

**8. 開口の数や位置を考慮した鉄筋コンクリート造の  
耐震壁の強度・剛性評価方法に関する実験・解析**

大阪大学  
京都大学  
豊橋技術科学大学  
竹中工務店  
建築研究所

# 現行RC規準における有開口耐震壁のせん断強度および弾性剛性の算定法

有開口耐震壁のせん断強度

= 開口低減率 ( $\gamma$ )  $\times$  無開口耐震壁のせん断強度

有開口耐震壁の弾性剛性

= 開口低減率 ( $\gamma$ )  $\times$  無開口耐震壁の弾性剛性

開口による低減率

$$\gamma = 1 - \eta \text{ (強度)}$$

$$\gamma = 1 - 1.25 \eta \text{ (剛性)}$$

等価開口周比

$$\eta = \sqrt{\frac{h_o \cdot l_o}{h \cdot l}}$$

開口周比が同一であれば、開口の形状・位置に関係なく同一の耐震性能が算定される

# 研究目的

---

合理的な有開口耐震壁の強度と剛性の評価法の確立を念頭に置いて、開口の形状、位置、個数が耐震性能に及ぼす影響を実験的・解析的に明らかにすることを目的とする。

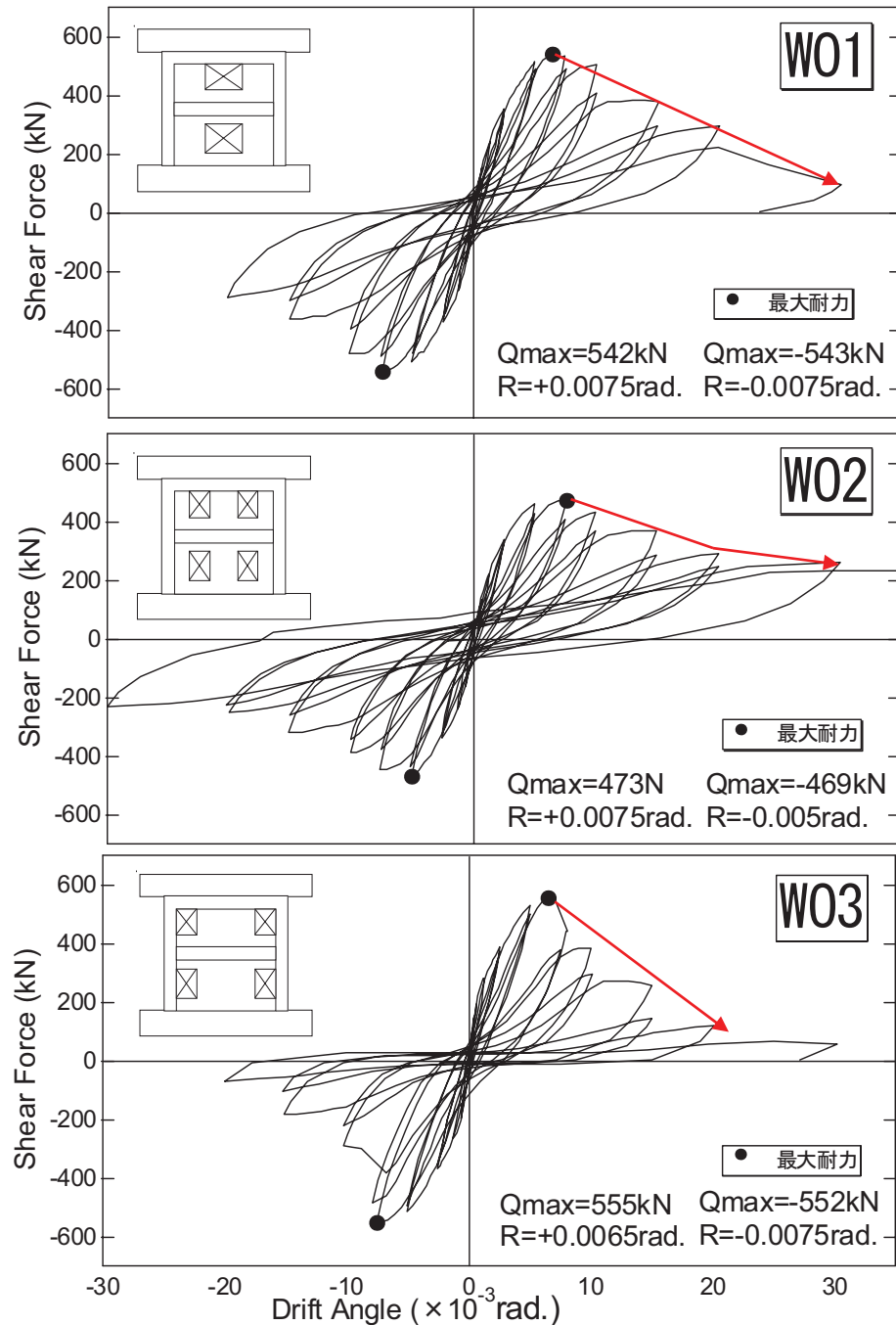
- (1) 複数開口耐震壁に関する実験調査  
(大阪大学、豊橋技術科学大学)
- (2) 偏在開口耐震壁に関する実験調査  
(京都大学)
- (3) 有開口耐震壁の数値解析・設計手法の調査  
(竹中工務店、大阪大学)

# 複数開口耐震壁に関する実験調査

大阪大学  
豊橋技術科学大学

# 既往の研究

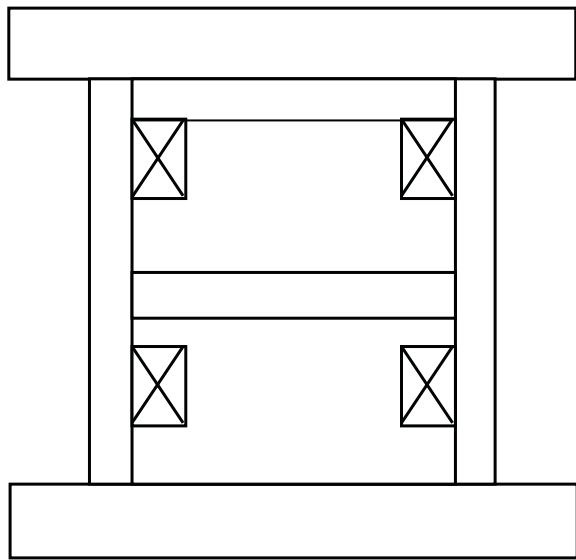
複数開口耐震壁の耐震性能に及ぼす開口間隔の影響を確認



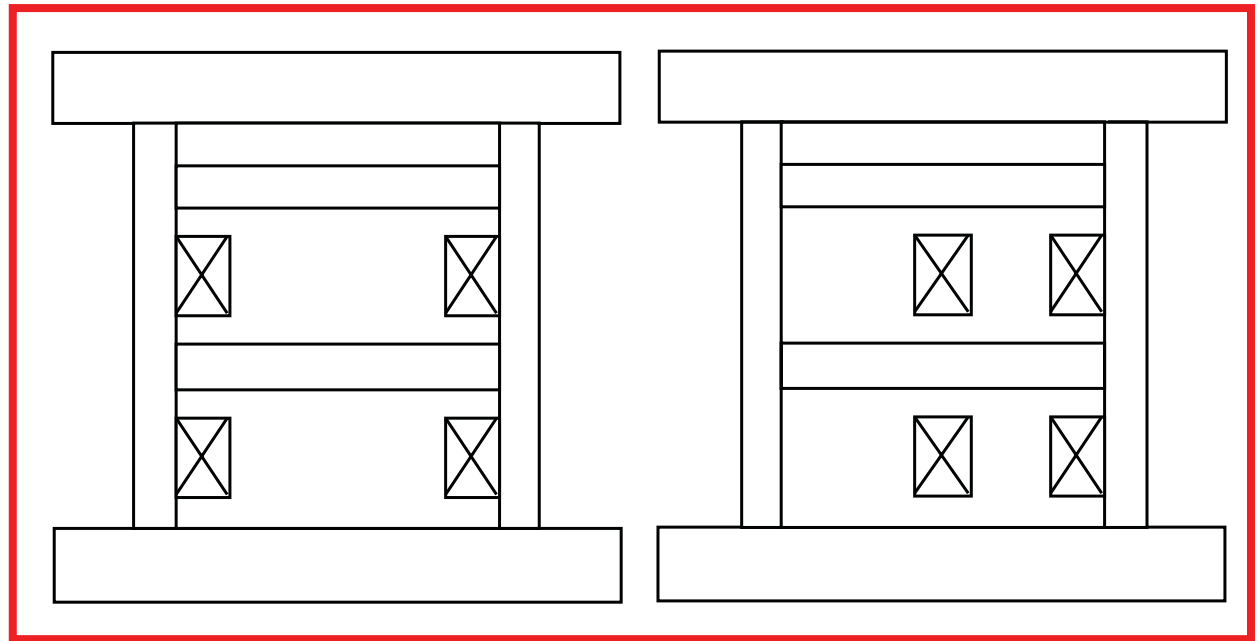
# 今年度の試験体

---

- 複数開口耐震壁**2体**の構造実験を実施  
(既往の試験体も含めて**3体**の構造性能を比較)
- 複数開口耐震壁の耐震性能に及ぼす開口偏在の影響を検討

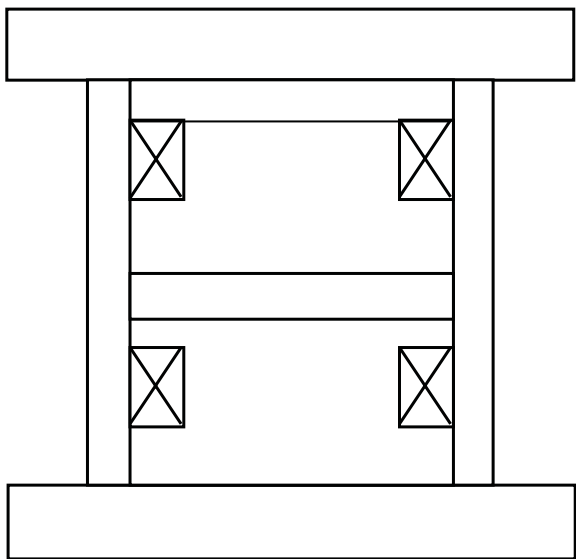
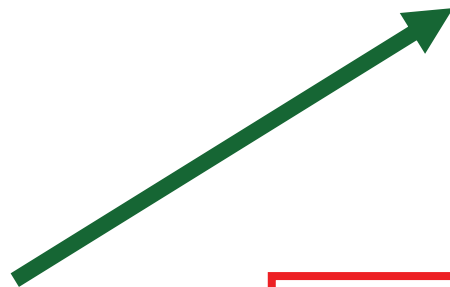


