



## 多スパン内蔵無補強組積造壁の 対角圧縮ストラットの形成メカニズムおよび負担せん断力の評価

崔琰<sup>1)</sup>、Devjyoti Paul<sup>2)</sup>、松川和人<sup>3)</sup>、真田靖士<sup>4)</sup>、中埜良昭<sup>5)</sup>、鈴木有美<sup>6)</sup>

- 1) 正会員 東京大学生産技術研究所、助教 博士 (工学)  
e-mail : choiho@iis.u-tokyo.ac.jp
- 2) NIPPON KOEI INDIA PVT. LTD.、修士 (工学)  
e-mail : devjyotip@gmail.com
- 3) 正会員 東京大学生産技術研究所、助教 博士 (工学)  
e-mail : mtkw@iis.u-tokyo.ac.jp
- 4) 正会員 大阪大学大学院工学研究科、准教授 工博  
e-mail : sanada@arch.eng.osaka-u.ac.jp
- 5) 正会員 東京大学生産技術研究所、教授 工博  
e-mail : iisnak@iis.u-tokyo.ac.jp
- 6) 大阪大学大学院工学研究科、大学院生  
e-mail : suzuki\_tomomi@arch.eng.osaka-u.ac.jp

### 要 約

本研究では、無補強組積造 (URM) 壁の全組積ユニットに3軸歪ゲージを貼付した1層1スパンおよび1層2スパンの1/4スケールのURM壁内蔵RC造縮小試験体を用いた面内方向への静的載荷実験を実施した。本論文では、筆者らが既提案した壁体の対角圧縮ストラットの形成角度や等価幅およびそれらに基づく負担せん断力の評価手法を用い、本実験結果への適用を試みた。その結果、2スパン試験体では、各壁体に対角圧縮ストラットが形成されており、本評価手法による壁体のせん断力と各柱のせん断力の和は実験結果の荷重－変形関係を概ね再現できた。

キーワード： 無補強組積造壁、RCフレーム、多スパン、対角圧縮ストラット、せん断力

### 1. はじめに

筆者らはRC造架構に内蔵された無補強組積造 (URM) 壁の面内方向への耐震性能評価に関する研究に数年間取り組んできた。その研究成果として、全組積ユニットに3軸歪ゲージを貼付した1層1スパンの1/4スケールの縮小試験体を用いた静的加力実験を行い、RC造架構の変形レベルに応じたURM壁の負担せん断力を定量的に評価することができた<sup>1)</sup>。

本研究では、多スパンでのURM壁の対角圧縮ストラットの形成メカニズムやその負担せん断力を明らかにするため、URM壁の組積ユニットに3軸歪ゲージを貼付した1層1スパンおよび1層2スパンの1/4スケールのURM壁内蔵RC造縮小試験体を用いた面内方向への静的載荷実験を実施した。

本論文では、既提案したURM壁の対角圧縮ストラットの形成角度や等価幅およびそれに基づく負担せん断力の評価手法を用い、本実験結果への適用を試みた。

## 2. 実験概要

### 2.1 対象建物および実験パラメータ

図1に1層1スパン試験体の詳細を示す。1層2スパン試験体の柱、梁および壁体の詳細は、1層1スパン試験体と同様である。本試験体はURM壁を一般に外壁や間仕切り壁として用いられているトルコの5階建てRC造建物の1階を想定した1/4スケールの縮小試験体である。

縮小柱の断面寸法は対象建物の約1/4とし、軸応力度、主筋比、せん断補強筋比およびせん断余裕度が実建物とほぼ同程度になるよう設計した。縮小梁は対象建物のスラブの影響を考慮したT型梁とし、せん断余裕度が実建物とほぼ同程度になるように設計した。コンクリートブロック (CB) 造壁は後積みで、縮小CBの寸法は実大の1/4とし、実大組積ユニットのプリズム圧縮試験による圧縮強度およびヤング係数を再現することを目指し製作した。

### 2.2 材料試験結果

表1～3に各材料試験結果を示す。表中の各値は3サンプルの平均値である。コンクリートの設計基準強度は18 N/mm<sup>2</sup>としたが、設計値を約35%上回った。鉄筋の降伏強度も規格降伏点強度を35%程度上回る結果となった。縮小CBの3段プリズム圧縮強度およびヤング係数はそれぞれ6.7 N/mm<sup>2</sup>および9.6×10<sup>3</sup> N/mm<sup>2</sup>であった。

