

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420546

研究課題名(和文) URM壁の面外転倒を含むRC造架構の耐震性能および耐震補強手法に関する実用化研究

研究課題名(英文) Feasibility Study on Seismic Performance and Reinforcing System of Unreinforced Masonry Infill Walls Considering Out-of-plane Failure

研究代表者

崔 琥 (Choi, Ho)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：40512009

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年世界各地で内蔵無補強組積造壁(URM)壁の面外転倒破壊が多発している。そこで本研究では、内蔵URM壁の破壊メカニズムの究明および壁体の面外転倒メカニズムに基づいた耐震補強手法の提案を主目的とする。

この目的を達成するために、平成26年度は、URM壁付きRC造架構の面内実験を行い、URM壁の架構全体への耐震性能寄与分を定量的に明らかにした。平成27年度は、本研究で提案した壁体への補強材(タイシステム)の有無をパラメータとした面外振動台実験を計画・実施した。平成28年度は、振動台実験結果を分析し、壁体の面外破壊メカニズムの評価および本研究で提案した耐震補強システムの有効性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The objectives of this study are to evaluate on the in-plane (IP) capacity of unreinforced masonry (URM) infill walls, and to investigate out-of-plane (OOP) behavior of URM infills and to identify the effectiveness of the tie system, which was proposed to enhance the infill stability under both IP and OOP forces. For this purpose, 1/4-scale, single-story, one-bay masonry infilled RC frame specimens were tested under the IP static cyclic loading and OOP dynamic excitation, respectively. Static cyclic loading tests were conducted to investigate the lateral force resisting mechanisms in the IP direction, which were evaluated based on the strain data measured on blocks forming the infill walls. Shaking table tests were performed to verify the effectiveness of the proposed tie system for preventing infill OOP failure under excitation simulating severe floor response in medium-rise buildings.

研究分野：建築構造学

キーワード：無補強組積造壁 RC造架構 静的実験 振動台実験 耐震補強手法

1. 研究開始当初の背景

近年世界各地で無補強組積造壁 (URM) 壁を含む RC 造建物が大きな地震被害を受けており、特に URM 壁の面外方向への転倒破壊が多発している。この種の建物の地震被害を軽減するためには、まず URM 壁の面外方向への耐震性能を明らかにした上で、さらに面外転倒メカニズムを評価する必要がある。

2. 研究の目的

上記の背景から、本研究では、URM 壁の耐震性能の把握のための面内方向への静的実験および面外転倒メカニズムの評価のための振動台実験を行い、URM 壁付き RC 造架構の破壊メカニズムを明確にするとともに、壁体の面外転倒メカニズムに基づいた耐震補強手法の提案を主目的とする。

この目的を達成するために、スパン数、層数および組積ユニットの積み方をパラメータとした URM 壁付き RC 造架構の面内静的載荷実験および本研究で提案した壁体への補強材 (タイシステム) の有無をパラメータとした面外振動台実験を計画・実施した。

3. 研究の方法

(1) 試験体の概要

対象建物はトルコで一般に用いられている RC 造 5 階建て建物とし、面内静的載荷用試験体は対象建物の 1 階部分を想定し、スパン数、層数および組積ユニットの積み方をパラメータとした 5 体とし (図 1)、面外振動台実験用試験体は本研究で提案した補強システム (タイシステム) の有無をパラメータとした 2 体とした (図 2)。

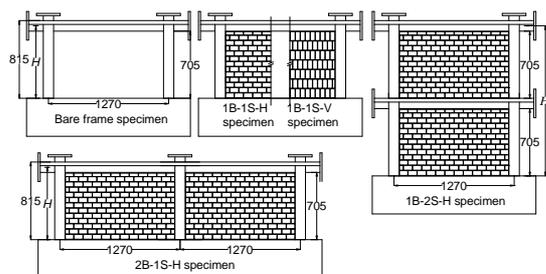


図 1 面内静的載荷用試験体 (単位: mm)