既往の実験

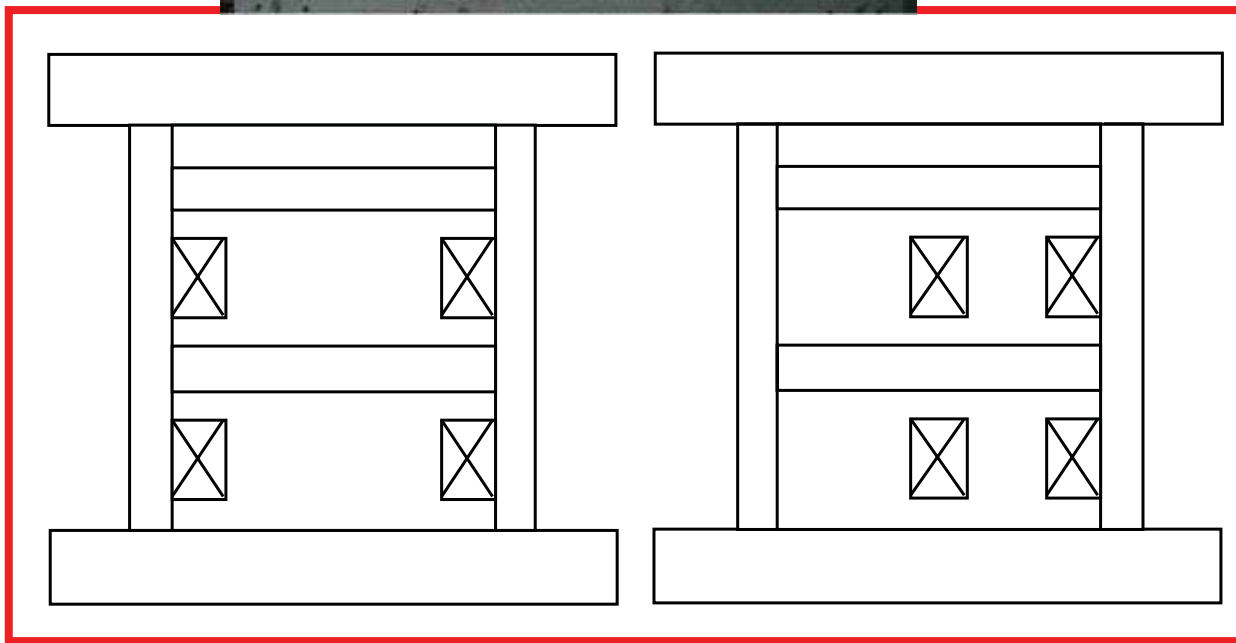


今年度の実験

# 今年度の試験体



既往の実験



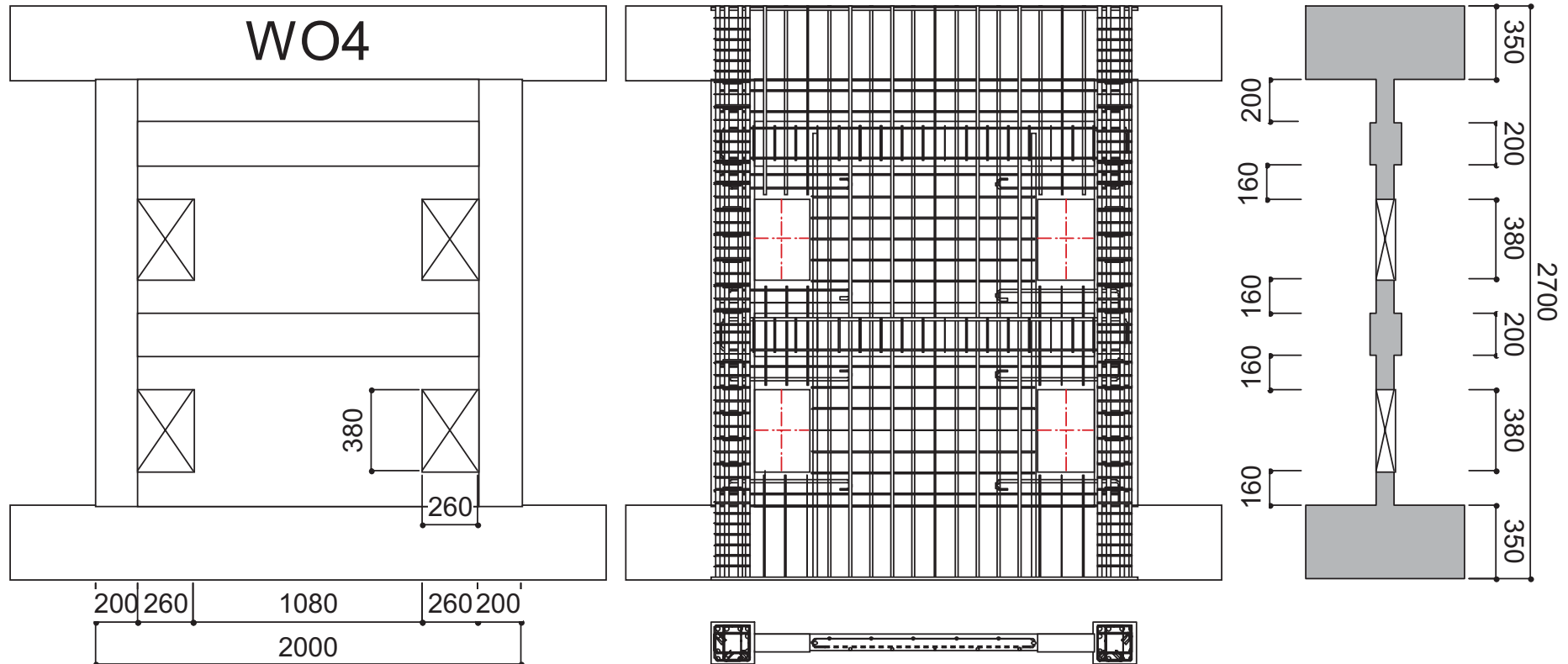
今年度の実験

# 試験体概要

等価開口周比：0.35、縮尺：1/3スケール

## 試験体W04

- ・開口数・・・2つ
  - ・開口位置・・・柱にそれぞれ隣接
- W03と同じ開口条件

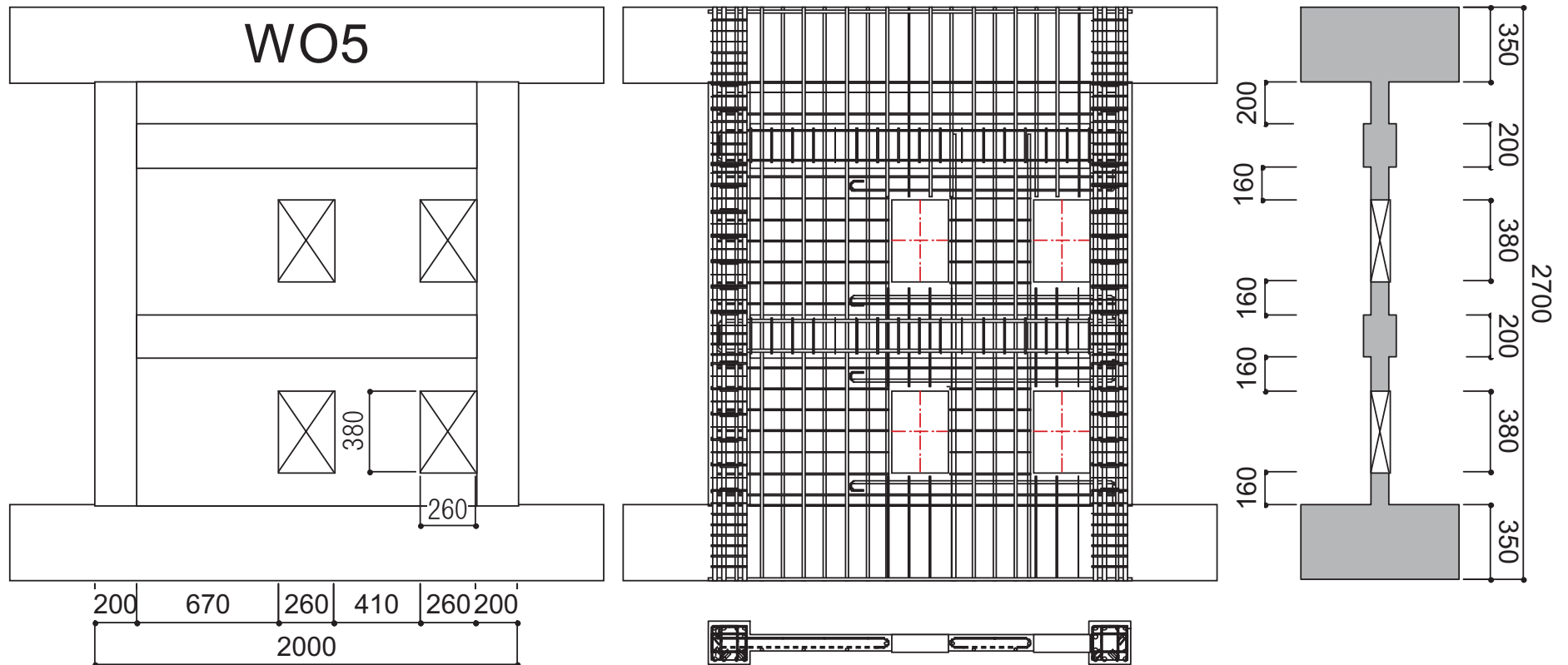




# 試験体概要

## 試験体W05

- ・開口数 . . . . 2つ
- ・開口位置 . . . . 壁版の中央、柱に隣接

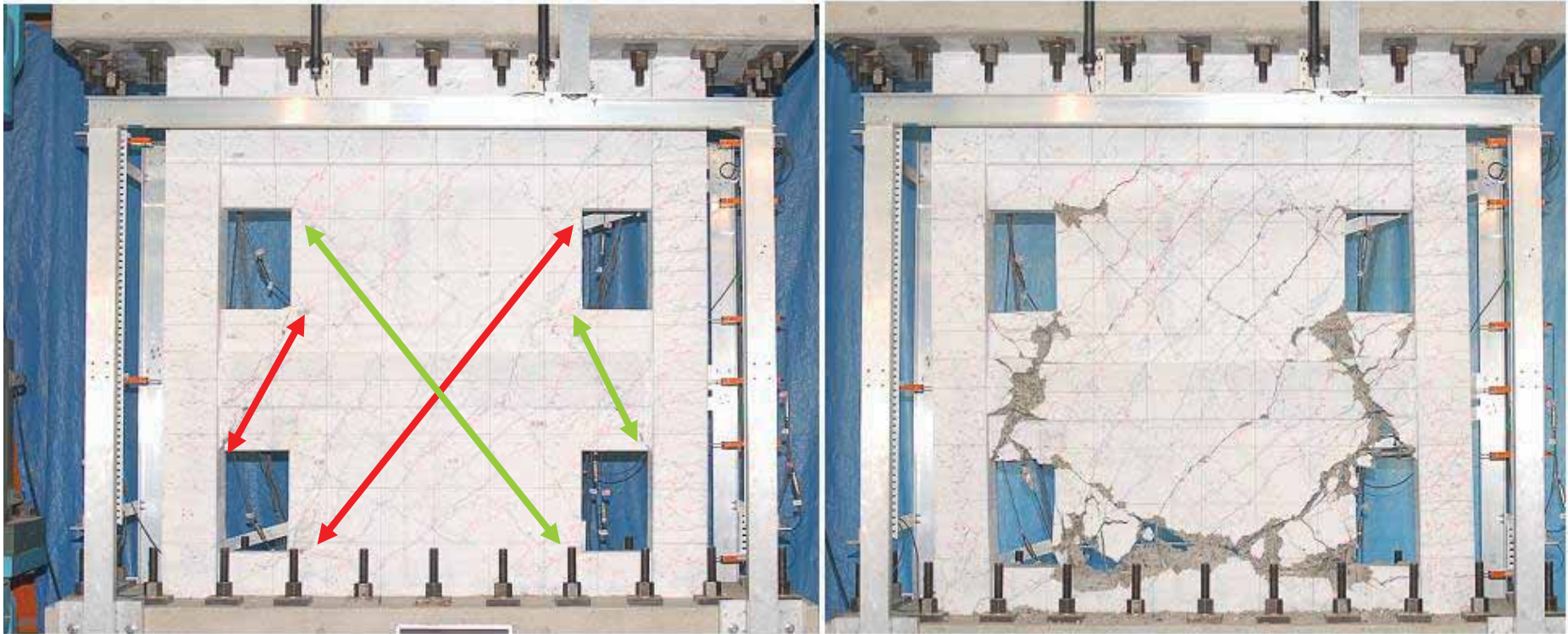


# 実験結果 (破壊性状)

正載荷時:  負載荷時: 

