

【研究ノート】

## 煉瓦壁を有する建物の地震時室内被害擬似体験システムの構築

平井敬<sup>1</sup>，阪本真由美<sup>2</sup>，清水克彰<sup>3</sup>，宇田晃<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科，准教授 博士（工学）

<sup>2</sup> 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科，教授 博士（情報学）

<sup>3</sup> 有限会社アシストコム

鉄筋コンクリート造躯体と煉瓦壁を有する建物を対象に，地震時の建物応答と室内被害を擬似体験することができるシステムを開発した．トルコでの防災教育への活用を念頭に，2023年のカフラマンマラシュ地震の強震記録を用いて実装した．これは，著者らが構築してきた地震動による建物の揺れと家具の動きをVR技術により可視化するシステムに対して，新たに煉瓦壁の崩落を表現できるようにしたものである．

キーワード：建物応答，家具転倒，仮想現実，可視化，カフラマンマラシュ地震

### 1. はじめに

2023年2月6日にトルコ南部のカフラマンマラシュ地域で発生した地震（以下，カフラマンマラシュ地震と呼ぶ）では，甚大な建物被害が発生した．鉄筋コンクリート(RC)造の建物においては，柱・梁の躯体が形を保ったまま転倒したものや，あるいは躯体が立った状態のまま残っているものであっても，壁が崩れ落ちた例が存在していた<sup>1)</sup>．こうした被害の様相は，RC造と煉瓦壁の組合せによるものであり，近年の日本においてはほとんどみられない．

著者らは，仮想現実(VR)技術により地震時の建物室内被害を擬似体験するシステムを構築してきた<sup>2),3)</sup>．しかし，これまでは家具転倒の可視化を主軸としており，壁の崩落は表現していなかった．

本研究では，RC造躯体に煉瓦壁を組み合わせた建物を想定し，地震時の建物応答と壁の崩落を含む室内被害を可視化するシステムを開発した．これにより，煉瓦壁を有する建物の地震時室内被害を擬似体験することが可能となり，トルコを含めそうした建物が多い国や地域での防災啓発に用いることが可能になると考えられる．なお，本論文は著者らによる日本建築学会2025年度大会での発表内容<sup>4)</sup>をもとに改良を加え，再構成したものである．

## 2. システムの構成

システムへ入力する情報は、地震動の3軸方向の加速度波形、建物の総階数、および室内被害を可視化するフロアとした。これらをもとにフロアの揺れと室内被害の映像を生成する。PC やスマートフォンの画面で視線の向きを変えながら映像を視聴できる VR システムのほか、YouTube などの動画共有サイトで視聴できる 360 度動画としても出力できるものとした。

処理の流れとしては、第1段階で入力情報から建物の振動モデルを構築し、地震動に対する対象フロアの応答波形を算出する。第2段階で、あらかじめ配置しておいた家具の動きと壁の崩落を計算する。カフラムンマラシュ地震では煉瓦壁を有する建物の被害程度は様々であり、転倒や倒壊に至ったものもある。しかし、そうした終局時の建物の挙動を簡易に計算することはできないため、本研究では構造躯体を残したまま煉瓦壁が崩落する状況を表現することとした。

## 3. 建物応答の計算

建物の振動モデルの構築と地震応答の計算については、これまでの建物応答可視化システム<sup>2),3)</sup>と同様の方法を用いた。ここでは、概要のみ記載する。

まず、システムへ入力された建物の総階数  $n$  から1次固有振動数を概算し、 $n$  質点剪断振動モデルを作成する。逆三角形の1次固有振動モードを持つものとして質量行列・減衰行列・剛性行列を設定し、地動加速度入力に対する水平成分の絶対加速度応答を計算する。上下成分については、地動からの増幅はないとする。次に、可視化フロアの絶対加速度応答を2階時間積分することで絶対変位応答を算出し、これを家具転倒および煉瓦壁の崩落の計算への入力とする。ここで、強震記録に含まれるごく低振動数のノイズ成分の影響による変位の発散を防ぐため、遮断振動数 0.05 Hz のハイパスフィルターを併用している。

## 4. 壁の崩落を含む室内被害の可視化

フロアの揺れに対する家具の挙動は、それぞれのオブジェクトに形状・質量・摩擦係数・反発係数を設定して個別要素法により計算している。

煉瓦壁の崩落挙動については、原理的には、壁を多数の煉瓦の集合体として表現し、柱・梁から伝わる地震力により煉瓦相互間の固着が破壊された後は家具転倒と同様の個別要素法の取り扱いを適用すれば良いと考えられる。しかし、この方法は煉瓦の固着に関するパラメータの扱いが難しく、また計算負荷の観点で実用的ではない。そこで、空間に固定された仮想的な球体を部屋の中央に置き、これと壁が衝突したときに当該部分の煉瓦の固着を解除することとした。崩落後の煉瓦の動きは、通常の個別要素法の計算により取り扱っている。

## 5. システムの実装

本研究では、トルコでの防災啓発に用いることを念頭にシステムを実装した。入力地震動にはカフ

ラマンマラシュ地震（現地時間午前4時17分頃に発生した  $M_w$  7.8 の地震）による強震記録のうち、日本の計測震度を適用して 6.0 以上であった 15 か所を選択可能とした。室内の壁や床、家具のデザインはトルコの一般住家の写真を参考にした。

