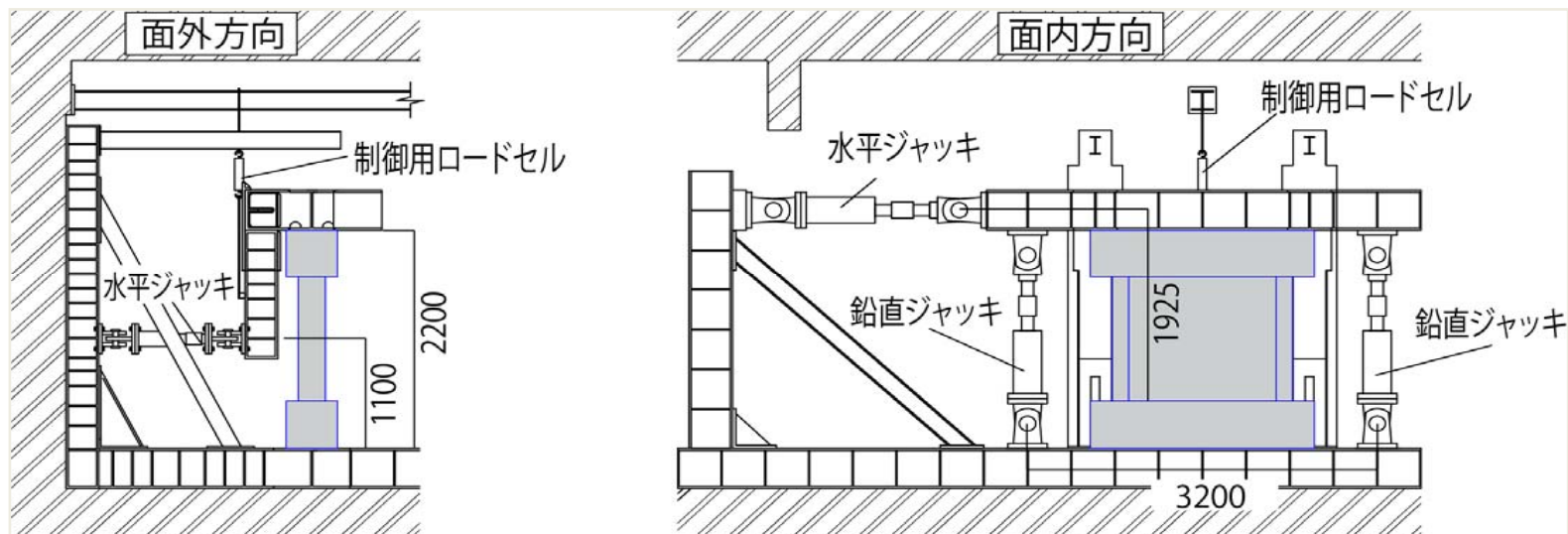
実験概要

- 4体の試験体

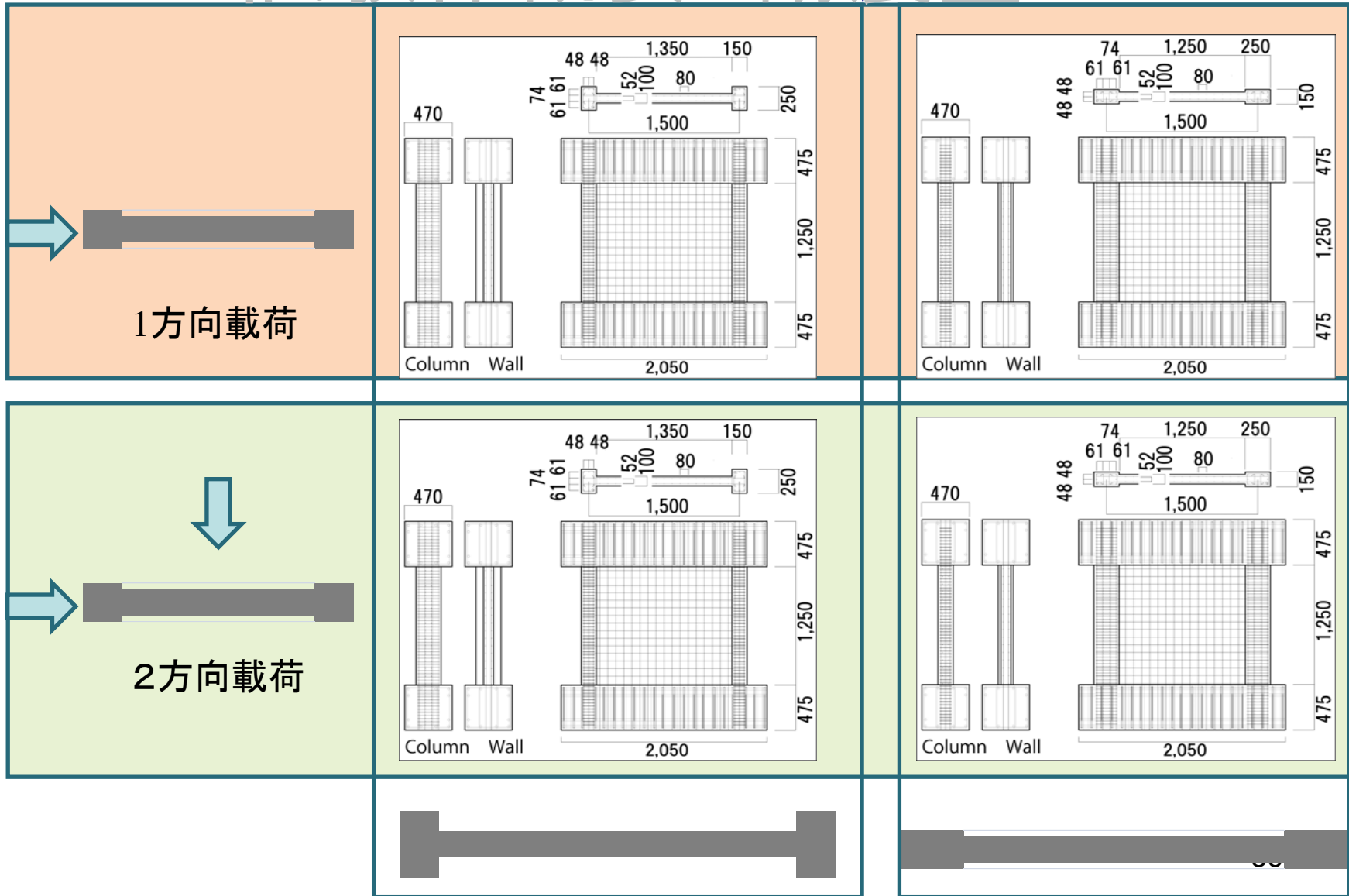
耐震壁(1方向) 2体

耐震壁(2方向) 2体

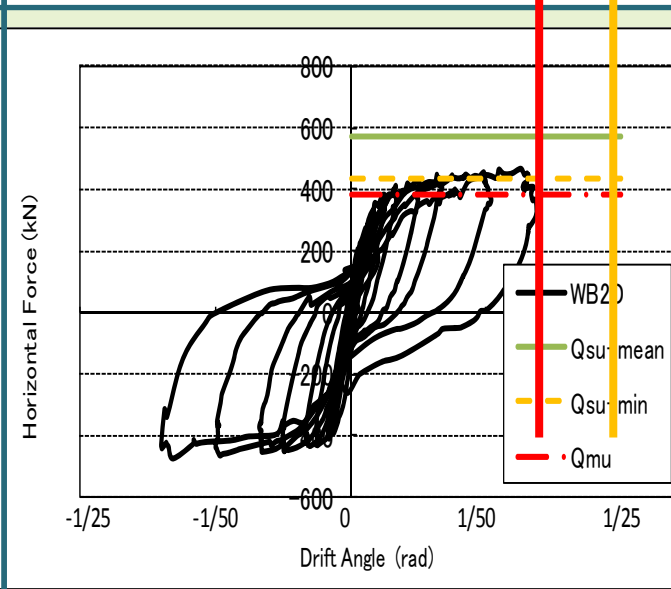
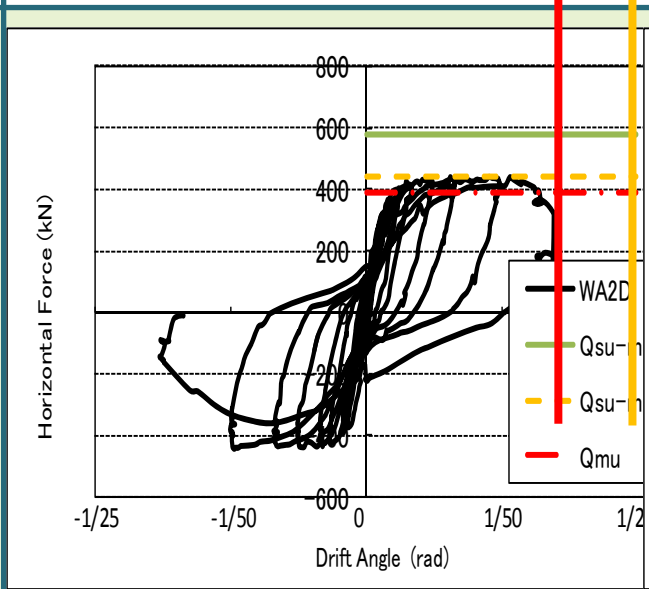