## 試験体W04

西 最大耐力時 東 西 最終破壊状況 東



# 実験結果 (破壊性状)

正載荷時:  負載荷時: 

## 試験体W04

西 **W03** 東



**2層側柱がせん断破壊**

西 **W04** 東



**1層壁板がせん断破壊**

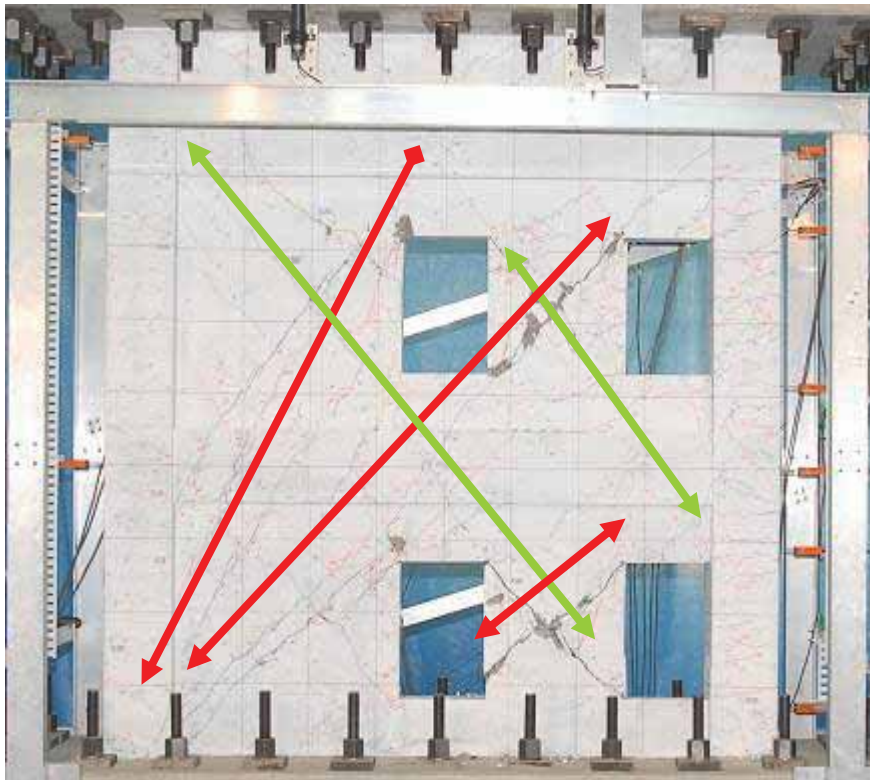


# 実験結果 (破壊性状)

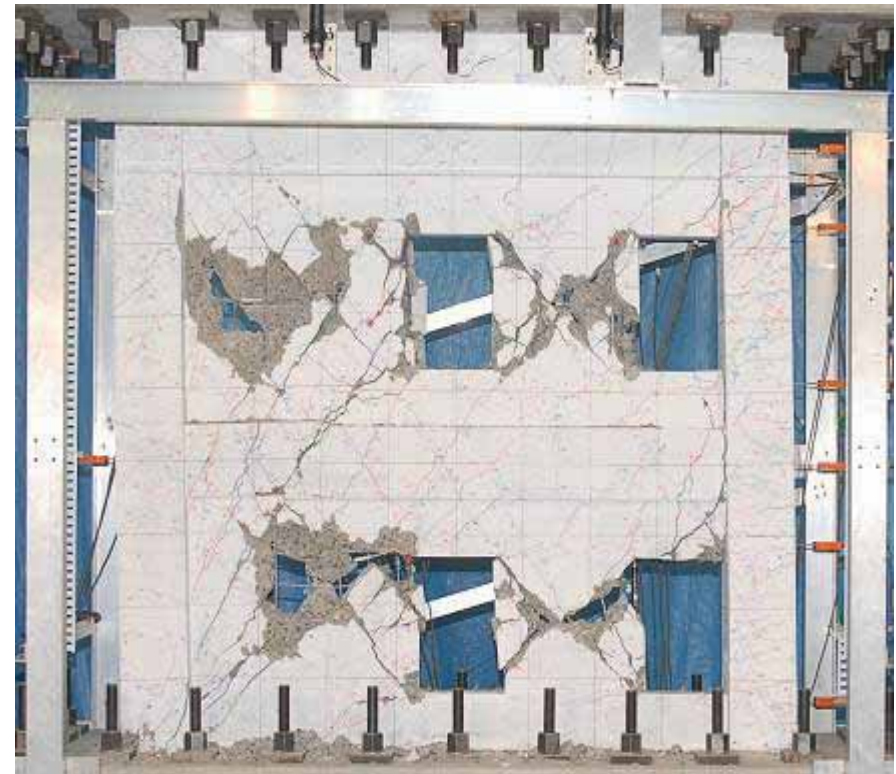
正載荷時:  負載荷時: 

## 試験体W05

西 **最大耐力時** 東

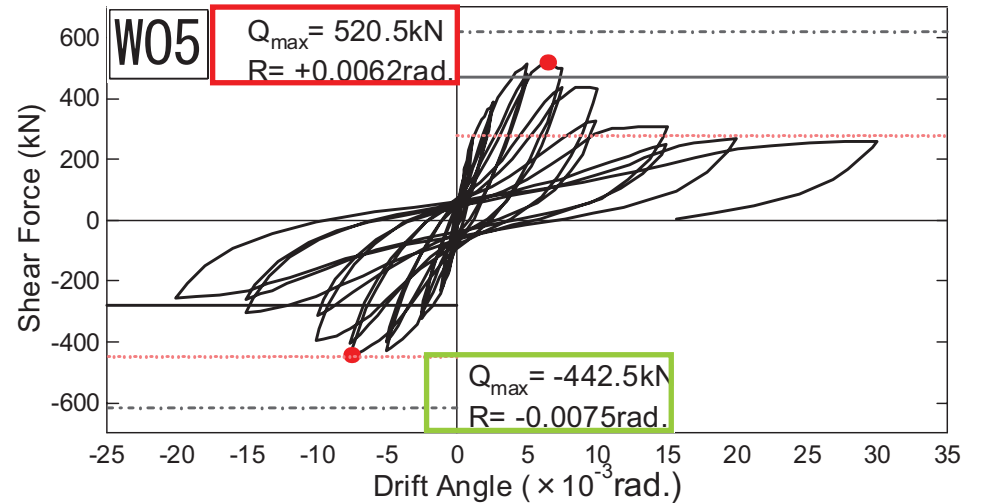
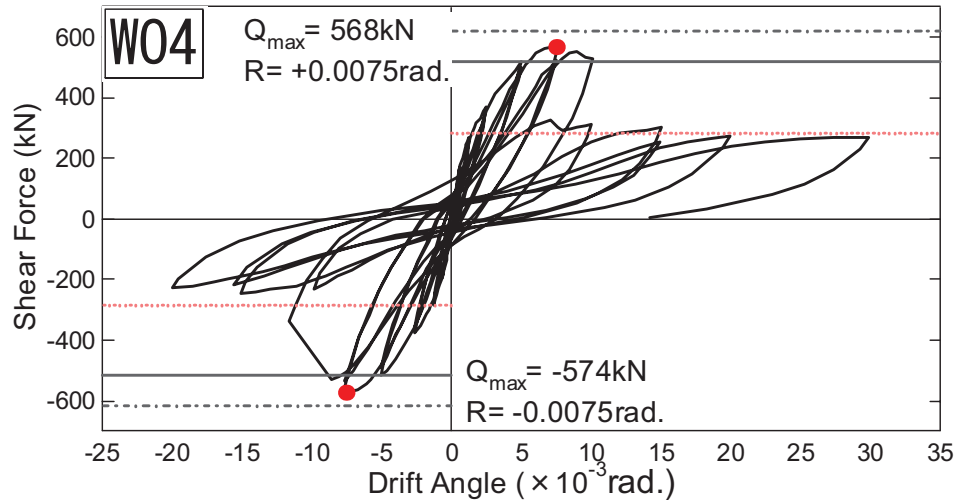


