

建物と家具の統合モデルを用いたEPS緩衝材による 棟間衝突被害低減効果の評価

Evaluation on Seismic Pounding Damage Reduction Effect of EPS Cushioning Material
Using Integrated Model of Building and Furniture

古谷野真輝¹⁾, 磯部大吾郎²⁾

Masaki Koyano and Daigoro Isobe

1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: koyano.masaki.ay@alumni.tsukuba.ac.jp)

2) 博(工) 筑波大学 教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

In this research, the effect of two types of EPS cushioning materials with different foam ratio and thicknesses in reducing seismic pounding damage was verified by conducting seismic pounding analysis using an integrated model of building and furniture. As a result, it was clarified that overturning behavior of furniture was different when different EPS cushioning materials were installed. It was also shown that the acceleration response was more suppressed when the EPS cushioning material was deformed to the plateau region, compared to the case when the deformation remained in the elastic region. On the other hand, the yielded ratio was suppressed in the low-rise model, but was increased in the high-rise model.

Key Words: Seismic pounding analysis, EPS material, Furniture, ASI-Gauss code

1. 序論

日本は世界有数の地震大国であり、近い将来に南海トラフ巨大地震や首都直下型地震といった大規模地震が起ることが予想されている。日本の都市部では、大小様々なビルが極めて短い間隔で立ち並んでおり(図-1)、それぞれのビルが異なる固有周期を持つため、異なる揺れ方をする。地震発生時には、これらのビル同士が棟間衝突を起こし、構造部材や内部の什器に対し、大きな被害が生じる可能性が指摘されている。

隣接した建物の棟間衝突による被害を抑制する方法の一つとして、EPS (Expanded Polystyrene) と呼ばれる発泡材を緩衝材としてビルの側面に設置することが検討されており、棟間衝突によって発生する被害を抑制できることが先行研究[1]で示されている。しかし、棟間衝突が発生した場合にビル内の什器類がどのような挙動を示すかについては不明であり、EPS材の棟間衝突被害低減効果を評価する上で、地震動と衝突による建物内の家具への影響を調査することは重要である。

本研究では、EPS材の材料特性を考慮した上で、EPS緩衝材を側面に設置した2棟の高さの異なる隣接した中高層ビルと家具をはり要素でモデル化し、それらを統合的に解析することができる有限要素解析プログラムを開発することで、棟間衝突解析を行った。そして、各建物の応答加速度、塑性化率(全柱・梁の要素数に対する塑性化した要素の割合)、家具の転倒挙動についてEPS緩衝材の有無、EPS緩衝材の厚さと発泡倍率を変更した場合で比較し、その衝撃緩和効果を評価した。有限要素解析手法には、衝突解析において実績があり、最小限の要素分割で骨組構造物の挙動を解くことができる、ASI-Gauss法[2]を用いた。



図-1 隣接したビルの様子
(東京・銀座一丁目)

2. EPS材のモデル化

EPS材は弾性領域では線形的な応力変化が起きるが、プラトー領域では非線形的な応力変化が起きる。本研究では、EPS材の準静的一軸圧縮試験結果(積水化成工業(株)提供)に基づき、発泡倍率ごとにひずみと弾性係数を対応させたデータベースを作成し、除荷時のひずみ値に応じてデータベースを参照し、逐次的に弾性係数を更新する。これにより、プラトー領域における応力-ひずみ関係を表現した。

また、EPS材のひずみ速度依存性は、解析中に計算されたひずみ速度に応じて降伏応力を変化させることで表現する。本研究では、次式に示すCowper-Symondsの式[3]を用いて降伏応力を計算した。

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{q}} \quad (1)$$

ここで、 σ_0 は準静的圧縮時の降伏応力、 D と q は材料固有の係数である。本研究では、準静的圧縮時の降伏応力として、発泡倍率33倍のEPS材をひずみ速度0.001667 [1/s]で一軸圧縮試験を行った際の結果を用い、 $D = 9.3555$ 、 $q = 2.2019$ と決定した。

さらに、ひずみ履歴特性については、発泡倍率33倍のEPS材に対する一軸繰返し載荷試験結果をもとに、除荷時のひずみ量に依存する再載荷時の弾性係数の近似式を構築し用いた。構築した近似式を以下に示す。

$$\frac{E}{E_0} = -8.7603\varepsilon_{ul}^3 + 11.65\varepsilon_{ul}^2 - 5.3334\varepsilon_{ul} + 1.1591 \quad (2)$$

