

非構造部材を含む建物の統合的 FEA-VR システムの開発

正会員 ○磯部 大吾郎 1*
同 楊 全宜 2**

非構造部材 建物 地震応答解析
有限要素法 VR システム ASI-Gauss 法

1. 緒言

地震時には、建物が無事であっても家具が転倒して人々がその下敷きとなったり、室内が散乱することで避難が遅れてしまったりするなど、居住者に対する被害が大きくなる場合がある。先行研究[1]では、同一種類の家具でも、設置する階数によってその挙動が異なることが数値解析上で確認された。本研究では、建物内に家具や天井などの非構造部材を設置した統合モデルを用いて有限要素解析 (FEA, Finite Element Analysis) を実施し、その結果を投影し、地震発生時の建物各階層の室内挙動を体験できる VR (仮想現実) シミュレータを開発することを目的とする。10 層 RC 造建物を模擬したモデルと家具・天井モデルを作成し、ペナルティ接触理論に基づいた接触アルゴリズムと RC 構成則を導入した ASI-Gauss 法[2]に基づく解析プログラムを用いて地震応答解析を実施した。さらに、VR 用の 3D モデルを作成し、3D 環境の中に解析結果を再現することで地震発生時の室内を仮想的に体験できる VR シミュレータを開発した。

2. 解析モデル

E ディフェンスでの実験[3]で用いられた 10 層 RC 造建物の設計図に基づき、図 1 に示す建物の解析モデルを作成した。全高 25.75 m、幅 12 m、奥行 8 m であり、1 階から 7 階まで耐震壁が設置されている。モデルの節点数は 718、

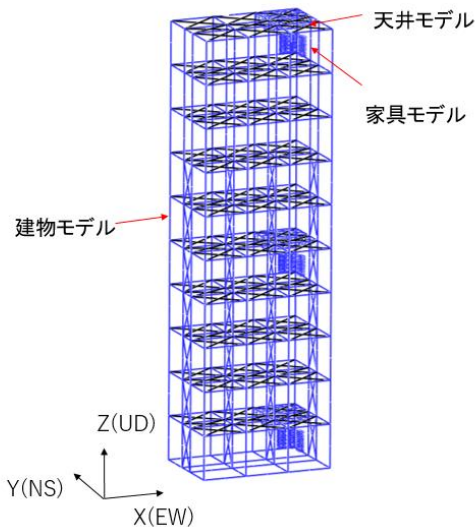


図 1 建物と非構造部材の統合解析モデル

要素数は 1320 である。解析モデルの材料・断面情報については、設計図に記載された情報を元に必要なデータを算出し使用した。

次に、3 種類の家具の解析モデルを作成した。全ての家具を線形 Timoshenko はり要素でモデル化し、接触面でのすり抜けを防ぐためにその接触面は細かく分割した。家具の重心と内容物の重量については、部材密度を調整することにより表現した。家具の接触は、ペナルティ接触理論に基づきペナルティ力と動摩擦力を接触要素の各節点に与えることで表現している。要素どうしが相対速度 $\boldsymbol{v}$ で接触した場合、要素に対して次式に示すペナルティ力 $\boldsymbol{F}_p$ および動摩擦力 $\boldsymbol{F}_D$ が作用する。

$$\boldsymbol{F}_p = \alpha \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\boldsymbol{n}}{\|\boldsymbol{n}\|} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{F}_D = \boldsymbol{F}_T + \boldsymbol{F}_N \tag{2}$$

$$\boldsymbol{F}_T = -\mu \alpha \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\boldsymbol{v}_T}{\|\boldsymbol{v}\|} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{F}_N = -D_c \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\boldsymbol{v}_N}{\|\boldsymbol{v}\|} \tag{4}$$

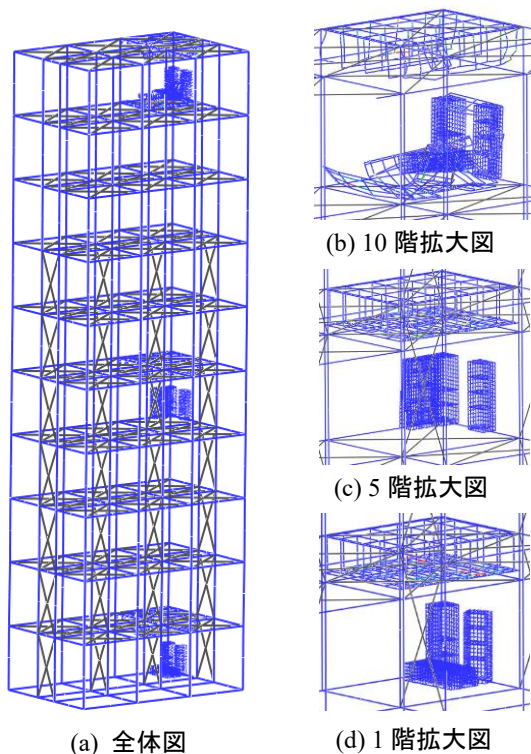
ここで、 L は両要素幅の平均値、 l は両要素軸間距離、 α はペナルティ係数 (対象物の重量[kgf])、 q はペナルティ指数 (=1.0)、 μ は動摩擦係数 (最大静止摩擦係数の 0.8 倍)、

表 1 家具モデルの諸元

家具の種類	幅 [mm]	奥行 [mm]	高さ [mm]	α [kgf]	q	D_c	μ	
							短辺 方向	長辺 方向
棚	600	417	1800	157.0	1	188.4	0.39	0.39
冷蔵庫	590	645	1790	70.0		84	0.18	0.40
多目的棚	900	440	1800	107.0		128.4	0.34	0.42