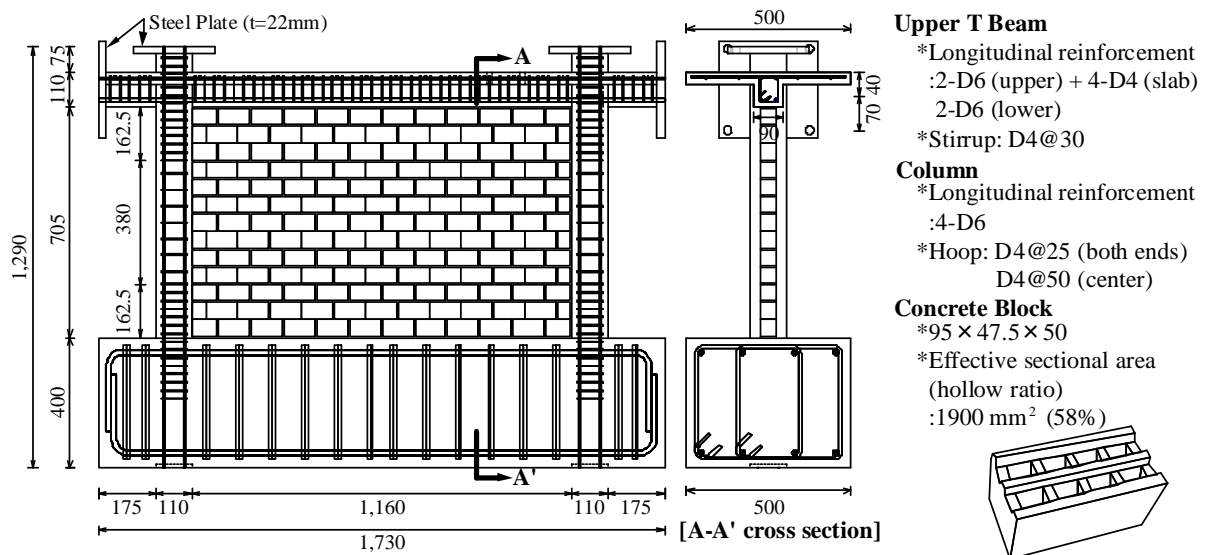


図1 1層1スパン試験体の詳細 (単位: mm)

表1 コンクリートの材料試験結果

圧縮強度	ヤング係数	割裂強度
24.1 N/mm <sup>2</sup>	2.1×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup>	1.71 N/mm <sup>2</sup>

表2 鉄筋の材料試験結果

直径 (鉄筋規格)	使用箇所	降伏強度	引張強度	ヤング係数
D4 (SD295)	柱・梁補強筋	401 N/mm <sup>2</sup>	574 N/mm <sup>2</sup>	2.1×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>
D6 (SD295)	柱・梁主筋	407 N/mm <sup>2</sup>	543 N/mm <sup>2</sup>	2.0×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>

表3 CBの3段プリズム圧縮試験結果

圧縮強度	ヤング係数
6.7 N/mm <sup>2</sup>	9.6×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>

\* 各値は空洞部を含む全断面積で除したものである。

### 2.3 計測計画および加力計画

本計測計画の特徴は前述したとおり、CB造壁の対角圧縮ストラットの形成角度や幅から壁体の架構全体へのせん断力負担分を定量的に算定するため、全てのCBユニット（1層1スパン試験体：全162箇所）に3軸歪ゲージを貼付したことである。図2に両試験体の歪ゲージの貼付様子を示す。1層2スパン試験体においては計測機器の制約上、圧縮ストラットの正方向加力時のみの評価を目指し、1層1スパン試験体に比べ半数程度の歪ゲージを貼り付けた（図2（b））。

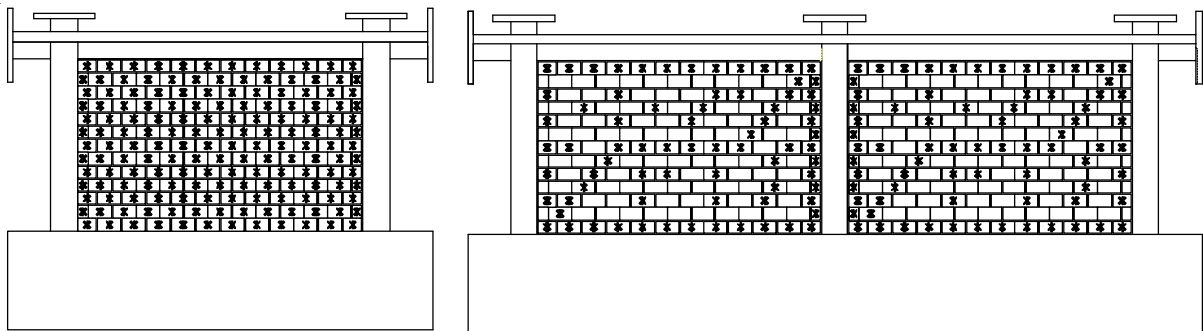
図3に本実験の荷重システムを示す。試験体に作用する水平力は原則として正負交番で、部材角0.1、0.2は1サイクルずつ、0.4、0.67、1.0、1.5、2.0、3.0%は2サイクルずつ荷重した。ただし、試験体の破壊状況に応じて荷重のルールを変更または荷重を終了した。また、鉛直方向には各柱に35 kNの一定軸力を、スラブに7.5 kNの固定荷重を与えた（柱1本あたりの軸応力度： $3.2 \text{ N/mm}^2$ ）。