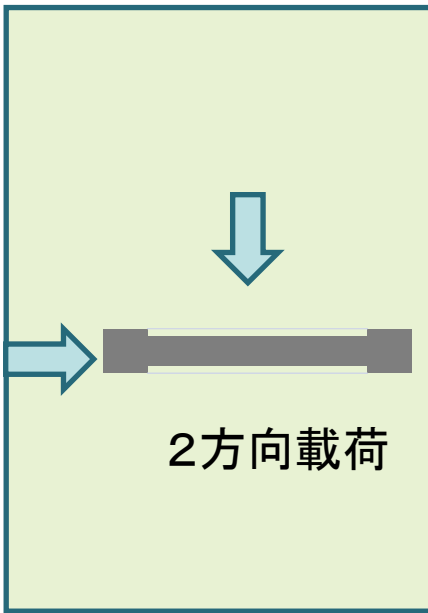
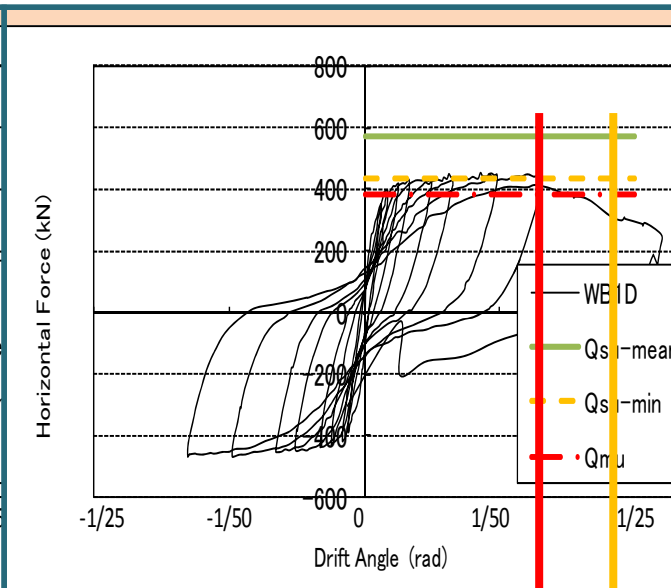
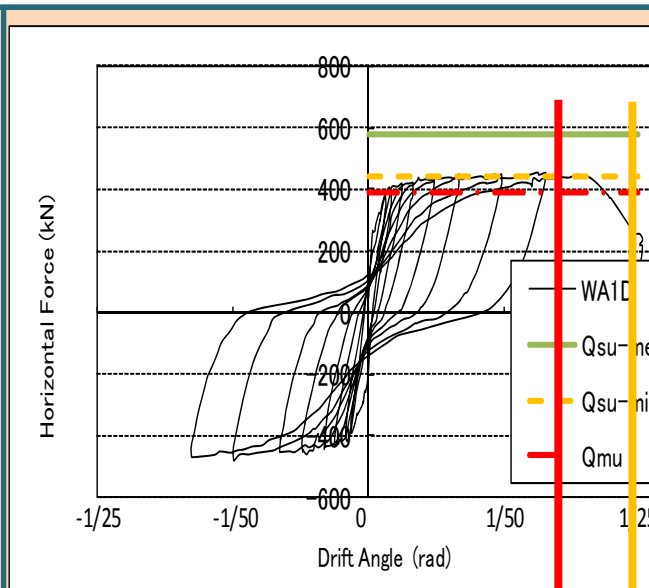
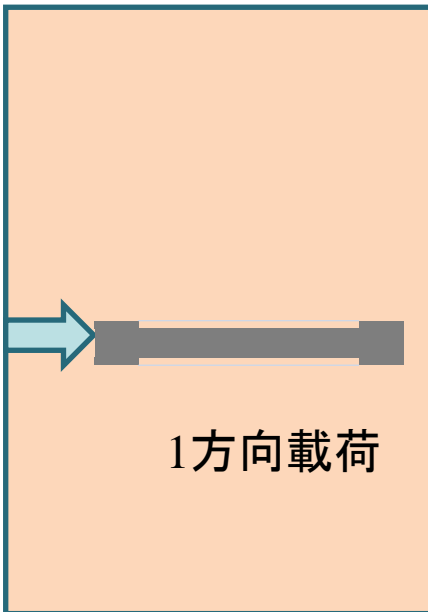
- 載荷装置



