

S36 引張軸力が作用する鉄筋コンクリート造  
連層壁部材の耐力評価に関する検討

令和4年度 成果報告会  
4/25 すまい・るホール

# 研究組織

## 引張軸力が作用する鉄筋コンクリート造連層壁部材の耐力評価に関する検討 全体委員会 委員構成（令和4年度）

|       |       |       |                            |
|-------|-------|-------|----------------------------|
| 事業主体  | 委員長   | 壁谷澤寿一 | 東京都立大学大学院都市環境科学研究科建築学域 准教授 |
|       | 委員    | 壁谷澤寿海 | 東京大学地震研究所 名誉教授             |
|       | 〃     | 谷 昌典  | 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授      |
|       | 〃     | 五條 涉  | (一財) 日本建築防災協会 技術総括参与       |
| 共同研究  | 〃     | 時本 和則 | (一般) 日本建築防災協会 保全調査部長       |
|       | 〃     | 渡邊 秀和 | (国研) 建築研究所 構造研究グループ 主任研究員  |
|       | 〃     | 中村 聡宏 | (国研) 建築研究所 構造研究グループ 主任研究員  |
|       | 〃     | 坂下 雅信 | (国研) 建築研究所 構造研究グループ 主任研究員  |
| 国土交通省 | 国土交通省 |       |                            |
|       | 委員    | 向井 智久 | 国土技術政策総合研究所 建築研究部          |
|       | 〃     | 小原 拓  | 国土技術政策総合研究所 建築研究部          |
|       | 〃     | 岡野 大志 | 住宅局参事官（建築企画担当）付企画専門官       |
|       | 〃     | 甲斐 菜月 | 住宅局参事官（建築企画担当）付構造係長        |

# 研究スケジュール

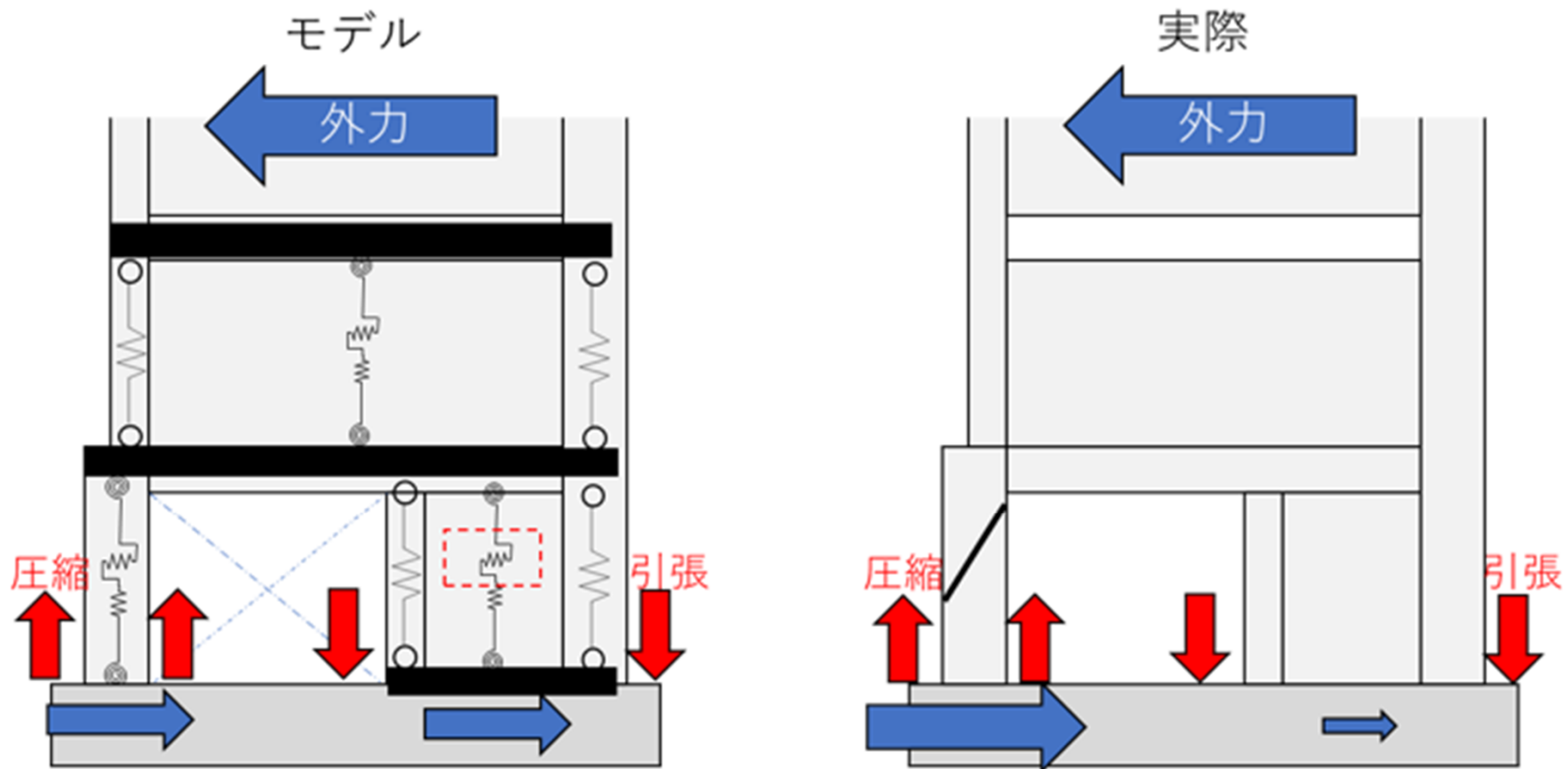
| 調査検討項目                             | R4年          |    |    |      |              |             |     |     |            | R5年   |       |    |
|------------------------------------|--------------|----|----|------|--------------|-------------|-----|-----|------------|-------|-------|----|
|                                    | 4月           | 5月 | 6月 | 7月   | 8月           | 9月          | 10月 | 11月 | 12月        | 1月    | 2月    | 3月 |
| (イ) 数値解析による連層壁部材の最下層に作用する応力状況の検討   | 次年度試験体<br>解析 |    |    |      |              | 載荷試験体<br>解析 |     |     | 解析結果・データ整理 |       | 報告書作成 |    |
| (ロ) 部材実験による引張軸力が作用する壁部材のせん断終局耐力の検討 | 実験準備         |    |    | 載荷実験 |              |             |     |     | 報告書作成      |       |       |    |
| (ハ) 部分架構実験による連層壁部材の最下層における地震時挙動の検討 | 次年度試験体<br>設計 |    |    |      | 次年度試験体<br>製作 |             |     |     |            | 報告書作成 |       |    |
| 委員会の運営                             | -            |    |    |      |              |             |     |     |            |       |       |    |

# 研究背景

耐力壁全体が引張だと負担できる曲げモーメントと曲げ剛性は低下する

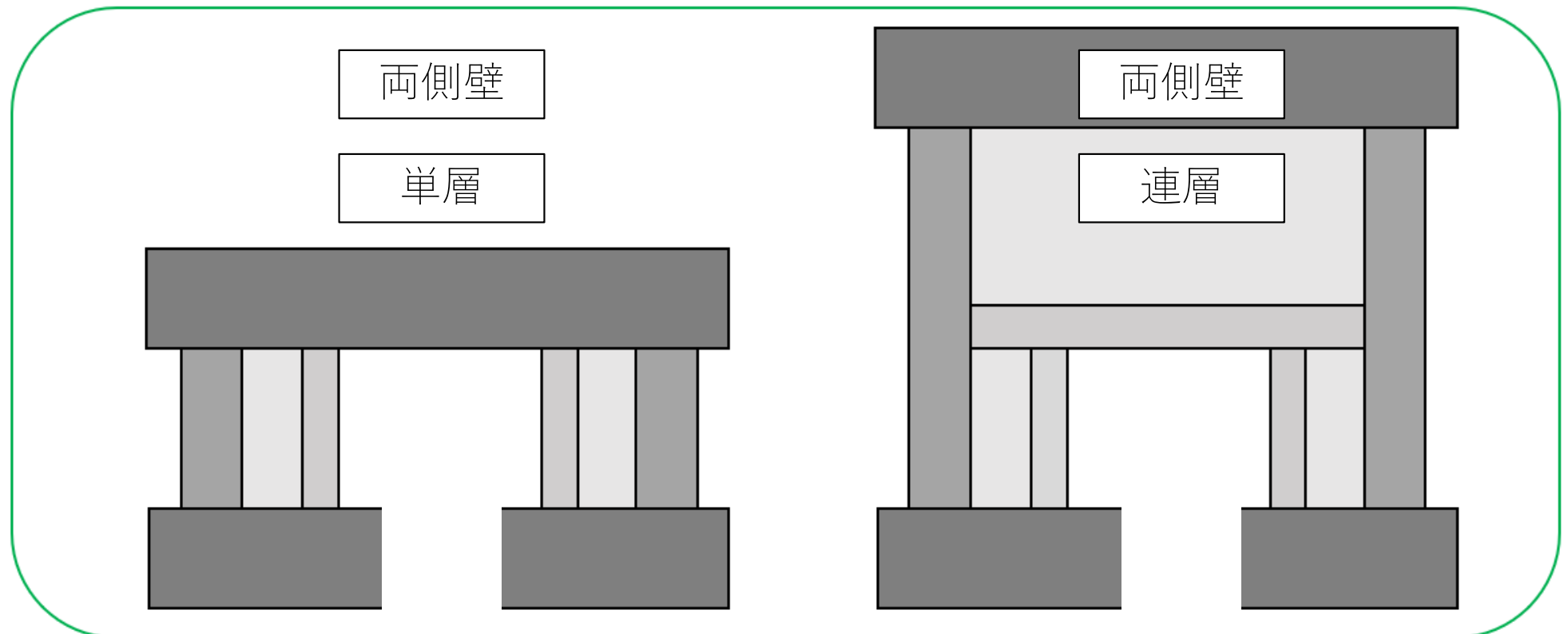
→ 引張下での耐力壁のせん断剛性の低下はモデル上考慮されていない

→ 実際は引張壁はせん断力を負担せず隣接するピロティ柱が破壊する危険性がある



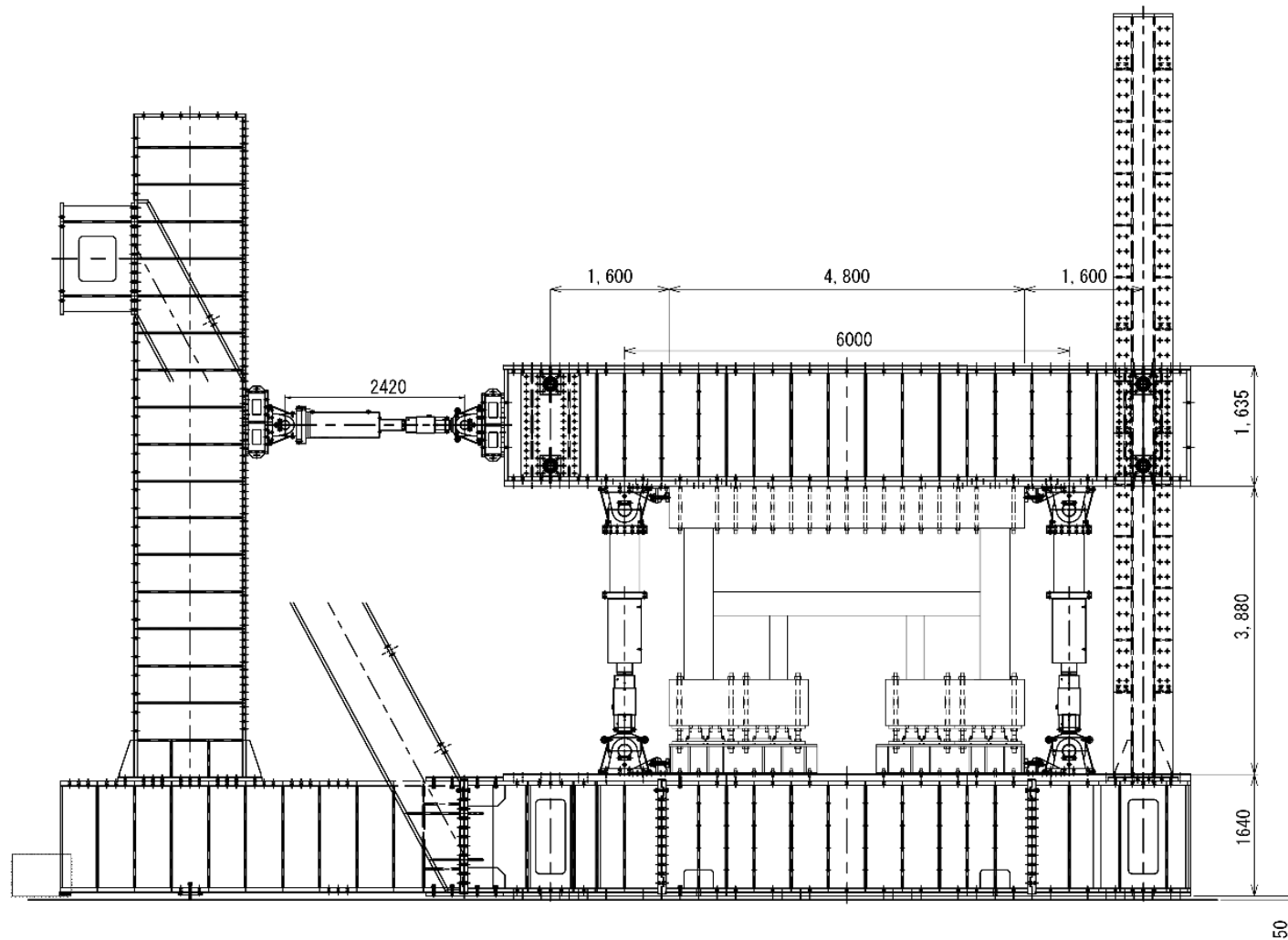
# 載荷実験試験体

- ・ 40%縮小スケールの単層試験体と連層試験体の載荷実験を実施した
- ・ 各壁の負担せん断力を把握するため荷重計の台座を設置した
- ・ 枠梁はRC規準に準じて設計した



