

隣接した建築物間におけるEPS緩衝材の効果 に関する数値解析的検証

Numerical Verification on Effect of EPS Materials on Seismic Pounding Damage of Neighboring Buildings

渋谷知弘¹⁾, 磯部大吾郎²⁾

Tomohiro Shibuya 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: shibuya.tomohiro.xg@alumni.tsukuba.ac.jp)

2) 博(工) 筑波大学 システム情報系 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 recent years, large scale earthquakes have been predicted to cause extensive damage to urban areas in Japan. Buildings with different heights and structures have different natural periods, and they show different shaking behaviors depending on the seismic motions. If a clearance between neighboring buildings is insufficient, there is a risk of collision between those buildings. In order to reduce the damage, an installation of EPS materials as a shock-absorbing material on the walls of buildings is proposed. However, such condition is difficult to realize in experiments and the reduction effect on the impact force during collision has not yet been proved. This paper describes numerical verification on the damage reduction effect of shock-absorbing materials placed between two neighboring buildings during a seismic motion. According to the numerical results, the peak of acceleration at impact and the ratio of yielded members to all structural members was reduced when EPS materials was installed. It was also shown that the impact force and the damage of collision between neighboring buildings may be sufficiently reduced by small and thin EPS materials with lower foaming ratio.

Key Words : Seismic pounding, Natural period, EPS materials, ASI-Gauss technique

1. 緒言

我が国において、首都直下地震など、都市部に大きな被害をもたらす地震が近い将来に発生する可能性が高いと予測されており、都市部の防災性向上が急務となっている。我が国の現行法では、建蔽率に関する基準は策定されている一方で、隣接する建築物間の距離（棟間距離）に関する明確な規定がなく、都市部では中高層建築物が密集している地域が多く存在する。建築物は高さ及び構造等の違いからそれぞれ異なる固有周期を持ち、地震動によって異なる揺れ方を示すことが予想される。そのため、建築物間に十分な棟間距離が確保されていない場合、2棟が衝突する棟間衝突の発生が考えられ、その衝撃によって構造部材の損傷や倒壊といった直接的な被害のほか、屋内家具の転倒など二次被害をも引き起こしてしまう危険性がある。

このような棟間衝突による被害の低減策として、緩衝材の設置が提案されている。これは、あらかじめ衝突が予想される建築物間に緩衝材を設置し、棟間衝突による衝撃を緩和させることを意図したものであるが、現時点において建築物に緩衝材が設置された事例はなく、棟間衝突のような大規模な衝突現象に対する緩衝材の衝撃緩和効果を検証した研究例、及び建築物に設置する緩衝材として最適な材料特性や形状に関する知見は存在しない。また、棟間衝突を模擬した実験の実施もコスト等の観点から現実的ではない。そこで、本研究では、EPS (Expanded PolyStyrene) 緩衝材を設置した建築物モデルを用いた有

限要素解析によって、緩衝材による棟間衝突被害の低減効果を定量的に評価することを目的とする。

2. 解析手法

数値解析手法にはASI-Gauss法[1]を適用し、衝突現象を再現するために要素間接触アルゴリズムを導入した解析コードを用いた。本章では、要素間接触アルゴリズムについて述べる。

まず、内分ベクトル型接触アルゴリズム[2]を用いて、接近する2本の要素の節点間距離および節点の幾何学的位置関係により接触の判定を行う。接触が判定された要素の組については、4つの節点を4本のギャップ要素を用いて結合する。これにより、節点力がギャップ要素を通じて別要素の節点に伝わるようになるため、要素同士の接触を表現することが可能になる。また、ギャップ要素には通常の部材と同程度の剛性を持たせることとする。そして、ギャップ要素によって拘束させている4つの節点に対して、接触開始ステップからの全体座標系における相対変位値を用いて、次式に従って相当変位 $|u_x|$ 、 $|u_y|$ 、 $|u_z|$ を計算する。

$$|u_x| = \sum_{i=1}^4 \sqrt{(X_i + \Delta X_i)^2}, \quad |u_y| = \sum_{i=1}^4 \sqrt{(Y_i + \Delta Y_i)^2}, \quad (1)$$

$$|u_z| = \sum_{i=1}^4 \sqrt{(Z_i + \Delta Z_i)^2}$$

X_i, Y_i, Z_i はそれぞれ、接触開始ステップからのX, Y, Z方向の変位, Δ は増分を表す。| u_x |, | u_y |, | u_z |のうちいずれか1つがその最大値のある割合以下になったとき接触を解除する。この割合を接触解除判定比と定義する。