西 **最終破壊状況** 東



**正負載荷でひび割れの角度や損傷の激しい箇所が異なる**

# 実験結果（履歴特性）



偏在開口の試験体

正負で最大耐力に違い

# 複数開口耐震壁の数値解析・設計手法の調査

大阪大学  
豊橋技術科学大学

# 研究目的

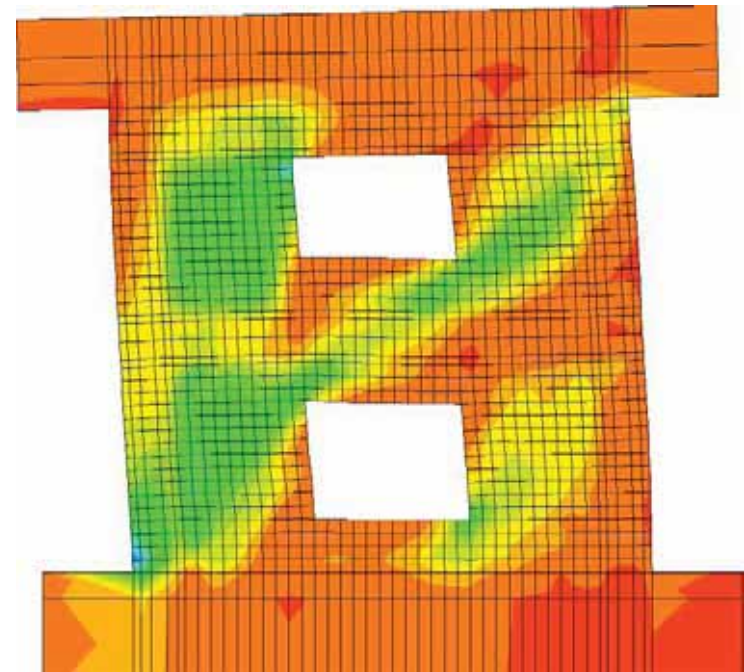
---

---

- ・ 有開口耐震壁内部の応力状態の解明
- ・ 開口形状が応力伝達機構に及ぼす影響の把握
- ・ 開口位置を実験因子としたパラメトリック解析



まず、FEM解析による実験  
結果のシミュレーション  
手法を検討する！



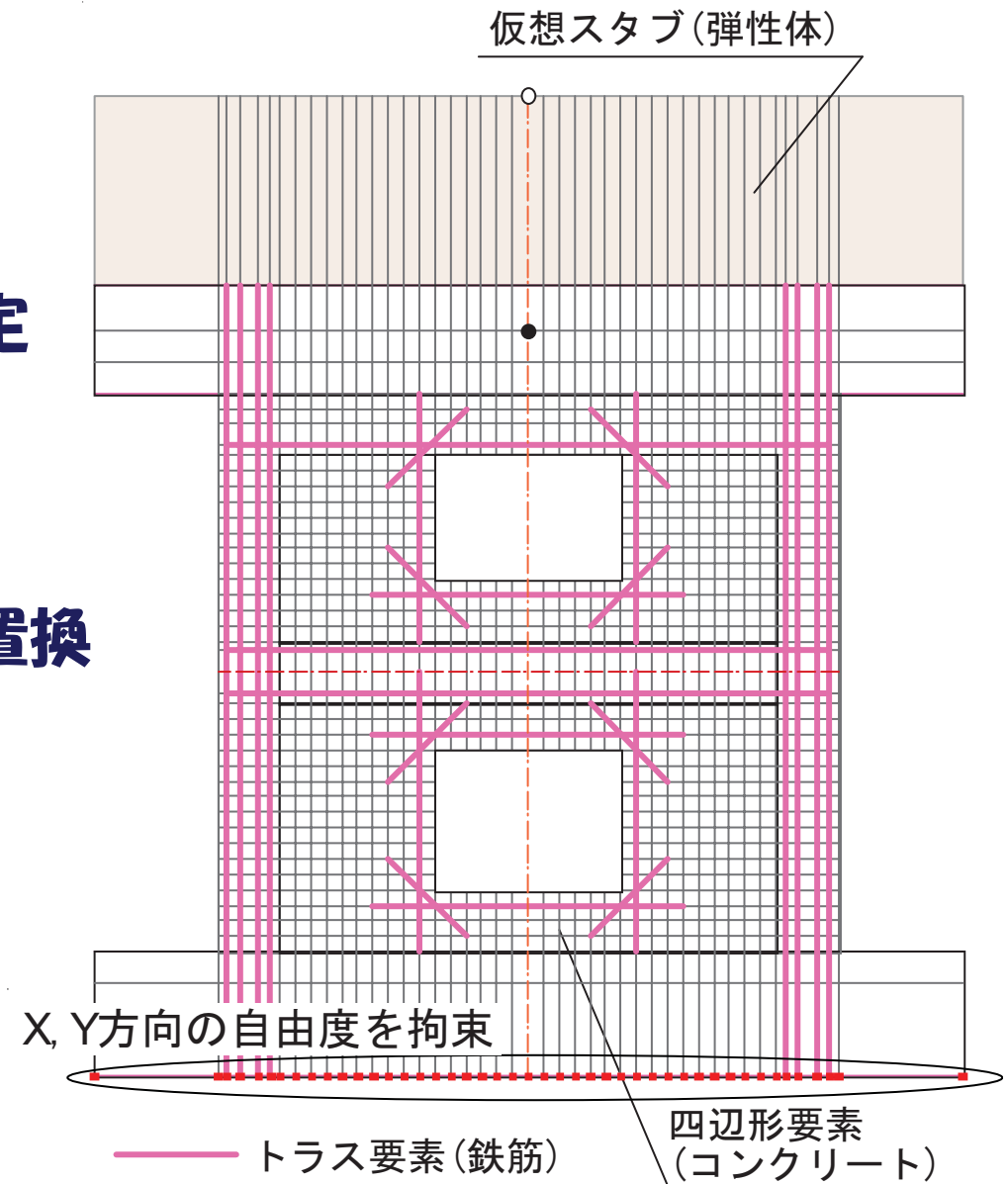
# FEM解析概要

## 市販ソフト (FINAL) を使用

**基本条件：**  
**2次元解析、平面応力場を仮定**

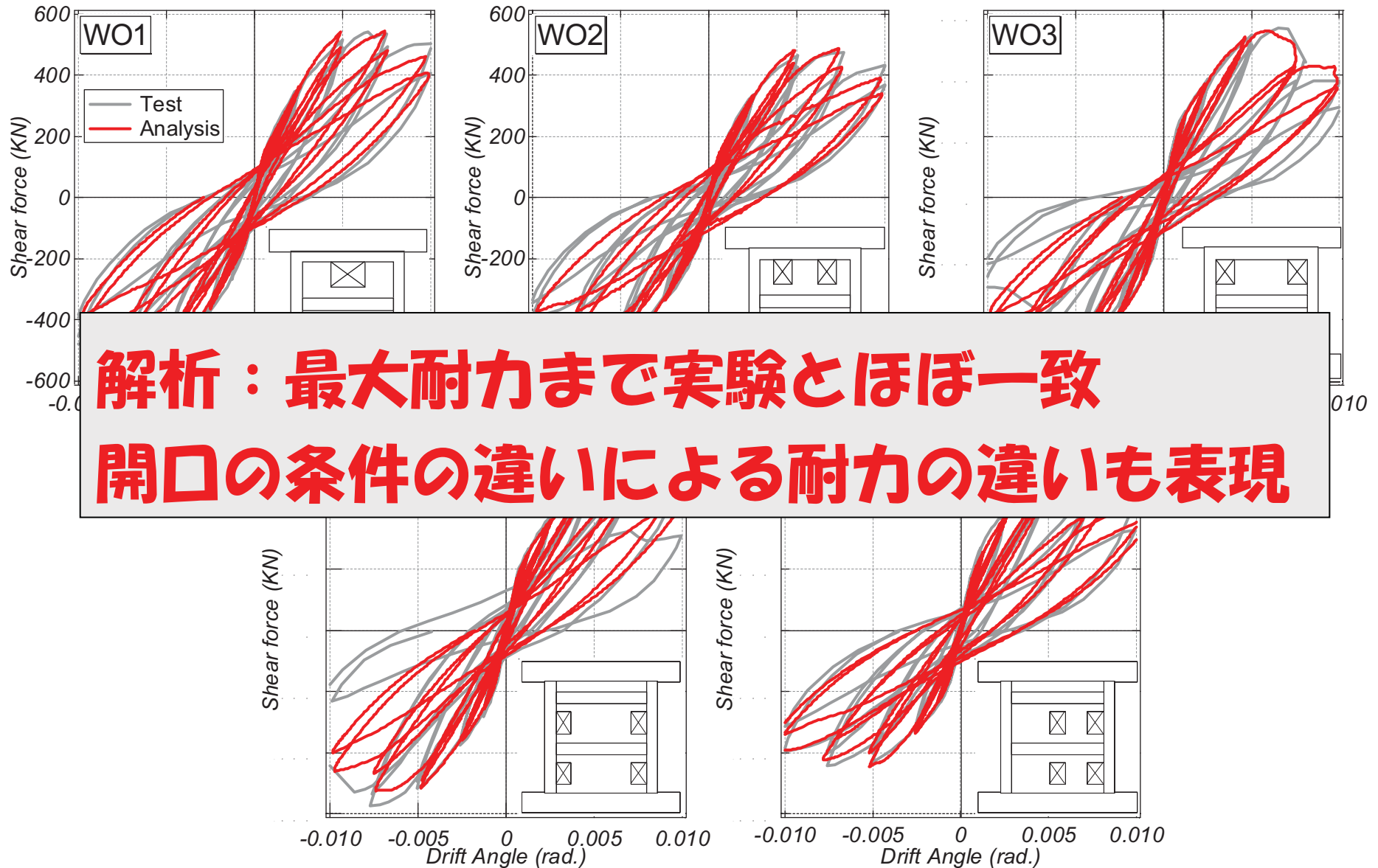
**コンクリート：**  
**4節点四辺形要素**  
**\*帯筋・壁筋は要素内に層状置換**