### 3. 実験概要

図4および図5に両試験体における荷重－変形関係および破壊状況をそれぞれ示す。

#### 3.1 1層1スパン試験体

本試験体では、部材角0.1%で壁体に目地ひび割れが、両柱に曲げひび割れが観測された。部材角0.4%では両柱にせん断ひび割れが発生し、部材角0.67%および0.9%付近では柱および梁の主筋が降伏した。部材角-1.0%で最大耐力-58.7 kNを記録した。その後、部材角1.5%付近で引張側柱の柱頭部にせん断ひ



(a) 1層1スパン試験体

(b) 1層2スパン試験体

図2 歪ゲージの貼付位置（試験体背面の様子）

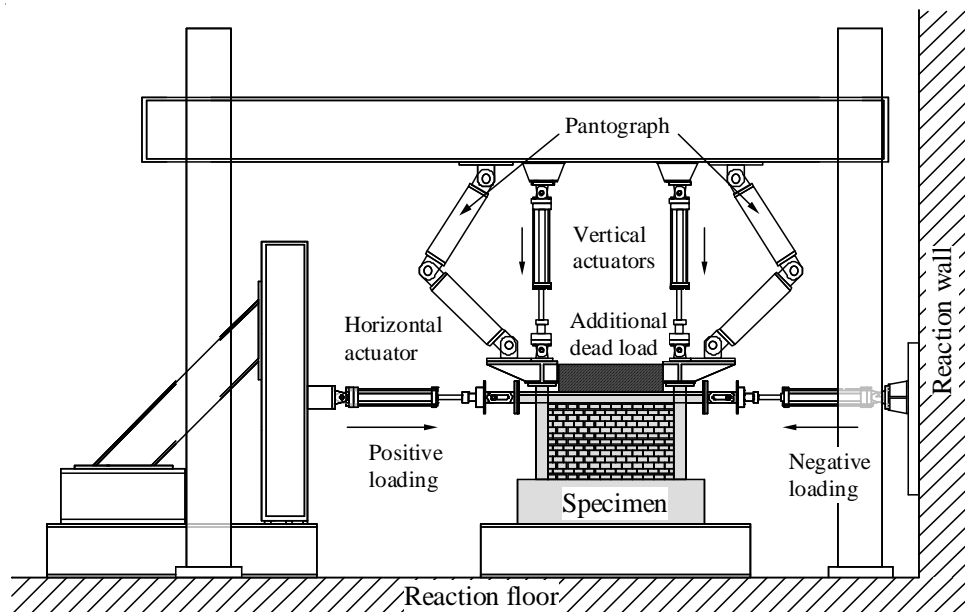


図3 加力システム

び割れが開き始め、部材角 2.0% では架構の耐力が最大耐力の 80% 程度に低下した。その後も、耐力低下が見られたものの、著しい耐力低下は見られず部材角 8.0% まで加力し実験を終了した。

本試験体における両柱および壁体のせん断力の計算結果とその和を図 4 (a) に示す。両柱のせん断力の算定において、実験の際の計測結果より、図 4 (a) に示すように引張側柱の可撓長さ  $h$  は  $0.5h_0$  ( $h_0$ : 柱の内法高さ)、圧縮側柱の可撓長さは  $h_0$  と仮定した。また、初期剛性、曲げひび割れモーメントおよび降伏時の剛性低下率は文献 2) により算定し、曲げ終局モーメント  $M_U$  はストレスブロックに基づき精算した。一方、壁体のせん断力は文献 3) の式(1)および式(2)より算定したものである。ここで、壁体の履歴特性は Bi-linear とし、降伏部材角は 0.1% と仮定した。図 4 (a) より、両柱と壁体のせん断力の和の最大値は実験結果の約 70% に留まっている。純フレーム試験体を対象とした耐力については精度良く評価されることを別途確認していることから、文献 3) による壁体のせん断力は過小評価になったと思われる。

$$V_c = W_{eq} \cdot t \cdot f_{me} \cdot \cos \theta \quad (1)$$

$$W_{eq} = 0.175 \left( \frac{4 \cdot E_c \cdot I_c \cdot h_m}{E_m \cdot t \cdot \sin 2\theta \cdot h^4} \right)^{0.1} \cdot l_d \quad (2)$$