また、接触解除後すぐに再接触してしまうことを回避するため、接触領域内にある要素同士の相対速度を計算し、要素同士が離れていく方向に速度を持つ組に関しては接触判定の対象外とする。

本研究では、構造部材同士の接触については接触解除判定比を0.95とする。一方、構造部材に比べて柔らかい物性を持つ緩衝材との接触については、接触解除判定比による解除判定が困難であるため、各緩衝材に引張方向のひずみが生じたとき、その緩衝材に対するギャップ要素による拘束をすべて解除するという例外処理を行う。

3. 解析モデル

(1) EPS緩衝材

図-1に示すように、EPS緩衝材は圧縮初期では線形挙動を示す一方、降伏点以降では非線形挙動（プラトー領域と呼ぶ）を示すため、構成則による定式化が難しい。さらに、発泡倍率が高くなると剛性が全体的に低下することが知られている。そこで、解析コード内では、1軸圧縮試験の結果より作成した、微小なひずみ区間における弾性係数をリスト化したデータベースを参照し、計算ステップ毎に弾性係数を逐次更新する処理を行う。また、EPS緩衝材の降伏点に関するひずみ速度依存性を再現するため、降伏応力比を算出し、ひずみ速度に応じて降伏点をシフトする処理を行う。本研究では、式(2)に示す、材料構成則におけるひずみ速度依存性を表した式であるCowper-Symondsの式[3]によって降伏応力比を計算する。

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{q}} \quad (2)$$

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、図-2に示す発泡倍率33倍の試験結果のうち、圧縮速度5 [mm/min]による結果を準静的圧縮特性として係数の同定を行い、 $D=9.3555$, $q=2.2019$ とした。なお、 D 及び q は各発泡倍率において固有の値を持つことが予想されるが、既存の試験データが存在しないため、本研究ではすべての発泡倍率において33倍と同様のひずみ速度依存性を示すという仮定の下、 D 及び q を同値に設定した。

建築物にEPS緩衝材を設置したモデルの概略図を図-3に示す。緑色の直方体がEPS緩衝材を表す。これをはり要素によるモデルに置き換えたものを図-4に示す。本研究では、2種類の要素を組み合わせることで建築物に設置された緩衝材のモデル化を行う。1つは、緑色で示される、設置壁面に対して垂直に伸びている軸要素（以

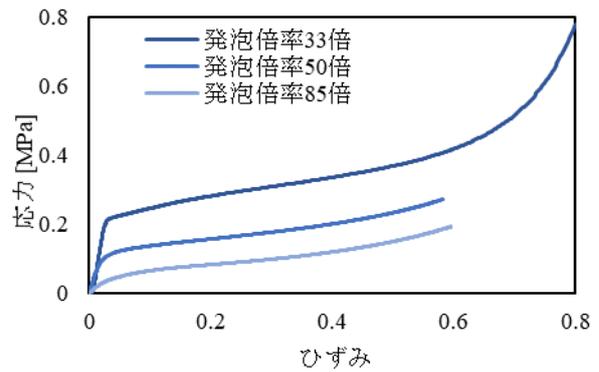


図-1 EPS緩衝材の材料特性（試験結果）

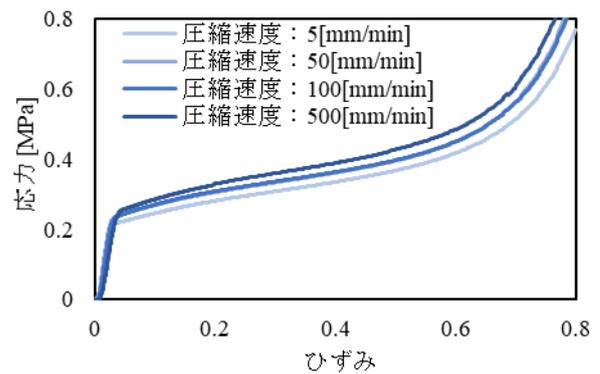


図-2 EPS緩衝材のひずみ速度依存性
(試験結果、発泡倍率33倍)