**柱・梁主筋：**  
**2節点トラス要素**

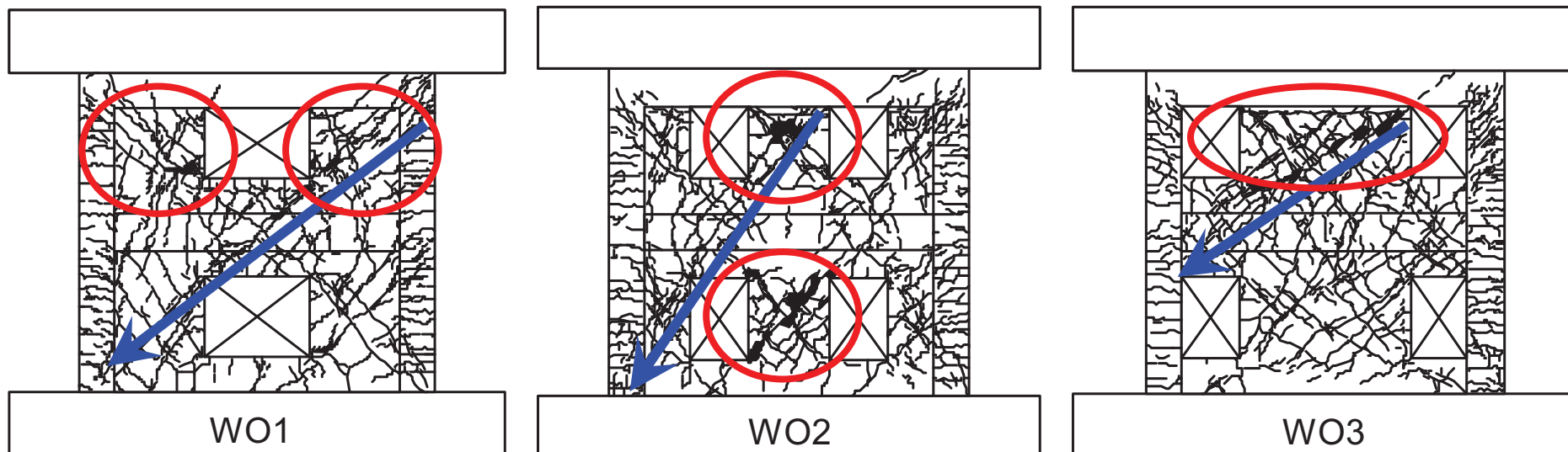




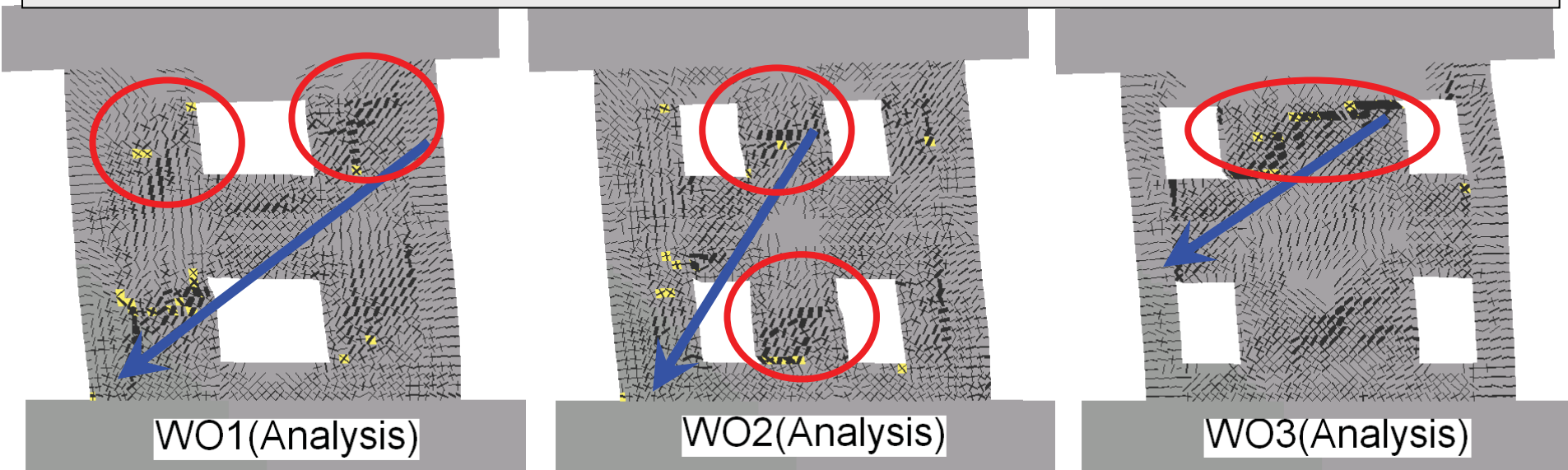
# 解析結果：荷重－変形関係



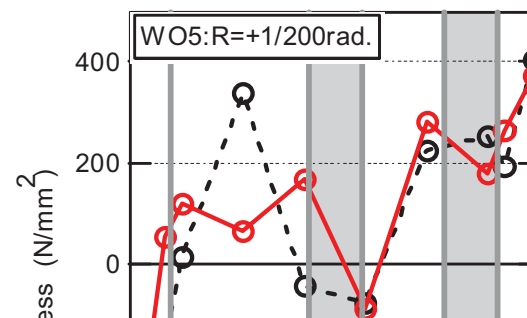
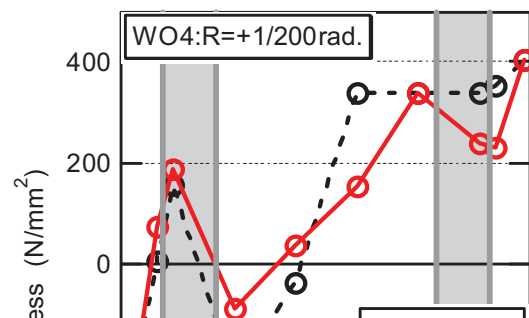
# 解析結果：破壊性状 (R=+1/133rad.)



ひび割れ方向・損傷の激しい箇所：実験とほぼ一致



# 解析結果：壁脚部の応力分布

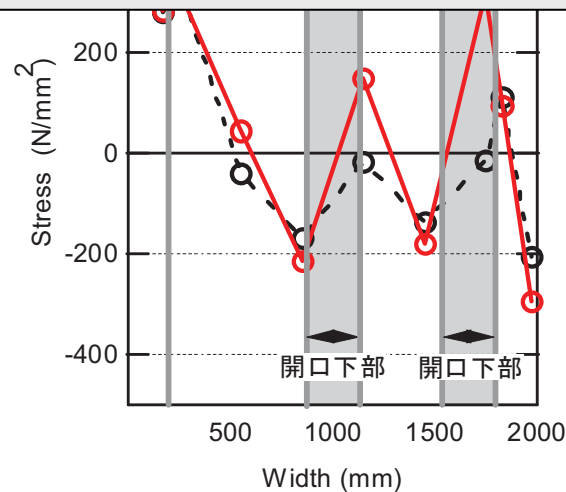
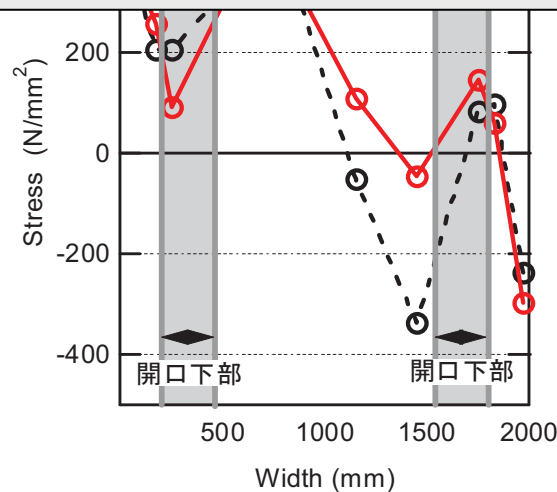


実験と解析でモーメントの傾向は概ね一致  
 (耐震壁脚部で各壁板が個々にモーメントに抵抗)

Width (mm)

Width (mm)

偏在開口の場合でも傾向を捉えている



# 偏在開口耐震壁に関する実験調査

京都大学

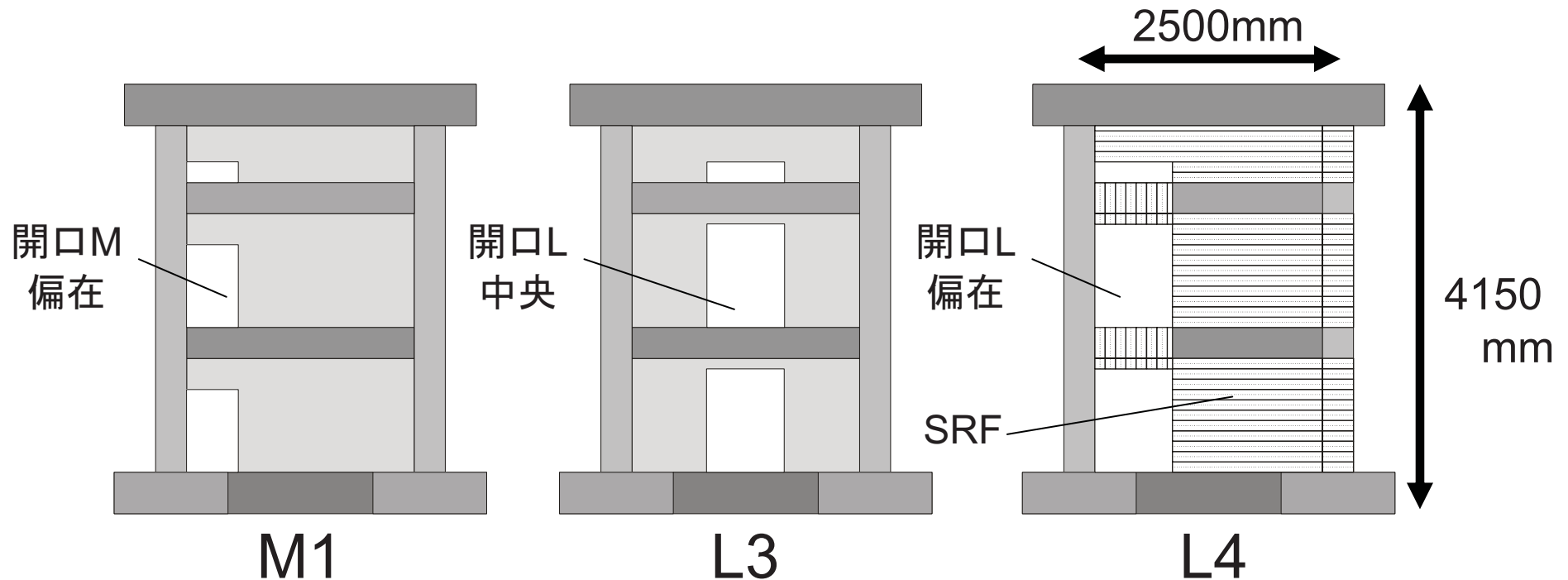
# 実験計画

## 【試験体】

- ・ 縮尺40%のモデル試験体 3体  
(6層中低層RC構造物の最下層3層を想定)

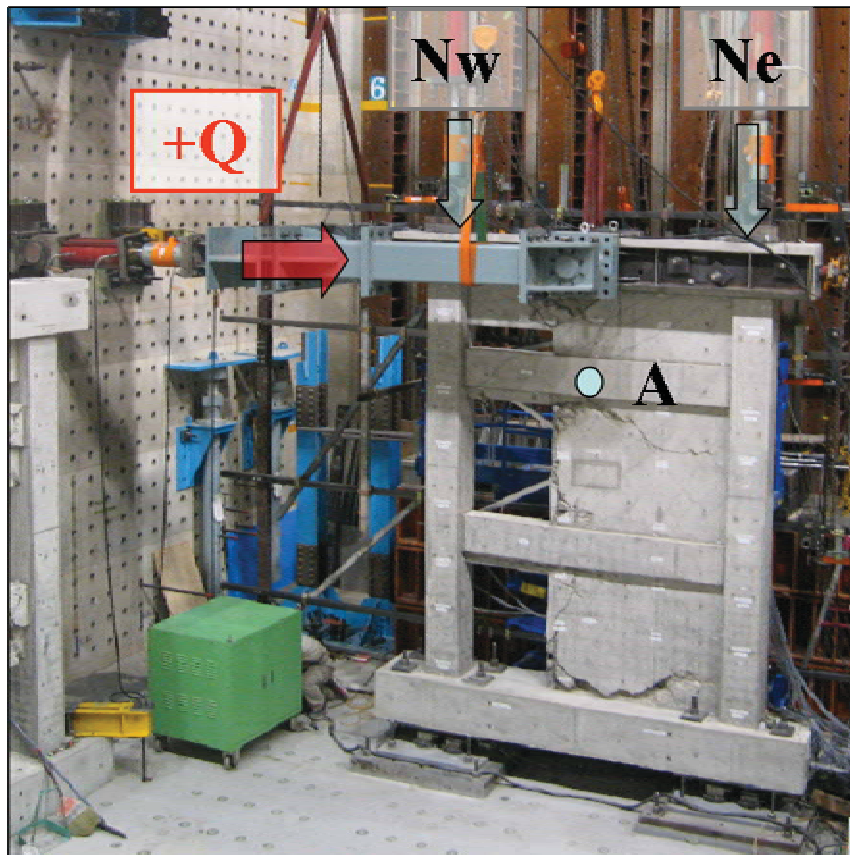
## 【実験変数】

- ・ 開口の大きさ (開口周比相当で,  $M:0.34$ ,  $L:0.46$ )
- ・ 開口位置 (中央, 偏在)
- ・ 耐震補強 (ポリエステル繊維シート [SRF])