図 1 に操作画面を示す。表記はトルコ語である。画面左側の地図から強震記録を選ぶ。図 1 は専門家向け(Profesyoneller için)に 1 次モードの固有周期と減衰定数を直接入力する画面であるが、一般向け(Genel Halk için)に建物階数と可視化フロアのみを入力することもできる。その場合、固有周期は建物階数から概算する。図 2 に、一例としてカフラマンマラシュ県パザルジュク（観測点コード 4615）の観測点における加速度記録と、これをもとに計算した建物 12 階床の絶対変位応答波形を示す。ここでは、建物の 1 次モードの固有周期を 1.0 s、減衰定数を 10% とした。図 3 と図 4 に地震前後の室内の様子を示す。右下には当該フロアの絶対応答変位波形が描画されている。揺れにより家具が移動・転倒するとともに、壁の一部が崩落して煉瓦が散乱した様子が表現されている。



図 1 操作画面

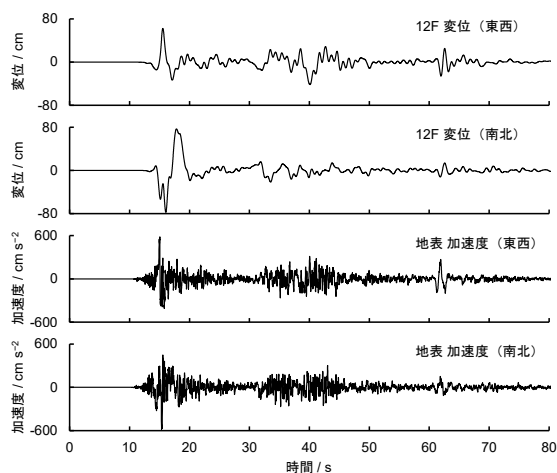


図 2 加速度・変位波形の例



図 3 地震前の室内の様子



図 4 地震後の室内の様子

## 6. まとめ・今後の課題

RC 造躯体に煉瓦壁を組み合わせた建物を想定し、地震時の建物応答と壁の崩落を含む室内被害を可視化するシステムを開発した。トルコでの防災教育への活用を念頭に、カフラマンマラシュ地震の強

震記録を用いて実装した。

現状、壁を構成する煉瓦の固着を解除する基準として、衝突判定用の仮想的な球体を空間に固定する方法を取っている。この方法による壁の崩落の表現の力学的な妥当性については、検討の余地がある。また、壁の崩落位置のランダム性の表現などは、今後の課題である。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、SATREPS「災害に強い社会を發展させるためのトルコにおける研究と教育の複合体の構築—マルテスト」(代表：金田義行)の助成を受けた。強震記録は、トルコ災害緊急事態対策庁(AFAD)によるものを使用した。また、中東工科大学の Aysegul Askan 教授、ゲブゼ工科大学の Selçuk Toprak 教授より助言をいただいた。それぞれ、感謝の意を表す。

なお、VR技術による室内映像は、名古屋大学減災連携研究センター・有限会社アシストコム・著者の共同発案による「地震時建物応答可視化システム」をもとに機能拡張したものである。

## 参考文献

- 1) 楠浩一：2023年トルコ・シリア地震被害調査，日本地震工学会誌，No. 50, pp. 19–22, 2023.
- 2) 福井優太，倉田和己，平井敬，福和伸夫：仮想現実技術と振動台を組み合わせた超高層建物の地震応答体験環境の構築，日本建築学会大会学術講演梗概集 2017 構造Ⅱ，pp. 407–408, 2017.
- 3) 平井敬：任意地点・任意建物に対応した地震時建物応答体験システムの構築，日本建築学会大会学術講演梗概集 2024 構造Ⅱ，pp. 295–296, 2024.
- 4) 平井敬，清水克彰，宇田晃：煉瓦壁を有する建物の地震時室内被害可視化システムの開発，日本建築学会大会学術講演梗概集 2025 構造Ⅱ，pp. 175–176, 2025.

Note:

## **Development of Pseudo Experience System for Interior Damage Caused by Earthquake in Building with Brick Walls**

Takashi Hirai<sup>1</sup>, Mayumi Sakamoto<sup>2</sup>, Katsuaki Shimizu<sup>3</sup>, Akira Uda<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Disaster Resilience and Governance, University of Hyogo, Associate Professor, Ph. D.

<sup>2</sup> Graduate School of Disaster Resilience and Governance, University of Hyogo, Professor, Ph. D.

<sup>3</sup> Assistcom Co., Ltd.

### **Abstract**

The authors developed a system to simulate building response and interior damage during earthquakes for buildings with RC frames and brick walls. The system was implemented using strong-motion records of the 2023 Kahramanmaraş earthquake for use in disaster mitigation education in Turkey. It expands our existing VR system visualizing the building response and furniture movement by adding the expression of collapse of brick walls.

Keywords: Building response, Furniture movement, Virtual reality, Visualization, Kahramanmaraş earthquake