

室内における非構造部材の地震時挙動を再現する VR システムの構築

Numerical Analysis and VR Visualization for the Motion of Nonstructural Components under Seismic Excitation

○学 Yan Meng^{*1}, 正 磯部大吾郎^{*2}

Yan Meng^{*1}, Daigoro ISOBE^{*2}

^{*1} 筑波大学大学院 Graduate School, University of Tsukuba

^{*2} 筑波大学 University of Tsukuba

Improperly secured nonstructural components, especially on the upper floors of high-rise buildings subjected under long-period ground motion, can prove dangerous to human life. The fallen items such as furniture, ceilings and lighting fixtures could become fatal obstacles that prevent efficient evacuation. To alleviate this problem, devices to prevent furniture from overturning were designed. However, a low proportion of installation of these devices shows that people have insufficient awareness of earthquake risks. In this study, a VR system was developed to reproduce the motion of furniture, ceilings and lighting fixtures under seismic excitation simulated by the ASI-Gauss code. The developed VR is more realistic than traditional numerical simulation model in order to enhance residents' awareness of earthquake risks.

Key Words : Earthquake risk, Motion analysis, Nonstructural components, ASI-Gauss code, VR visualization

1. 緒 言

長周期地震動が発生した場合には、建物内の非構造部材の転倒や散乱によって避難が遅くなり、多くの人が室内で怪我を負うことが危惧される。特に高層建築物内での人身への直接的な被害がさらに多くなることが予想される。一般的に家具などの転倒解析には個別要素法 (Distinct Element Method, DEM) ⁽¹⁾が適用され、多くの研究が行われている⁽²⁾が、DEMでは家具を剛体として扱うために、それらが壁や床面、人身などと接触する際の変形や応力変化などについて検証することは困難である。また、東京消防庁の地震に対する意識のアンケート結果⁽³⁾によると、多くの人が地震対策に対する意識が低いことが分かる。本研究は、室内の家具や天井などの非構造部材の挙動をシミュレーション可能とし、人的被害評価および避難経路策定に適用できる解析システムを構築することを目的とする。そのメインフレームには、応力や変形を評価可能な有限要素法に基づき開発され、非構造部材の動的挙動解析において低コストかつ高精度な解析が実施できることが確認されている ASI-Gauss 解析コード⁽⁴⁾を適用する。さらに、解析結果を仮想空間 (VR) に映し出す VR 可視化システムを構築し、人々の防災・減災意識の啓蒙に活かす強力なツールを生み出すことを最終的な目標とする。

2. 室内における非構造部材の数値解析モデル

室内における非構造部材は天井、照明器具、家具などがある。本研究では、照明器具付吊り天井と家具の数値解析モデルを個別に構築した。照明器具付吊り天井の解析モデルを図1に示す。モデルの全要素数は1,216、全節点数は1,013である。照明器具および吊り天井を全て線形チモシェンコはり要素でモデル化した。天井の下地材は吊りボルト、野縁受け、野縁、石膏ボード (仕上げ材) で構成されている。それぞれはクリップ、ハンガー、ビス、野縁ジョイントによって接合される。ここで、クリップは野縁受けと野縁、ハンガーは吊りボルトと野縁受け、ビスは野縁と石膏ボード、野縁ジョイントは野縁同士を接合する。壁と仕上げ材の衝突を表現するために、仕上げ材との隙間には2 mmのクリアランスを設けている。次に、家具の解析モデルを図2に示す。モデルの全要素数は6,041、全節点数は4,574である。全ての家具を線形チモシェンコはり要素でモデル化した。また、本研究で用いる接触アルゴリズムでは、家具を粗く要素分割すると家具間で接触判定されず、すり抜けてしまう可能性がある。そのため、家具は一定の長さで要素分割している。分割した要素の長さは家具の部材幅 (50mm) と同