ここで、 E_0 は初期弾性係数、 ε_{ul} は除荷時のひずみである。プラトー領域到達後に除荷の判定が行われた際には、その時間ステップでのひずみ値を保存し、その値を上式に代入することで再載荷時の弾性係数を得る。なお、除荷時の弾性係数は再載荷時と同値とした。

本研究では、EPS 緩衝材をはり要素でモデル化するにあたり、EPS 材の軸方向圧縮特性を表現するためのEPS 要素と、緩衝材の形状を表現するフレーム要素の2種類の要素を組み合わせた、フレーム要素は建築物との接触判定および接触力の伝達を行うための仮想的な要素であり、接触の誤判定および接触力の過小評価を防ぐために、硬い弾性材料としている。

3. 家具の接触表現

本研究では、家具と床・壁面間の接触はペナルティ接触理論に基づき、接触判定された要素に対し、2種類の接触力を作用させることで表現した。1つ目は次式に示すペナルティ力 F_p であり、要素間で構成される接触面の法線方向のみに作用する。

$$\mathbf{F}_P = \alpha \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\mathbf{n}}{\|\mathbf{n}\|}, \text{ if } l \leq L \quad (3)$$

ここで α はペナルティ定数, q はペナルティ指数, $\mathbf{n}$ は接触面の法線ベクトルである. また, l は要素間の最短距離, L は接触する 2 つの要素の部材幅の平均値である. 2 つ目の接触力は次式に示す動摩擦力 $\mathbf{F}_D$ であり, 接触面の接線方向と法線方向に作用する.

$$\mathbf{F}_D = \mathbf{F}_T + \mathbf{F}_N, \text{ if } l \leq L \quad (4)$$

下付き添え字 $\mathbf{T}$, $\mathbf{N}$ は, それぞれ接触面に対する接線方向成分および法線方向成分であることを表す. 次式に示すように, $\mathbf{F}_T$, $\mathbf{F}_N$ は $\mathbf{v}$ のそれぞれの方向成分 $\mathbf{v}_T$, $\mathbf{v}_N$ に対して逆方向に作用する.

$$\mathbf{F}_T = -\mu\alpha \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\mathbf{v}_T}{\|\mathbf{v}\|}, \quad \text{if } l \leq L \quad (5)$$

表-1 家具モデルの諸元

寸法 [mm]			重量 [kg]	重心位置 [mm]			靜止摩擦係數
W	D	H		w	d	h	
600	417	1800	30	300	278.9	888.9	0.297

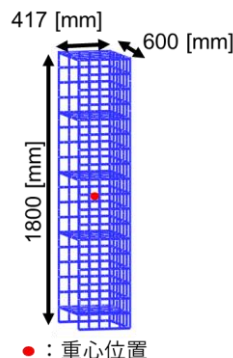


図-2 家具モデルの概観

$$\mathbf{F}_N = -D_C \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\mathbf{v}_N}{\|\mathbf{v}\|}, \text{ if } l \leq L \quad (6)$$

本研究では、先行研究[4][5]で有効な値として示されている、ペナルティ定数 α は対象物の重量[kgf]と同値、ペナルティ指数 q は1.0、減衰に関する係数 D_c は α の120 %と設定し、動摩擦係数は実験前に計測された静止摩擦係数の80 %とした。また、壁との摩擦係数は、床と接触する際の摩擦係数と同じ値を用いた。

本研究で用いる家具モデルの諸元を表-1に、概観を図-2に示す。本棚を想定してモデル化を行っており、構成部材毎に密度を調整することで重心を表現している。

接触判定は、面の単位法線ベクトルと接触要素と面上の点を結ぶベクトルの内積を計算することで接触要素と面との距離を求めている。面の法線ベクトルを用いて接触要素の面からの距離を求めることで、面の傾きを考慮した接触力計算を行うことができ、床や壁が傾きを伴いながら、激しく動くような状況での家具の挙動を表現することが可能となる。

4. 棟間衝突解析

4.1 隣接した2棟の中高層ビルのモデル化

本研究では、EPS緩衝材の棟間衝突被害の低減効果について評価を行うために、異なる固有周期を持つ、隣接した2棟の中高層ビルのモデル化を行う。図-3にそのモデルを示す。解析モデルは階高4.0 [m]、スパン長6.0 [m]で共通となっており、それぞれ8層3×3スパン、12層3×3スパン、棟間距離は200 [mm]である。また、構造部材は線形Timoshenkoはり要素を用いてモデル化しており、1部材4要素分割としている。