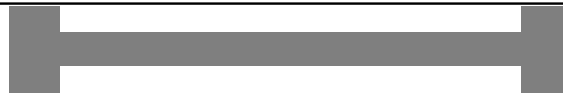
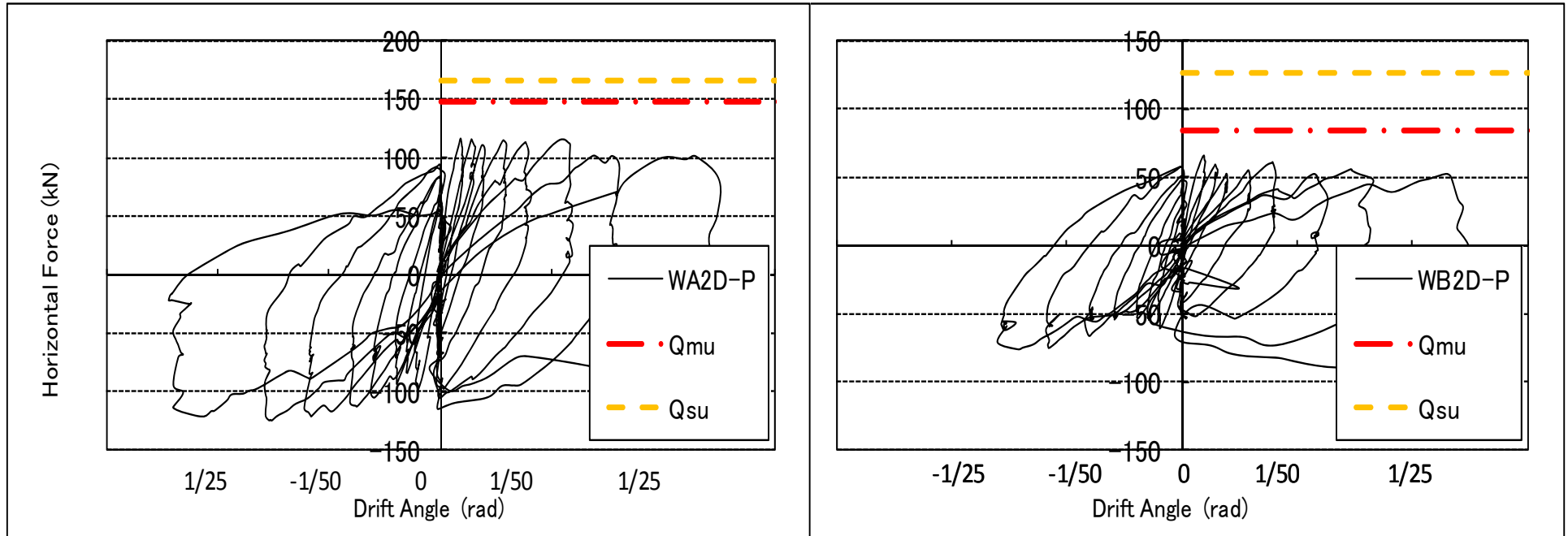
試験体概要 耐震壁