表 2 天井モデルの脱落条件

接合金具の種類	脱落条件
クリップ	引張力 $\geq 0.35 \text{ kN} \times 1.2$ (安全係数)
ハンガー	引張力 $\geq 2.80 \text{ kN}$
ビス	引張力 $\geq 0.40 \text{ kN}$ & 軸方向変位 $\geq 3.0 \text{ mm}$
	せん断力 $\geq 0.30 \text{ kN}$ & せん断方向変位 $\geq 18.0 \text{ mm}$
野縁ジョイント	軸方向長さ $\geq 42.5 \text{ mm}$ (引抜き剛性 7.5 N/mm)



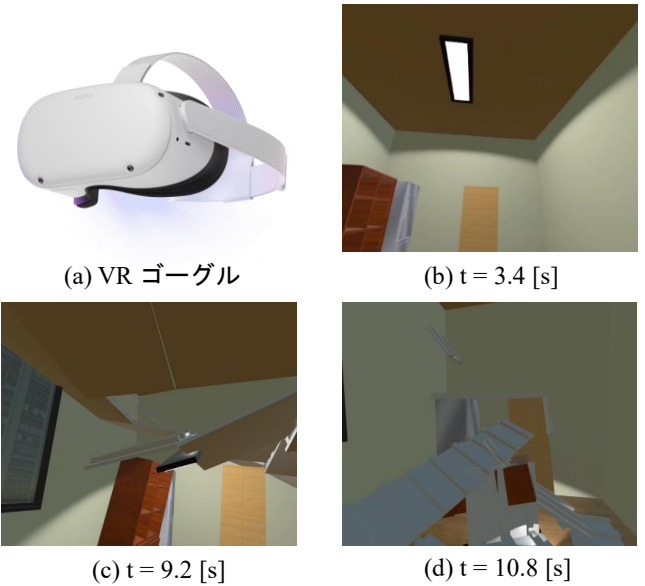
(a) 全体図 (b) 10 階拡大図 (c) 5 階拡大図 (d) 1 階拡大図
図 2 統合解析モデルによる解析結果

D_c は減衰に関する定数 (α の 1.2 倍) である。それぞれの家具モデルの寸法および接触パラメータを表 1 に示す。

さらに、本研究では仕上げ材、野縁、野縁受け、吊りボルト、クリップ、ハンガー、野縁ジョイント、ビスなどによって構成される吊り天井を線形 Timoshenko はり要素でモデル化した。部材の断面データは、JIS 天井地下材 19 形の標準データを使用して算出した。吊りボルトは座屈を再現可能とするために 8 要素に分割し、クリップは二又状に 2 部材でモデル化した。公共建築工事標準仕様書[4]に従い、石膏ボードの重量は 1 平方メートルあたり 10 kg とし、吊りボルト、野縁受け、野縁および石膏ボードを仕様書に従って配置した。天井モデルに使用した接合金具の脱落条件を表 2 に示す。以上のモデルを図 1 に示すように解析モデルとして統合した。

3. 解析結果および VR システムによる可視化

1995 年 JMA 神戸波を図 1 の解析モデルの支持点に入力した結果、図 2 に示すように加速度応答が最大値をとる 10 階の室内が最も深刻な被害を受け、天井が完全に落下し、家具も転倒することが確認された。天井は、最初に照明器具設置位置のクリップから脱落が始まり、他の箇所に脱落が伝播した後、完全に崩落した。一方、5 階の室内では天井構造材に多くの塑性変形が発生したが、崩落は起きなかった。また、家具も多少揺れたのみであった。1 階の室内では、天井構造材の塑性変形が最も少なかったが、



(a) VR ゴーグル (b) $t = 3.4$ [s] (c) $t = 9.2$ [s] (d) $t = 10.8$ [s]
図 3 VR ゴーグル内から見た 10 階室内の様子

家具に移動や揺れが生じ、その中の 1 つが転倒した。

VR システム用の 3D モデルは、実物の写真と寸法を使用し、その外観と同じになるように Blender[5]を用いて作成し、照明器具の位置には円錐状に拡散する光線を発する光源を配置した。図 3 に Unity[6]を用いて VR ゴーグル (Oculus Quest 2) 内に 10 階における解析結果を投影した画像を示す。

4. 結言

本研究では、ASI-Gauss 法を用いて建物-非構造部材モデルを統合的に解析し、任意の視点から見た室内の様子を仮想的に体験できる VR システムを開発した。

謝辞

本研究は、公益財団法人鹿島学術振興財団一般研究助成金による援助を得て実施した。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] 三浦 他, RC 造建物内に配置した耐震家具の地震時挙動解析, 日本計算工学会論文集, 2018 巻, 2 号, p. 20182005, 2018.
- [2] 磯部, はり要素で解く構造動力学: 建物の崩壊解析からロボット機構の制御まで Fortran90・C++ソースコード付, 丸善出版, 2020.
- [3] 福山 他, E-ディフェンスを用いた 10 階建て鉄筋コンクリート造建物 (2015) の三次元振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 分冊, p.865, 2016.
- [4] 公共建築工事標準仕様書 (建築工事編) 令和 4 年版.
- [5] <https://www.blender.org/>
- [6] <https://unity.com/>

*筑波大学 1

**筑波大学大学院 2

*University of Tsukuba 1

**Graduate School, University of Tsukuba 2