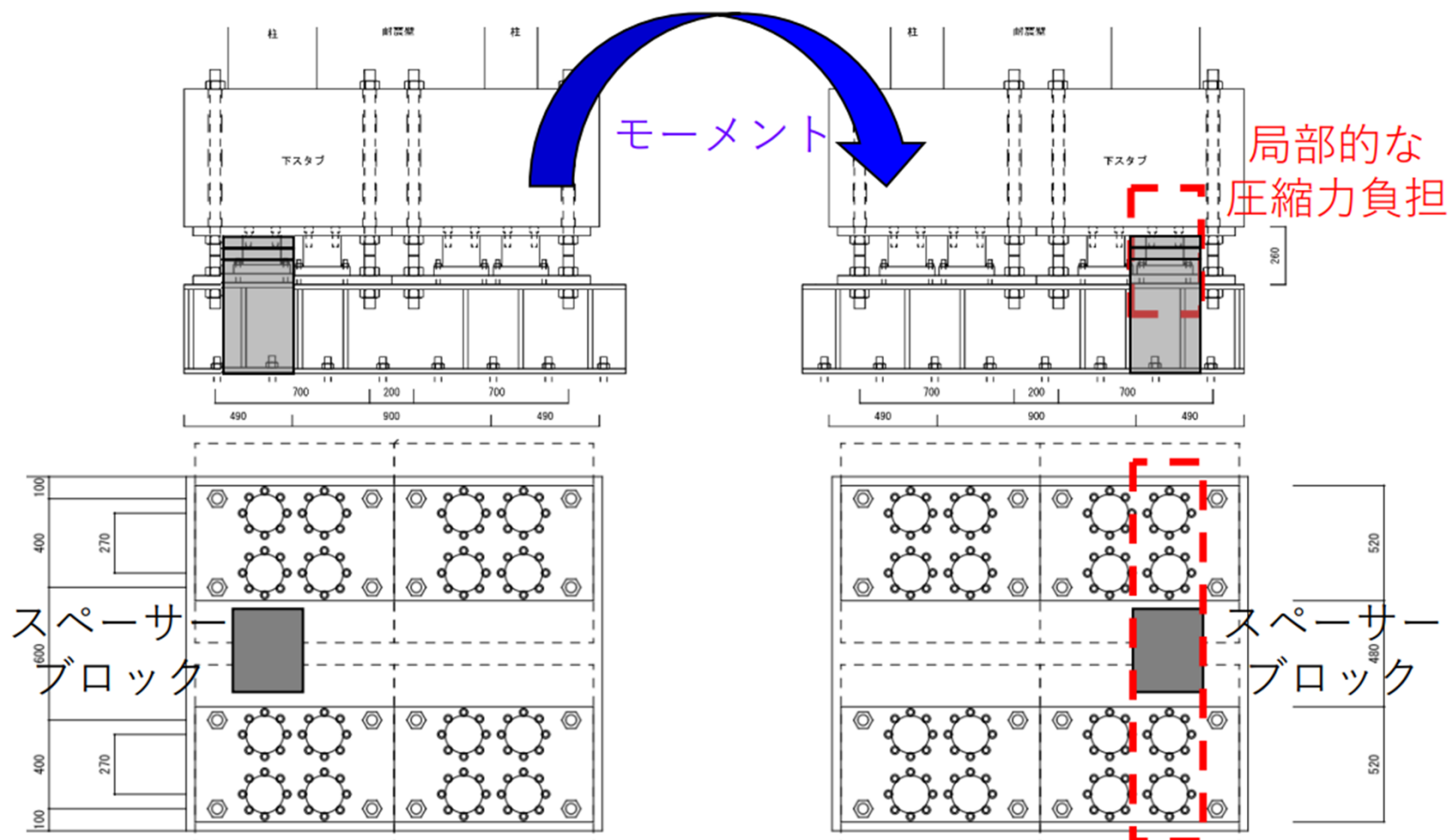
# 載荷方法

- ・ 建築研究所の鉛直2,000トン・水平2方向自己釣合型加力装置で載荷実験を行った
- ・ 鉛直ジャッキにより外力作用高さ(せん断スパン)を変動させている



# 荷重計の補剛

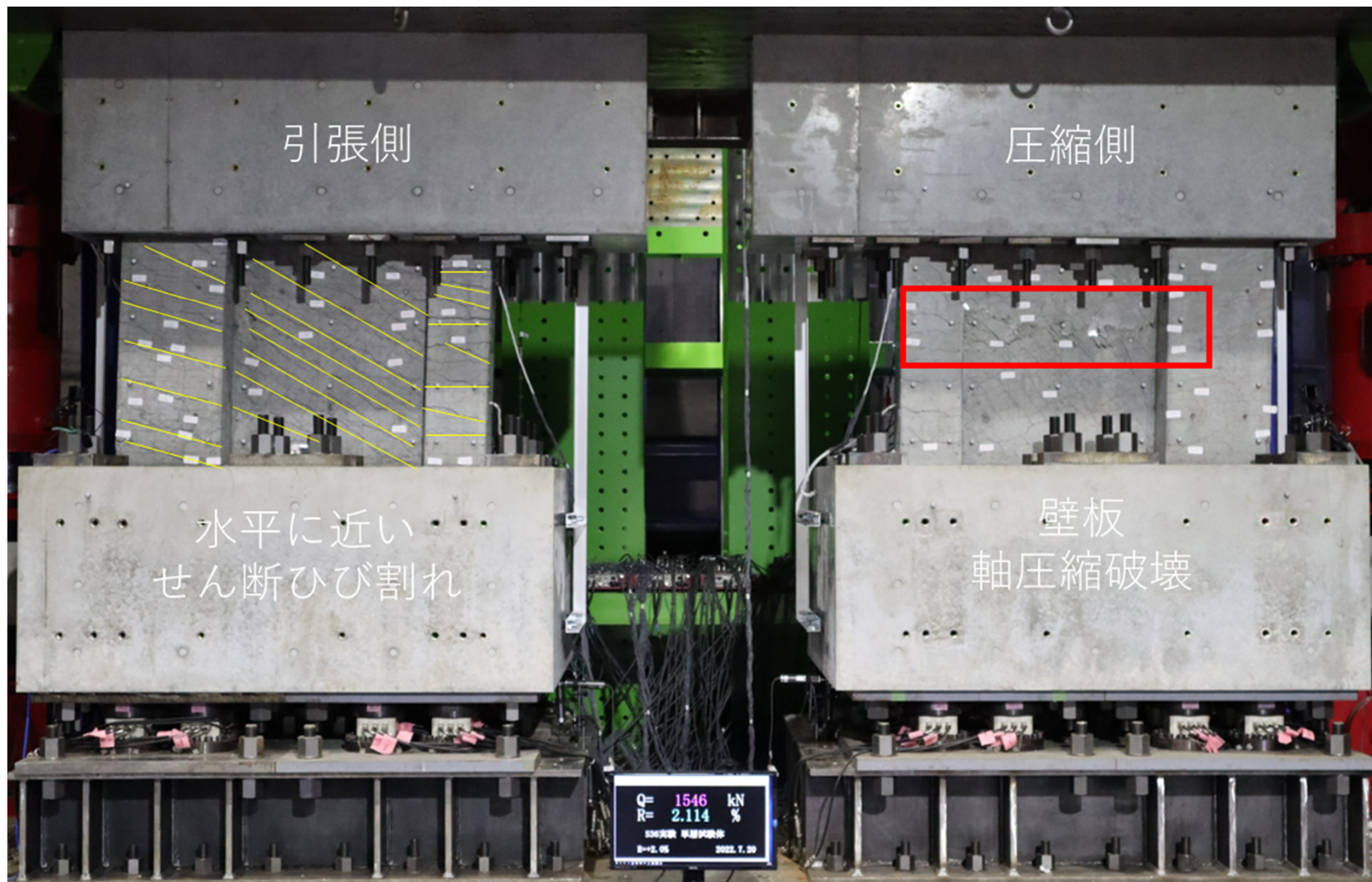
- ・ 端部荷重計の圧縮力が許容値を超える可能性を懸念して圧縮力の一部をスペーサーブロックに負担させた



# 実験結果 (単層試験体) $M/Q=8m$ , 軸力比0.08

水平変形角 2%まで概ね耐力を保持していた

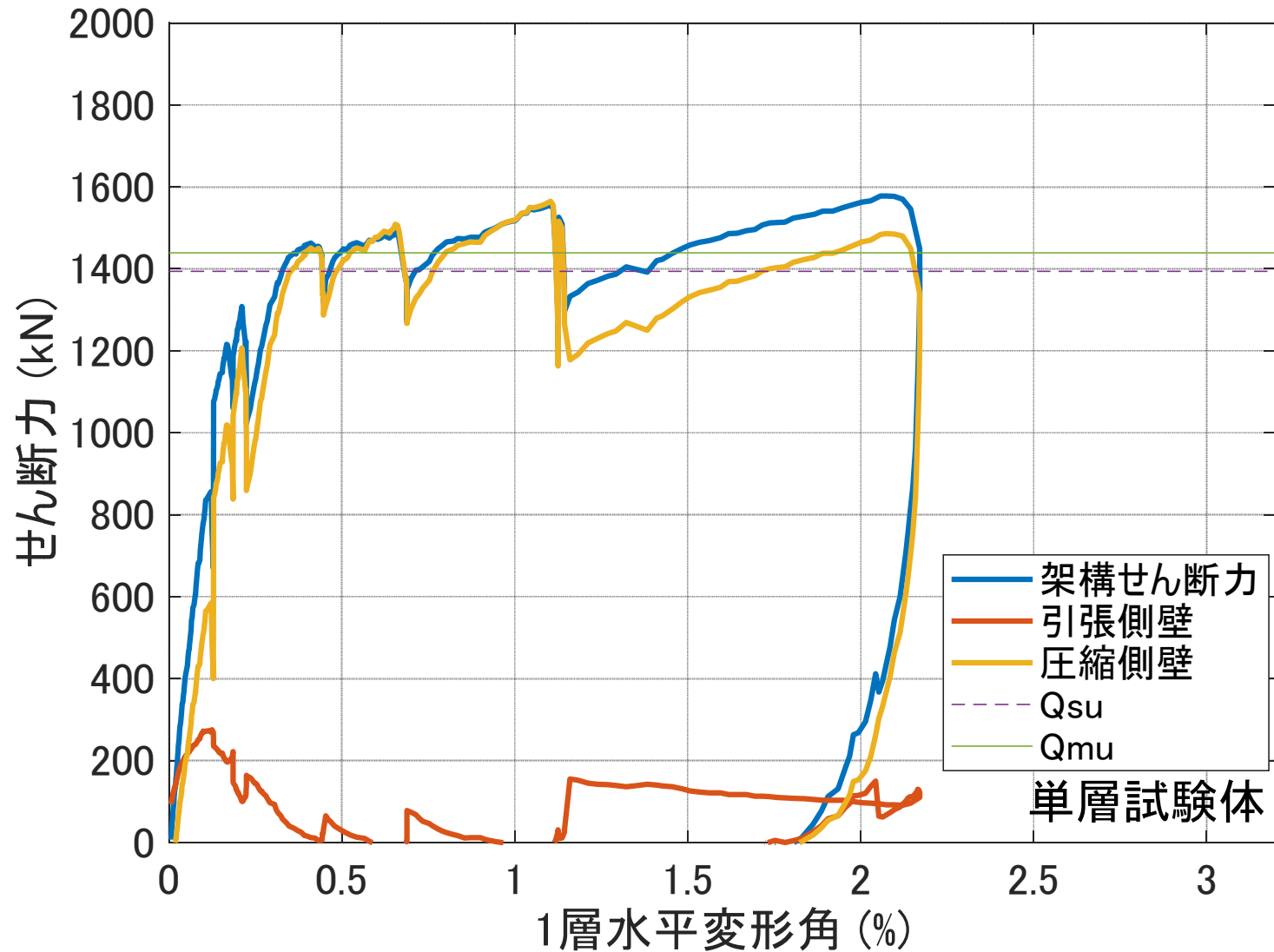
破壊形式は**曲げ破壊** (圧縮側は軸圧縮破壊, 引張側は水平せん断ひび割れ)





# 単層試験体（荷重包絡曲線）

圧縮側の壁で全せん断力を負担し，引張側は200kNから変形増加に従い概ね0となる  
架構せん断力は1枚の有開口耐力壁とみなしたとき曲げ終局強度と対応する



# 片側壁の最大耐力評価（単層試験体）

圧縮側壁の最大負担せん断力

$$Q_w = 1565 \text{ kN} \quad t_u = 16.3 \text{ (MPa)}$$

$$t_u / \sigma_B = 0.31 \quad \rightarrow \text{でも曲げ破壊 (WC)}$$

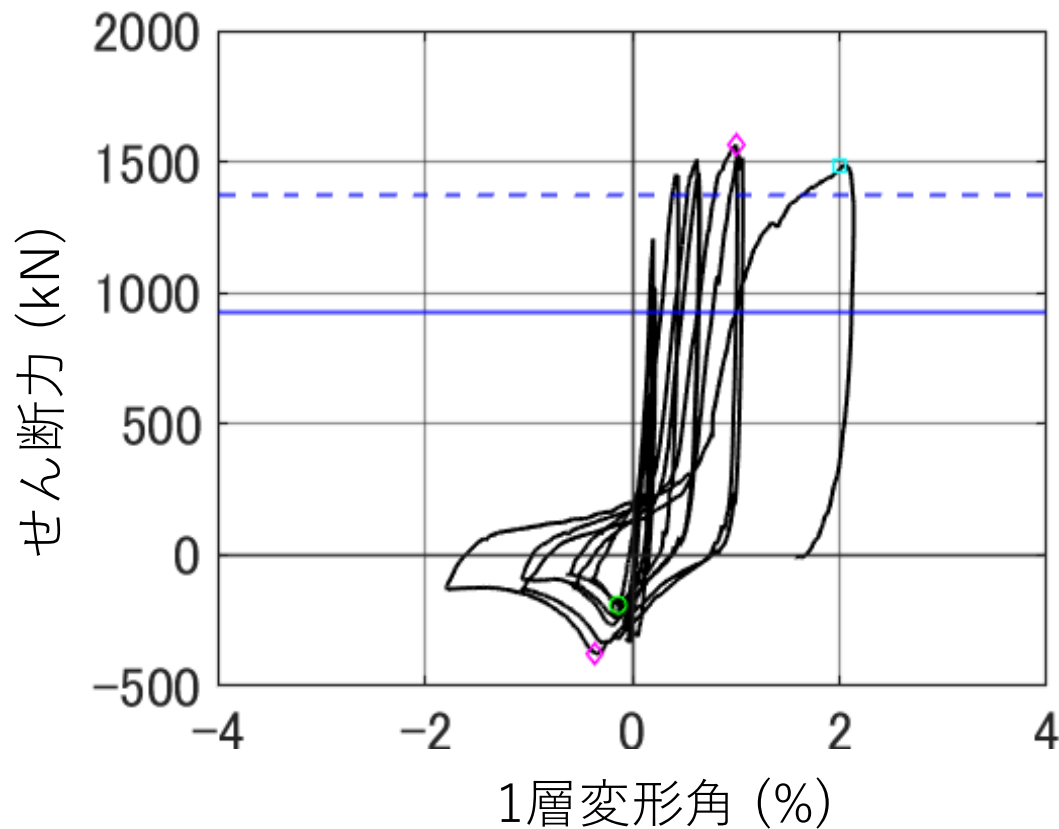
圧縮壁の反曲点高さ1.4mとして計算した  
片側耐力壁の平均広沢式計算強度

$$Q_{wsu} = 927 \text{ kN}$$

→ 軸力が高い壁は広沢式の精度が低い  
(実強度の約0.5倍)

