

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01473

研究課題名(和文) 無補強組積造壁の面外損傷を考慮したRC架構の地震時応答と安全性評価手法の高度化

研究課題名(英文) Improvement of Safety Evaluation Method for Out-of-Plane Overturning of Unreinforced Masonry Infill Walls in RC Structures

研究代表者

中埜 良昭 (Nakano, Yoshiaki)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：10212094

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：無補強組積造壁を内蔵するRC造架構は、海外の建築物で多く見られる建築形式であり、過去の地震で甚大な被害を受けてきた。特に、当該壁が構面外へ転倒する事象は、人々がその下敷きとなって死傷する要因となり、人命や資産等へ与える影響が大きく、これまで多くの研究がなされてきているが、その破壊メカニズムの解明には至っていない。そこで本研究では、同種架構に静的に与えた面内変形をパラメータとした振動台実験を実施し、組積造壁が面外転倒へ至る要因を調査した。その結果、RC柱の塑性化に伴う軸方向伸びや、それに伴う梁と壁の境界部における摩擦力の喪失が、面外転倒を引き起こす要因であることを強く示唆する結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無補強組積造壁を含む鉄筋コンクリート造架構は日本を除く世界中で見られる建築様式であり、その面外転倒は、過去の地震時に多くの物的・人的被害を引き起こしてきた。本研究結果は、柱の塑性化に伴う軸伸び変形が骨組と組積造壁の一体性を低下させることで、組積造壁が面外転倒しやすくなることを新たに指摘するものである。そしてこの結果は、合理的な安全性評価手法や補強手法、設計手法や建設手法を提案するための大きな一助となるものである。

研究成果の概要(英文)：Reinforced concrete frames with unreinforced masonry infill walls are a common structural system found in buildings overseas and have exhibited significant damage in past earthquakes. In particular, their out-of-plane overturning has been a major cause of injury and death, posing substantial risks to human lives and property. In this research, shake table experiments were conducted on such frames with prior in-plane deformation applied statically to investigate its effect on the out-of-plane damage to the masonry infill walls. The results strongly suggest that axial elongation associated with the repeated large non-linear lateral displacement of RC columns and the resulting loss of frictional resistance due to the gap at the boundary between beam bottom and wall top are key factors causing out-of-plane failure.

研究分野：建築構造

キーワード：無補強組積造壁 鉄筋コンクリート 柱 面外転倒 面内損傷

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

無補強積造壁を内蔵する鉄筋コンクリート造架構（以下、URM+RC 架構と称する）は、海外の建築物で多く見られる建築形式であり、過去の地震で甚大な被害を受けてきた。特に、当該壁が構面外へ転倒する事象は、人々がその下敷きとなって死傷する要因となり、人命や資産等へ与える影響が大きく、これまで多くの研究がなされてきている。URM+RC 架構の構造的な性能に関する研究は、1) 構面内の地震力抵抗要素として期待することを主眼に置いた研究（面内）、2) 構面外方向への転倒現象を理解しそれを防止するための研究（面外）、3) 面内・面外の相互作用を評価するための研究、に大別される。本研究プロジェクトはこれらのうち2)に特に該当し、3)についても研究対象として考慮する。2)、3)に関する研究開始当初の研究動向としては、概ね以下のようなものであった。

- ・ 実大スケールに近く、かつ鉄筋コンクリート造架構の変形を許容した振動台実験がほとんど行われていない。
- ・ 地震時に面外方向転倒を生じるメカニズムや発生要因、面内損傷が面外転倒へ与える影響が明らかにされておらず、安全性を正しく評価する手法が存在しない。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、URM+RC 架構の地震時挙動を正しく把握するための振動台実験を実施し、それに基づく面外転倒メカニズムの把握、および安全性評価手法を提案することを目的として研究を行った。