実験結果耐震壁



実験結果 耐震壁 面外方向

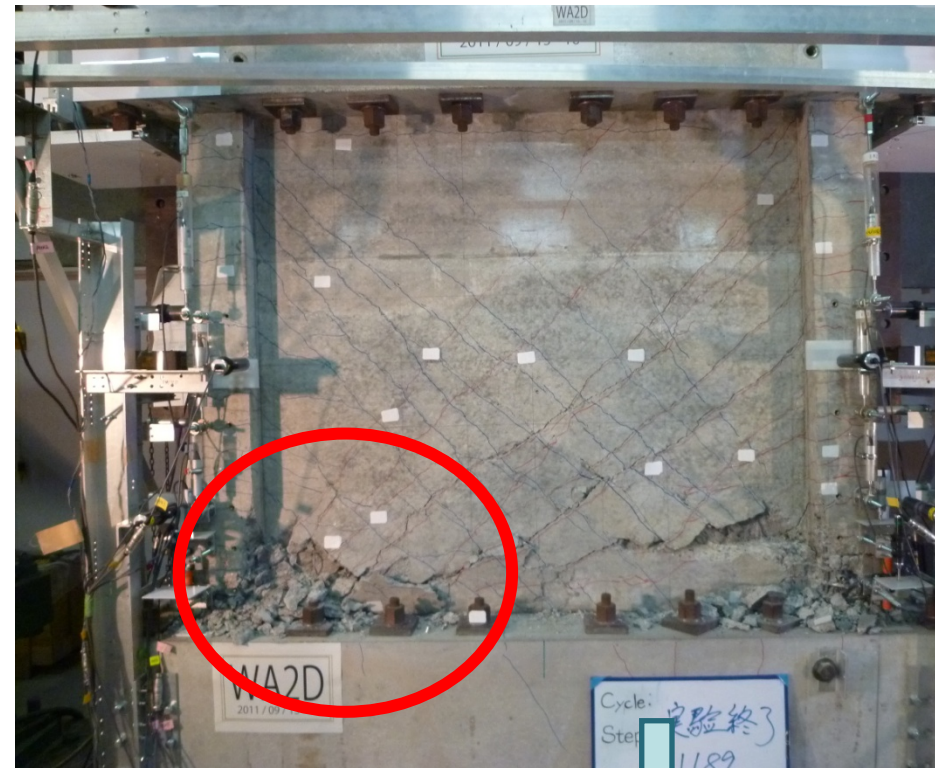
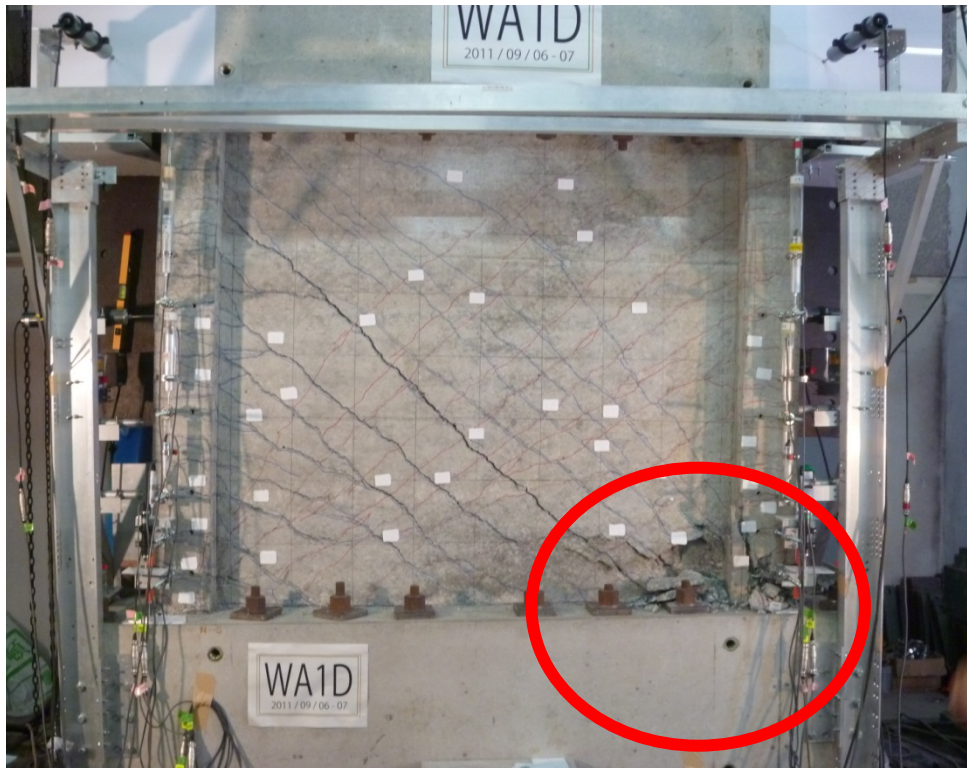


$$M_u = 0.8 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5 N \cdot D \left[1 - \frac{N}{b \cdot D \cdot F_c} \right] \dots (\text{N} \cdot \text{mm})$$