柱部材，梁部材は共にSS400とし，柱部材は角型鋼管，梁部材はH型鋼としている。

床部材ははり要素で十字状にモデル化しており、厚さ300 [mm]、幅3000 [mm]、材料は普通コンクリートである。

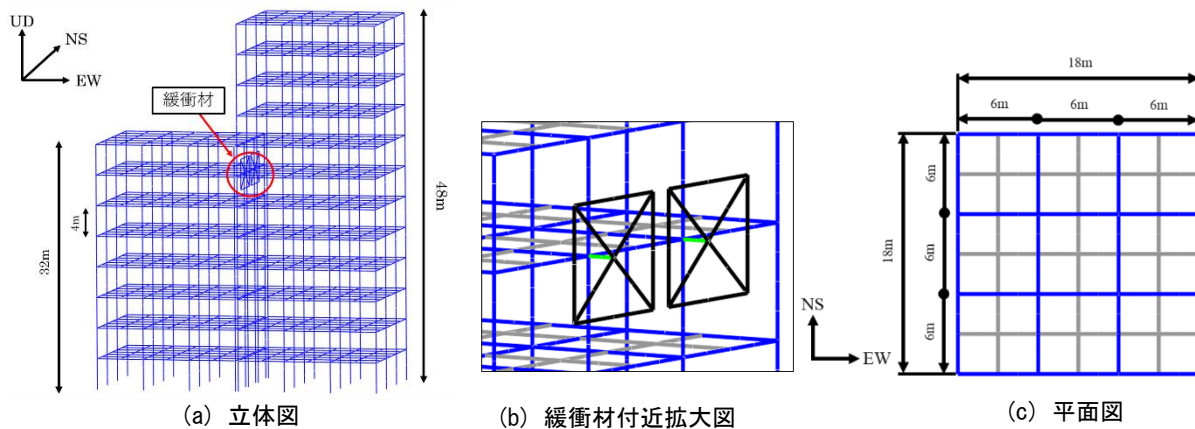


図-3 建物モデルの概観

床荷重を最上階では $3530 \text{ [N/m}^2\text{]}$ ，それ以外の階は $4903 \text{ [N/m}^2\text{]}$ としている。固有周期は，EW方向，NS方向共に低層モデルが 0.93 [s] ，高層モデルが 1.37 [s] である。ベースシア係数は低層モデルが 0.232 ，高層モデルが 0.167 である。

4.2 解析条件

本研究では，厚さと発泡倍率を調整することで，衝撃緩和効果の異なる2つのEPS緩衝材を設定し，それぞれを設置した場合で棟間衝突被害にどのような差が現れるかを検証した。

1つ目は発泡倍率33倍で厚さが 30 [mm] のEPS緩衝材である。発泡倍率33倍のEPS材は剛性が高く，弾性限界も高いのが特徴である。そのため，発生するひずみ量が小さく，EPS緩衝材を薄く設計することができ，隣接する建物とのクリアランスを確保することができる。さらに，ひずみがプラトー領域まで進行しづらいため，永久変形が起こりにくく，取り換え回数を抑えることができる。しかし，ひずみがプラトー領域まで進行しづらいことで，エネルギー吸収量が少ないというデメリットがある。

2つ目は発泡倍率が85倍で厚さが 100 [mm] のEPS緩衝材である。発泡倍率33倍のEPS材と比べ剛性が低く，弾性限界も低いのが特徴である。そのため，ひずみがプラトー領域まで進行しやすく，エネルギー吸収量が発泡倍率33倍のEPS材よりも大きくなる。しかし，ひずみがプラトー領域を超え，緻密化領域まで進行してしまう可能性があるため，十分な厚みを確保する必要があり，永久変形発生による取り換え回数が多くなるというデメリットがある。

EPS緩衝材の寸法は幅 5000 [mm] ，高さ 4000 [mm] とし，大きな衝突が予想される8階部分の低層モデル側壁面の柱梁接合部に計2枚設置している。入力地震波には，1995年兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で観測されたJMA神戸波を用いる。本研究では問題を単純化するためにEW方向成分のみの一軸加振とし，EPS緩衝材の衝撃緩和効果を評価しやすくするために入力地震波倍率を 80% とした。最大加速度は 494 [Gal] ，卓越周期は 0.39 [s] である。