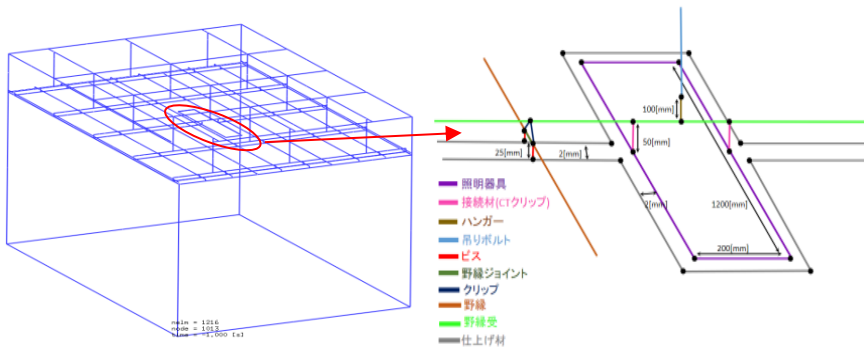


Fig. 1 Numerical model of ceiling and lighting

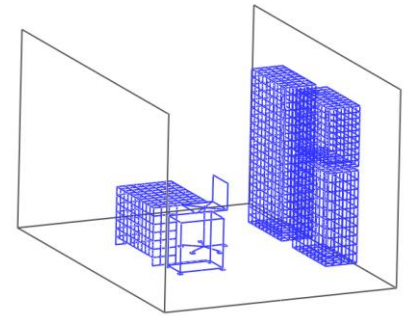


Fig. 2 Numerical model of furniture

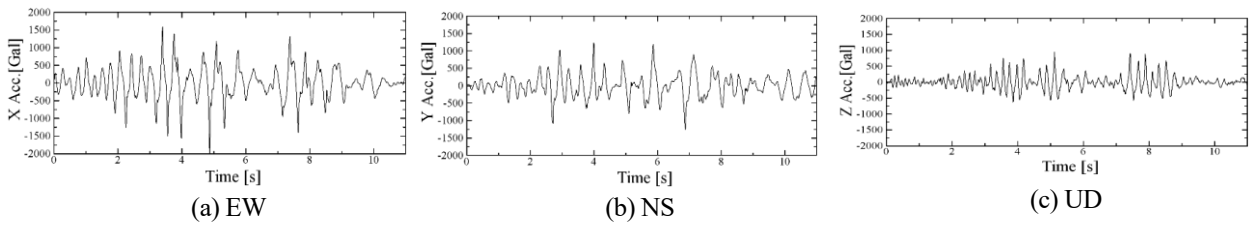


Fig. 3 Seismic wave

Table 1 Fracture conditions of connecting joints⁽⁵⁾

Item	Conditions
Clip	Single ceiling joist (front type): Tensile strength ≥ 0.35 kN
	Single ceiling joist (back type): Tensile strength ≥ 0.70 kN
	Double ceiling joist: Tensile strength ≥ 0.80 kN
Hanger	Tensile strength ≥ 2.80 kN
Screw	Tensile strength ≥ 0.40 kN and axial direction displacement ≥ 3.0 mm
	Shear force ≥ 0.30 kN and shear direction displacement ≥ 18.0 mm
Ceiling joist	Tensile strength ≥ 0.56 kN

じ値に設定し、背の高い棚、二段に重ねた棚（上段）、二段に重ねた棚（下段）、机、椅子、ラックを各々モデル化した。なお、椅子とラックにはキャスターが取り付けられているため、動摩擦係数を低く設定し滑りを表現した。

3. 室内における非構造部材の地震時挙動解析

3・1 解析条件

地震波としては、図3に示す Kik-net 芳賀波 100%を3軸方向に入力した。時間増分を0.001 s、解析時間を12.6 sとした。接合金具の脱落条件には、表1に示す接合金具の要素実験に基づく脱落荷重・変位を使用した⁽⁶⁾。