### 3. 研究の方法

本研究では、図1に示す1層1スパンのURM+RC 架構試験体3体に対し、振動台実験を実施した。試験体の設計にあたってはURM+RC 架構が一般的な建築工法となっているバングラデシュ国の6層建物の6層部分を参考とし、スパンは2,900mm、階高は2,090mm、柱と梁の断面はそれぞれ250×250mmと250×330mm、梁に付帯するスラブ厚は130mmであり、ほぼ実大スケールである。柱主筋、梁主筋は4-D16（引張鉄筋比：柱で1.2%、梁で0.96%）、せん断補強筋はD10@125（せん断補強筋比は柱0.46%、梁0.36%）とした。壁体を構成する煉瓦は幅×奥行き×高さ＝210×100×60mmの密実な焼成煉瓦である。試験体3体のうち2体は事前に面内損傷を静的に与え、残りの1体については面内損傷を与えずに面外加振を行った。層間変形角1.0%の面内損傷を与えた試験体をSpecimen1、層間変形角0.4%の面内損傷を与えた試験体をSpecimen2、面内損傷を与えなかった試験体をSpecimen3と名付けた。なお、Specimen1を隅角部圧縮破壊（corner crushing 破壊）、Specimen2を滑りせん断破壊（sliding shear 破壊）とするよう当初計画していたため、Specimen2のみ壁体の高さ方向中央部に意図的に貧配合のモルタル層を作ったが、後述する通りSpecimen1もSpecimen2も壁体の高さ方向中央部で滑りせん断破壊を生じたため、貧配合モルタル層の影響は結果としてほとんど見られなかった。材料強度は、コンクリート圧縮強度が22.0MPa、鉄筋の降伏強度が372MPa（D16 SD345）、358MPa（D10 SD295）、煉瓦単体の圧縮強度は48.1MPa、モルタルの圧縮強度は15MPa、プリズム試験体の圧縮強度は31.9MPaであった。

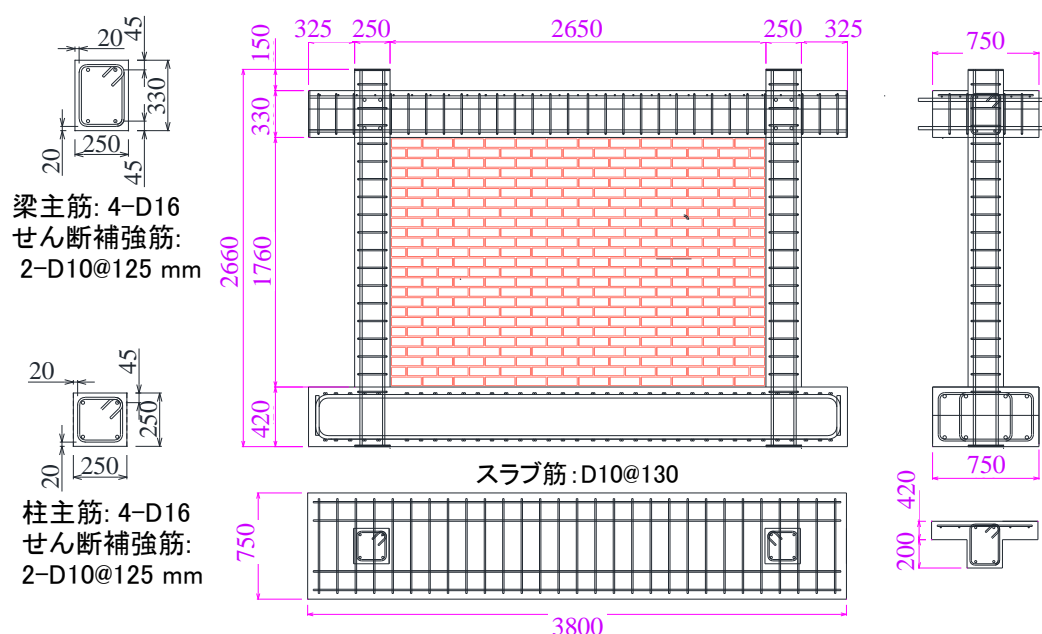


図1 試験体詳細図

図2に面内静的実験と面外振動実験のセットアップ図を示す。Specimen1と2については鉛直ジャッキにより一定軸力を柱に作用させた状態で水平アクチュエーターにより所定の最大層間変形角となるまで正負交番繰り返し载荷を行った。その後、試験体の残留変形がゼロになるまで水平アクチュエーターにより加力し、振動台へ設置した。Specimen3については面内実験を行わず、振動台へ設置した。