4.3 解析結果

EPS緩衝材未設置の場合と発泡倍率33倍，厚さ 30 [mm]

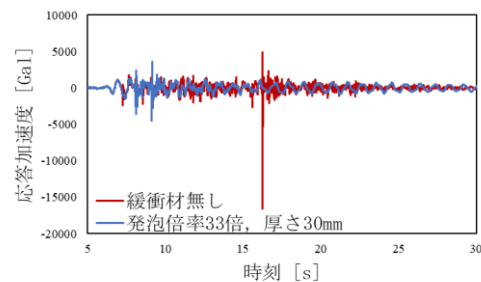


図-4 EW 方向応答加速度（低層モデル）

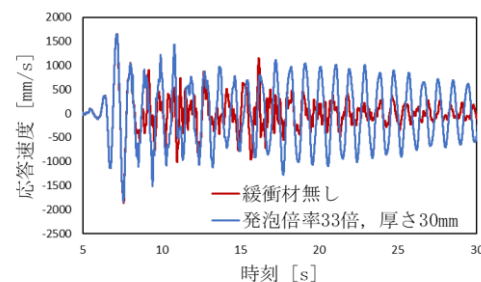


図-5 EW 方向応答速度（低層モデル）

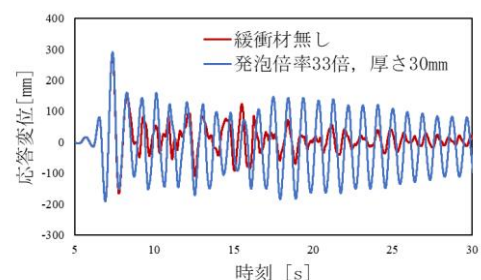


図-6 EW 方向応答変位（低層モデル）

のEPS緩衝材を設置した場合の低層モデル側の8階におけるEW方向の応答加速度，応答速度，応答変位を比較した図を図-4から図-6に示す。これらの図より，EPS緩衝材を設置することで低層モデル側の応答加速度は大幅に抑えられるが，衝突後の応答速度と応答変位が増加してしまうことが確認できる。

EPS緩衝材未設置の場合と発泡倍率33倍，厚さ 30 [mm] のEPS緩衝材を設置した場合の高層モデル側の8階におけるEW方向の応答加速度，応答速度，応答変位を比較した