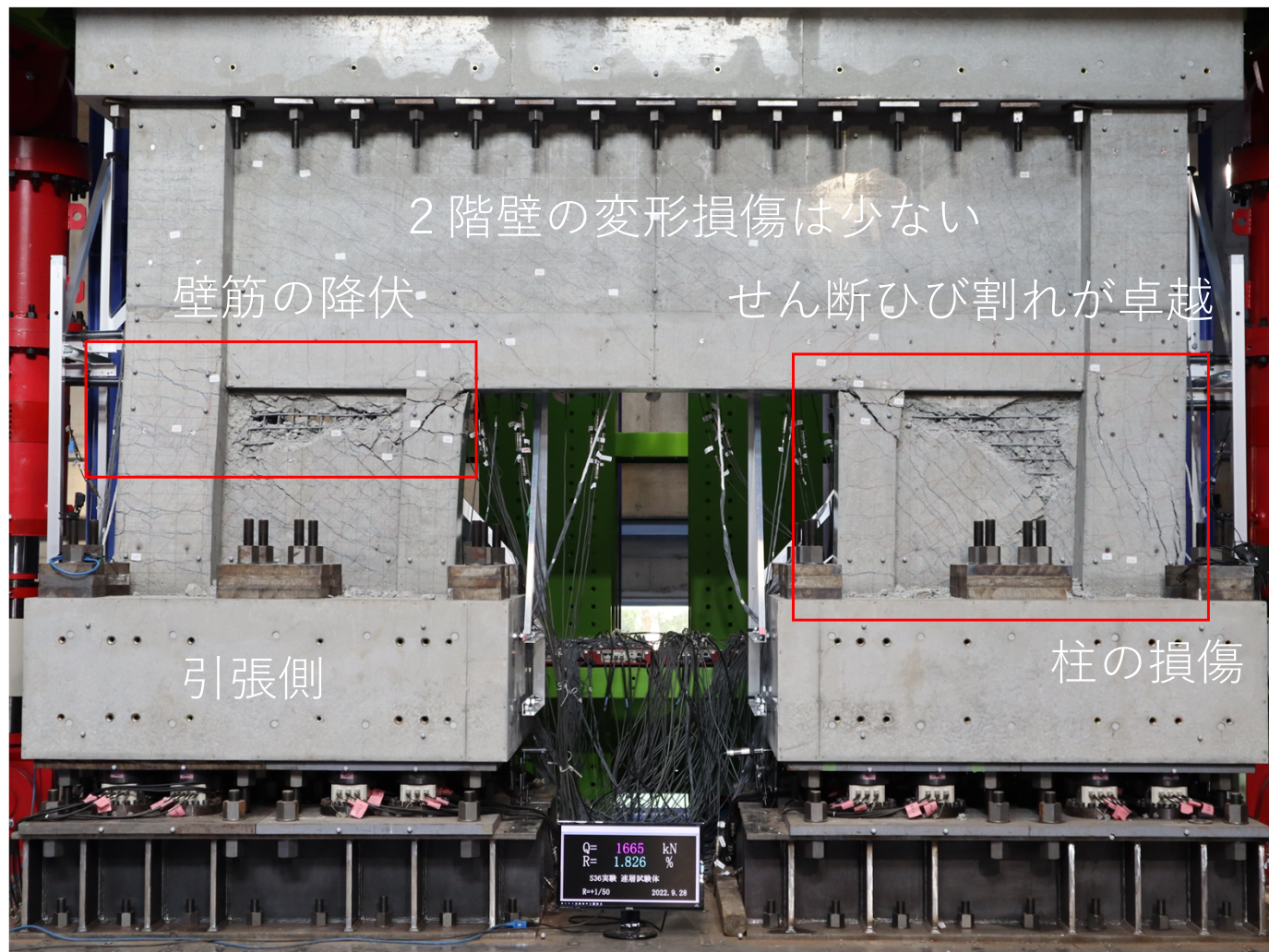
$$Q_{wsu} = 1375 \text{ kN}$$

(等価壁厚比  $t_e < 1.5t$  制限を設けない場合)



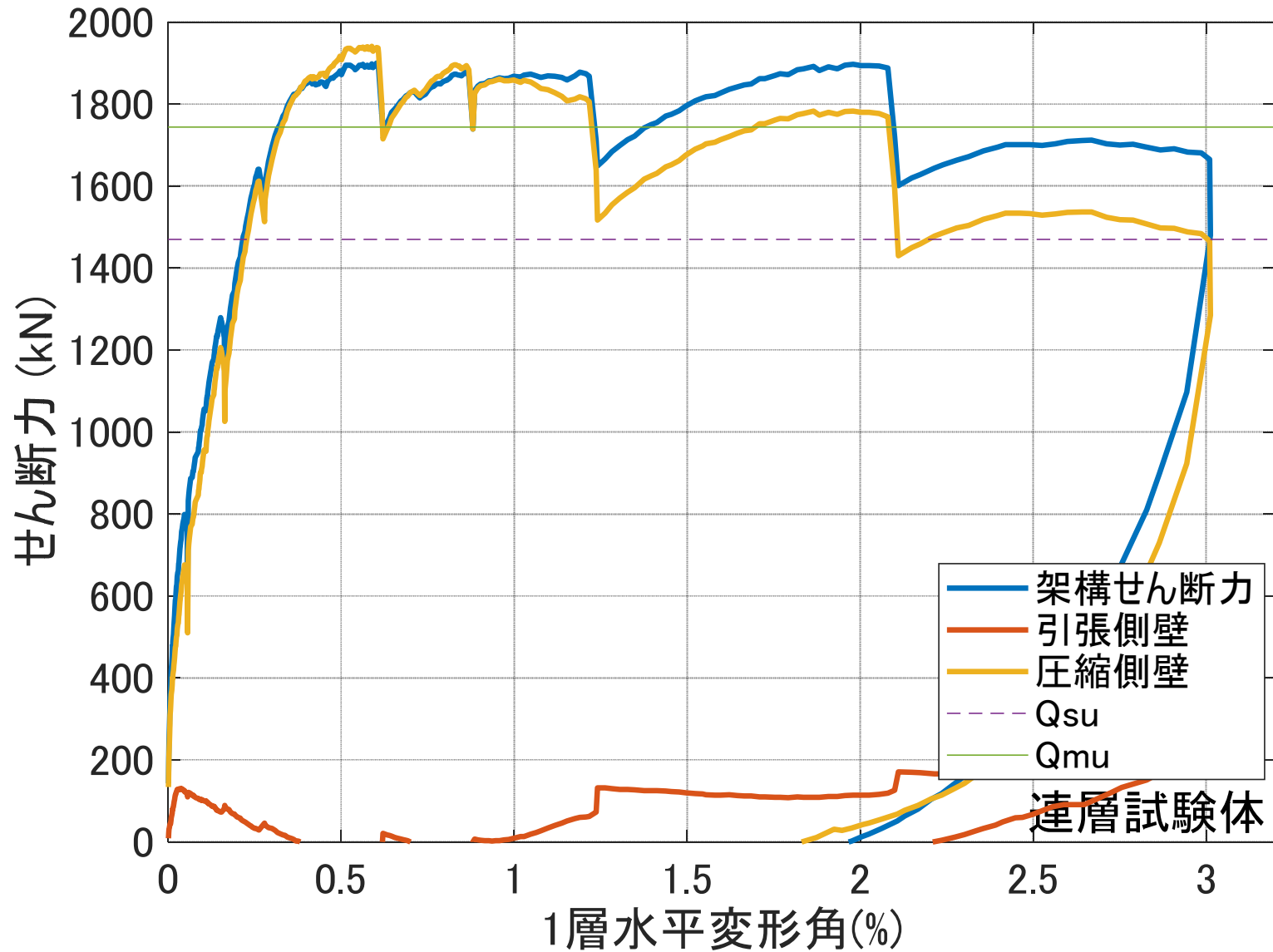
# 実験結果（連層試験体） $M/Q=6m$ , 軸力比0.06

水平変形角  $1/400$  でせん断補強筋が降伏し、その後耐力一定値を保持する  
破壊形式は圧縮側はせん断圧縮破壊，引張側は水平せん断ひび割れ



# 連層試験体（荷重包絡曲線）

最大せん断力は1枚の有開口耐力壁としてのせん断終局強度を大きく超える  
単層試験体同様、圧縮側の壁で全せん断力を負担している



# 片側壁の最大耐力評価（連層試験体）

圧縮側壁の最大負担せん断力

$$Q_w = 1941 \text{ kN} \quad t_u = 20.0 \text{ (MPa)}$$

$$t_u / \sigma_B = 0.40 \quad \rightarrow \text{せん断耐力が低下}$$

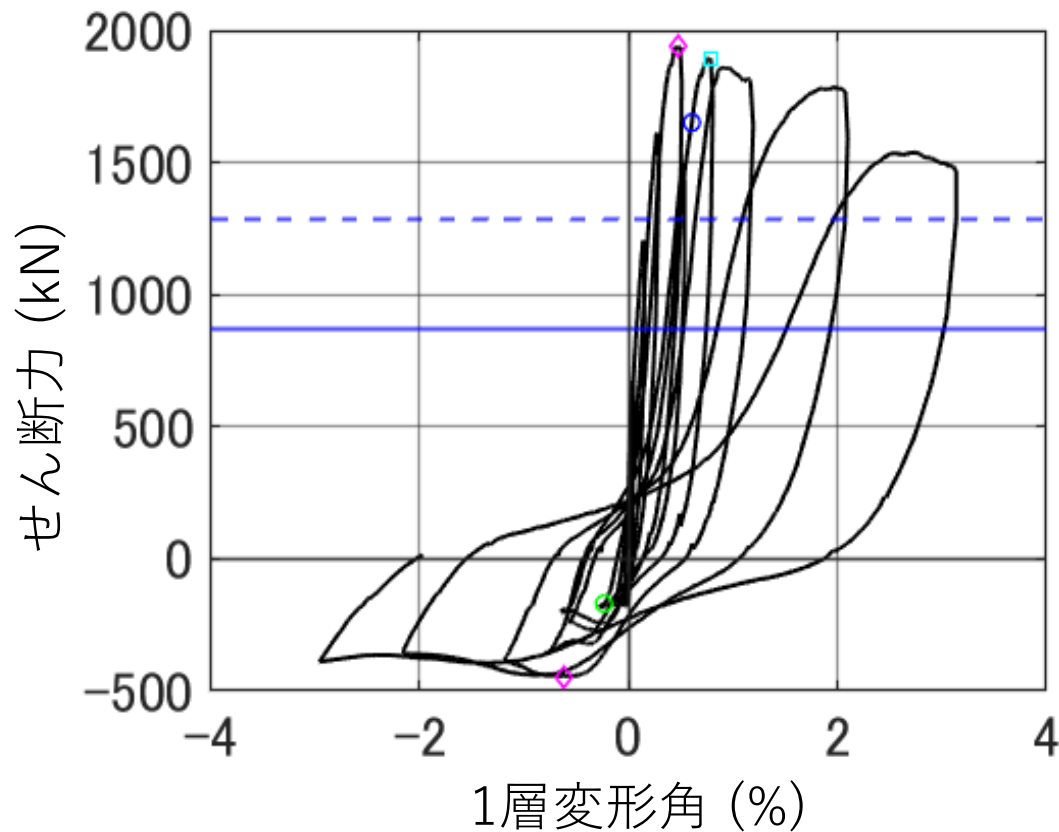
圧縮壁の反曲点高さ1.4mとして計算した  
片側耐力壁の平均広沢式計算強度

$$Q_{wsu} = 927 \text{ kN}$$

→ 軸力が高い壁は広沢式の精度が低い  
(実強度の約0.5倍)

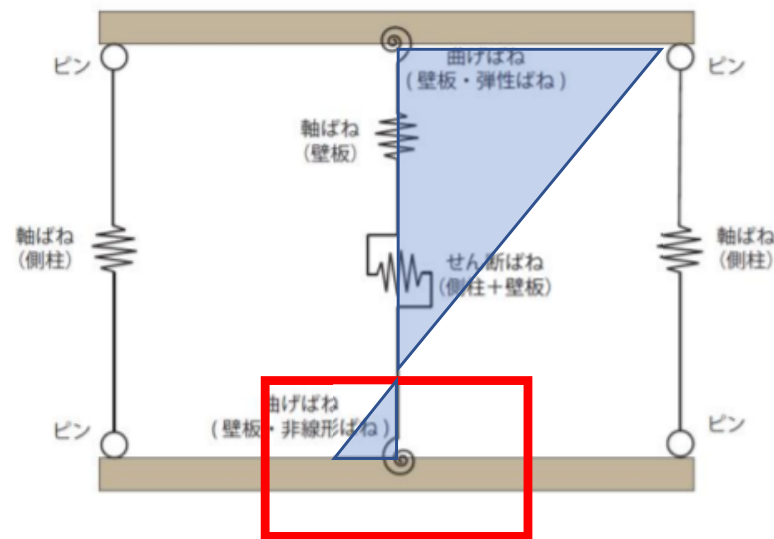
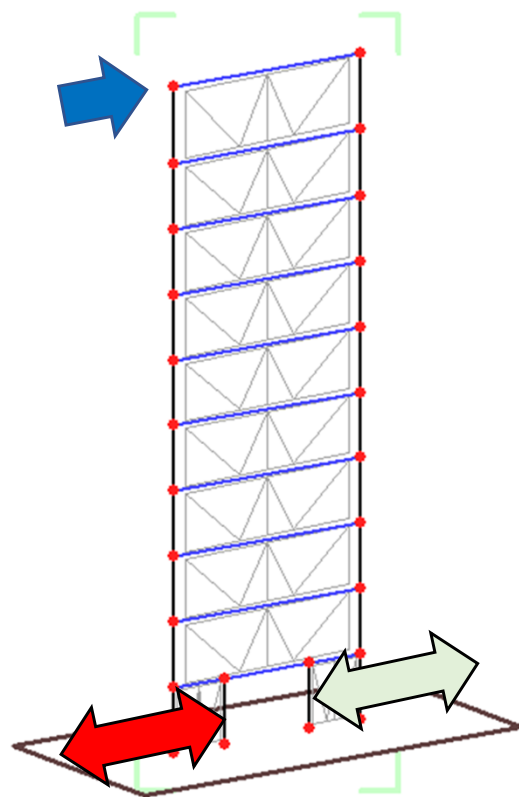
$$Q_{wsu} = 1283 \text{ kN}$$

(等価壁厚比  $t_e < 1.5t$  制限を設けない場合)