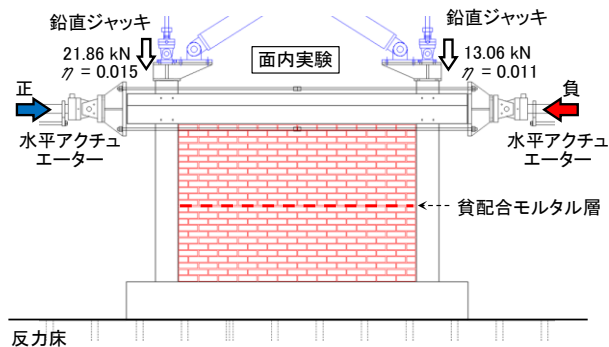


図2 試験体概要と面内実験時の加力セットアップ

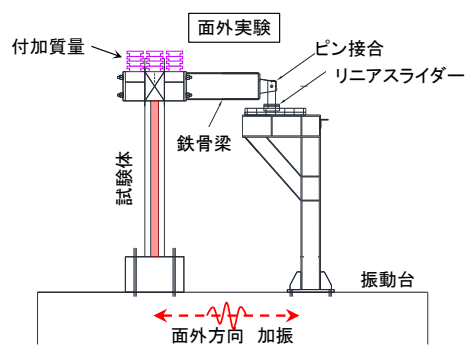


図3 面外振動実験時のセットアップ

面外振動実験における入力波について、本試験体がバングラデシュに立地する6層建築物の6層目を想定していることから、まずバングラデシュの建築基準 (BNBC2020) に規定されるダッカ市の設計用応答スペクトルに適合する模擬地震波を作成し、6質点系モデルへ入力した。その後、6質点系モデルの6層目の床応答を取り出し、試験体への入力波とした。なお、6質点系モデルへ入力した模擬地震波には、ダッカの設計用スペクトルと応答スペクトルの概形がよく似ている、1979年のImperial Valley地震で観測された地震波の位相特性を有するものを使用した。図4に、この決定過程の概略を示した。面外実験においては、ここで決定した床応答波形を100%の入力波として、正弦波掃引加振、30%、50%、75%、100%、125%、150%(1回目)、150%(2回目)、150%(3回目)…と無補強組積造壁が面外転倒するまで加振した。