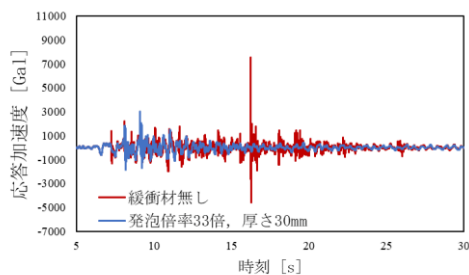


図-7 EW 方向応答加速度（高層モデル）

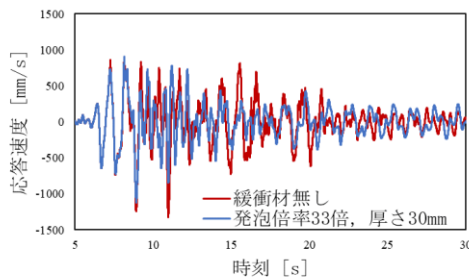


図-8 EW 方向応答速度（高層モデル）

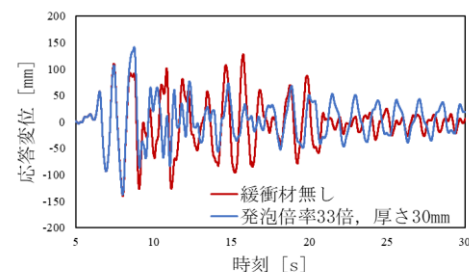


図-9 EW 方向応答変位（高層モデル）

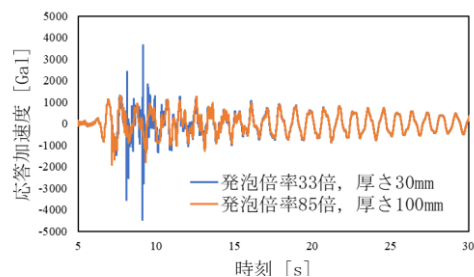


図-10 EW 方向応答加速度（低層モデル）

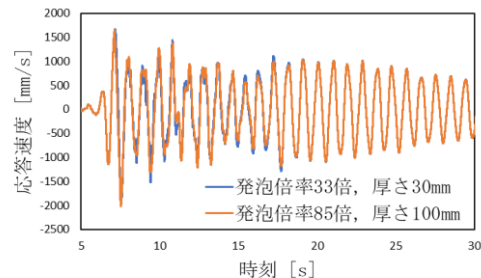


図-11 EW 方向応答速度（低層モデル）

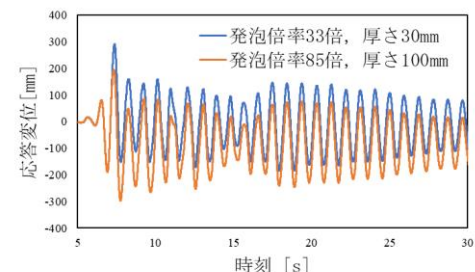


図-12 EW 方向応答変位（低層モデル）

図を図-7から図-9に示す。これらの図より、EPS緩衝材を設置することで高層モデル側の応答加速度が大幅に抑えられ、衝突直後の応答速度と応答変位についても抑えられることが確認できる。

次に、低層モデル側の8階におけるEW方向の応答加速度、応答速度、応答変位を比較した図を図-10から図-12に示す。図-10より、発泡倍率85倍、厚さ100 [mm]のEPS緩衝材を設置した方が応答加速度をより抑えることができていないことが確認できる。応答速度については大きな差は無く、応答変位はEPS緩衝材の厚みの分、西側に移動していることが図-11および図-12から確認できる。

さらに、高層モデル側の8階におけるEW方向の応答加速度、応答速度、応答変位を比較した図を図-13から図-15に示す。図より、発泡倍率85倍、厚さ100 [mm]のEPS緩衝材を設置した方が応答加速度、応答速度、応答変位を抑えられていることが確認できる。

解析終了時の低層モデルと高層モデルのそれぞれの塑性化率を図-16に示す。低層モデル側に関しては、発泡倍率85倍、厚さ100 [mm]の方が塑性化率を抑えられているが、高層モデル側では発泡倍率85倍、厚さ100 [mm]の方が高くなっていることが確認できる。これは、低層モデル側では衝突部分での塑性化がより抑えられた分、EPS緩衝材によって吸収しきれなかったエネルギーが高層モデル側の部材の塑性化という形で現れたものと考えられる。

解析終了時の家具の様子を図-18と図-19に示す。発泡倍率33倍、厚さ30 [mm]を設置した場合は全ての家具が転倒することが確認された。一方で、発泡倍率85倍、厚さ100 [mm]を設置した場合は高層モデル側の5階に設置した家具が転倒せず、家具の挙動にも相違が生じることが確認された。

5. 結論

本研究では、建物と家具の統合モデルを用いて棟間衝突解析を行うことで、発泡倍率と厚さが異なる2種類のEPS緩衝材の棟間衝突被害低減効果を検証し、建物の応答、塑性化率、家具の挙動の観点から評価を行った。

その結果、棟間衝突発生時の家具の転倒挙動が明らかとなり、異なるEPS緩衝材を設置した場合に家具が異なる転倒挙動を示すことが確認された。また、ひずみが弾性領域で留まるEPS緩衝材を設置した場合と比べ、ひずみがプラトー領域まで達するEPS緩衝材を設置した場合には、より建物の応答を抑えられることが示された。一方で、塑性化率は低層モデル側では抑えられるが、高層モデル側は増加してしまうことが示された。

EPS緩衝材のひずみが弾性領域内に留まる場合でも、棟間衝突に伴う応答加速度を大きく減少させることが示されているため、低発泡倍率で薄いEPS緩衝材を設置することで、十分な棟間衝突被害抑制効果を得ながら、クリアラ