3・2 解析結果

解析で得られた天井の脱落と家具の転倒の様子を図4に示す。天井の解析では、0.6 s付近で天井と壁が衝突し始め、それによって生じる衝撃波の伝播によって壁際のクリップが脱落した。その後、脱落したクリップが支持していた荷重が周囲のクリップと野縁ジョイントに再分配され、最終的に仕上げ材が落下する様子が確認された。家具の解析では、背の高い棚は滑りながらロッキング振動を起こし、転倒に至った。ここでロッキング振動とは、床との接地箇所を支点として前後左右に倒れるようなモードの振動を指す。積み重ねられた二つの棚は、それぞれ

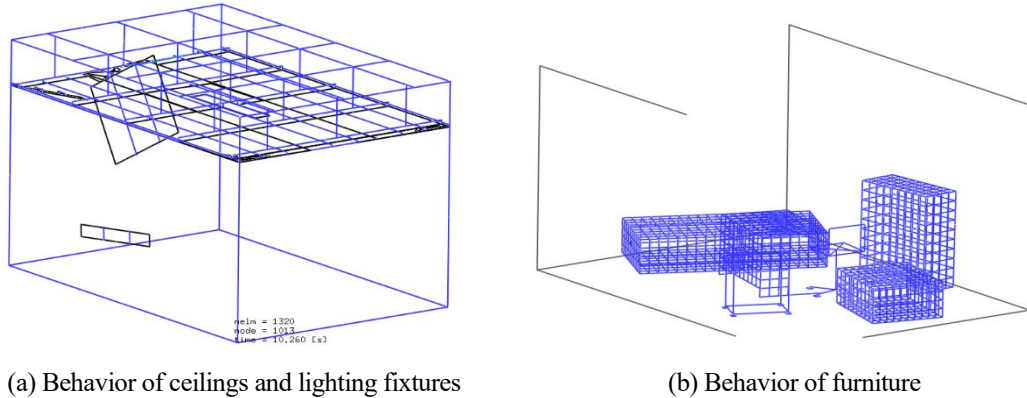


Fig. 4 Numerical results

れが滑りやロッキング振動を起こしたが、転倒したのは上段の棚のみであった。キャスターが取り付けられている椅子とラックについては、大きく移動するのみで転倒はしなかった。

4. VR システムの構築

4・1 VR システム構築の意義

VR 技術を用いることの利点の一つは、シミュレーションされたものを高い臨場感で提示できる点である。本研究の背景として、家具転倒対策の実施率を向上させることにある。人々が転倒対策を実施しない理由で多くを占めるものは、「大きな地震が起きるとは思っていなかったから」と「必要性は感じているが面倒」であり、地震リスクの認知が不足していることが分かる。一方、地震発生後の居間の様子を視覚的に把握することができれば、対策を促進する上でより効果的である。言い換えると、大地震が発生する前にどの家具が転倒し、家のどの部分のリスクが高いかをはっきり認識できれば、人々に家具の転倒対策を促すことが容易になる。そこで、より現実感のある状況を短時間で仮想空間に映し出すシステムを構築し、人々の防災・減災意識の啓蒙に活かす強力なツールとして提供することは重要である。

4・2 VR システムによる再現結果

ASI-Gauss 法の解析結果から、3dsMax ソフトウェアを使用して VR 用の 3D モデルを作成した。モデルのレンダリングには、光の反射や屈折などの光学現象を物理法則に従って厳密に数式で表現する Physical Based Rendering (PBR)を用いる。VR 用の 3D アニメーションは、統合開発環境を内蔵したゲームエンジンである Unity を用いて作成した。Unity 内で 3D の物体を可視化するには、物体のスケール、中心位置、回転角の情報を必要とする。これらの情報は、物体を構成する解析モデルの節点から同一平面上に存在しないものを 3 点選び、それらの座標値を用いて計算する。構築したモデルを図 5 に示す。ASI-Gauss 法の解析結果から非構造部材の座標値を抽出し、