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 \cdot P_t^{0.23} \cdot (18 + F_c)}{\frac{M}{Q_d} + 0.12} + 0.85 \sqrt{P_w \cdot \sigma_{wy} + 0.1 \sigma_0} \right\} b \cdot j \dots (\text{N})$$

(耐震診断基準より抜粋)⁸

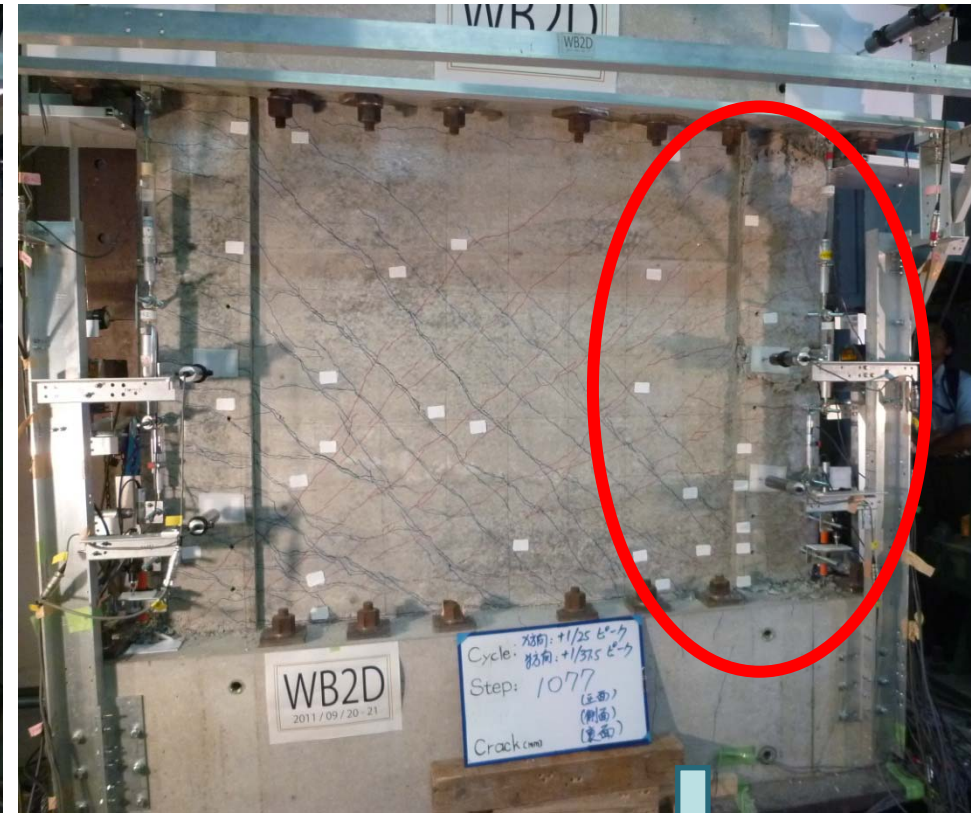
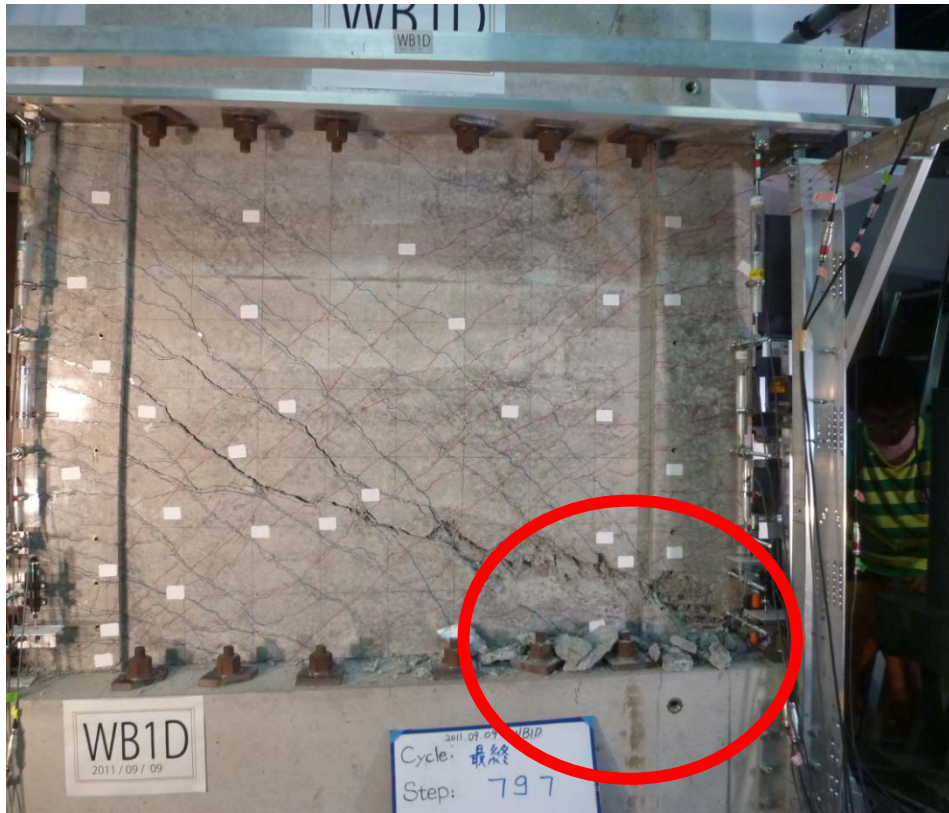
試験体終局時の比較