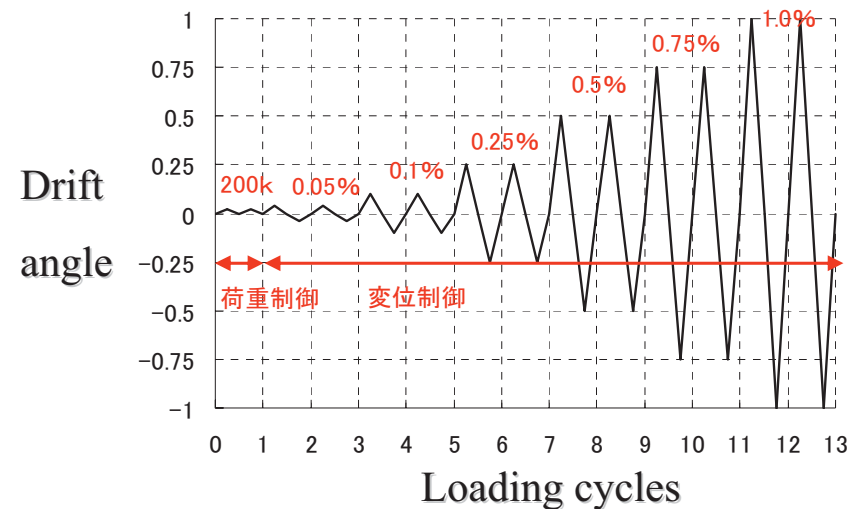
# 実験目的と載荷方法

偏在開口が耐震壁のせん断性状（強度，剛性，破壊形式）に及ぼす影響を検証する。



**【載荷ルール】**  
長期軸力：244kN（柱1本あたり）  
せん断スパン比：1.0

**【載荷サイクル】**





# 実験結果：損傷状況

## 【M1試験体】

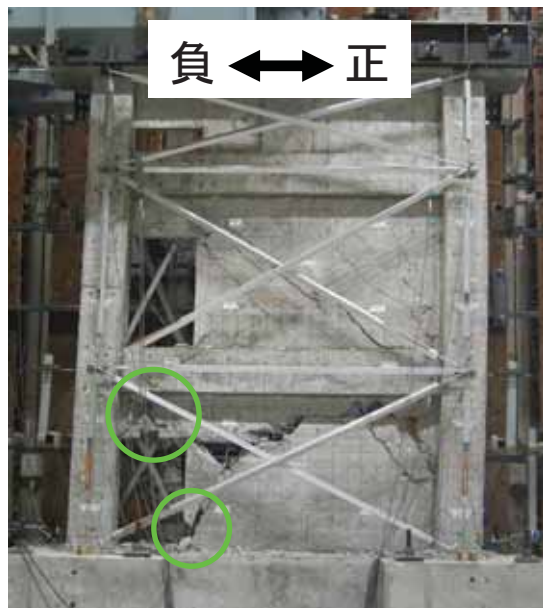
- ・隅角部のコンクリートの損傷が甚大
- ・開口上下梁材の垂れ壁に剥落が見られる

## 【L3試験体】

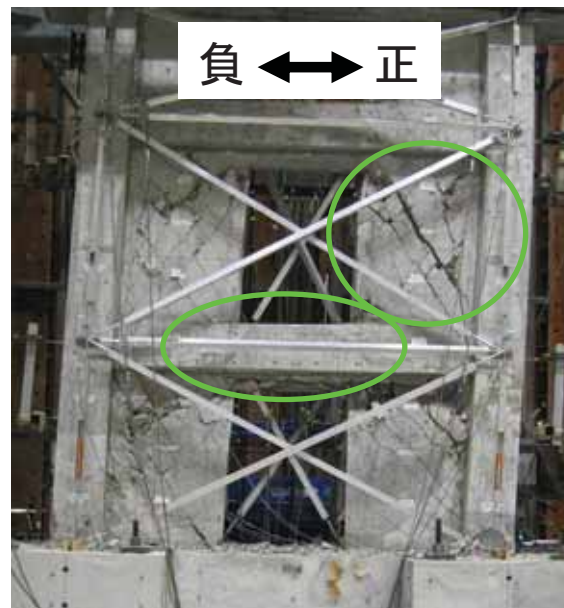
- ・各階の壁板に損傷が分散
- ・開口上下梁材の損傷は軽微

## 【L4試験体】

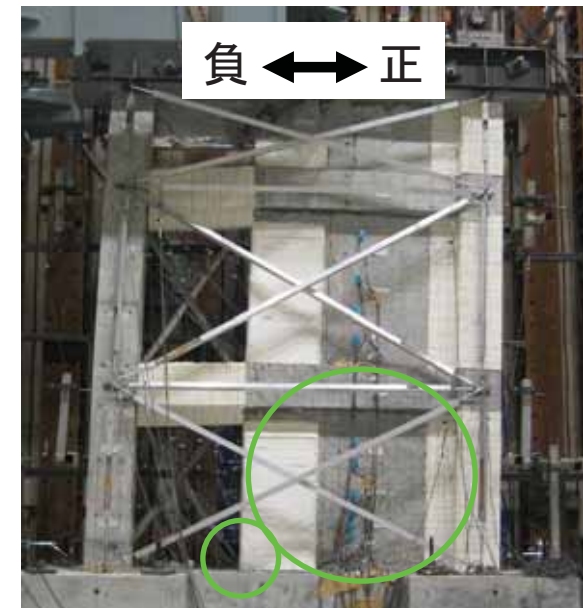
- ・繊維シートにより、隅角部コンクリートの損傷が軽減
- ・壁板に発生するせん断ひび割れの幅が平均化



M1

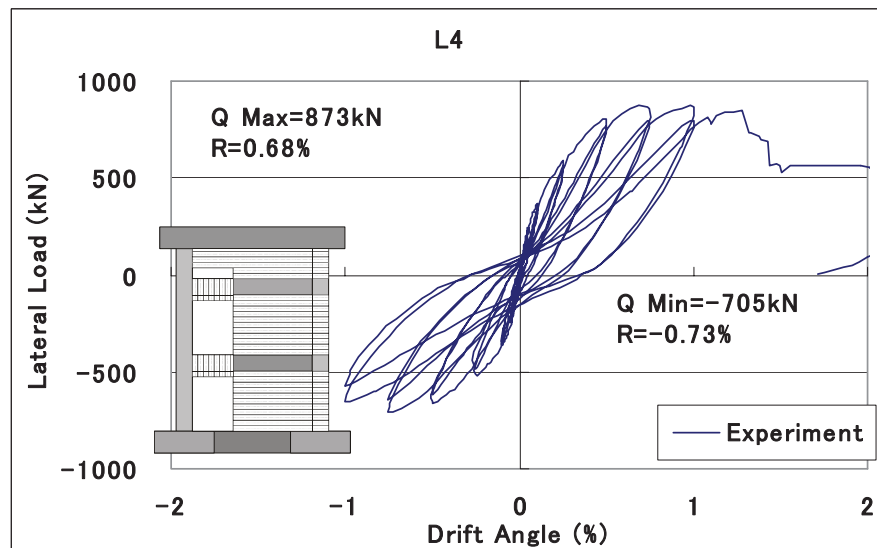
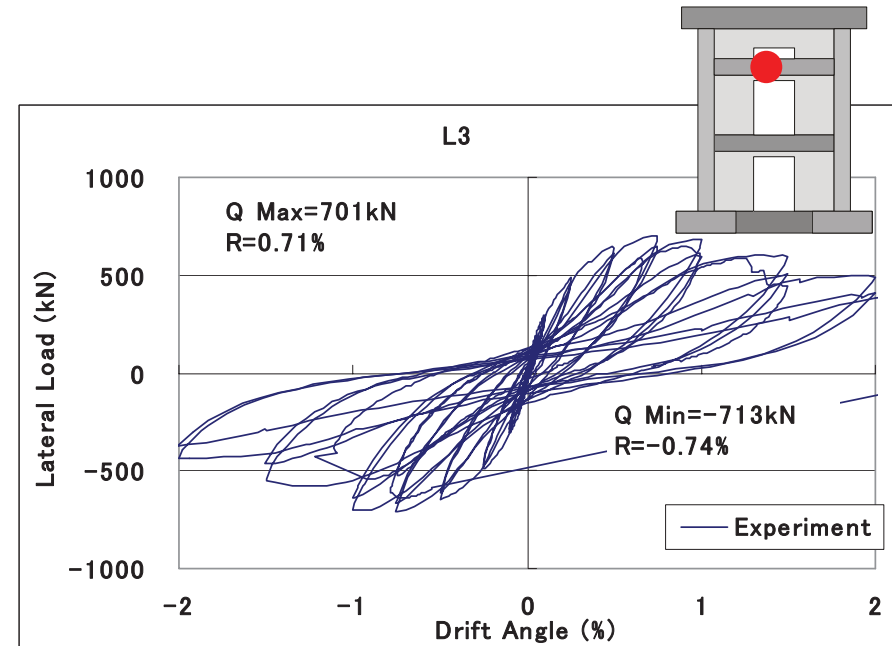
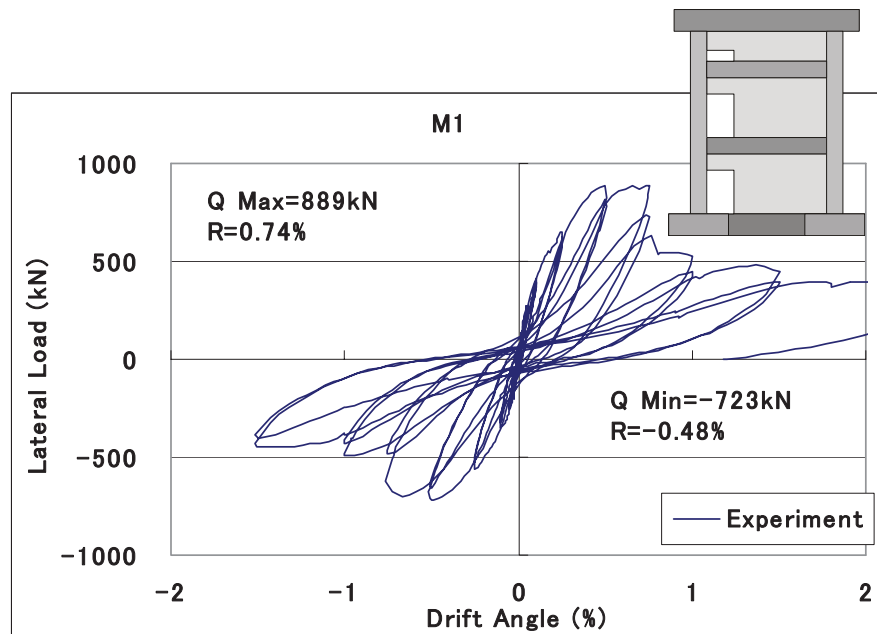


L3



L4

# 実験結果：水平荷重－全体変形角関係



- 荷重方向（正負）による耐力差
- 開口位置，開口の大きさによる最大耐力後の変形性能の相違
- 繊維補強による耐力，変形性能の向上



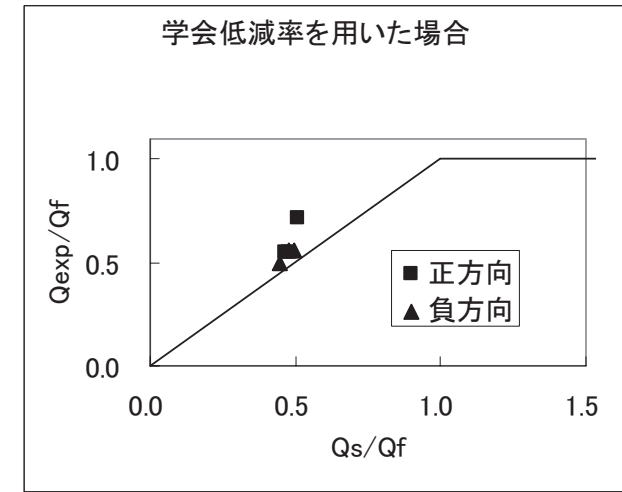
# 実験結果：有開口試験体のせん断耐力評価

## 学会規準

$$r = 1 - \eta$$

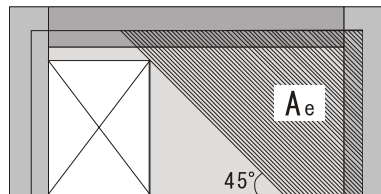
$$\eta = \max \left\{ \sqrt{\frac{h_o \cdot l_o}{h \cdot l}}, \frac{l_o}{l} \right\}$$