# 従来の骨組解析モデル

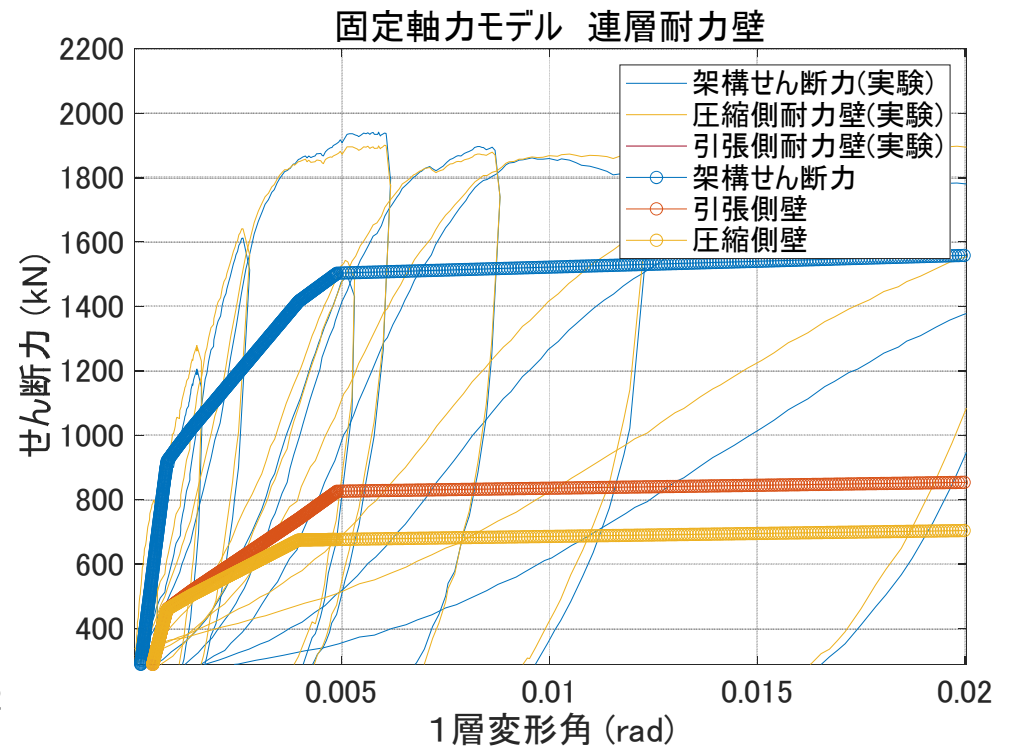
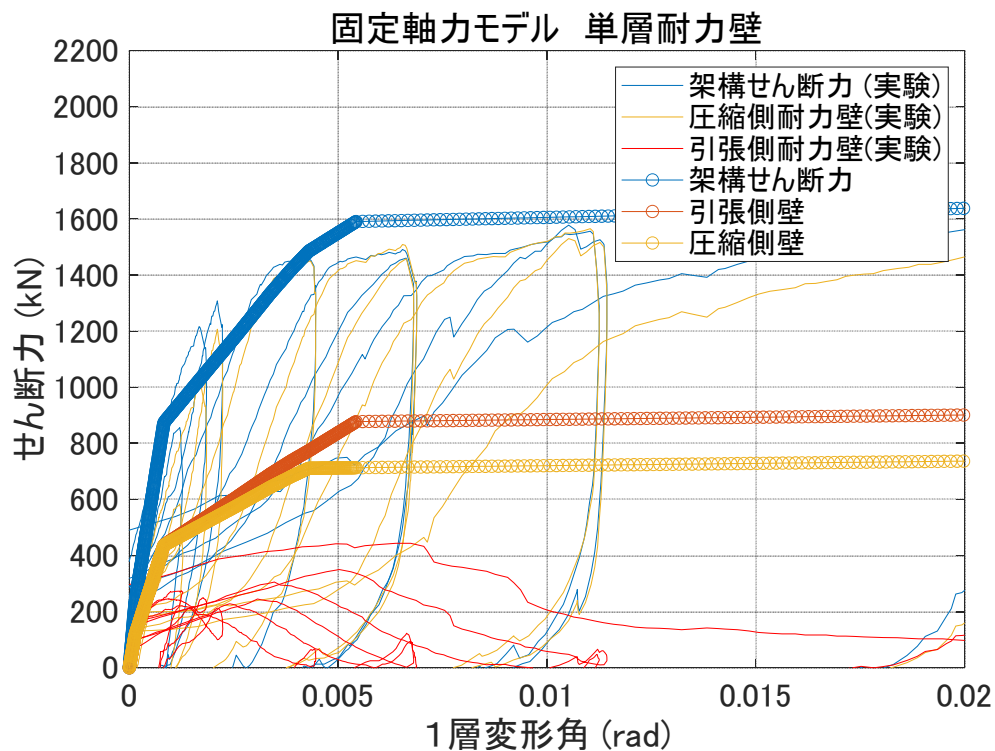
- ・ 連層耐力壁を3本柱モデルとしてモデル化した
- ・ 部材復元力は材料強度と構造関係技術基準解説書に基づいて設定する
- ・ せん断強度と壁脚の非線形曲げばねの軸曲げ相関の考慮の有無をパラメータとした



壁脚非線形ばね  
軸曲げ相関を考慮  
(する/しない)

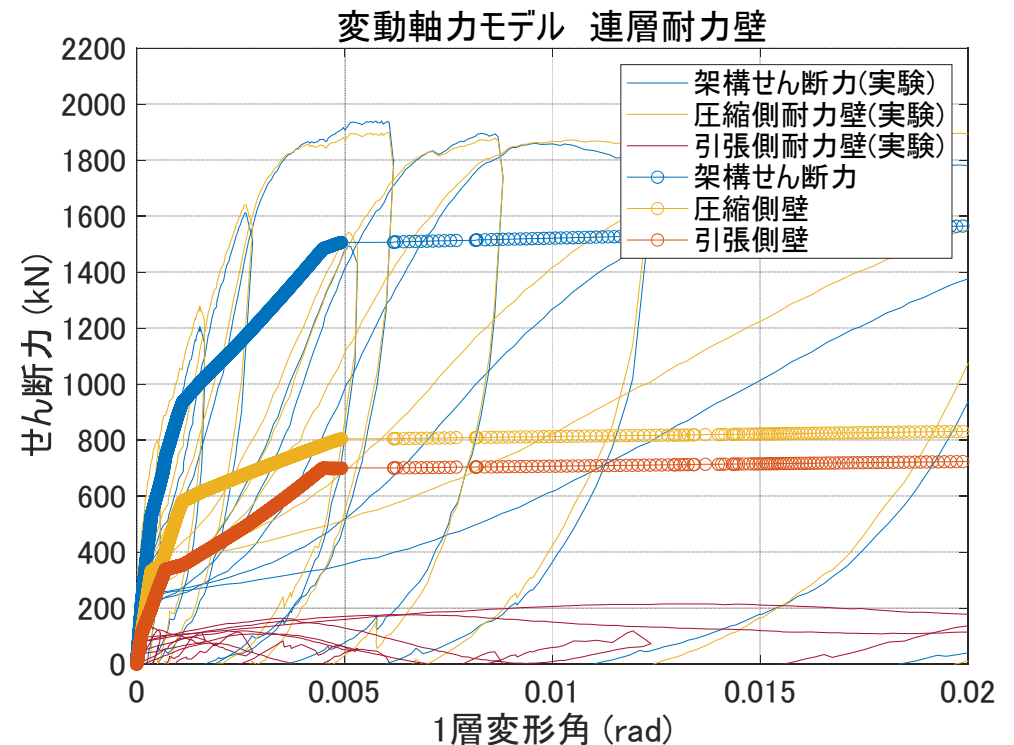
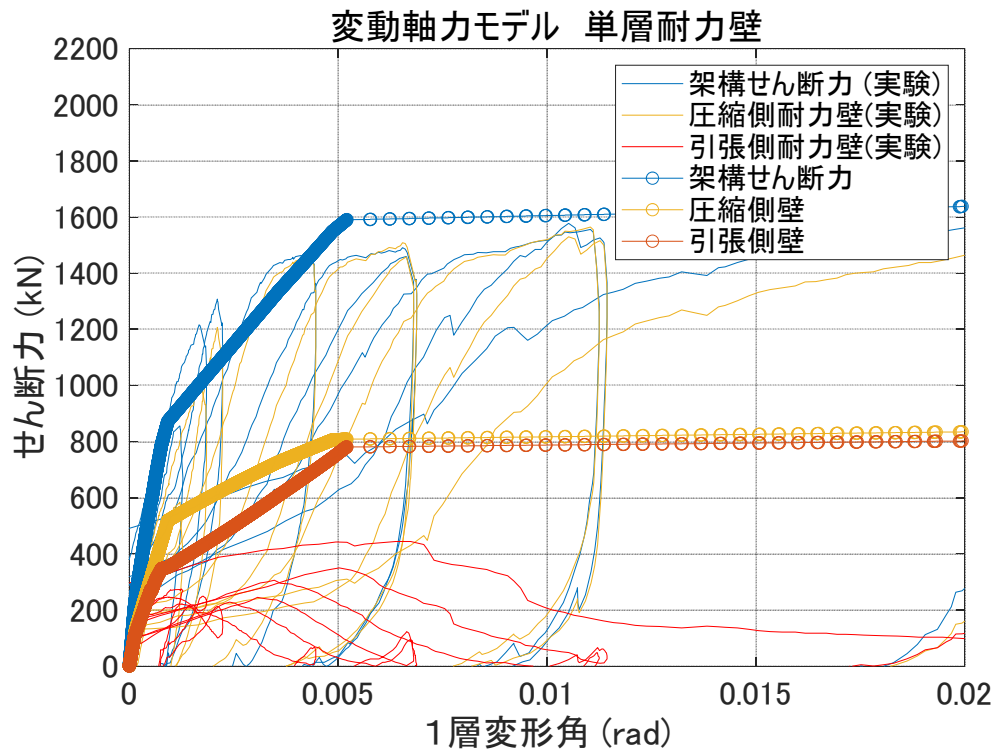
# 従来の骨組解析モデル（固定軸力モデル）

解析における最大耐力は耐力壁のせん断強度で決定し、  
単層試験体では崩壊形が異なり、連層試験体では耐力を過小評価している  
負担せん断力は実験とは異なり引張側壁の方が高いが、概ね同程度となっている



# 従来の骨組解析モデル（変動軸力モデル）

変動軸力モデルについても破壊形式は変わっていない  
軸力により圧縮側耐力壁のせん断力負担が大きくなっているが  
両試験体の負担せん断力は概ね同程度となっている