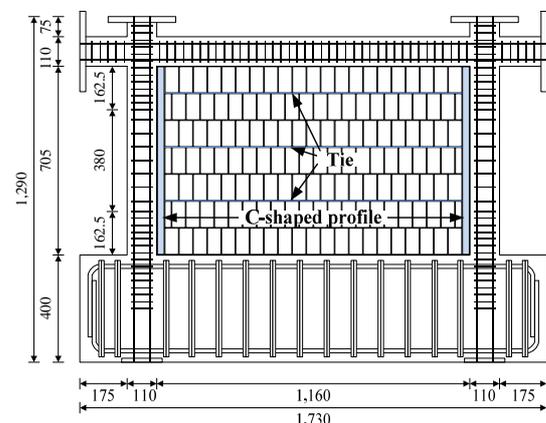


図 2 タイシステム試験体 (単位: mm)

面内静的載荷用試験体名は、純 RC 試験体 (BF 試験体)、1 スパン 1 層試験体 (1B-1S-H 試験体 (横積み)、1B-1S-V 試験体 (縦積み))、2 スパン 1 層試験体 (2B-1S-H 試験体)、1 スパン 2 層試験体 (1B-2S-H 試験体) で、面外振動台実験用試験体名は、無補強組積造壁試験体 (URM wall 試験体)、タイシステム試験体 (Tie system 試験体) である。

写真 1 にタイシステム試験体の詳細を示す。タイシステムは両柱に固定した 2 つの C チャンネルと 2 列、4 列、6 列に設置した 3 つのタイ材で構成される。



(a) タイシステムの施工 (b) 接合部の様子  
写真 1 タイシステムの設置様子

(2) 加力計画および計測計画  
静的実験

図 3~図 5 に面内静的載荷実験のための加力計画、載荷計画および計測計画をそれぞれ示す。図 5 に示すように、本研究では、組積造壁の耐震性能寄与分を定量的に評価するために、各組積ユニットに 3 軸ひずみゲージを貼り付けた。ただし、計測装置の制限のため、2B-1S-H 試験体および 1B-2S-H 試験体においては全組積ユニットの半数程度のみひずみゲージを貼り付けた。より詳細な内容については文献(1)および(2)を参考されたい。