ここで、 $W_{eq}$  は等価圧縮ストラットの有効幅 (=135 mm)、 $t$  は壁体厚さ (=48 mm)、 $f_{me}$  はプリズム圧縮強度の 50% (表 3 参照)、 $\theta$  は対角圧縮ストラットの形成角度 (ここでは、壁体の両隅と水平方向のなす角度と見なし、 $31^\circ$  と設定)、 $E_c$  および  $E_m$  はコンクリートおよび壁体のヤング係数 (表 1 および表 3 参照)、 $I_c$  は柱の断面 2 次モーメント、 $h_m$  は壁体高さ (=705 mm, 図 1 参照)、 $h$  は上下梁の中心間距離 (=705 mm と仮定)、 $l_d$  は壁体の対角長さである。

### 3.2 1層2スパン試験体

本試験体では、部材角 0.1% で壁体に目地ひび割れが、各柱に曲げひび割れが観測された。部材角 0.4% では各柱にせん断ひび割れが発生し、この部材角で両側柱の主筋が、部材角 0.9% 付近で中央柱の主筋がそれぞれ降伏した。また、部材角+0.4% で最大耐力+104.4 kN を記録した。その後、各柱のひび割れ進展とともに耐力が徐々に低下したものの、1層1スパン試験体と同様、著しい耐力低下は見られず部材角 8.0% まで加力し実験を終了した。

本試験体における各部材のせん断力の計算結果を図 4 (b) に示す。各柱のせん断力の算定において、実験の際の計測結果より、引張側柱の可撓長さ  $h$  は  $0.5h_0$ 、その他の柱の可撓長さは  $h_0$  と仮定した。その他、柱および壁体のせん断力の算定における諸条件は1層1スパン試験体と同様である。図 4 (b) より、各柱

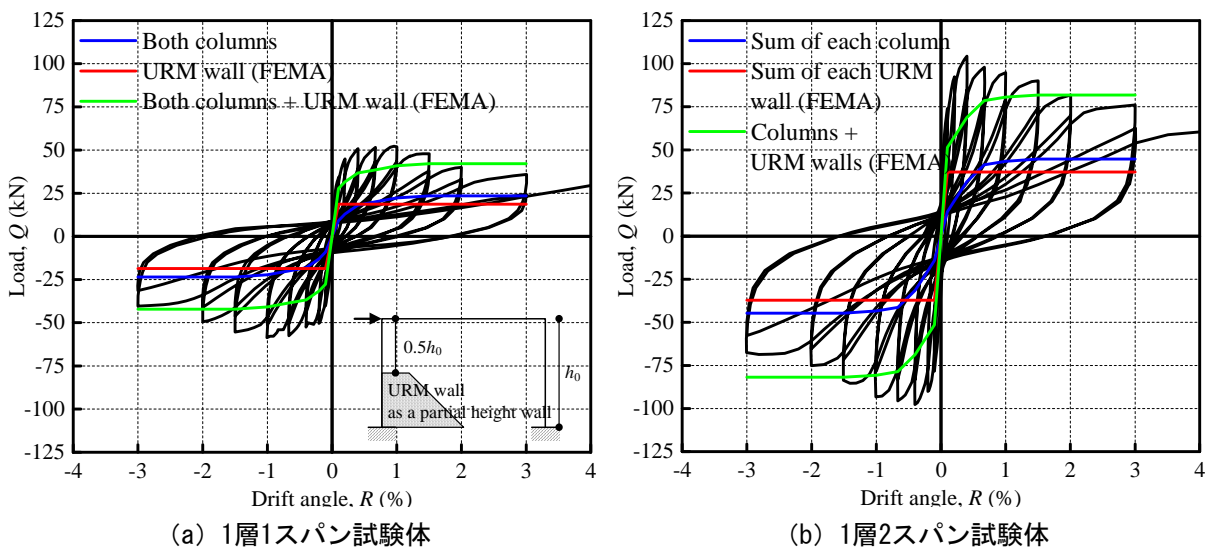
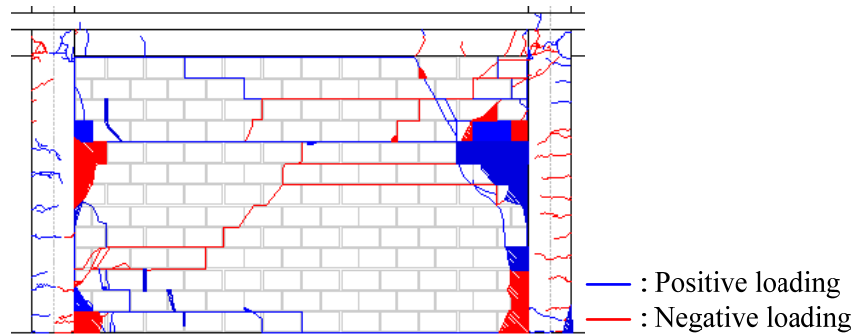
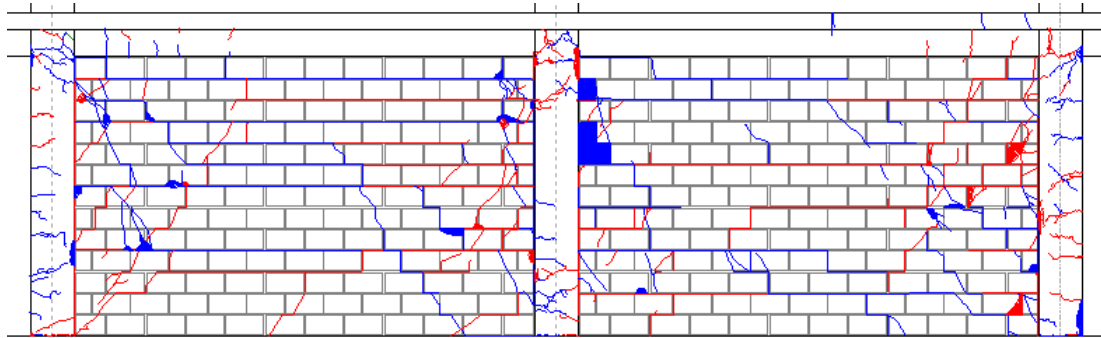