方向	試験体名	実験値 kN	解析値 kN	実験値 /解析値
正	M1	889	636	1.40
	L3	701	607	1.15
	L4	873	563	1.55
負	M1	-723	-636	1.14
	L3	-713	-607	1.17
	L4			

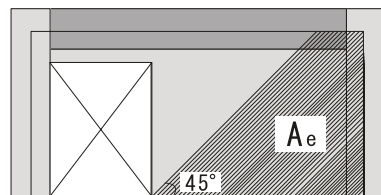


## 小野らの低減率

$$r_u = \sqrt{\sum A_e / hl}$$

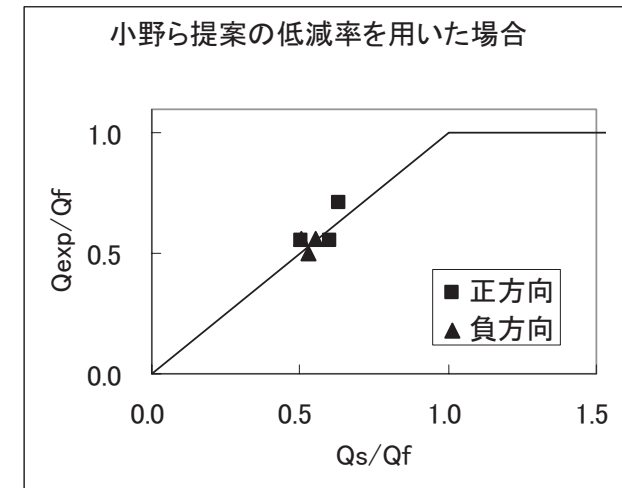


正側



負側

方向	試験体名	実験値 kN	解析値 kN	実験値 /解析値
正	M1	889	790	1.13
	L3	701	640	1.10
	L4	873	729	1.20
負	M1	-723	-713	1.01
	L3	-713	-640	1.11
	L4			



\* ここでは、無開口壁のせん断耐力の算定にスリップ式を用いた。

# 偏在開口耐震壁の数値解析・設計手法の調査

竹中工務店

# 解析の概要

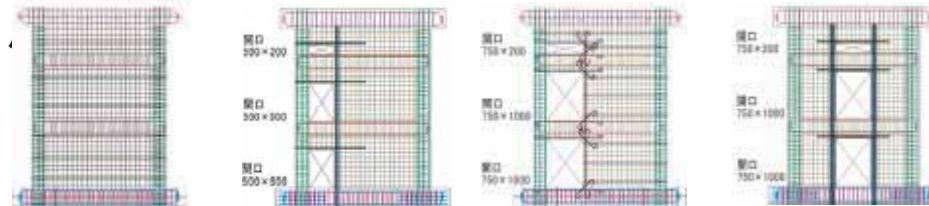
■ 解析の目的 偏在開口耐震壁の水平加力実験を対象

実験結果のシミュレーション

← 本年度は、  
ひび割れ損傷状況及び荷重-変形関係を予測し、  
解析手法の妥当性を検証することを目的とする。  
(3次元非線形地震応答解析プログラムNAPISOSを使

応力伝達メカニズムの解明

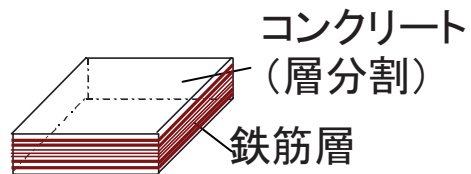
マクロモデルの構築



■ 解析プログラム【NAPISOS】 原子力建屋等の壁式構造物解析用に開発

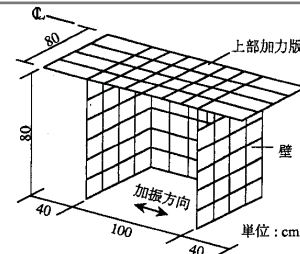


↓ 積層シェル要素

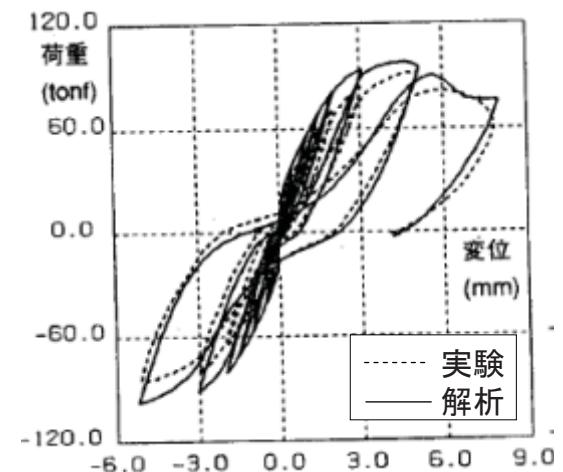
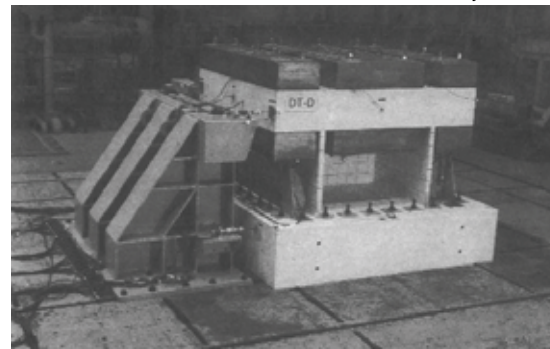


RC部材のモデル化

精度確認  
実験・解析  
(耐震壁)



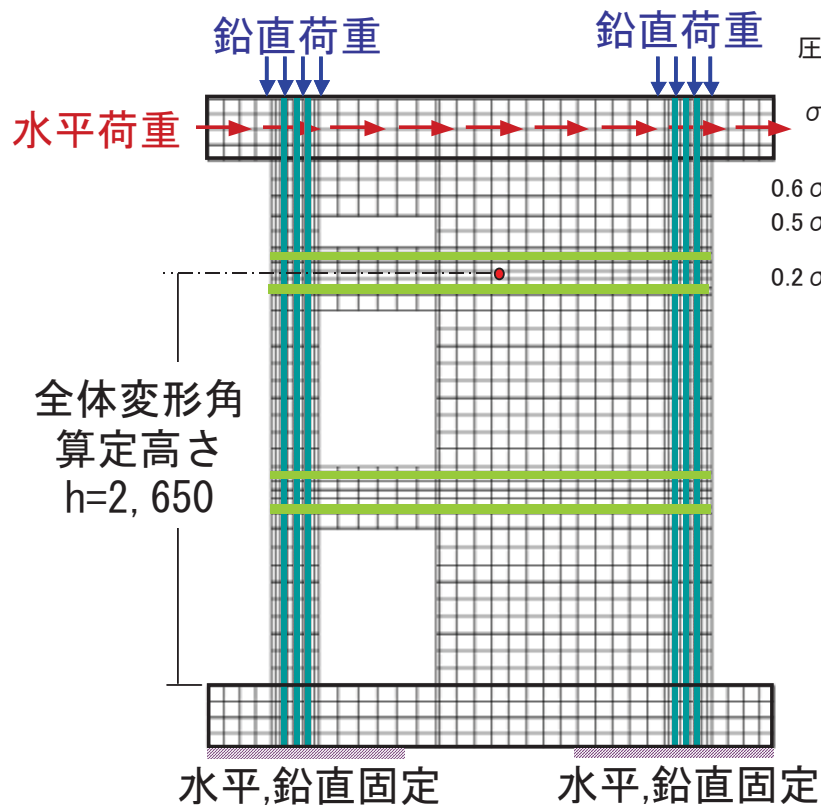
耐力・変形性能とも良好に対応



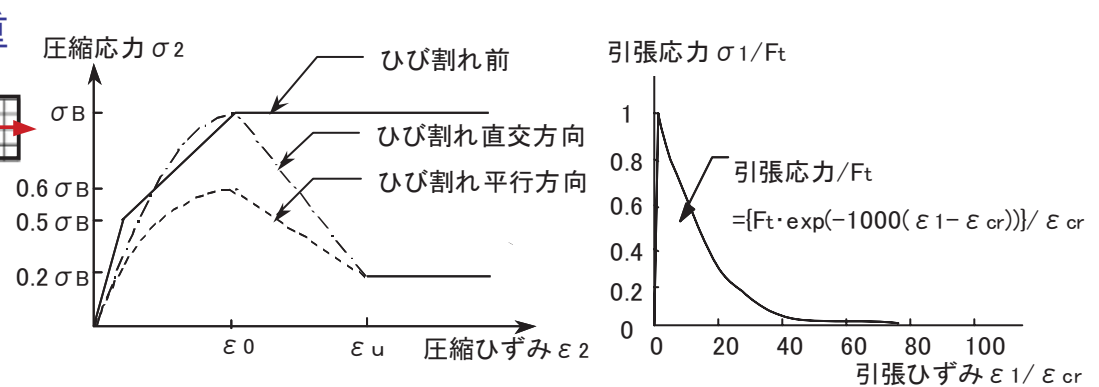
出典) 2003年 日本建築学会構造系論文集

# 解析計画

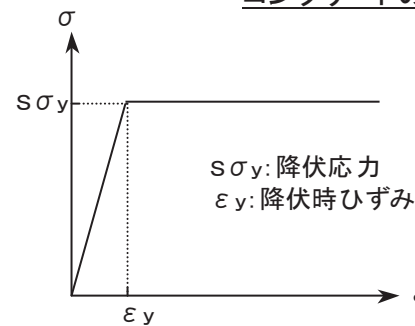
- ・荷重制御による一方向への荷重増分解析とする。
- ・RC部材は非線形性を考慮した積層シェル要素にてモデル化する。
- ・基礎梁・載荷梁はコンクリートの弾性剛性を有するものとする。
- ・材料強度・ヤング係数は実験時材料試験を使用する。