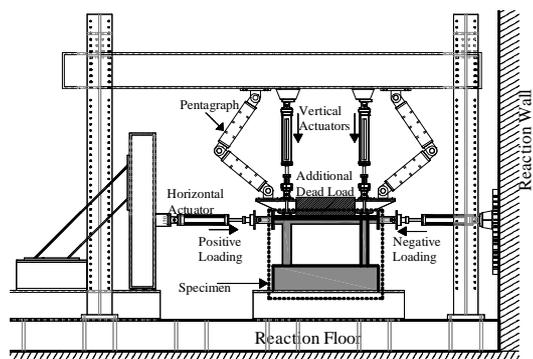


図 3 静的実験の加力計画

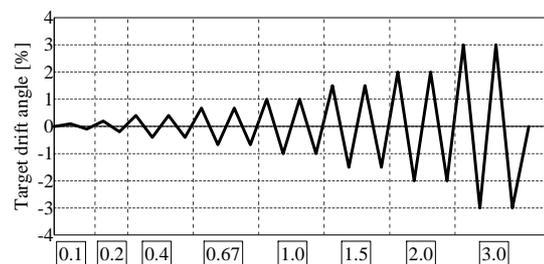


図 4 静的実験の載荷計画

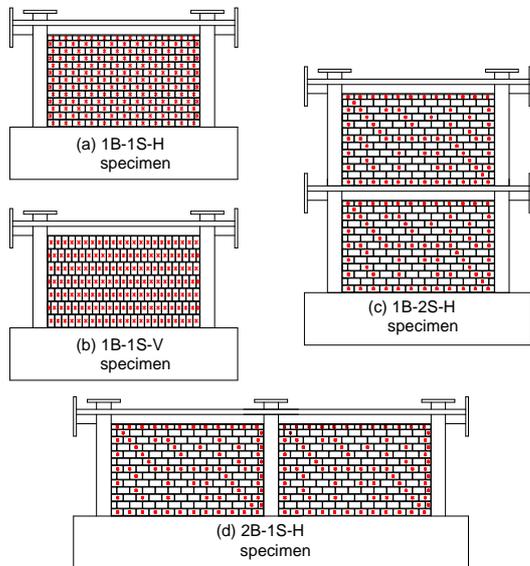


図5 ひずみゲージの付着位置

#### 振動台実験

図6に面外振動台実験のための加力計画および計測計画を示す。同図に示すように、両試験体の上部は鉄骨梁で繋がれており、動的加振が両試験体に同時に加力される。

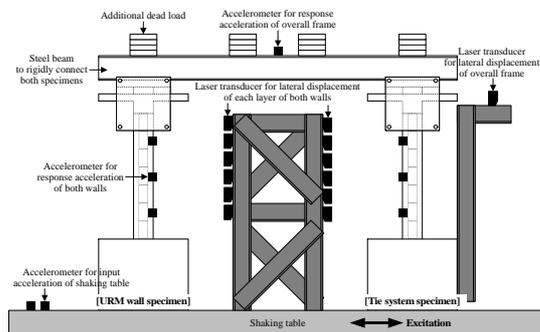


図6 振動台実験の加力計画および計測計画

内蔵組積造壁は上層部になるほど面外転倒が起こりやすくなるため、本振動台実験では、対象建物の最上階である5層における壁体の挙動に着目する。加振波は、Erzincan地震(1992)のEW成分を選択した。加速度データの時間刻みおよび振幅は、弾性解析より得られた対象建物の5層の応答加速度データを用いて相似則に従い修正した。図7に元および修正した加速度データを示す。本研究で取り入れた相似則の詳細は文献(2)を参考されたい。

目標ピーク加速度は加振レベルにより修正した。すなわち、Run1~Run6の目標ピーク加速度は $2.6 \text{ m/s}^2$  (10%),  $6.4 \text{ m/s}^2$  (25%),  $12.8 \text{ m/s}^2$  (50%),  $19.1 \text{ m/s}^2$  (75%),  $25.5 \text{ m/s}^2$  (100%),  $30.6 \text{ m/s}^2$  (120%)である。しかし、振動台で計測された値は少し小さい結果となった(図15参照)。また、両試験体においてRun6まで壁体の面外転倒が生じなかったため、Run6と同じピーク加速度および異なる時間刻みを有するRun7を設けた。試験体の応答変位を増加させるために、Run7の時間刻

みをRun6の1.3倍とした。

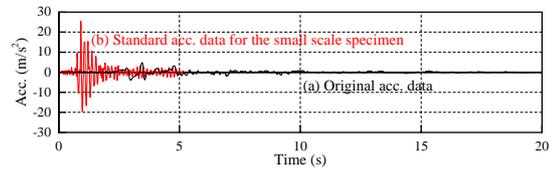


図7 元および修正した加速度データ

#### 4. 研究成果

##### (1) 面内静的荷重実験

破壊パターンおよび荷重-変形関係

図8および図9に各試験体の最終破壊状況および荷重-変形関係をそれぞれ示す。

##### BF試験体

部材角0.1%および0.4%より柱および梁に曲げひび割れがそれぞれ発生し、部材角1.0%で両柱が降伏した。また、この部材角で柱梁接合部にせん断ひび割れが観測された。部材角1.5%では梁が降伏した。本試験体は最終荷重サイクルまで著しい耐力低下は起こらなかった。最大荷重は、正荷重時の部材角+1.5%で19.0 kN、負荷荷時の部材角-1.5%で-21.0 kNをそれぞれ記録した。

##### 1B-1S-H試験体

壁体では、部材角0.1%で階段状のひび割れが生じはじめ、最大荷重が現れるまで進展した。また、組積ユニットの圧壊および剥落により耐力が見られた。

本試験体の周囲フレームのひび割れパターンはBF試験体とは異なる傾向を示した。柱の曲げひび割れは両端だけではなく、柱の中央部でも観測された。これは壁体が圧縮ストラットとして作用されるからと思われる。本試験体の最大荷重は、部材角+1.0%および-1.5%で52.2 kNおよび-58.7 kNをそれぞれ記録した。これはBF試験体の最大荷重の約2.8倍である。

##### 1B-1S-V試験体

組積ユニットを縦積みした本試験体では、ほとんどの組積ユニットが回転する様子を示した。また、初期剛性および最大荷重は1B-1S-H試験体より低い結果となった。本試験体の最大荷重は、部材角+1.5%および-1.5%で45.9 kNおよび-49.9 kNをそれぞれ記録した。

##### 1B-2S-H試験体

本試験体においては、最大荷重に達するまで2層の壁体にひび割れが多く進展していなかった。その後、対角上のひび割れの進展や柱へのせん断ひび割れの発現により耐力低下が生じることとなった。2層の梁が上下壁により拘束されたため、本試験体の初期剛性は1B-1S-H試験体より高い結果となった。本試験体の最大荷重は、部材角+0.2%および-0.2%で52.6 kNおよび-49.3 kNをそれぞれ記録した。