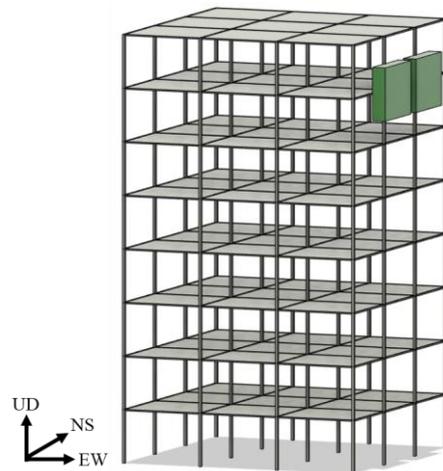


図-3 EPS緩衝材を設置した建築物モデル（概略図）

下、EPS要素)である。EPS要素は、EPSの材料特性を表現するものである。もう1つは、黒色で示される、緩衝材の形状を表現している要素（以下、フレーム要素）である。フレーム要素は、他方の建築物との接触判定及び接触力の伝達に用いられるもので、あくまでもEPS緩衝材が存在する面をモデル上で表現するための仮想的な要素である。したがって、フレーム要素の変形による接触の誤判定及びエネルギー吸収による接触力の過小評価を避ける必要がある。そこで、弾性体かつ硬い材料であるという仮定の下、曲げ剛性及びせん断剛性を確保するために、断面二次

モーメント及び部材断面積を本来の断面形状から算出される値よりも大きな値に設定している。

(2) 建築物モデル

本研究では、異なる固有周期を持つ建築物が隣接している状況を想定する。図-5に作成した建築物モデルの鳥瞰図を示す。4.0 [m]の階高、EW方向及びNS方向ともに6.0 [m]×3スパンの平面形状は共通とし、階数のみが異なる2棟の建築物をEW方向に並べたものである。この2棟は、8層の建築物モデル（以下、低層モデル）と12層の建築物モデル（以下、高層モデル）で、各棟の高さはそれぞれ32 [m]、48 [m]である。柱部材は角型鋼管、梁部材はH形鋼とし、ともにSS400を用いる。弾性係数、降伏応力、ポアソン比、密度はそれぞれ、205 [GPa]、235 [MPa]、0.3、 7.85×10^{-6} [kg/mm³]とする。部材寸法は、各棟のベースシア係数を算出し、その場合における建築物に必要とされる水平耐力を満たす断面形状によるものである[4]。ベースシア係数は低層モデルで0.232、高層モデルで0.167である。柱、梁はともに4要素分割としている。

床部材は図-6に示すように十字状のはり要素でモデル化を行う。厚さを300 [mm]、幅をスパン長の半分と仮定して3000 [mm]と設定する。材料は圧縮強度24 [MPa]の普通コンクリートを用いて、密度 2.35×10^{-6} [kg/mm³]、弾性係数22.6 [GPa]、ポアソン比は0.2とする。また、床荷重を屋上階では360 [kgf/m²]、それ以外の階では500 [kgf/m²]と設定し、密度の次元に換算して床要素の密度に加えている。

本研究では、以上の条件に基づくモデルのうち、低層モデルと高層モデルをそれぞれ単独で構築したものを単体モデル、2棟をEW方向に並べて構築したものを隣接モデルとする。各棟の総要素数及び床要素を除いた全柱・梁要素数を表-1に、単体モデルに対する自由振動解析によって求められた各棟の固有周期を表-2にそれぞれ示す。