- WA型の試験体では端部の圧縮

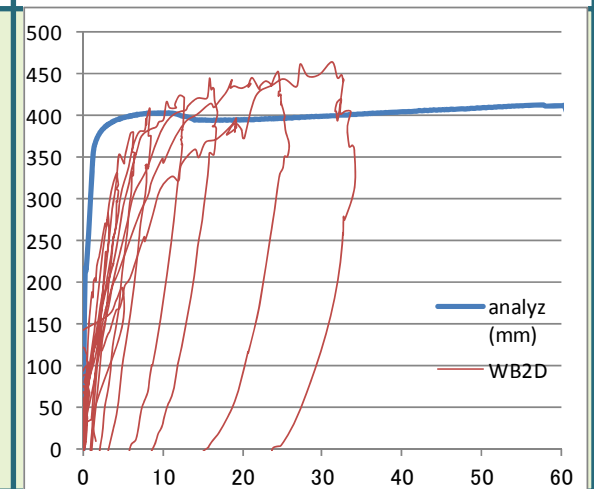
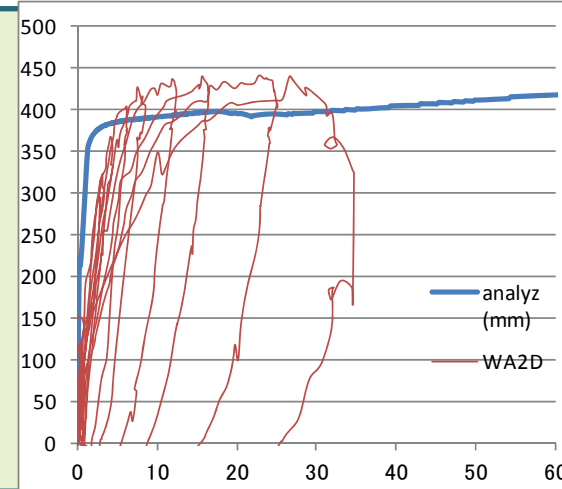
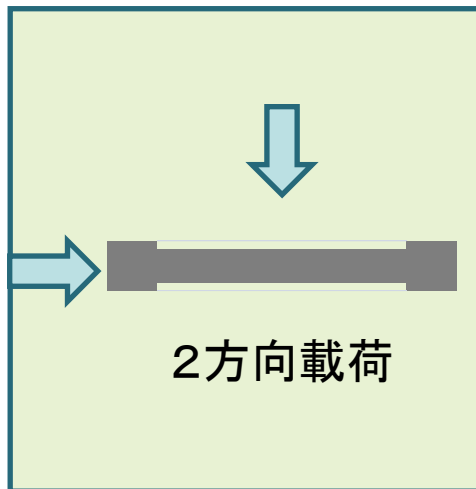
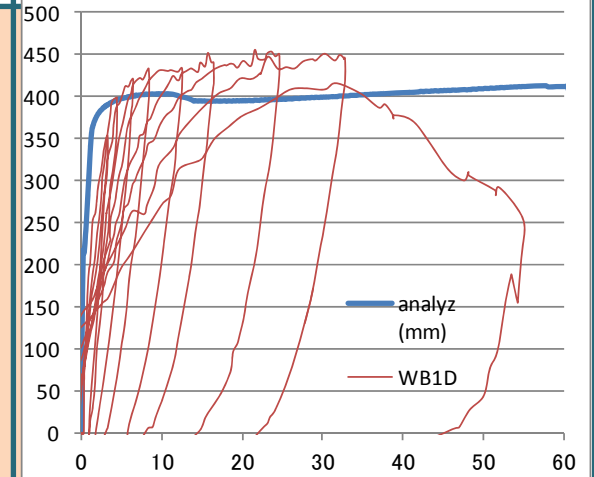
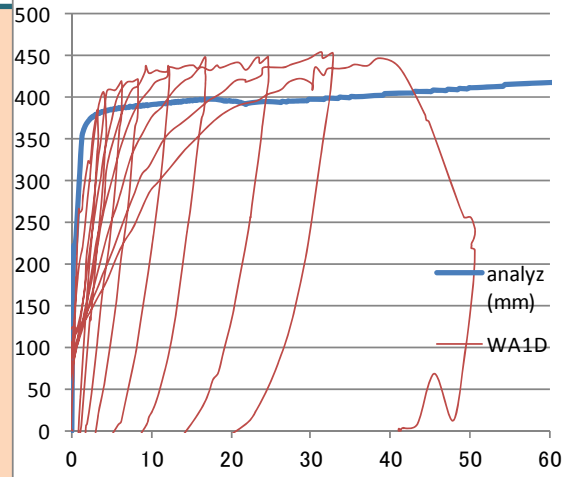
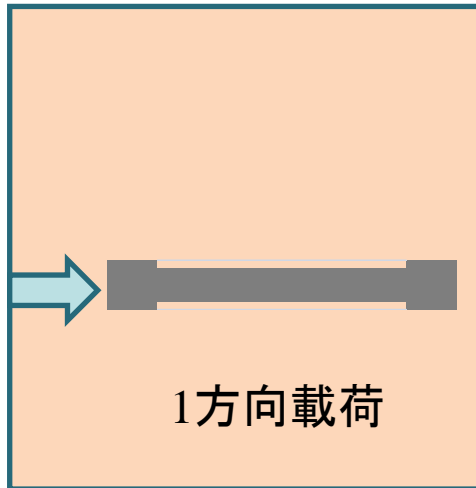