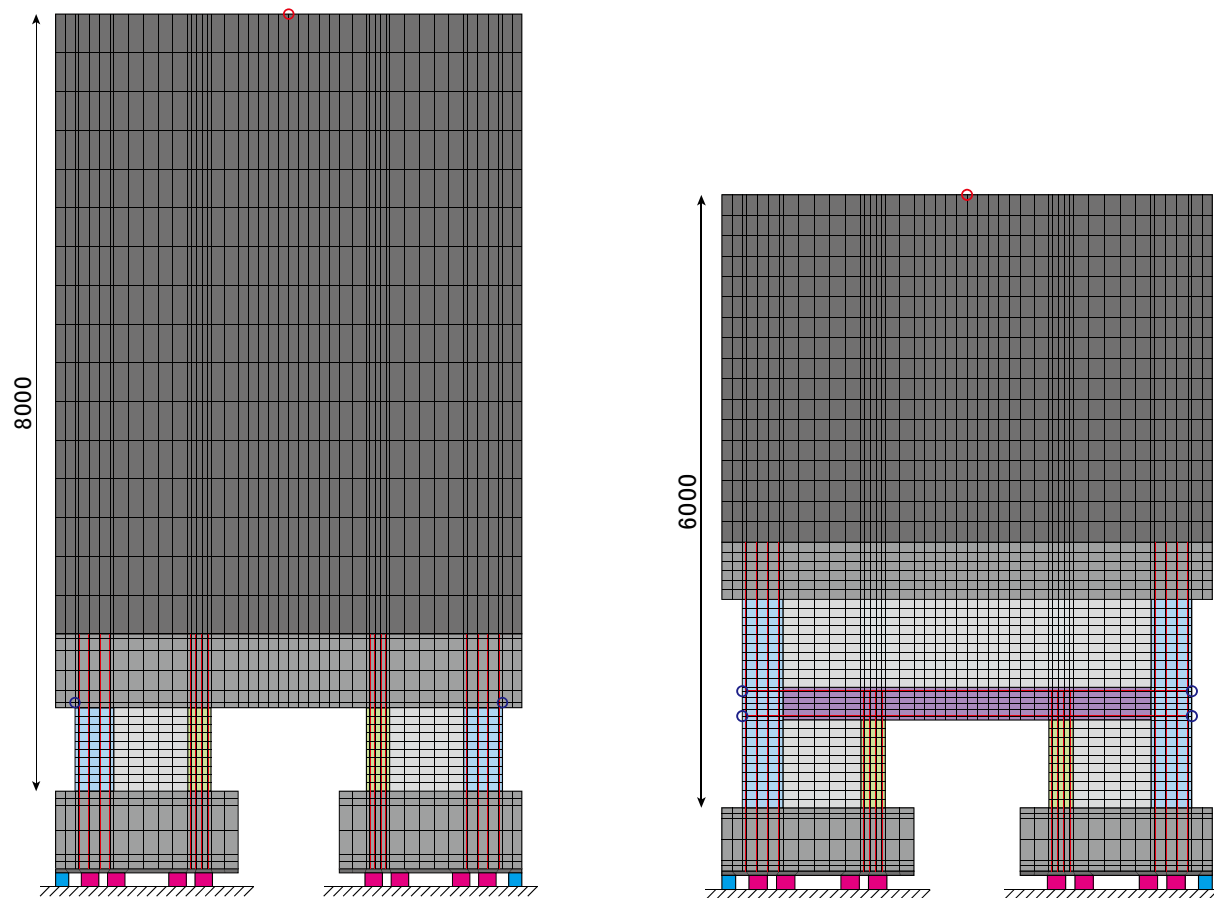


# 有限要素法解析（京都大学）

平面 2次元有限要素による静的漸増載荷解析を行った

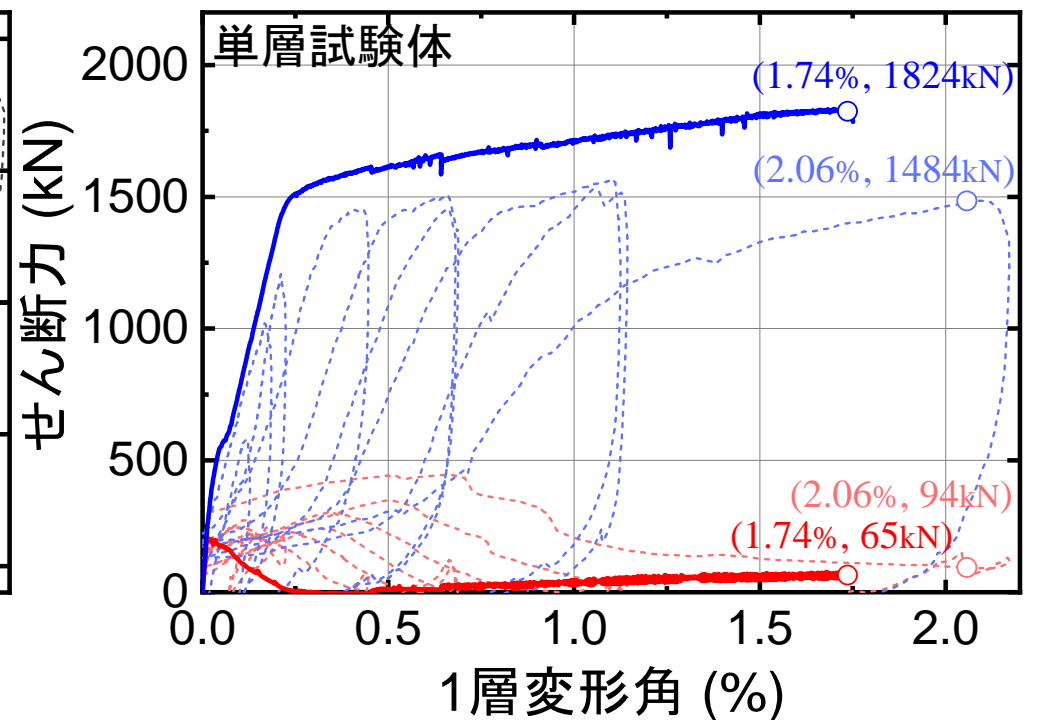
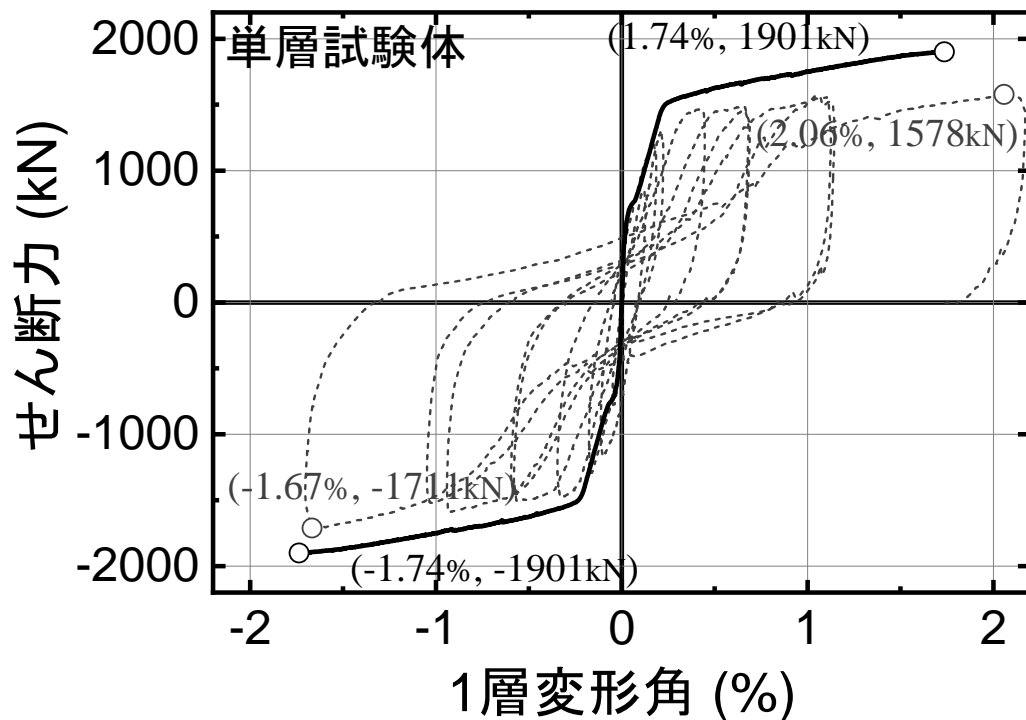
上部構造を剛体として外力高さ8m および6mとした

コンクリート 修正Ahmadモデル，埋込鉄筋 修正 Menegotto-Pintoモデル (トラス)



# 単層試験体の解析結果

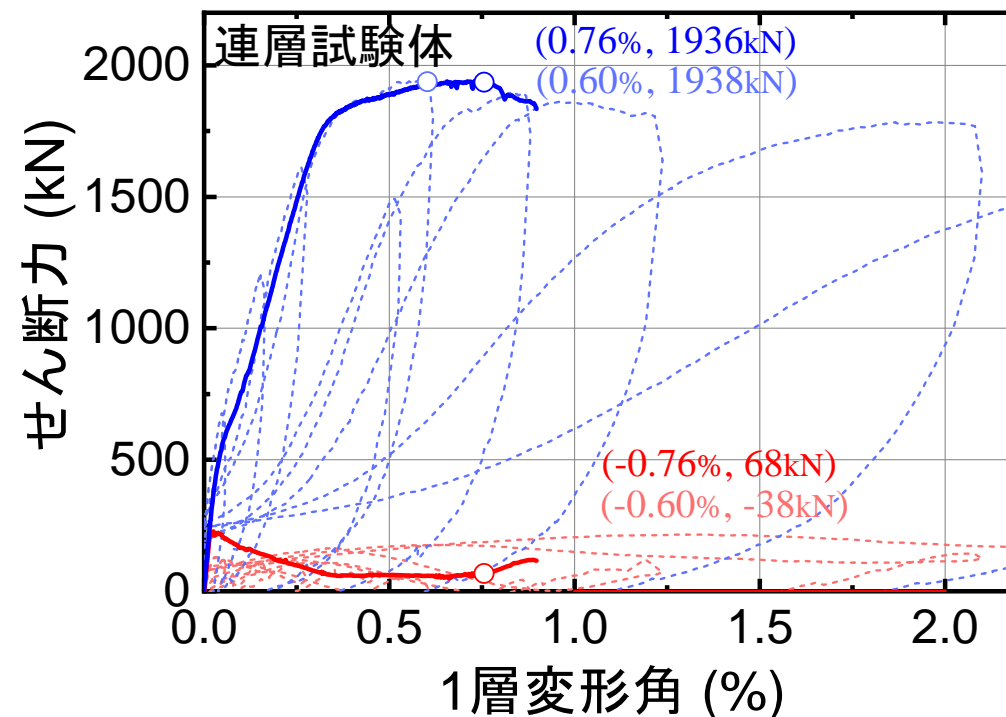
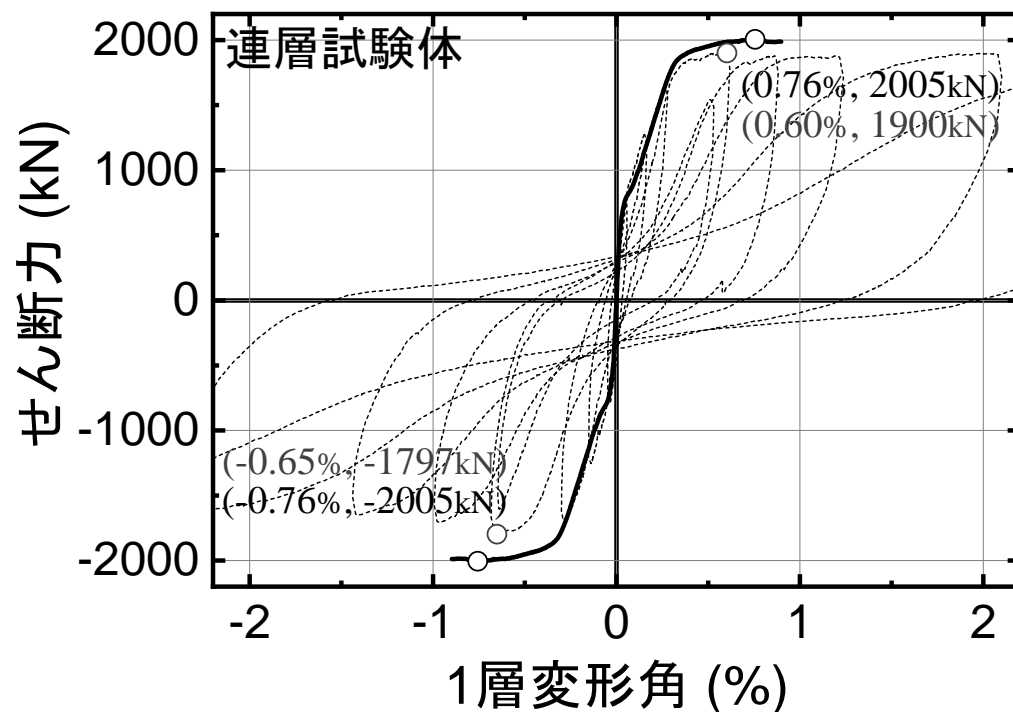
荷重変形関係の包絡線は概ね一致しているが実験をやや過大評価した  
実験結果と同じく圧縮側壁がほぼすべてのせん断力を負担している