図4 荷重－変形関係



(a) 1層1スパン試験体



(b) 1層2スパン試験体

図5 最終破壊状況

と壁体のせん断力の和は実験結果の約80%となり、1層1スパン試験体と同様、壁体のせん断力が過小評価された。

#### 4. URM壁の負担せん断力の評価手法<sup>1)</sup>および負担せん断力の算定

本項では、筆者らが既提案した内蔵URM壁の負担せん断力の評価手法について簡略に紹介する。詳細の内容については文献1)を参考されたい。本手法のフローは以下のとおりである。

##### 4.1 各組積ユニットの圧縮主歪 $\varepsilon_j$ およびその角度 $\theta_j$

まず、CBユニット $j$ の3軸歪データから圧縮主歪 $\varepsilon_j$ およびその角度 $\theta_j$ を算出する。両試験体における部材角0.4%の時の各CBユニットの圧縮主歪の分布例を図6に示す。同図より、両試験体ともに壁体の圧縮主歪が概ね対角線上に分布していることがわかる。この結果より、1層2スパン試験体では各壁体に対角圧縮ストラットがそれぞれ形成されることが予想される。

##### 4.2 対角圧縮ストラットの形成角度 $\theta$

次に、4.1節で算定したCBユニット $j$ の $\varepsilon_j$ および $\theta_j$ を用い、対角圧縮ストラットの形成角度 $\theta$ を求める。その際に、 $\theta$ を $\varepsilon_j$ の重み付け平均により定義する(式(3))。ここで、 $\theta$ は $0^\circ$ から $90^\circ$ の間に分布する圧縮主歪のみを算定対象とした。

$$\theta = \left( \frac{\sum_{j=1}^l \varepsilon_j \times \theta_j}{\sum_{j=1}^l \varepsilon_j} \right) \quad (3)$$

ここで、 $l$ は $\theta_j$ が $0^\circ$ から $90^\circ$ の間に分布するCBユニットの総数である。

##### 4.3 URM壁の各区間における圧縮主歪 $\varepsilon_i$ および平均圧縮主歪 $\varepsilon_m$

次に、壁体を対角圧縮ストラットの形成角度 $\theta$ の法線方向に長さが均等になるよう19区間に分割し(図6(a)参照)、各区間 $i$ における圧縮主歪の算術平均 $\varepsilon_i$ を算定する。両試験体における部材角0.4%での $\varepsilon_i$ の

分布例を図7に示す。同図より、両試験体における $\varepsilon_i$ の全体的な形状は概ね対称的に分布することがわかる。さらに、 $\varepsilon_i$ の平均値を平均圧縮主歪 $\varepsilon_m$ と定義し、それを壁体を代表する圧縮主歪とする。