##### 2B-1S-H試験体

本試験体は5つの試験体の中で最も大きい

初期剛性および最大荷重を示した。1B-1S-H 試験体にくらべ最大荷重は約 2 倍であった (部材角 0.4% で 104.4 kN)。両壁のひび割れパターンは 1B-1S-H 試験体とほぼ同様である。これは、本試験体の両壁にはそれぞれ圧縮ストラットが形成されていることを意味する。

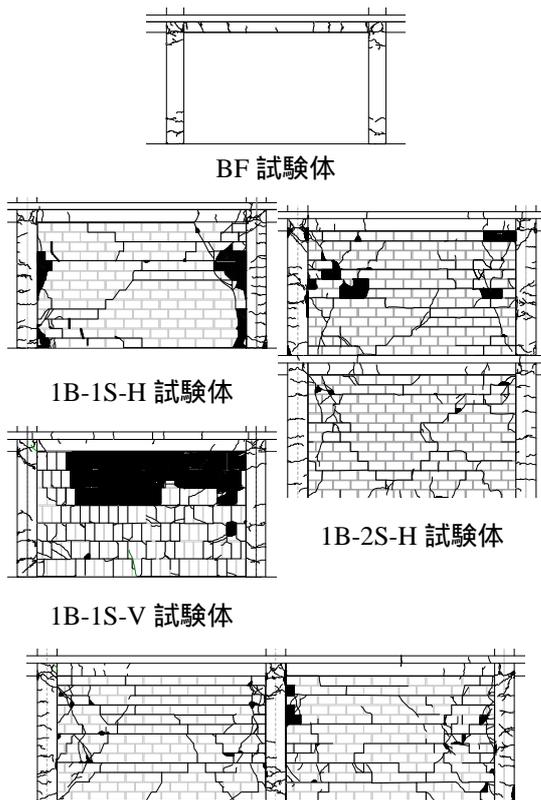


図 8 各試験体の最終破壊状況

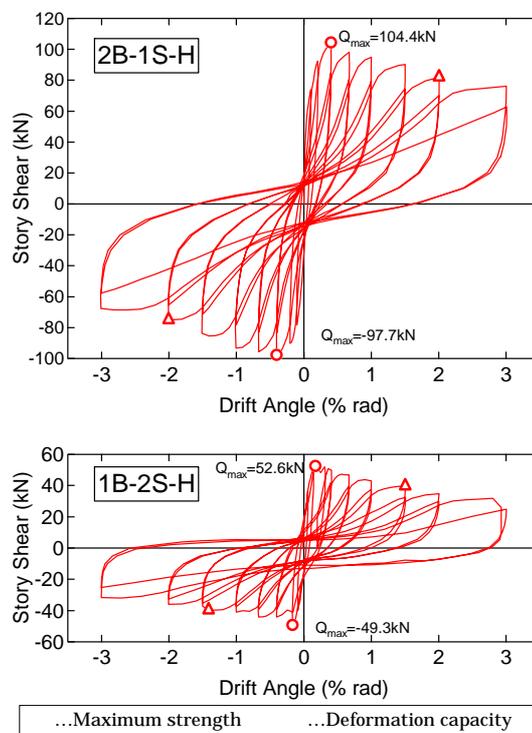
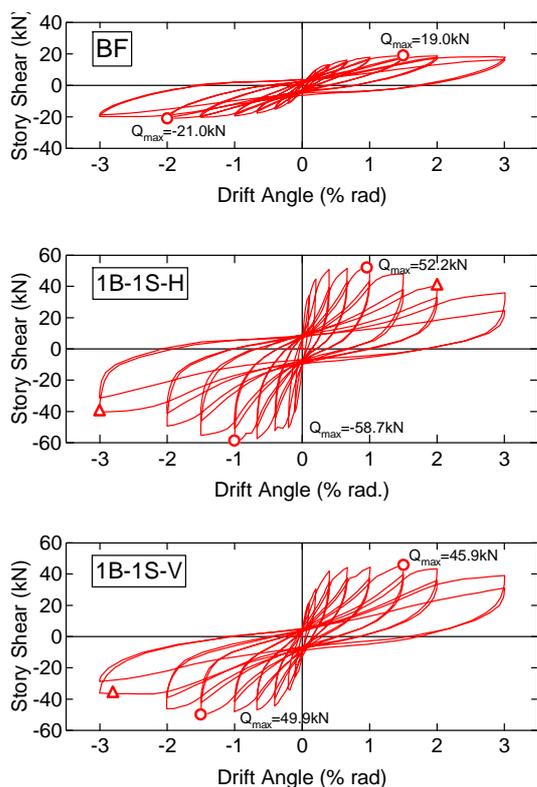