試験体終局時の比較

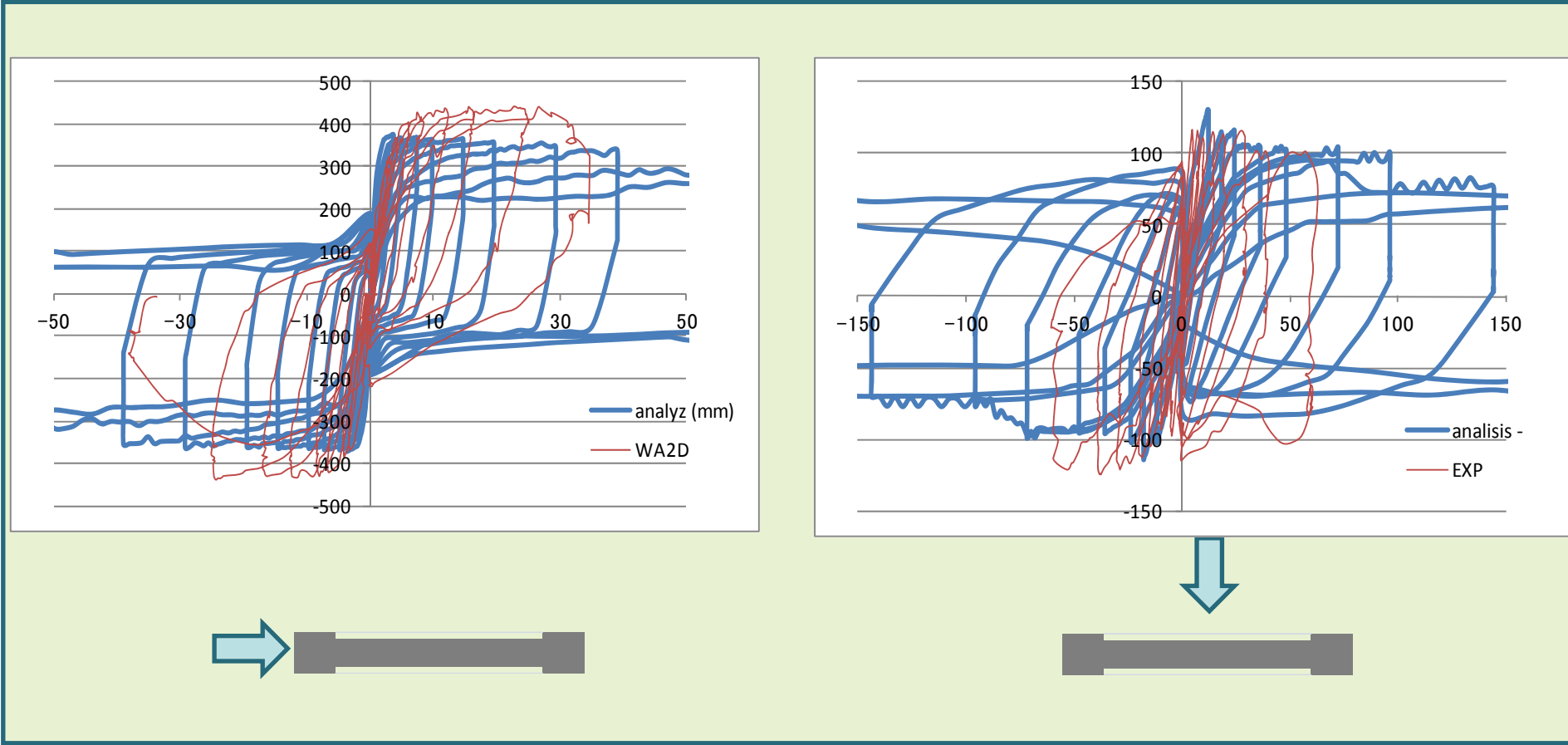


- WB型の試験体では2方向試験体で座屈

1方向解析結果

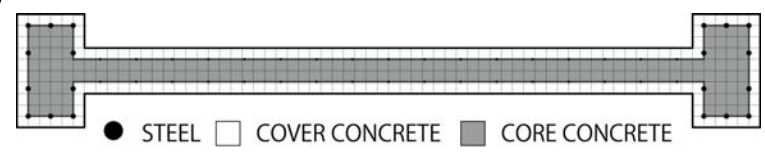


2方向解析結果

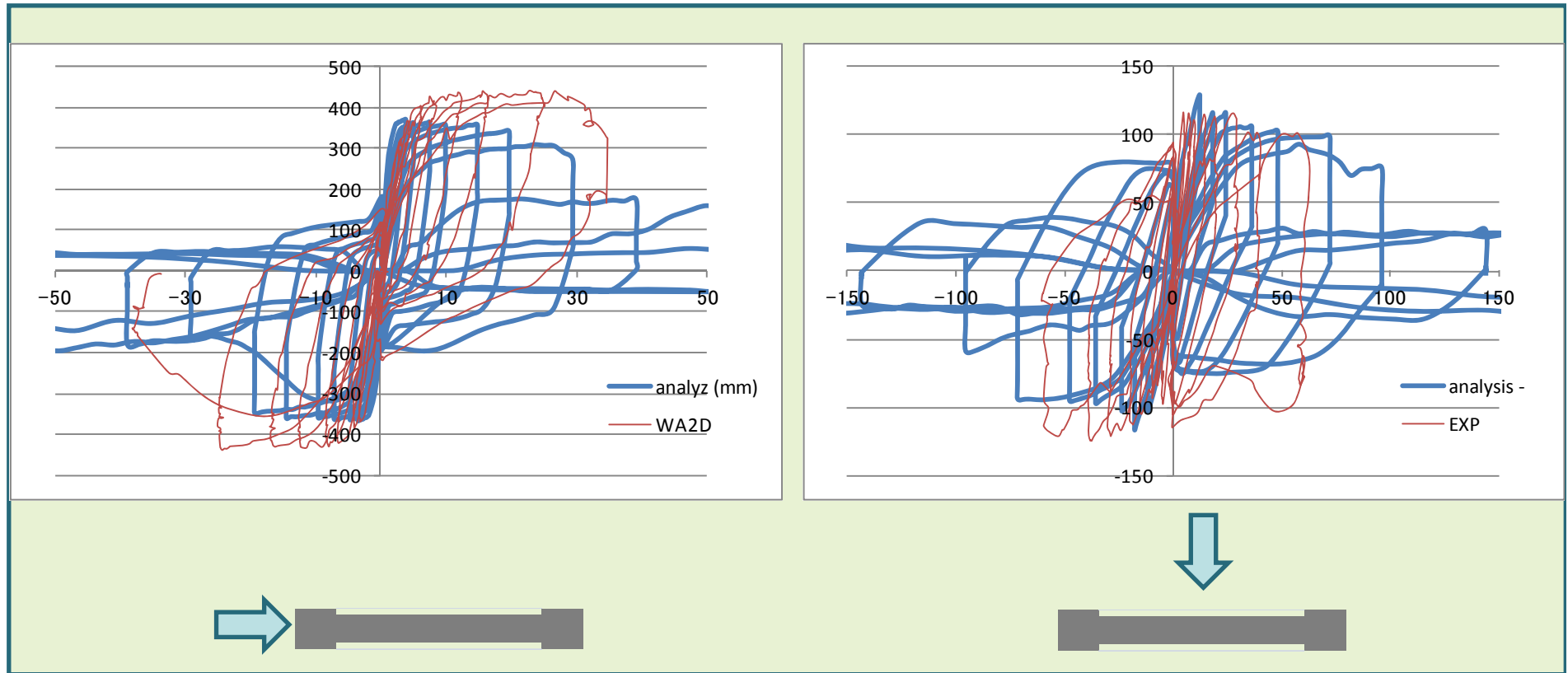


面内

面外

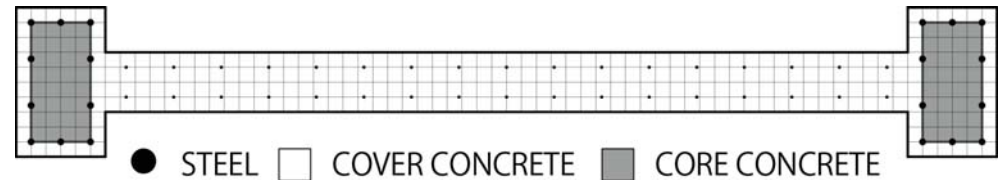
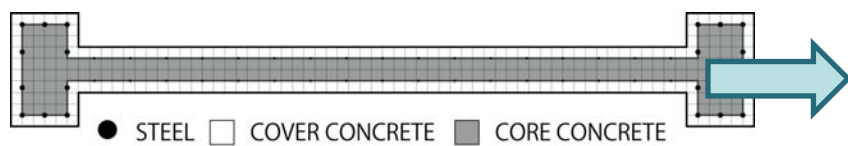


2方向解析結果



面内

面外



③ 多方向入力のおとめ

- 耐震壁の面内方向の耐力は1方向・2方向での顕著な差はなく、2方向力を与えたものも面内方向のみ独立に計算したもので概ね良好に評価できた。
- 耐震壁のどの試験体も1/37.5程度と十分な面内方向の変形性能を示したが、2方向力を与えた試験体はやや早めに限界変形に至った。
- 2方向力を受ける耐震壁の面外方向の耐力を独立に柱として計算すると過大な評価となった。
- 耐震壁を面内で独立にファイバーモデルで解析したところ、いずれの試験体もおよそ良好に評価した。面外の変形を考慮すると、面内方向の評価はやや過小な評価となるが、面外方向では概ね評価できた。

まとめ

I) 問題点の把握と実験データベースの構築

- 現在の $\tau u/F' c$ のみでは, 変形性能を十分に予測できない.

II) 連層耐震壁試験体を用いた構造実験の実施

- 耐震壁(対称・非対称)では, 枠柱の有無・端部のせん断補強筋量が変形性能に影響を及ぼした. 圧縮面積が小さいと, 面外座屈が生じることがある.
- 耐震壁多方向載荷では, 面外方向載荷は耐力に影響しなかった.

III) 解析モデルの構築と数値解析

- ファイバーモデルで, 骨格曲線を凡そ再現できる.

IV) 各種設計式の提案

- 次年度に持ち越し.