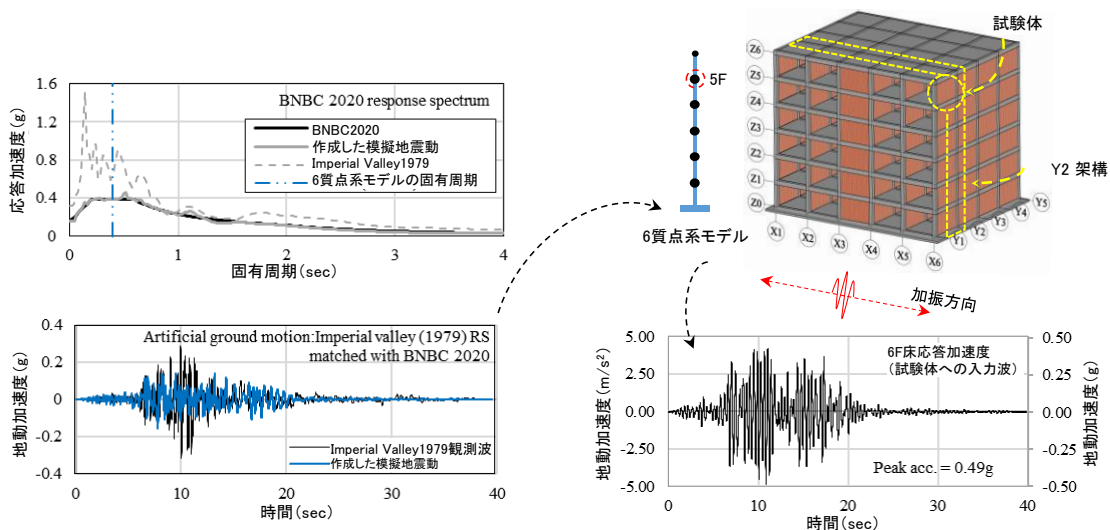


図4 試験体への入力波の決定過程

#### 4. 研究成果

##### (1) 面内静的実験の結果

Specimen1とSpecimen2は、それぞれ層間変形角1.0%と0.4%で加力を終了する。両試験体とも、層間変形角+0.1%の第1サイクル中に柱の曲げひび割れと壁中央部のモルタル層に水平ひび割れが発生した。-0.1%の1サイクル目ピーク時には、両供試体とも、壁中央部のモルタル層を貫く水平ひび割れが発生した。壁中央部の水平クラックは、滑りせん断破壊の兆候であった。±0.4%のサイクルでは、両試験体で柱の降伏が発生した。Specimen2は、層間変形角0.4%で载荷を終了したため、面内最大耐力に達しなかった。面内試験中のSpecimen2で計測した最大の水平力は、正側で136kN、負側で-133kNであった。Specimen1は±0.67%サイクル中に最大耐力に達し、正側で180kN、負側で-199kNであった。図5は、Specimen1と2の面内静的実験による荷重変形関係を示している。先述した通りSpecimen1では隅角部圧縮破壊を想定し、Specimen2では貧配合モルタル層での滑りせん断破壊を想定していた。しかし、どちらの供試体も滑りせん断破壊を生じ、貧配合モルタル層は破壊モードにほとんど影響しなかった。滑りせん断破壊に対応するURM壁を貫通する大きな水平ひび割れは、両供試体とも中央部のモルタル層(貧配合モルタル層と同様の位置)に生じた。図6は、両試験体のひび割れ図である。

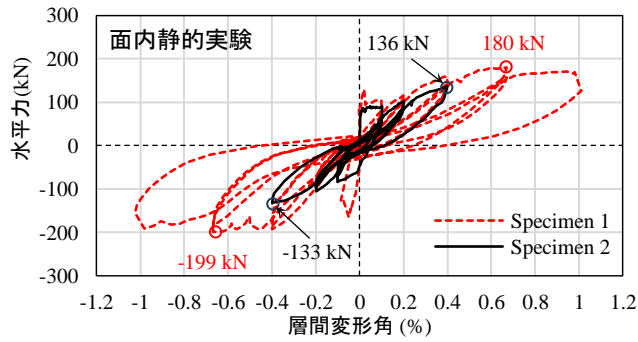


図 5 Specimen1 と 2 の荷重—変形関係

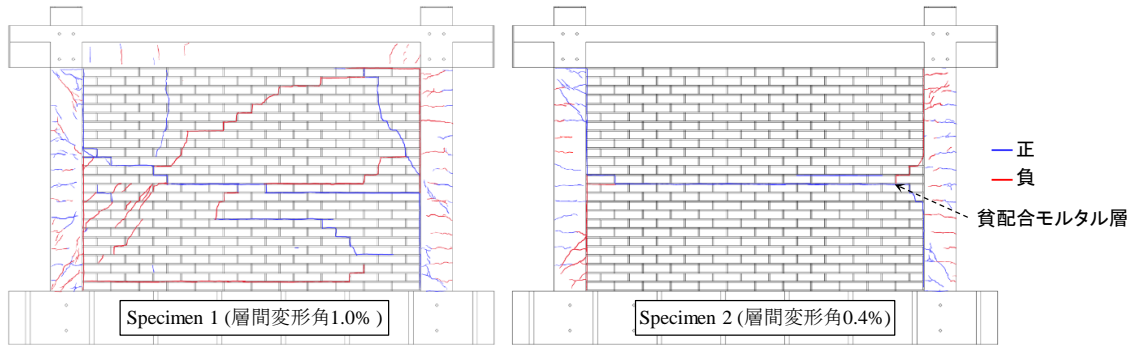


図 6 Specimen1 と 2 のひび割れ図

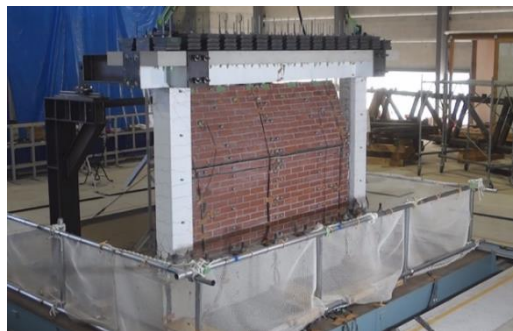
(2) 面外振動実験の結果

正弦波掃引加振の結果、Specimen1 の固有振動数は 3.5Hz、Specimen2 は 4.9Hz、Specimen3 は 6.5Hz であり、大きな面内変形を与えた試験体ほど固有振動数が小さくなる傾向が見られた。3 体の試験体の諸元は貧配合モルタル層を除けばほぼ同一であり、これらの違いは面内静的実験で受けた損傷による剛性低下の影響を受けている。