図 9 各試験体の荷重 - 変形関係

壁体の圧縮ストラットおよびせん断力  
ここでは、代表的に 1B-1S-H 試験体および 2B-1S-H 試験体における壁体の等価対角圧縮ストラットおよびそのせん断力の評価についてまとめる。

等価対角圧縮ストラットに基づく組積造壁のせん断力は式(1)より計算できる。等価対角圧縮ストラットの概念図は図 10 に示す。

$$V_{CS} = W_{eq} \cdot \cos \theta \cdot \sigma_m \cdot t \quad (1)$$

ここで、 $W_{eq}$ : 等価対角圧縮ストラット幅、 $\theta$ : ストラットの角度、 $\sigma_m$ : 等価対角圧縮ストラットの主圧縮ひずみ  $\varepsilon_m$  に対応する応力、 $t$ : 壁体の厚さ (48 mm)。

等価圧縮ストラットを求めるための各因子の計算方法は以下に示す。より詳細な内容については文献(3)を参考されたい。

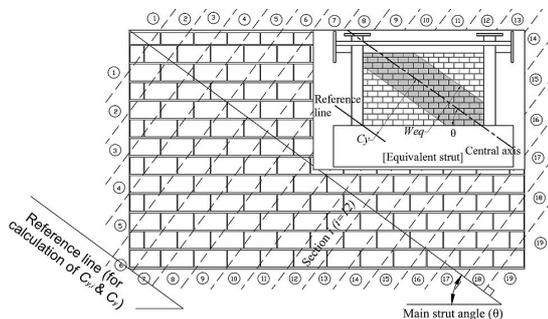


図 10 等価圧縮ストラットの各因子

主ストラット角度  $\theta$

主ストラット角度  $\theta$  は式(2)より求める。

$$\theta = \left( \frac{\sum_{j=1}^l \varepsilon_j \times \theta_j}{\sum_{j=1}^l \varepsilon_j} \right) \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon_j$ :  $j$  ユニットの主圧縮ひずみ、 $l$ :  $\theta_j$  が  $0^\circ$  から  $90^\circ$  の間に分布する組積ユニットの総数。

**等価対角圧縮ストラットの平均圧縮ひずみ  $\varepsilon_m$**

壁体を  $\theta$  の直角方向に長さが均等になるよう 19 区間に分割し (図 10 参照), 各区分  $i$  における圧縮主歪の算術平均  $\varepsilon_i$  を算定する。また、 $\varepsilon_i$  の平均値  $\varepsilon_m$  (平均圧縮主歪) を等価対角圧縮ストラットのひずみとする。

**等価対角圧縮ストラットの中心軸  $C_y$**

次に、区分ごとの対角圧縮ストラットの作用点  $C_{y_i}$  をそれぞれ算出し、その中心軸  $C_y$  を算定する。ここで、各区分  $i$  における  $C_{y_i}$  は、各区分  $i$  における選定対象の  $\varepsilon_i$  の大きさとその  $\varepsilon_j$  までの距離  $y_j$  を考慮した式(3)より算出し、また  $C_y$  は各  $C_{y_i}$  および上記で求めた  $\varepsilon_i$  を用い、式(4)より算定することとした (図 10 参照)。

$$C_{y_i} = \left( \sum_{j=1}^m \varepsilon_j \times y_j \right) / \sum_{j=1}^m \varepsilon_j \quad (3)$$

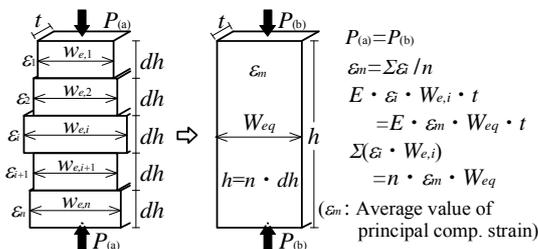
$$C_y = \left( \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \times C_{y_i} \right) / \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (n=19) \quad (4)$$