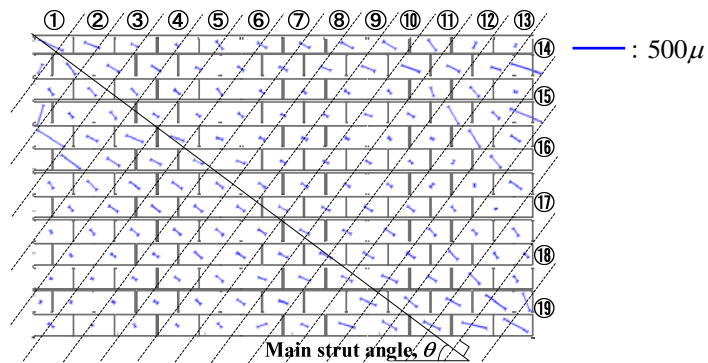
#### 4.4 URM壁の各区間における対角圧縮ストラットの有効幅 $W_{ei}$ および等価幅 $W_{eq}$

図8に示す区間*i*における対角圧縮ストラットの有効幅 $W_{ei}$ を算定する。ここで、有効幅とは区間ごとに本研究で定めた選定対象の $\varepsilon_j$  ( $\theta_j$ が0°から90°の間の値を有するCBユニット, 4.2節参照)が存在する両端のCBユニット間の距離を意味する。図8より、各区間の $W_{ei}$ の全体的な形状は概ね対称的に分布した。また、図7および図8より、 $\varepsilon_i$ と $W_{ei}$ は逆対称の関係にあることが分かった。

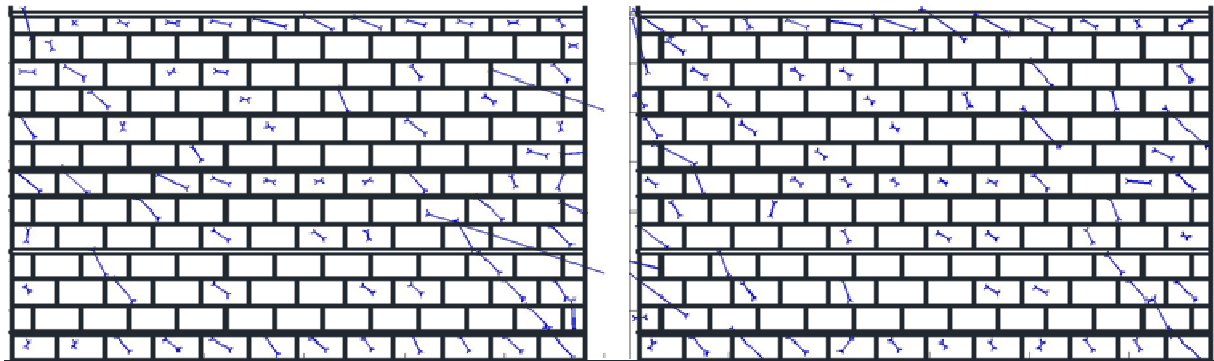
次に、対角圧縮ストラットの等価幅 $W_{eq}$ を式(4)から算定する。同式は図9に示すように元のストラットおよび等価ストラットに同じ圧縮力 ( $P_{(a)}=P_{(b)}$ ) が作用すると仮定し定式化したものである。

$$W_{eq} = \left( \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i \times W_{ei}) \right) / \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (n=15) \quad (4)$$

ここで、 $n$ は分割した区間の数である。



(a) 1層1スパン試験体



(b) 1層2スパン試験体

図6 CBユニットの圧縮主歪の分布例 (部材角0.4%, 正加力時)