# 連層耐力壁の解析結果

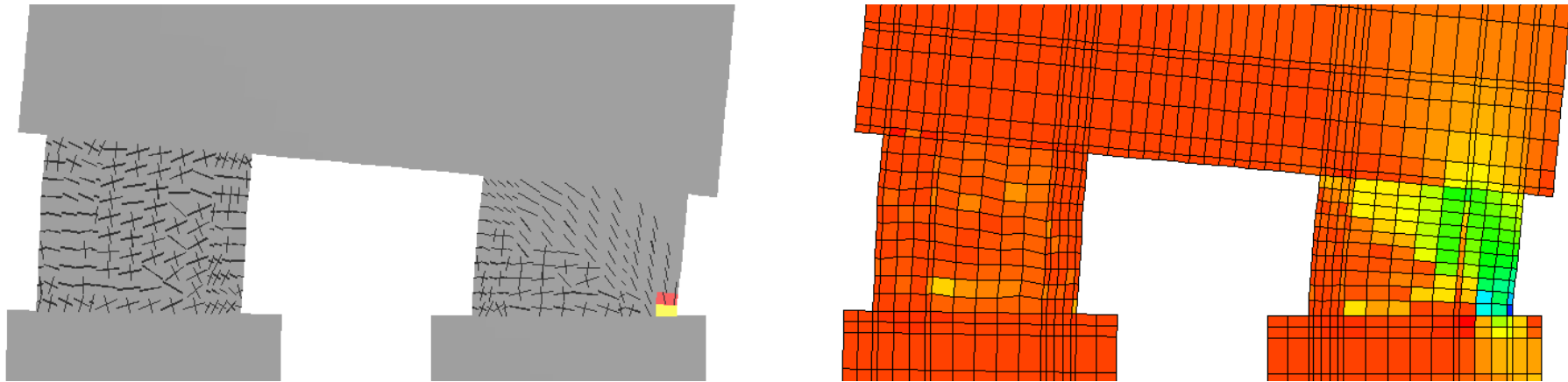
荷重変形関係の包絡線は実験結果と非常によく整合している

実験結果と同じく圧縮側壁がほぼすべてのせん断力を負担している

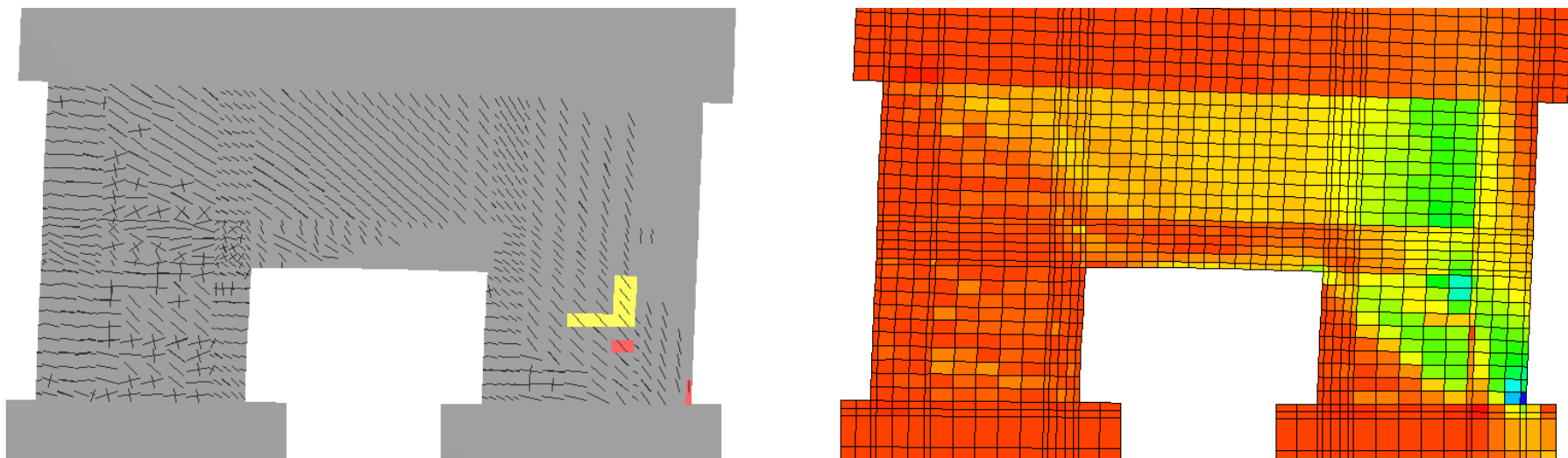


# 損傷性状

単層試験体では壁板の軸圧縮破壊は生じず，軟化したのは外柱脚部だけ

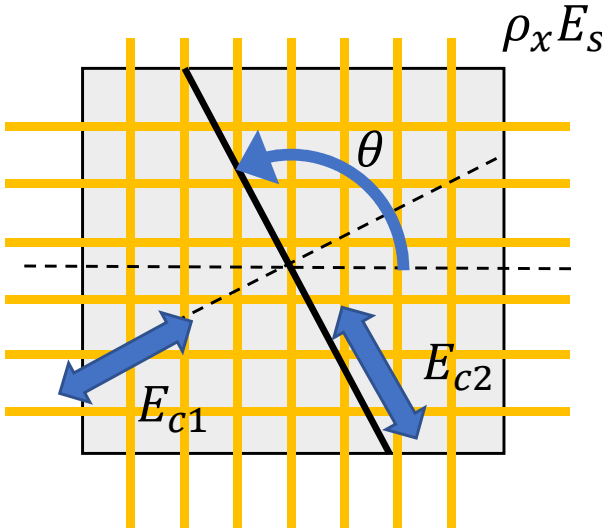


連層試験体では外柱脚部と壁板が軟化し，圧縮束が内柱側にシフトしている



# 軸せん断モデルによる検討

昨年度の検討で1つのガウスポイントのせん断応答性状に集約する方法を示した。今年度はこれを用いた骨組解析および解析結果を示す



コンクリート

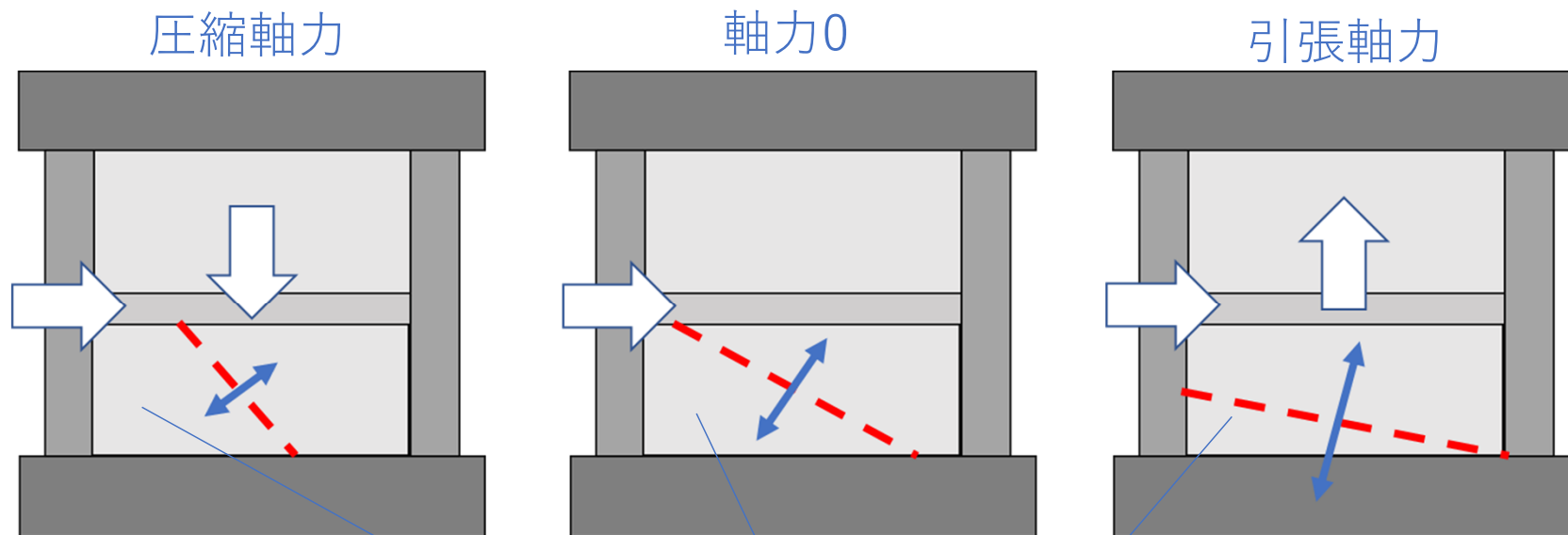
鉄筋

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau \end{pmatrix} = [T] \begin{bmatrix} E_{c1} & 0 & 0 \\ 0 & E_{c2} & 0 \\ 0 & 0 & G_c \end{bmatrix} [T]^t + \begin{bmatrix} \rho_x E_s & 0 & 0 \\ 0 & \rho_y E_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma \end{pmatrix}$$
$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\cos \theta \sin \theta \\ -2 \cos \theta \sin \theta & 2 \cos \theta \sin \theta & (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{bmatrix}$$

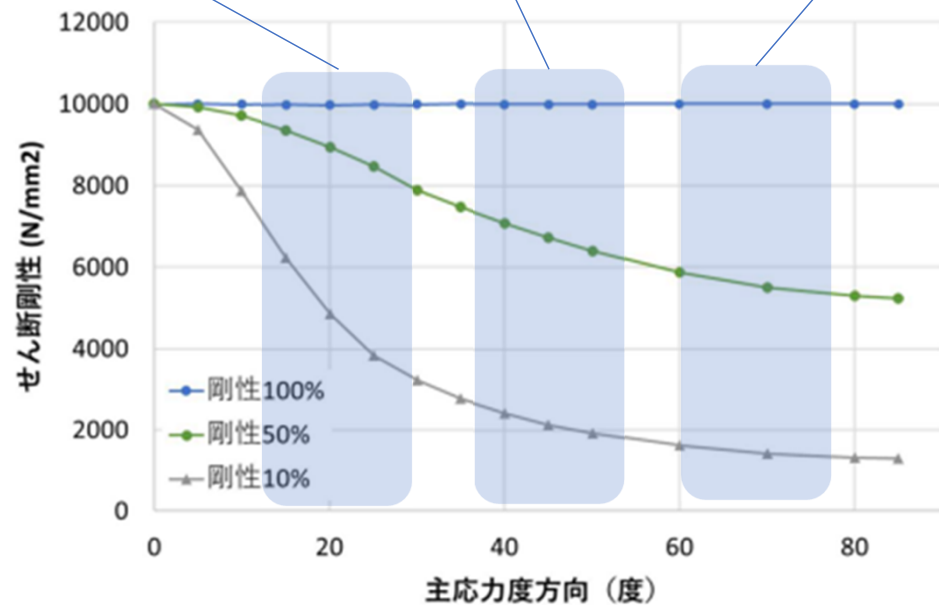
$$G_s = \frac{E_{c1} E_{c2}}{2(E_{c1} \sin^2 \theta + E_{c2} \cos^2 \theta)}$$

$E_{c1}, E_{c2}$ : 引張・圧縮主応力方向コンクリートヤング率,  $\theta$ : 圧縮主応力方向

# 軸せん断モデルによる検討



$E_c$  : ひび割れ直交方向のコンクリートの引張剛性



$E_c$

$E_c \times 0.5$

$E_c \times 0.1$

引張ひび割れによる剛性低下

せん断剛性低下

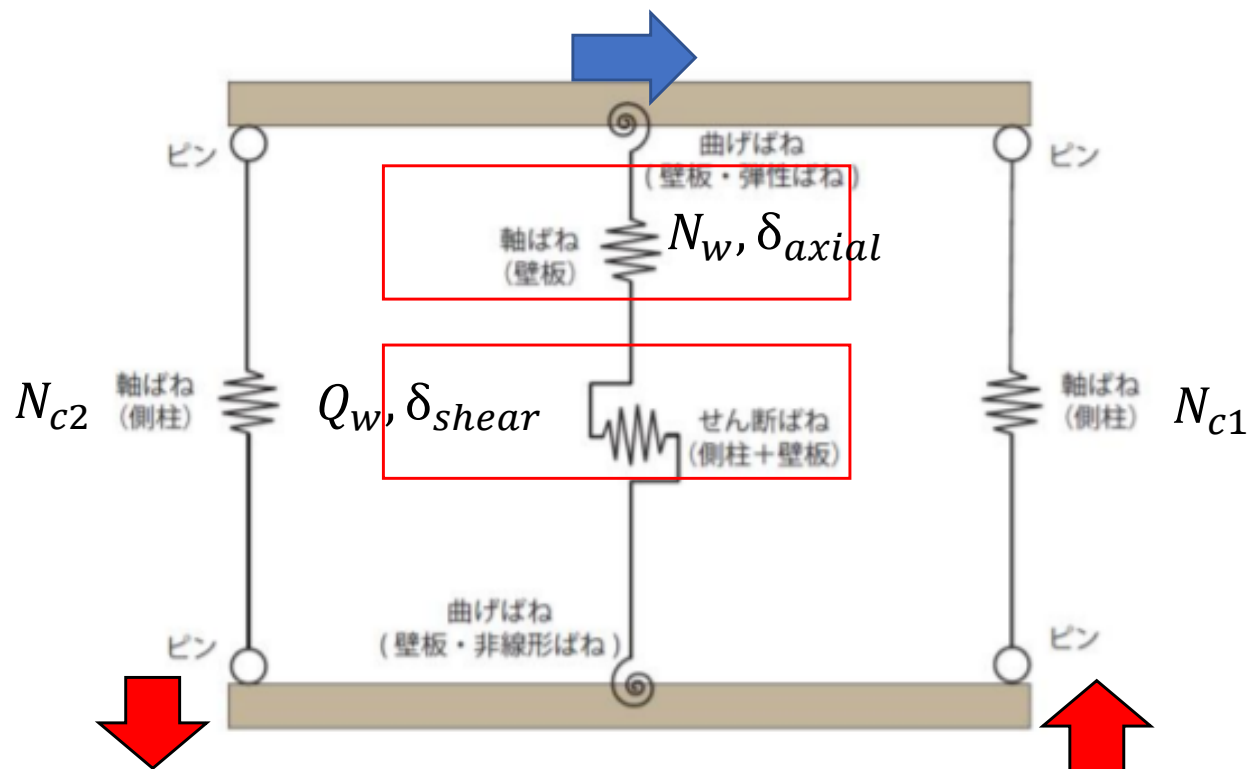
小

せん断剛性低下

大

# 軸せん断モデルによる検討

(1) 従来のモデルのせん断ばねと軸ばねの力と変形から応力度と歪を計算する

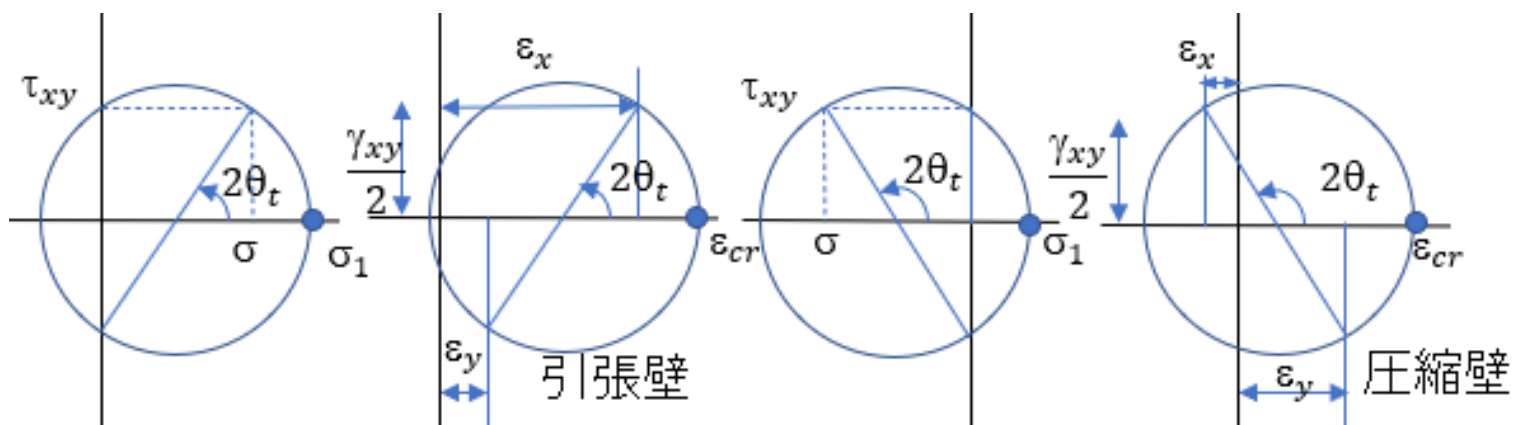


$$\tau = \frac{Q_w}{A_w + A_{c1}}, \quad \sigma = \frac{N_w + N_{c1} + N_{c2}}{A_w + A_{c1} + A_{c2}}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\delta_{shear}}{H_w}, \quad \epsilon_x = \frac{\delta_{axial}}{H_w}$$

$A_w$ : 壁板断面積,  $A_{c1}$ : 圧縮側柱断面積,  $A_{c2}$ : 引張側柱断面積  
 $\tau_{xy}$ : せん断応力度,  $H_w$ : 壁高さ,  $N_{c1}$ : 圧縮側柱軸力,  $N_{c2}$ : 引張側柱軸力

# 軸せん断モデルによる検討

- (2) Mohrのひずみ・応力円に基づきひび割れ発生ステップ( $\sigma_1 = 0.33\sqrt{f_c}$ )を求める  
そのステップで引張主応力方向 $\theta_t$ とひび割れ引張ひずみ $\varepsilon_{cr}$ を記録する



ひび割れ  
判定

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\tau^2 + \left(\frac{\sigma}{2}\right)^2} = 0.33\sqrt{f_c}$$

$$\tan 2\theta_t = \left(\frac{2\tau}{\sigma}\right), \quad \varepsilon_{cr} = \varepsilon_x - \frac{\gamma_{xy}}{2\tan 2\theta_t} + \frac{\gamma_{xy}}{2\sin 2\theta_t}$$

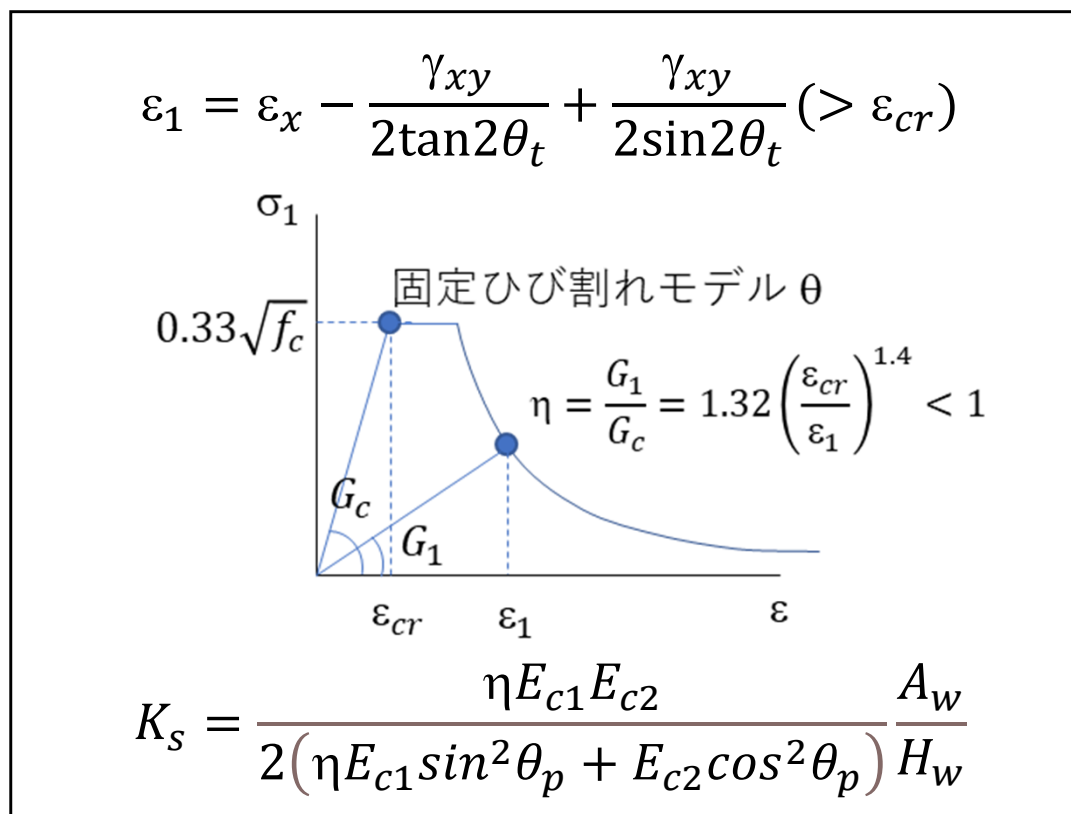


# 軸せん断モデルによる検討

(3) ひび割れ後は主応力度方向の歪 $\varepsilon_1$ を計算し，ひび割れ時の歪 $\varepsilon_{cr}$ に対する倍率からコンクリートの引張剛性低下率 $\eta$ に応じてせん断剛性 $K_s$ を計算する

(せん断伝達特性は無視する)

せん断剛性の計算



(出雲モデル)

$$\theta_p = \theta_t + \frac{\pi}{2} \text{ (圧縮時)}, \quad \theta_p = \frac{1}{2}(\pi - 2\theta_t) + \frac{\pi}{2} \text{ (引張時)}$$