ここで、 $m$ : 区分  $i$  における  $\varepsilon_i$  の  $\theta_j$  が  $0^\circ$  から  $90^\circ$  に分布する組積ユニットの数。

**等価対角圧縮ストラット幅  $W_{eq}$**

次に、区分  $i$  における対角圧縮ストラットの有効幅  $W_{e,i}$  を算定する。ここで、有効幅とは区分ごとに本研究で定めた選定対象の  $\varepsilon_i$  が存在する両端の組積ユニット間の距離を意味する。次に、対角圧縮ストラットの等価幅  $W_{eq}$  を式(5)から算定する。同式は図 11 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。

$$W_{eq} = \left( \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i \times W_{e,i}) \right) / \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (n=19) \quad (5)$$



(a)Original strut (b)Equivalent strut

図 11 圧縮ストラットの等価幅の算定方法

図 12 および図 13 に、1B-1S-H 試験体における部材角  $0.67\%$  での主圧縮ひずみ分布および 1B-1S-H 試験体と 2B-1S-H 試験体の等価対角圧縮ストラットの算定結果をそれぞれ示す。図 13 より、2 スパン試験体では壁体それぞれに圧縮ストラットが形成される結果となった。

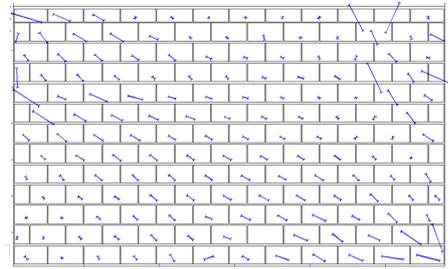


図 12 主圧縮ひずみ分布 ( $0.67\%$ )

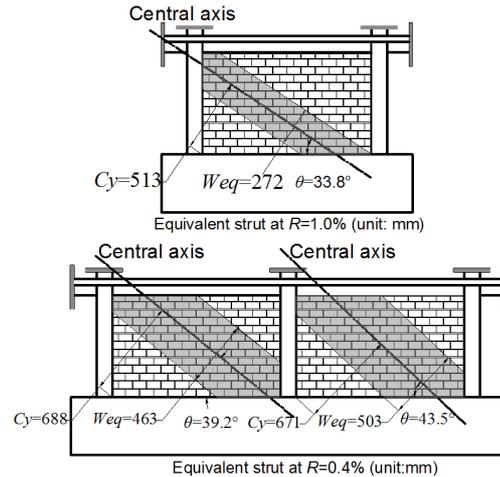
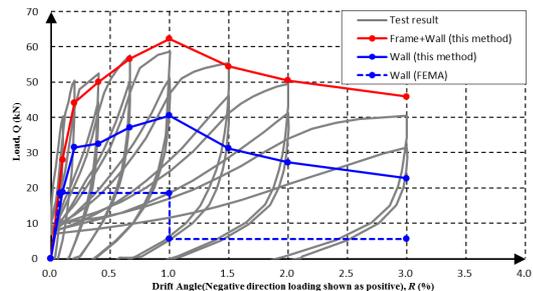


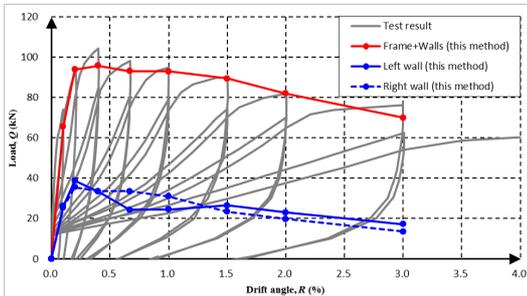
図 13 両試験体の等価対角圧縮ストラット

### 架構全体のせん断力の評価

以上の検討結果に基づき算定した両柱および壁体のせん断力とその和を図 14 に示す。同図より、両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、本研究で着目した壁体のせん断力の評価手法の適用可能性が確認できた。



(a) 1B-1S-H 試験体



(b) 2B-1S-H 試験体

図 14 荷重 - 変形関係の算定結果

## (2) 面外振動台実験

図 15 に両試験体の性能曲線（計算値）と振動台実験より計測された応答曲線を示す。同図には、実験結果から得られた各加振レベルにおける最大応答点も併せて示す。応答曲線と性能曲線の交差点は各加振レベルでの最大応答を意味する。同図より、応答曲線と性能曲線の交差点は実験による最大応答点と概ね対応することがわかる。