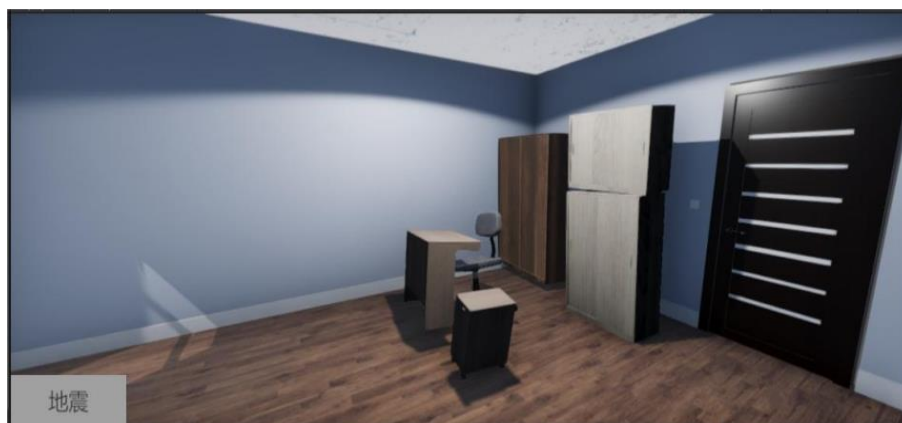


Fig. 5 Constructed VR model

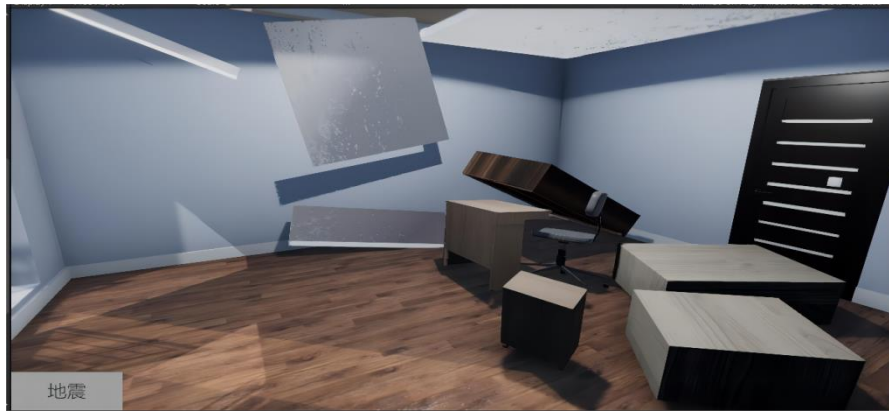


Fig. 6 VR visualization result

VR モデルの作成に用いた。VR モデルで再現した物体の挙動の様子を図 6 に示す。VR モデルの使用により、非構造部材の挙動を十分リアルに再現できた。

5. 結 言

本研究は、ASI-Gauss 法を用いて室内の家具や天井などの非構造部材の挙動をシミュレート可能とし、人的被害評価に適用できる解析システムを構築した。本解析システムにより、非構造部材の挙動を定性的に見ることができ、室内被害の予測や評価に役立てることが可能と考えられる。さらに、VR 技術の適用による数値解析結果の VR 可視化を行った。ASI-Gauss 法の解析結果から VR 用の三次元モデルを作成し、非構造部材の挙動を再現した。今後は、家具や天井などの非構造部材の挙動を統合的に解析するシステムの構築と VR 化を目指す。

文 献

- (1) Cundall PA, Computer Model for Simulating Progressive, Large-scale Movement in Blocky Rock System, Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics II-8, 1971, pp. 129-136.
- (2) 村田 晶他, 石灯籠の地震応答特性に関する振動台実験と 3 次元個別要素法による解析的検討, 土木学会論文集 A1, 69 巻 4 号, 2013, p.I_965-I_972.
- (3) 東京消防庁, 「室内被害の実態調査結果」, <http://www.tfd.metro.tokyo.jp/hp-bousaika/report/2018/03/index.html>.
- (4) 磯部 大吾郎, 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, ISBN:978-4-621-30544-7, 2020.
- (5) 佐々木 智大 他, 大規模空間吊り天井の脱落被害メカニズム解明のための E-ディフェンス加振実験報告書 — 大規模空間吊り天井の脱落被害再現実験および耐震吊り天井の耐震余裕度検証実験 —, 2015.2.