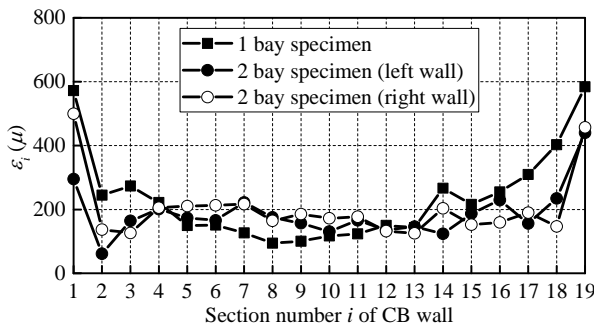


図7 各区間の圧縮主歪の分布

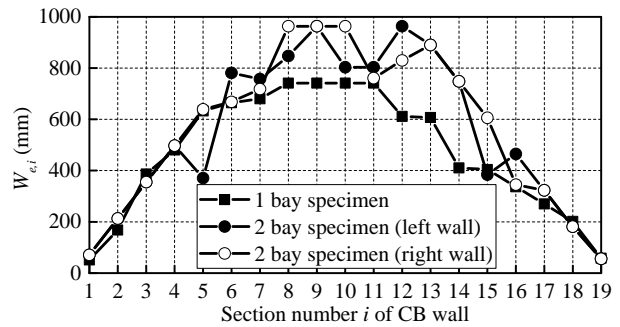


図8 各区間の対角圧縮ストラットの有効幅の分布



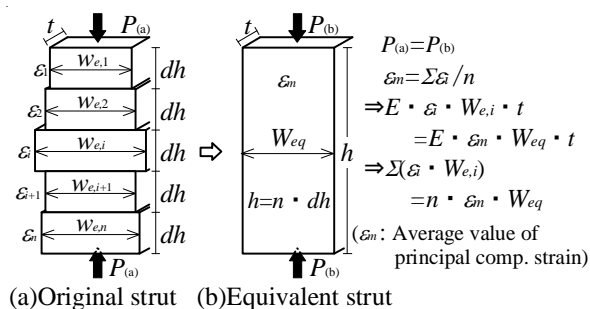


図9 対角圧縮ストラットの等価幅モデル<sup>1)</sup>

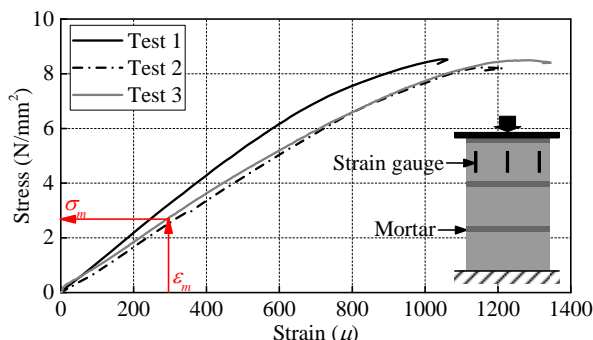


図10 CBの3段プリズム圧縮試験結果

#### 4.5 対角圧縮ストラットの中心軸 $C_y$

次に、区間ごとの対角圧縮ストラットの作用点  $C_{yi}$  をそれぞれ算出し、その中心軸  $C_y$  を算定する。ここで、各区間  $i$  における  $C_{yi}$  は、各区間  $i$  における選定対象の  $\epsilon_i$  の大きさとその  $\epsilon_i$  までの距離  $y_j$  を考慮した式(5)より算出し、また  $C_y$  は各  $C_{yi}$  および4.3節で求めた  $\epsilon_i$  を用い、式(6)より算定することとした。

$$C_{y_i} = \left( \sum_{j=1}^m \epsilon_j \times y_j \right) / \sum_{j=1}^m \epsilon_j \quad (5)$$

$$C_y = \left( \sum_{i=1}^n \epsilon_i \times C_{y_i} \right) / \sum_{i=1}^n \epsilon_i \quad (n = 15) \quad (6)$$

ここで、 $m$  は区間  $i$  における  $\epsilon_i$  の  $\theta$  が  $0^\circ$  から  $90^\circ$  に分布する CB ユニットの数である。

#### 4.6 壁体の負担せん断力

最後に、上記の検討結果および別途に実施した CB ユニットを用いたプリズム圧縮試験結果に基づき、壁体のせん断力  $V_c$  を式(7)により算定する。

$$V_c = W_{eq} \cdot t \cdot \sigma_m \cdot \cos \theta \quad (7)$$

ここで、 $\sigma_m$  は対角圧縮ストラットの平均圧縮主歪  $\epsilon_m$  に対応する圧縮主応力度である。 $\sigma_m$ - $\epsilon_m$  の関係は図10に示す CB の3段プリズム圧縮試験結果を用いることとする。本検討では、 $\sigma_m$  は3つの試験結果の平均値を用いた。

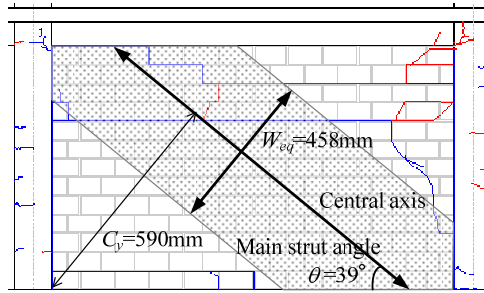
#### 5. RC造架構内に内蔵されたURM壁の負担せん断力の評価

以上の評価手法に基づき、両試験体における壁体の負担せん断力を算定する。図11に部材角0.4%での等価対角圧縮ストラットの形成様子を、図12に柱および壁体のせん断力とその和を、それぞれ示す。