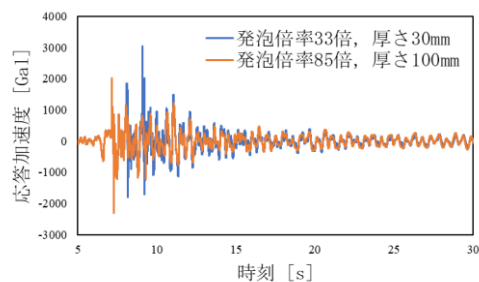


図-13 EW 方向応答加速度（高層モデル）

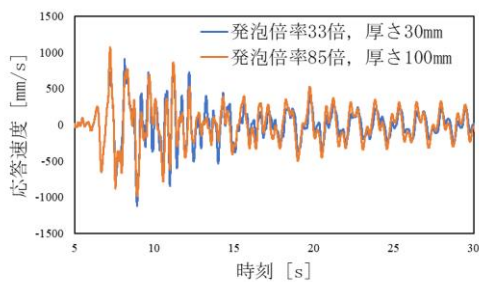


図-14 EW 方向応答速度（高層モデル）

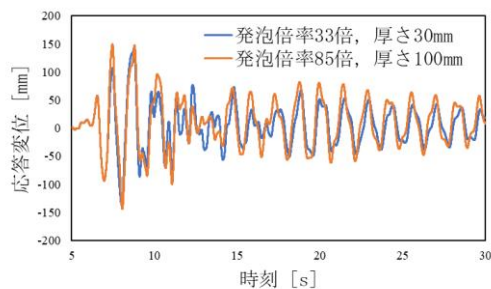


図-15 EW 方向応答変位（高層モデル）

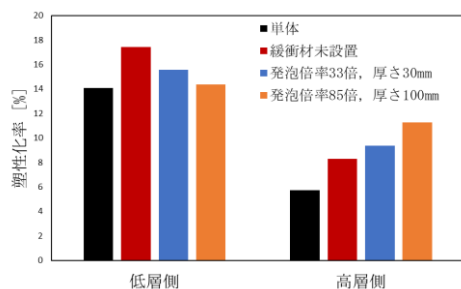


図-16 各棟の解析終了時の塑性化率

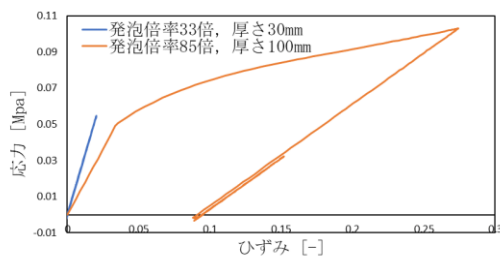
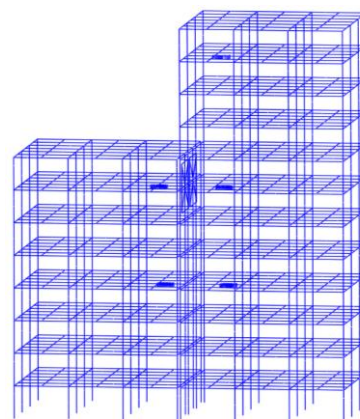
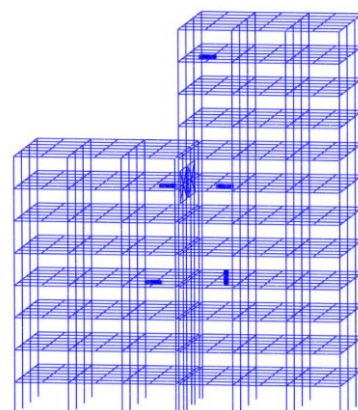


図-17 EPS 緩衝材の応力-ひずみ線図

図-18 解析終了時の家具の様子
(発泡倍率 33 倍, 厚さ 30 mm)図-19 解析終了時の家具の様子
(発泡倍率 85 倍, 厚さ 100 mm)

ンスを確保し、メンテナンス頻度を抑える使い方も選択肢として考えることができる。

参考文献

- [1] D. Isobe and T. Shibuya: Preliminary Numerical Study on the Reduction of Seismic Pounding Damage to Buildings with Expanded Polystyrene Blocks, *Engineering Structures*, 252, 113723, 2022.
- [2] 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, 丸善出版, 2020.
- [3] N. Jones : *Structural Impact*, Cambridge University Press, 1989.
- [4] 荻野 弘明, 山下 拓三, 金子 美香, 磯部 大吾郎: 家具・什器の地震時挙動を再現する有限要素解析手法の開発, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻, 第 717 号, pp. 1687-1697, 2015.
- [5] 磯部 大吾郎, 山下 拓三, 田川 浩之, 金子 美香, 高橋 徹, 元結 正次郎: 有限要素法を用いた地震時における家具の挙動解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻, 第 718 号, pp. 1891-1900, 2015.