図 16 に両試験体の各加振レベルにおける壁体の剥落率を示す。タイシステム試験体の損傷は加振前のほとんど変わらないのに対し、無補強試験体では 5 倍程度著しく損傷が生じていることがわかる。この結果より、本研究で提案したタイシステムは組積造壁の面外転倒を効率よく防止することが証明できた。

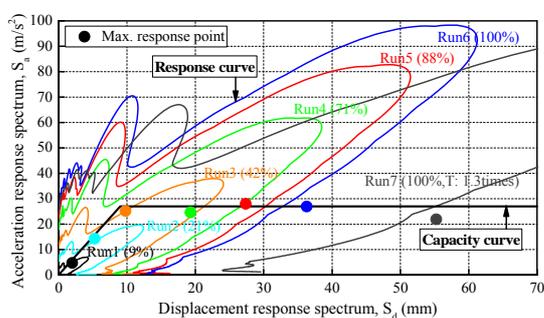


図 15 応答曲線と性能曲線の比較

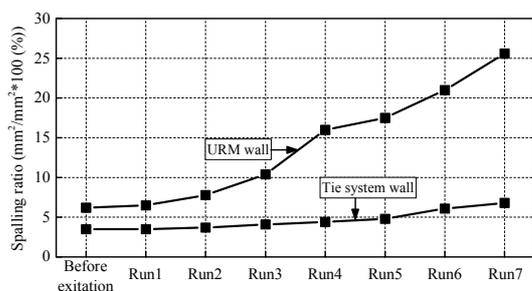


図 16 両試験体における壁体の剥落率

## 参考文献

- (1) Choi, H., Paul, D., Suzuki, T., Matsukawa, K., Sanada, Y. and Nakano, Y. (2015). "Seismic Capacity Evaluation of URM Infill Built in RC Frame, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan (AIJ), Vol.IV, pp.777-782.
- (2) Choi H, Matsukawa K, Sanada Y, Nakano Y. Experimental Study on Out-of-plane Behavior of Infill Wall Built in RC Frames, Bulletin of Earthquake Resistant Structure, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, No.49, 2016.
- (3) Jin, K., Choi, H., Takahashi, N., Nakano, Y. (2012). "Failure Mechanism and Seismic Capacity of RC Frames with URM Wall considering Its Diagonal Strut". Proc. 15th World Conference of Earthquake Engineering (WCEE), International Association of Earthquake Engineering.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

H. Choi, K. Matsukawa, Y. Sanada, Y. Nakano, Experimental Study on Out-of-plane Behavior of Infill Wall Built in RC Frames, Bulletin of Earthquake Resistant Structure, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, No.49, 2016.3

鈴木有美, 真田靖士, 崔琥, 中埜良昭, トルコの組積造壁を有する RC 架構の実験と解析による性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.841-846, 2016.7, 査読有

〔学会発表〕(計 7 件)

H. Choi, K.W. Jin, K. Matsukawa, Y. Nakano, Evaluation of Equivalent Diagonal Strut Mechanism and Shear Strength of URM Wall Infilled R/C Frame, European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, Turkey, 2014.8

H. Choi, D. Paul, T. Suzuki, K. Matsukawa, Y. Sanada, Y. Nakano, Seismic Capacity Evaluation of URM Infill Built in RC Frame - Part 1 and 3 -, 日本建築学会大会, 東海大学, 2015.9

崔琥, D. Paul, 松川和人, 真田靖士, 中埜良昭, 鈴木有美, 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, 日本地震工学会大会, 東大生研, 2015.11

T. Suzuki, H. Choi, Y. Sanada, K. Matsukawa, Y. Nakano, Seismic Capacity Evaluation of URM Infill Built in RC Frame - Part 4 -, 日本建築学会大会, 九州大学, 2015.8

H. Choi, K. Matsukawa, Y. Sanada, Y. Nakano, In- and Out-of-plane Behavior of Infill Wall with Reinforcing Tie System Built in RC Frames, 日本地震工学会大会, 高知工科大学, 2015.9

〔その他〕

ホームページ等

<http://sismo.iis.u-tokyo.ac.jp/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

崔 琥 (CHOI HO)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：40512009

(2) 研究分担者

松川 和人 (MATSUKAWA KAZUTO)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：50709186

晋 沂雄 (JIN KIWOONG)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：60727006