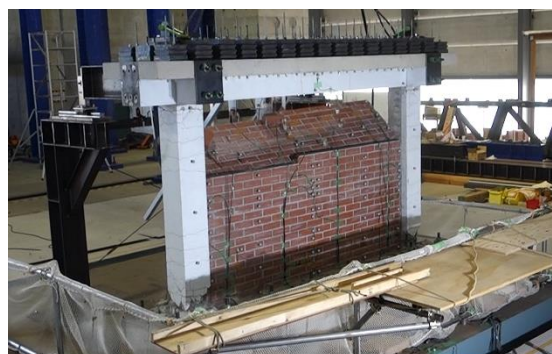
面外振動実験の結果、Specimen1 では 125%入力時に、Specimen2 では 150%(2 回目)入力時に、Specimen3 では 150%(3 回目)入力時に組積造壁が面外転倒を生じた。各試験体の面外転倒時の写真を図 7 に示した。同図から明らかなおとおり、面外転倒はどの試験体でも壁体のおよそ上半分から発生しており、壁体と梁の境界部における摩擦力が喪失し、転倒に至ったものと考えられる。



(a) Specimen1-125%



(b) Specimen2-150% (2)



(c) Specimen3-150% (3)

図 7 各試験体の面外転倒時の写真

Specimen3 の面外振動実験では、壁と梁の境界部の状況を確認するため、当該部を接写するカメラを設置した。図 8 は 150%(2 回目)加振前(左)と加振後(右)の動画からの切り抜きである。加振前と加振後を比較すると、加振後の境界部の隙間が加振前のそれより大きくなり、壁体の反対側にある照明の光が隙間から差し込んでいることが分かる。この隙間は柱の塑性化に伴う鉛直方向の伸びによって生じたものと考えられ、それにより壁頂部と梁下端の一体性が失われていることが確認された。Specimen3 はこの直後の 150% (3 回目) の加振中に面外転倒しており、柱の軸方向伸びやそれに伴う梁と壁の境界部における摩擦力の喪失が、面外転倒を引き起こす要因であることを強く示唆する結果である。このような現象の報告はこれまで行われてきた多くの既往研究の中でも管見の限り存在せず、本研究プロジェクトにおける一つの大きな成果である。



図 8 Specimen3 の 150%(2 回目)加振前(左)と加振後(右)の壁と梁の境界部の比較

面内と面外の相互作用について、面内で層間変形角 1.0%の変形を経験した Specimen1 が 125%で、同 0.4%を経験した Specimen2 が 150% (1 回目) で、面内変形を経験していない Specimen3 が 150% (2 回目) で面外転倒を生じ、経験した面内の層間変形角が大きい試験体ほど早期に面外転倒する傾向が見られた。先述した通り、面内層間変形角 0.4%のサイクルで鉄筋の降伏が発生しており、その後経験した面内の変形によっても柱の塑性化による軸伸び変形が生じるため、そのことが面外転倒を早期化させた要因の一つであると考えられる。

なお、当初の計画では数値解析モデルを作成して面内損傷の影響を考慮した面外挙動のシミュレーションと安全性評価手法の提案を実施する予定であったが、柱の軸伸び挙動を数値解析モデルで表現可能とすることは、本プロジェクト期間内では困難であったため、プロジェクト終了後も開発を続けていくこととした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Kazuto Matsukawa
2. 発表標題 Dynamic out-of-plane behavior of URM infill walls in RC frames with prior in-plane damage Part 1: Experimental plan
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 S M Naheed Adnan
2. 発表標題 Dynamic out-of-plane behavior of URM infill walls in RC frames with prior in-plane damage Part 2: Experimental results
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松川 和人  (Matsukawa Kazuto)  (50709186)	東京大学・生産技術研究所・助教   (12601)	
研究分担者	浅井 竜也  (Asai Tatsuya)  (90815846)	東京大学・生産技術研究所・准教授   (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------