# 壁せん断補強筋比の反映について

昨年度のモデルではコンクリートの引張性状のみ反映していたが  
壁横筋の応力負担による靱性 (コンクリート引張破壊後の耐力保持効果)  
壁横筋の降伏による剛性低下が反映可能となるように修正した

$$G = \frac{\eta E_{c1} E_{c2}}{2(\eta E_{c1} \sin^2 \theta_p + E_{c2} \cos^2 \theta_p)}$$

$$\alpha = \eta E_{c1} \sin^2 \theta_p + E_{c2} \cos^2 \theta_p, \quad \beta = \eta E_{c1} \cos^2 \theta_p + E_{c2} \sin^2 \theta_p, \quad \gamma = \eta E_{c1} E_{c2}$$



壁横筋の項に基づいて式を修正  
(逆行列と行列式の再計算)

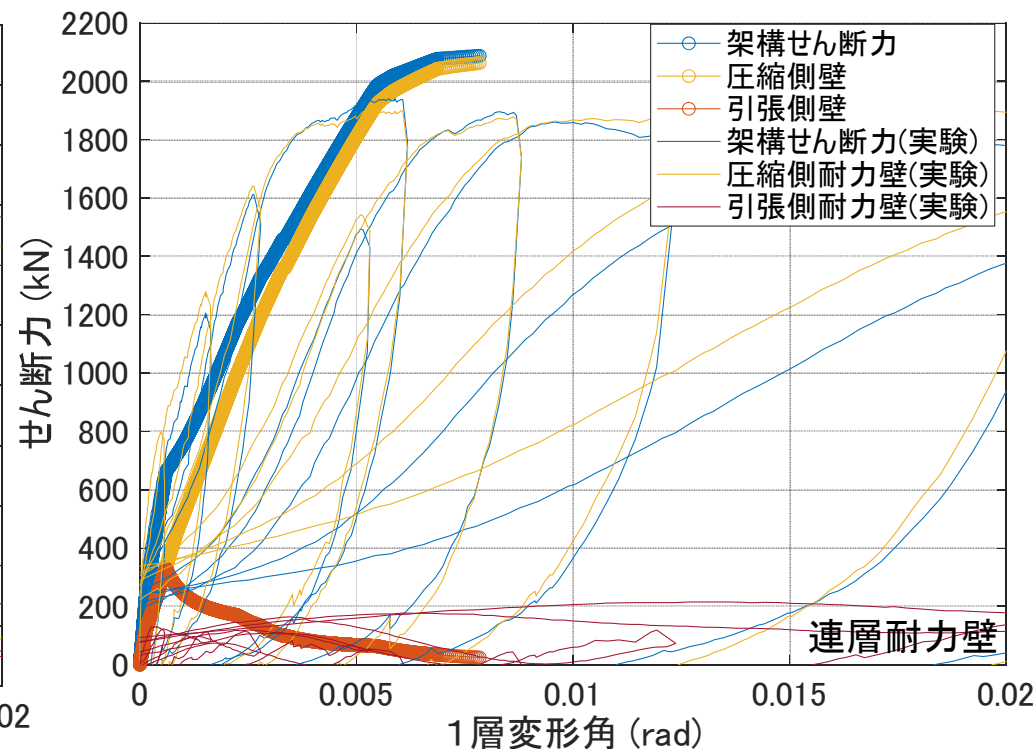
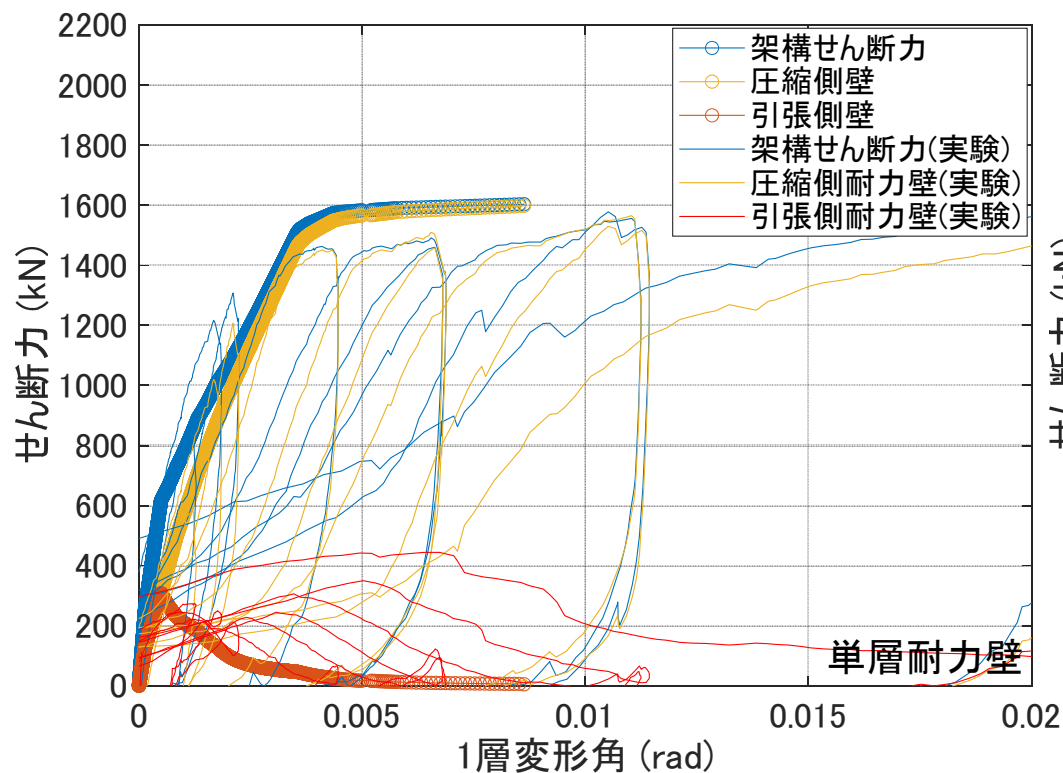
$$G = \frac{(\gamma + \rho_y E_{sy} \beta) \gamma}{2\alpha \gamma + \rho_y E_{sy} (\gamma + \alpha \beta)}$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_x - \frac{\gamma_{xy}}{\tan 2\theta_t}$$

$\rho_y$  : 壁横筋比 (面積比)  
 $E_{sy}$  : 鉄筋ヤング率

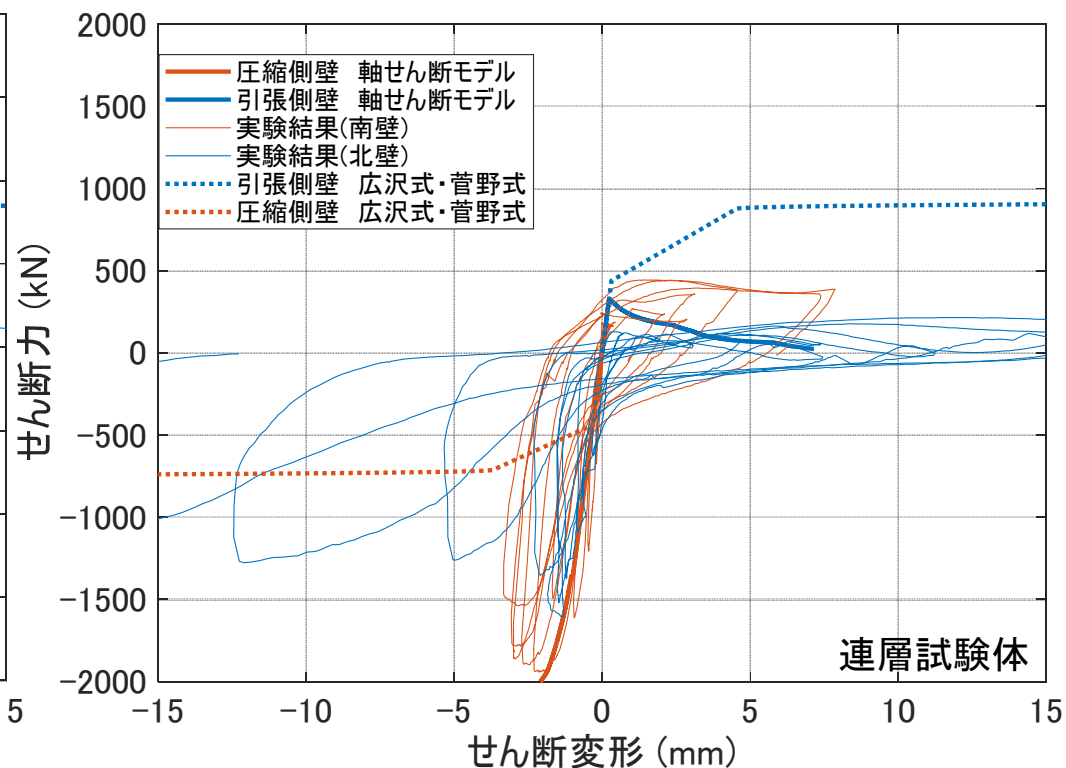
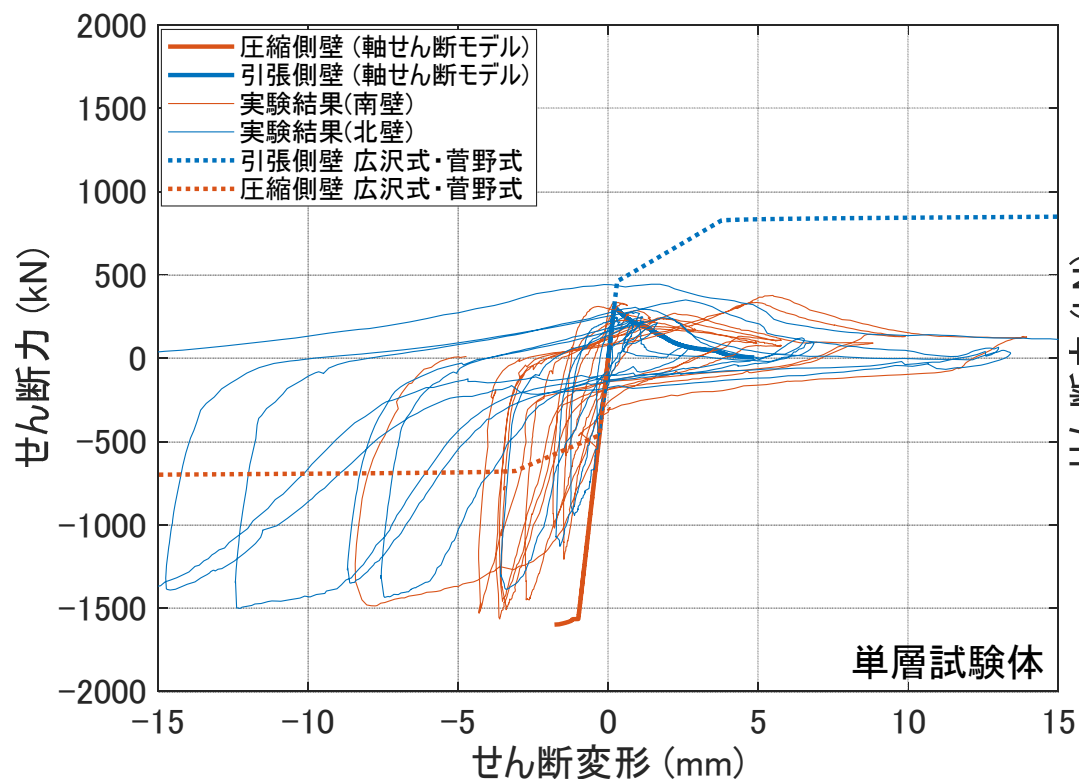
# 軸せん断モデルによる解析結果

- ・ 実験結果における最大耐力付近で非線形化が生じる
- ・ 実験結果における圧縮壁が概ね全せん断力を負担する性状を再現可能であった
- ・ 連層耐力壁では剛性低下をやや過大評価している



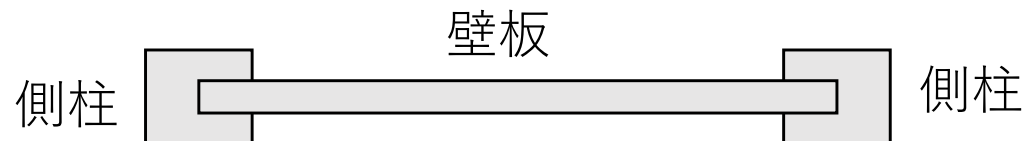
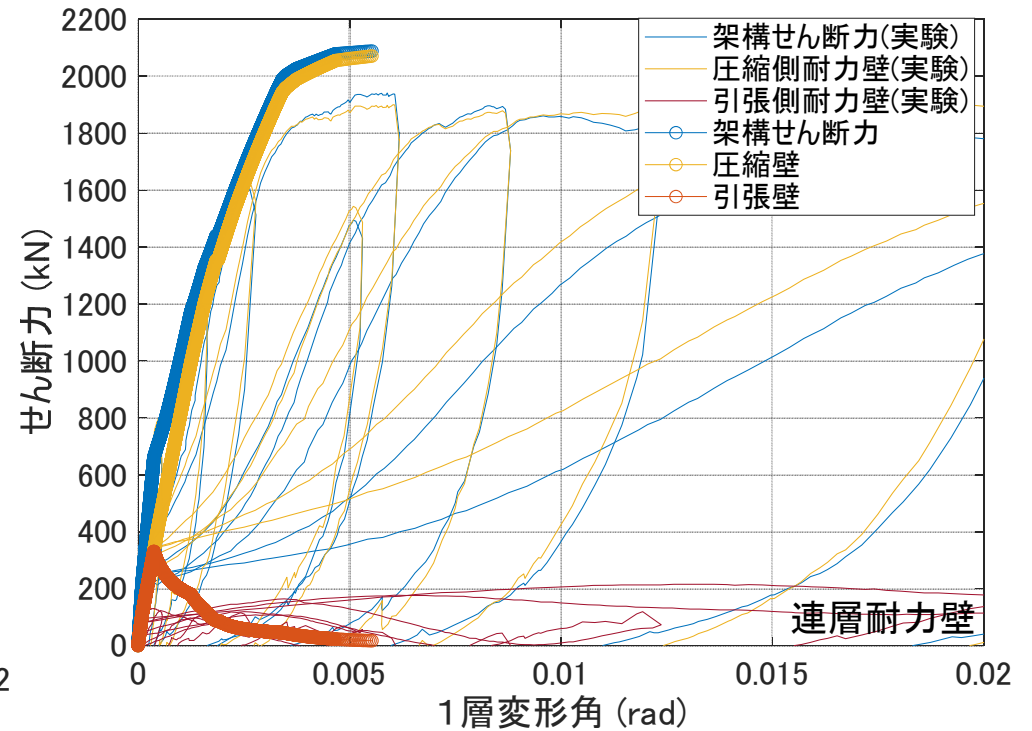
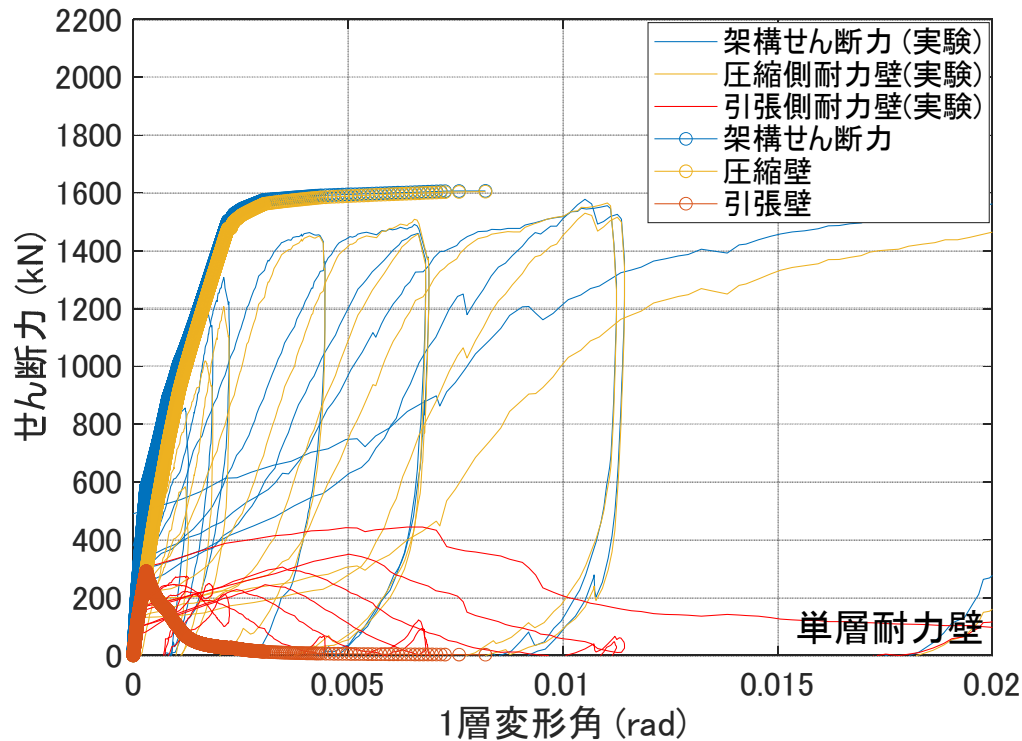
# せん断変形－せん断力関係