さらに、隣接モデルには、EPS緩衝材を設置しないモデル（以下、緩衝材未設置モデル）とEPS緩衝材を低層モデルの壁面に設置したモデル（以下、緩衝材設置モデル）の2種類を設定する。EPS緩衝材は、前節で述べた2種類のはり要素を用いてモデル化を行う。このうち、EPS要素は一端を設置面最上層の柱梁接合部に剛接し、他端を緩衝材の面を表すフレーム部の中心に剛接する。

4. 解析条件

隣接モデルにおける棟間距離は、200 [mm]と設定する。EPS緩衝材は先行研究[5]において、棟間衝突による被害が顕著に表れるとされた低層モデルの最上層壁面に2つ設置する。なお、EPS緩衝材の大きさは幅5000 [mm]、高さ4000 [mm]とし、厚さは棟間距離の半分である100 [mm]とする。また、EPS緩衝材の発泡倍率は33倍を用いる。

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神戸波原波を用いる。本研究では、EW方向のみの1軸加振としている。JMA神戸波のEW方向加速度波形を図-7に、EW方向加速度応答スペクトル

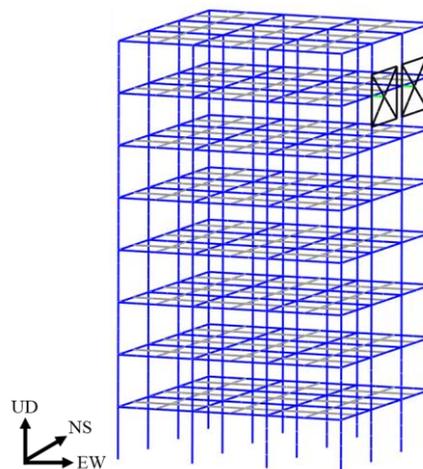


図-4 はり要素でEPS緩衝材を模擬した建築物モデル

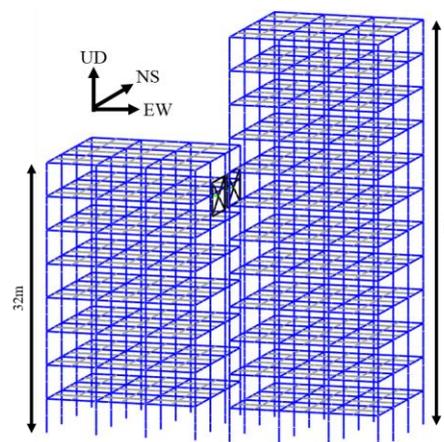


図-5 隣接した建築物モデル（隣接モデル）

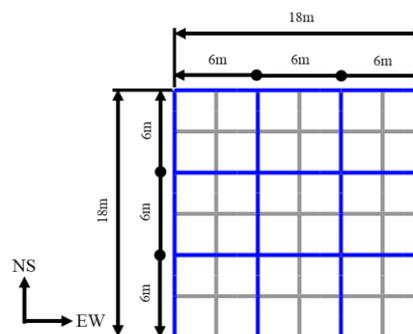


図-6 建築物モデルの平面図

表-1 各棟の総要素数及び全柱・梁要素数

	低層モデル	高層モデル
総要素数	1856	2784
全柱・梁要素数	1280	1920

表-2 各棟の固有周期 [s]

	低層モデル	高層モデル
固有周期 (EW)	0.93	1.37
固有周期 (NS)	0.93	1.37

を図-8に示す。最大加速度は618 [gal]、卓越周期は0.39 [s]である。時間増分は1 [ms]で、総ステップ数は40,961である。

5. 解析結果

本研究では、建築物の構造部材における損傷の程度を定量的に評価するため、塑性化率を算出する。これは、各棟において全柱・梁要素数に対する塑性化した要素の割合で定義されるものである。ただし、床要素及びEPS緩衝材に関する要素は弾性体として扱っているため塑性化率の算出から除外する。表-3に各条件における、解析終了時の塑性化率を示す。まず、単体モデル同士を比較すると、低層モデルの方が高い塑性化率を示しており、神戸波は低層モデルに対して厳しい条件であるといえる。次に、単体モデルと緩衝材未設置モデルを比較すると、両棟ともに塑性化率が増加しており、棟間衝突によって構造部材への被害が増大していることが分かる。最後に、緩衝材未設置モデルと緩衝材設置モデルを比較すると、両棟ともに緩衝材を設置することによって塑性化率の増加が抑制されており、EPS緩衝材の設置によって構造部材への被害を低減できていると考えられる。特に、低層モデルにおいては、単体モデルの場合と同程度の塑性化率まで低減できている。

