

## ひずみ履歴特性を考慮した EPS 緩衝材の棟間衝突被害低減効果の評価

正会員  
同○古谷野 真輝\*  
磯部 大吾郎\*\*棟間衝突  
有限要素解析EPS 緩衝材  
ASI-Gauss 法

ひずみ履歴特性

## 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地震や首都直下地震といった大規模地震が起こることが予想されている。日本の都市部には大小様々なビルが密集しており、それぞれのビルは固有周期の違いから異なる揺れ方を生ずる。そのため、地震が起こった際にはビル同士が衝突（棟間衝突）を起こし、大きな被害が生じる可能性が指摘されている。

隣接した棟間衝突による被害を減少させ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で、棟間衝突の被害を低減できることが先行研究[1]によって示されている。しかしこの研究では、繰り返し荷重を受ける際に塑性化の進行度に応じて弾性係数が低下するという、EPS 材特有のひずみ履歴特性が考慮されていなかった。

そこで本研究では、EPS 材のひずみ履歴特性が再現できる有限要素解析プログラムを開発した上で、2棟の隣接した中高層建築物モデルを対象とした棟間衝突解析を行った。そして、各建物の応答加速度および塑性化率（全柱・梁の要素数に対する塑性化した要素の割合）について EPS 緩衝材の発泡倍率を変化させることで比較し、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、はり要素による有限要素法の一つで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。

## 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、プラトー領域以降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に基づき、発泡倍率毎にひずみと弾性係数を対応させたデータベース

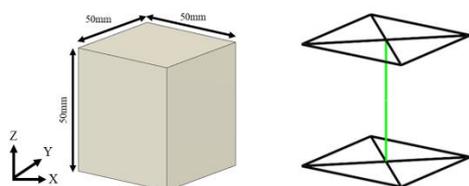


図1 EPS 緩衝材の模式図（左）とモデル図（右）

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、 $\sigma_0$ 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]で一軸圧縮実験を行った際の結果を用い、 $D = 9.3555$ 、 $q = 2.2019$ とした。

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。

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

ここで、 $E_0$ は初期弾性係数、 $\epsilon_{ul}$ 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

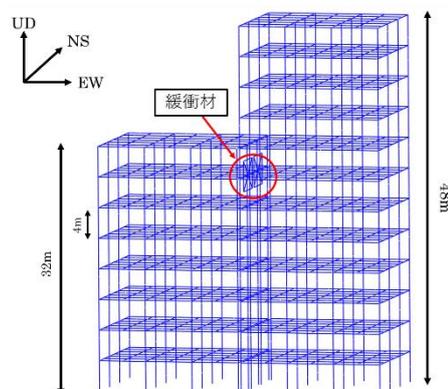


図2 解析モデルの外観

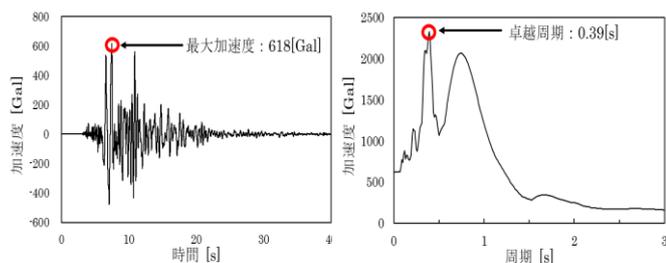


図3 JMA 神戸波のEW方向加速度波形と応答スペクトル

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じとした。

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、図1に示すように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 棟間衝突解析

#### 3-1 隣接した建築物モデル

本研究では、異なる固有周期を持つ隣接した2棟の中高層建築物のモデルを用いた。解析モデルは先行研究[1]と同じである。図2にそのモデルを示す。EPS緩衝材は幅5,000 [mm]、高さ4,000 [mm]、厚さを棟間距離の半分の100 [mm]としており、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枚剛接した。

#### 3-2 解析結果

隣接した2棟の中高層建築物間に発泡倍率が85倍および33倍のEPS材を設置した場合の比較を行う。入力地震波には、図3に示す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神戸波原波を用いた。本研究では、問題を単純化するためにEW方向の一軸加振とした。最大加速度は618 [Gal]、卓越周期は0.39 [s]である。解析における時間増分は0.001 [s]、実時間は40.961 [s]である。

各々のモデルの8階の天井部分に置いた評価点における低層モデルのEW方向応答加速度、高層モデルのEW方向応答加速度を図4および図5に示す。図より、低層モデル、高層モデル共に発泡倍率85倍のEPS緩衝材を設置した方がより応答加速度を抑えられていることが分かる。一方、塑性化率は低層モデルで約15%、高層モデルで約12%であり、発泡倍率の違いによる差異はほとんどなかった。

解析時に算出された発泡倍率33倍と85倍のEPS要素の応力-ひずみ線図を図6に示す。発泡倍率85倍のEPS緩衝材は、プラトー領域までひずみが進行している。これは、発泡倍率85倍のEPS緩衝材が発泡倍率33倍のものより多くのエネルギーを吸収していることを示している。

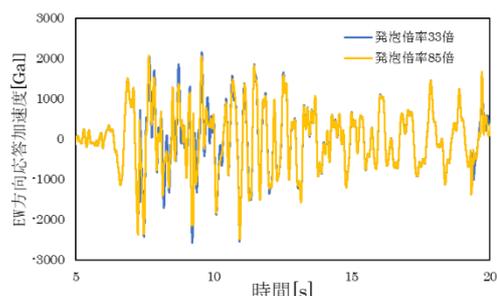


図4 EW方向応答加速度（低層モデル）

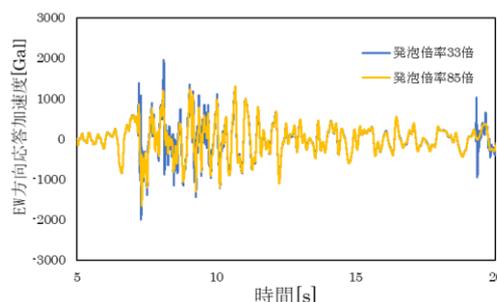


図5 EW方向応答加速度（高層モデル）

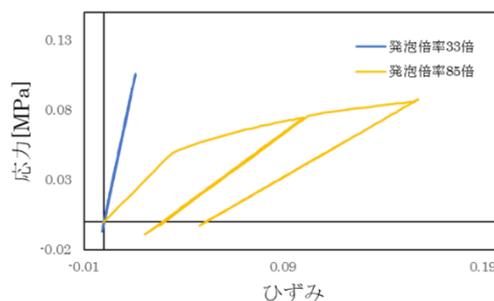


図6 EPS緩衝材の応力-ひずみ線図

### 4 結論

本研究では、EPS材の材料特性の一つであるひずみ履歴特性を考慮した上で、隣接した固有周期の異なる2棟の中高層建築物を対象として棟間衝突解析を行い、EPS緩衝材の発泡倍率の違いによる棟間衝突被害の低減効果の差異について検証した。その結果、低発泡倍率のEPS緩衝材よりも多くのエネルギーを吸収する高発泡倍率のEPS緩衝材を設置することで、棟間衝突被害をより低減できる可能性があることが示された。

### 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.

\*筑波大学大学院 システム情報工学研究群 大学院生

\*\*筑波大学 教授・博士(工)

\*Graduate student, Univ. of Tsukuba

\*\*Professor, Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.