- ・ 菅野式・広沢式を用いたせん断変形－せん断力関係と実験結果は整合しない
- ・ 圧縮側壁では軸力により高い応答せん断力までひび割れによる剛性低下が生じない
- ・ 引張側耐力壁ではひび割れ発生後に負担せん断力が0に漸近している



# 軸せん断モデル (修正) による解析結果

- 壁板のみでは壁板曲げ剛性を過小評価するため、壁板の断面2次モーメントを側柱芯間で算定すると包絡線の非線形性状が近似する結果となった
- 最大応答せん断力は解析で実験結果をやや高めに評価している



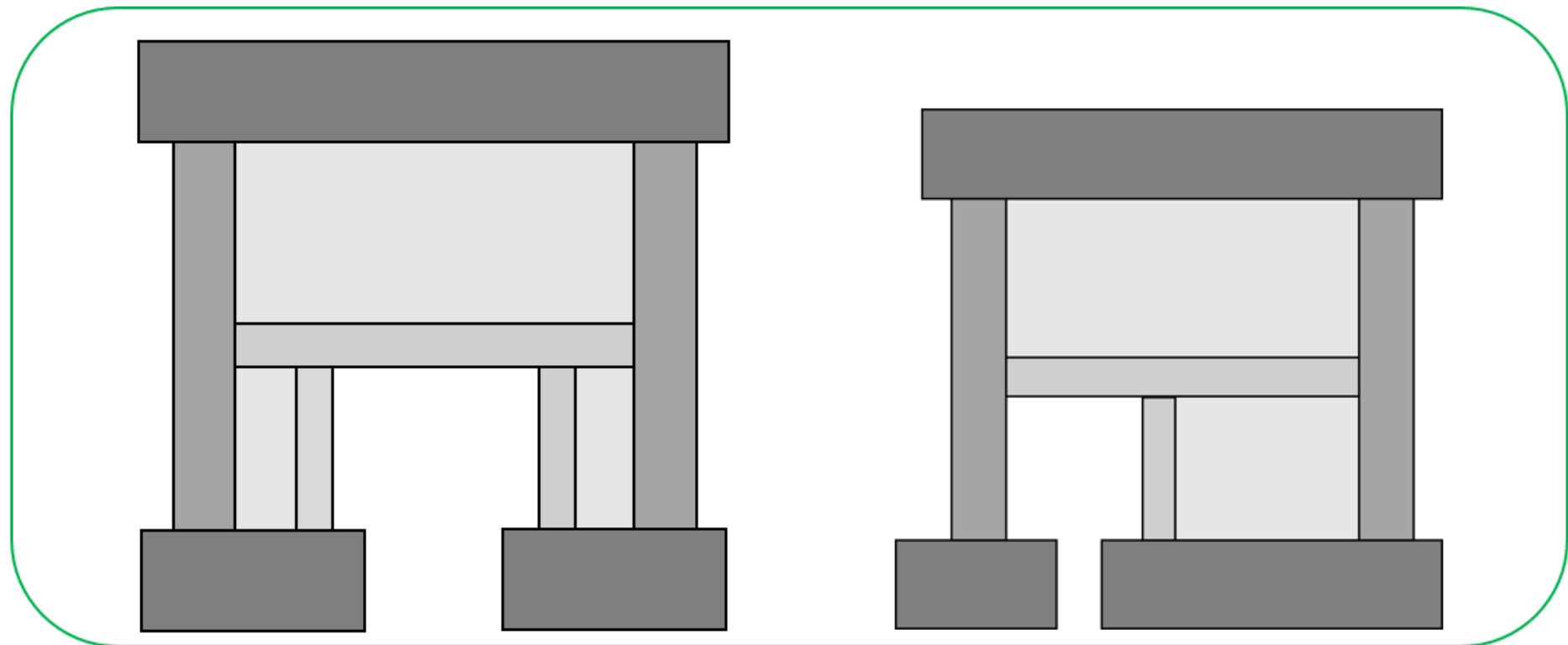
# 最終年度の架構試験体の実験計画

- ・ 最終年度は建築研究所の荷重計で分力を計測する
- ・ 40%縮小 壁厚化架構試験体 (壁板の軸圧壊を先行させない)
- ・ 35%縮小 片側柱壁架構試験体 (柱部材を曲げ降伏させて崩壊形を形成させる)

両側壁

壁厚化

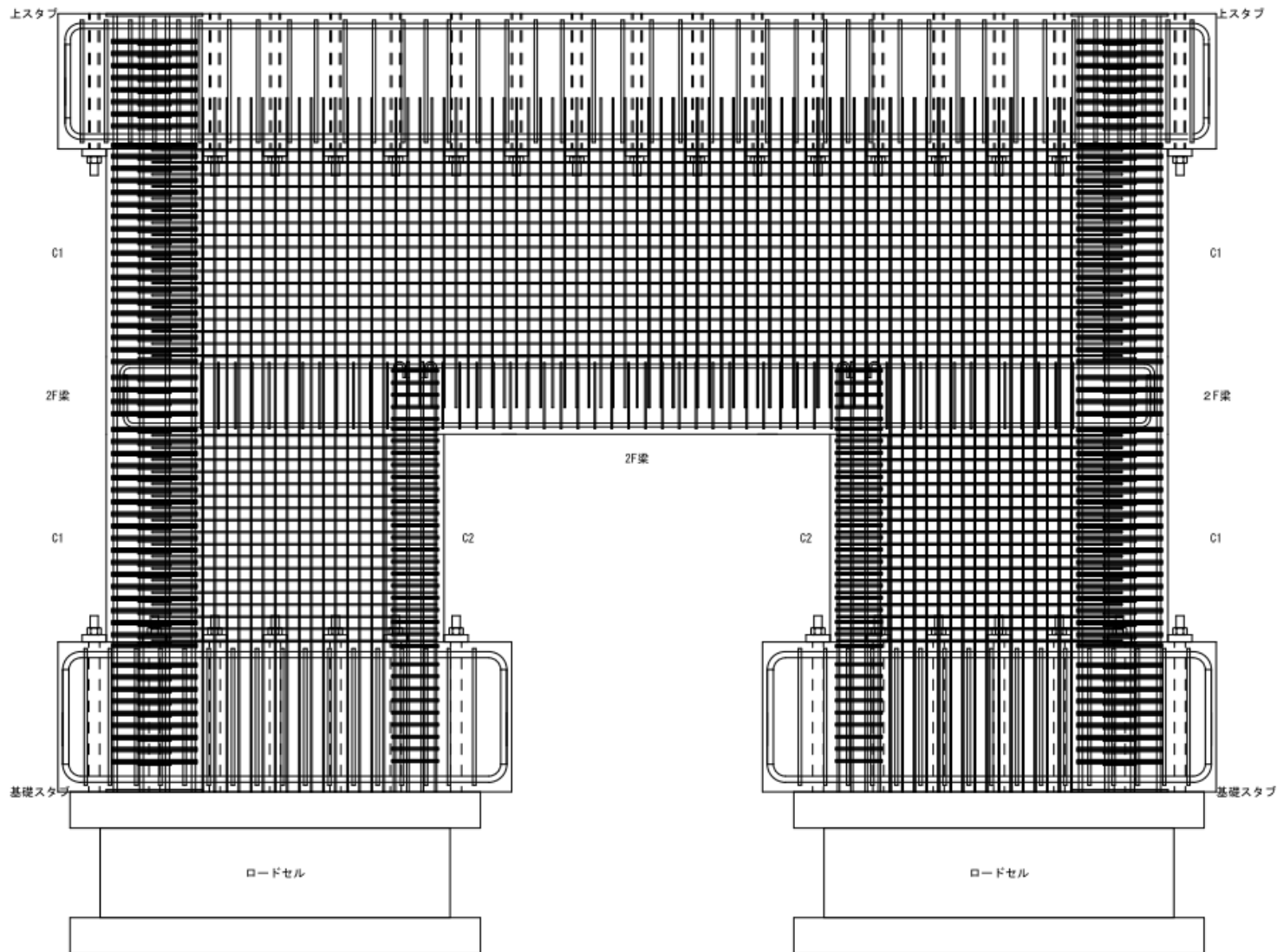
片側壁



# 壁厚化試験体

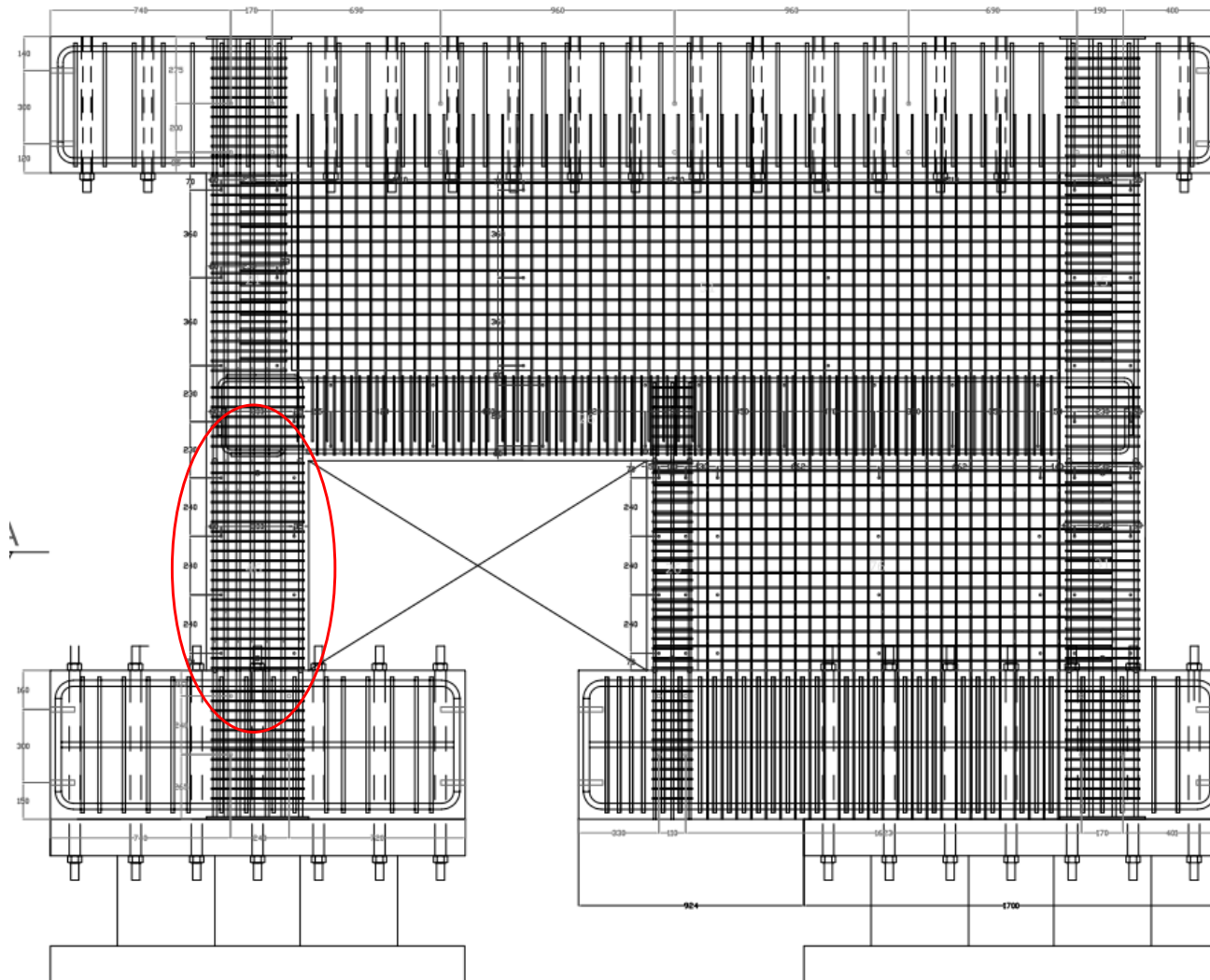
単層・連層耐力壁試験体では等価壁厚比の制限下において

壁板の軸圧縮破壊が生じたため壁厚を大きくした架構試験体を載荷する



# 片側壁試験体

圧縮側が壁ではなく柱部材となった場合に柱に過度な軸力とせん断力と集中しせん断破壊等の脆性的な破壊が生じさせない設計を提案する





# 試験体の製作状況

---



# 最終年度の検討内容 (一部) について

---

## (実験関係)

- ・ 架構試験体 2 体の応答性状を載荷実験で確認
- ・ 壁部材試験体による部材レベルでの載荷実験

## (解析関係)

- ・ 軸せん断モデルを用いた骨組解析方法の精度検証
- ・ 有限要素解析を用いた応力状態，損傷性状の把握
- ・ 保有水平耐力計算を想定した設計方法の提案