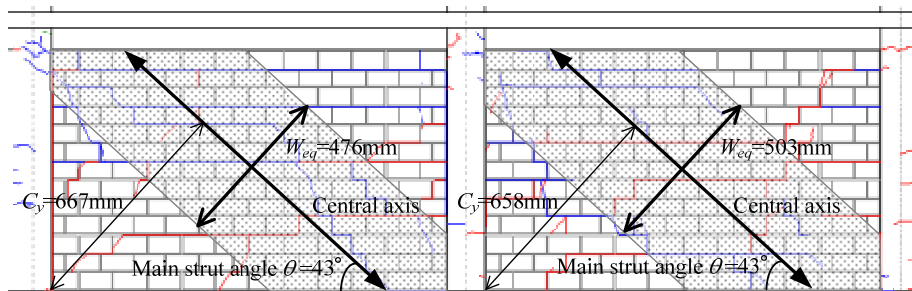
図11より、両試験体では上部柔梁を有しているため、上部梁の変形により上下梁間に対角圧縮ストラットが形成される結果となった。また、1層2スパン試験体では壁体ごとに対角圧縮ストラットが形成された。図12より、柱と壁体のせん断力の和は両試験体ともに実験結果と概ね対応していることから、筆者らが提案した壁体のせん断力の評価手法の整合性が確認できた。

#### 6. まとめ

本研究では、多スパンでのURM壁の対角圧縮ストラットの形成メカニズムやその負担せん断力を明らかにするため、既提案したURM壁の等価対角圧縮ストラットおよびそれに基づく負担せん断力の評価手法を用い、1/4スケールの1層1スパンおよび1層2スパン試験体における静的載荷実験結果への適用を試みた。その結果、上部梁の変形により上下梁間に対角圧縮ストラットが形成されたことや、1層2スパン試験体では壁体ごとに対角圧縮ストラットが形成されたことが確認できた。また、本評価手法に基づく壁体の負担せん断力と各柱のせん断力の計算値の和は、両試験体ともに実験結果を概ね再現できた。

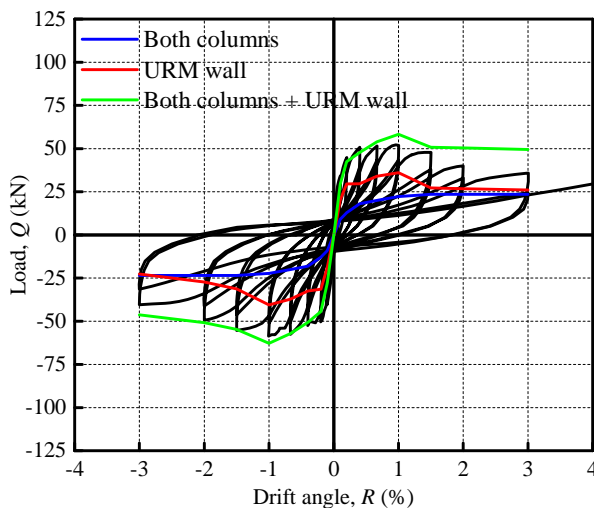


(a) 1層1スパン試験体

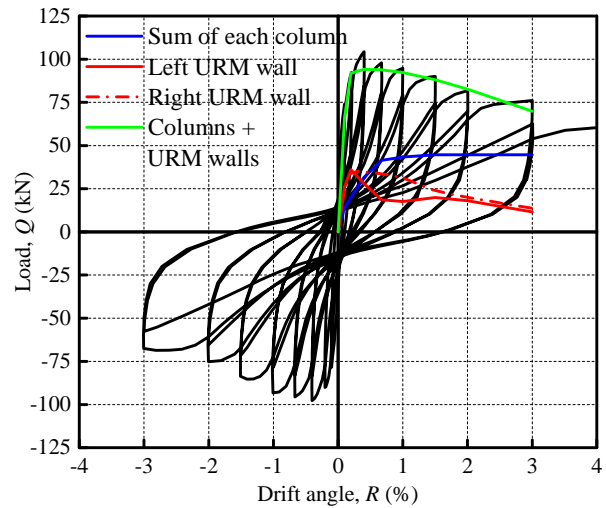


(b) 1層2スパン試験体

図11 本評価手法で求めた対角等価圧縮ストラット（部材角0.4%，正加力時）



(a) 1層1スパン試験体



(b) 1層2スパン試験体

図12 両試験体におけるせん断力の算定結果

謝 辞

本研究は科学技術振興機構 平成25年度戦略的国際科学技術協力推進事業「欧州諸国との研究交流（CONCERT-Japan）」（研究課題名：鉄筋コンクリート架構と内蔵組積造壁を一体化する革新的耐震補強工法の開発、研究代表者：Prof. Polat Gulkan，日本側研究代表者：中埜良昭教授）の助成を受けたものです。関係各位に謝意を記します。

参考文献

- 1) 晋沂雄，崔琬，高橋典之，中埜良昭：RC造架構に内蔵されたURM壁の対角圧縮ストラットに着目した負担せん断力の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，2013.7，pp.337-342.
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同説明，2010
- 3) FEMA306：Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings, Applied Technology Council (ATC-43 Project), 1998