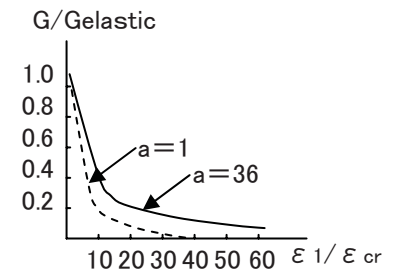
解析モデル



コンクリートの応力-ひずみ関係



鉄筋の応力-ひずみ関係



ひび割れ要素の

せん断剛性とひずみの関係

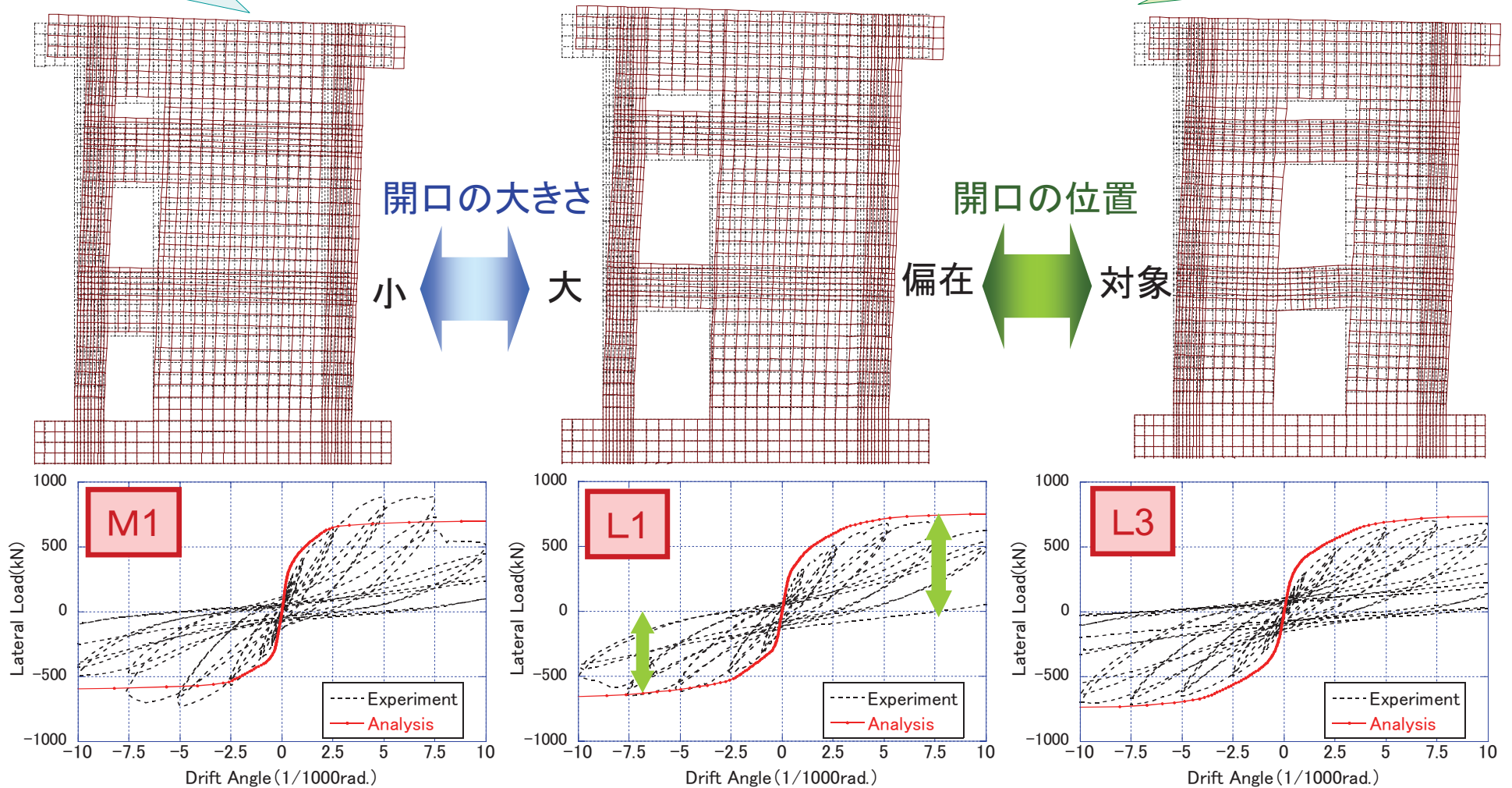
材料特性

# 解析結果

解析は小開口耐震壁の最大耐力を過小評価した。  
(その後の検討により改善)

大開口耐震壁では最大耐力まで良く対応した。

偏在による加力方向の差も精度良く予測した。



# まとめ

---

---

## 実験的研究に関して

- ・ 複数開口および偏在開口耐震壁の基本的な耐震挙動を把握した。
- ・ 開口個数に拘わらず偏在開口の場合には、載荷方向によって強度が異なる。
- ・ 現状では、終局強度式として小野・徳広式が有効である。

## 解析的研究に関して

- ・ FEM解析によって複数開口および偏在開口耐震壁の挙動をシミュレートすることが可能である。
- ・ 今後は、
  - パラメトリックスタディによる応力伝達メカニズムの把握
  - マクロモデルの構築
  - マクロモデルに基づくせん断耐力と合成の評価式の提案という方針で、さらなる検討を進める予定である。





ご清聴ありがとうございます。

# 材料構成則

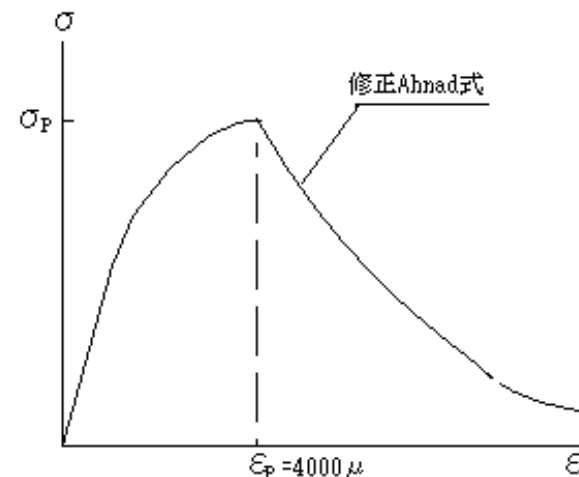
## ・コンクリート

・応力-ひずみ関係：修正Ahmadモデル  
(2軸応力下の破壊条件：Kupferの提案)

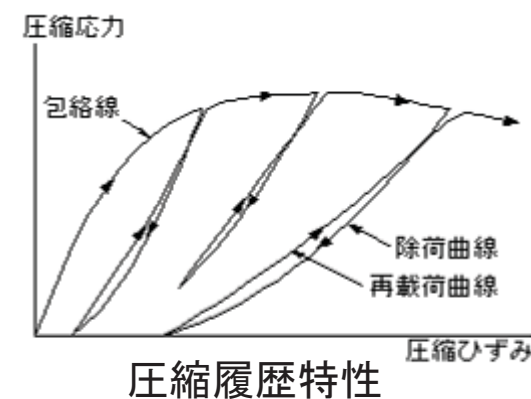
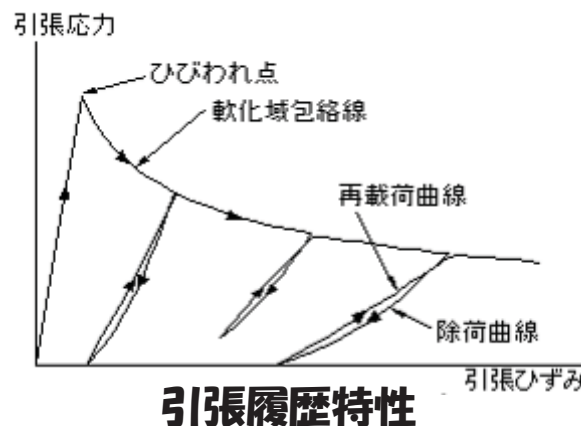
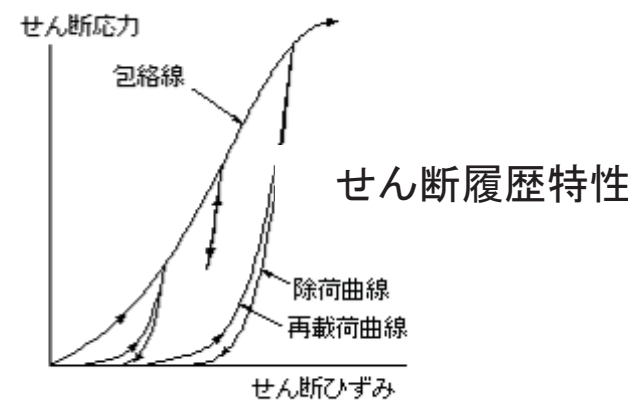
・テンションステフニング特性：コンクリートの圧縮強度・鉄筋比などの関数で定義（長沼・山口モデル）

・ひび割れ後のせん断伝達特性：コンクリートの圧縮強度・鉄筋比・ひび割れ方向の直交ひずみとせん断ひずみの関数で定義（長沼モデル）

・繰り返し応力下における履歴モデル：引張側・圧縮側共に2次曲線で表現（長沼モデル）



修正Ahmadモデル

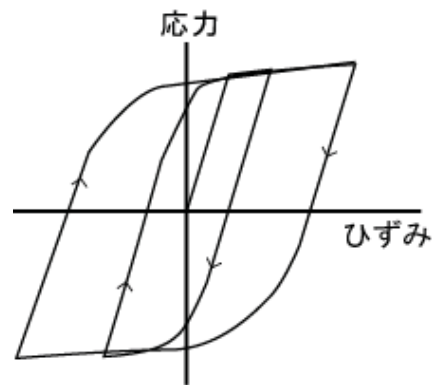




# 材料構成則

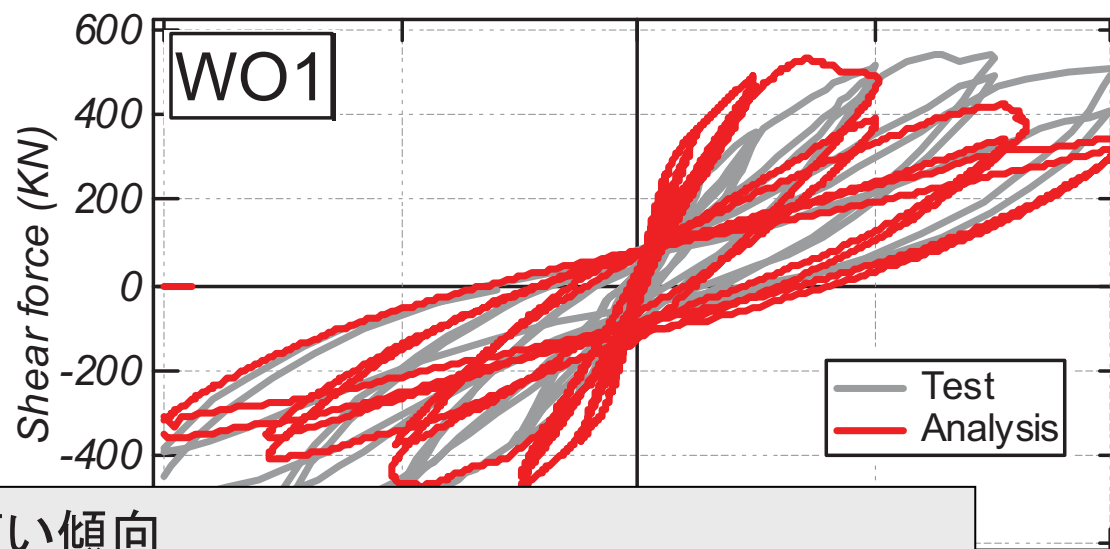
## 鉄筋

- 鉄筋の履歴特性：Ciampiらの修正Menegotto-Pintoモデルにより降伏後の履歴ループを表現



鉄筋の履歴特性

コンクリート・鉄筋の  
材料特性：材料試験値  
と同様



実験に比べ剛性が高い傾向

試験体の乾燥収縮の影響による剛性低下などを考慮して  
コンクリートの引張強度、ヤング係数、圧縮強度時ひずみを低減

0.010