また、非構造部材に与える影響の評価は、図-9に赤点で示す、各棟の評価点における応答加速度によって行う。まず、図-10、図-11にそれぞれの評価点における単体モデルと緩衝材未設置モデルの応答加速度を示す。第1ピーク後の9.13 [s]及び第2ピーク後の12.90 [s]においてEPS緩衝材が未設置の低層モデルで応答加速度がおよそ21,800 [gal]と高いピークを示している。高層モデルにおいても、同時刻付近で応答加速度が高いピークを示している。次に、図-12、図-13にそれぞれの評価点における緩衝材未設置モデルと緩衝材設置モデルの応答加速度を示す。緩衝材を設置した低層モデルの最大応答加速度はおよそ2,400 [gal]で、緩衝材未設置モデルに対しおよそ1/9と大きく抑制できている。高層モデルでも同様に、最大応答加速度をおよそ1/9まで抑制できている。

6. EPS緩衝材のパラメータの相違による効果の違い

緩衝材設置モデルにおいて、EPS緩衝材に関するパラメータとして発泡倍率及びEPS緩衝材の厚さを変えた場合の結果を比較し、効果の違いを検証する。発泡倍率については、第4章で設定した33倍のほかに50倍及び85倍を追加する。高い発泡倍率を用いることで、剛性が全体的に低下するため、より大きなひずみが生じると考えられる。また、EPS緩衝材の厚さについては、第4章で設定した100 [mm]のほかに80 [mm]及び120 [mm]を追加する。

厚さによって、同じ応力を受けた際の変位量が変わるため、衝撃緩和効果への影響が考えられる。EPS緩衝材

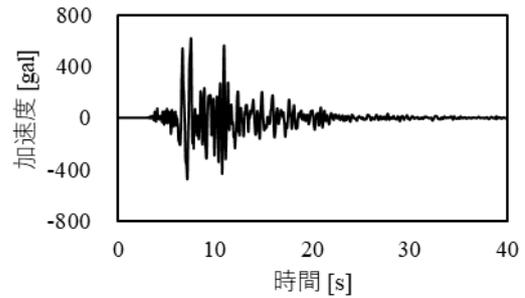


図-7 JMA神戸波EW方向加速度波形

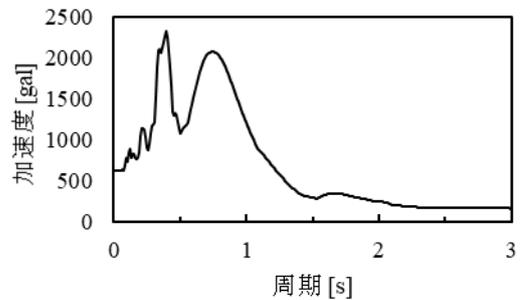


図-8 JMA神戸波EW方向加速度応答スペクトル

表-3 解析終了時の塑性化率 [%]

	低層モデル	高層モデル
単体モデル	14.69	8.65
緩衝材未設置モデル	18.13	12.92
緩衝材設置モデル	15.00	11.25

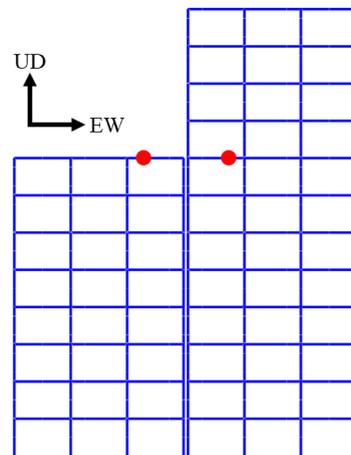


図-9 応答加速度の評価点

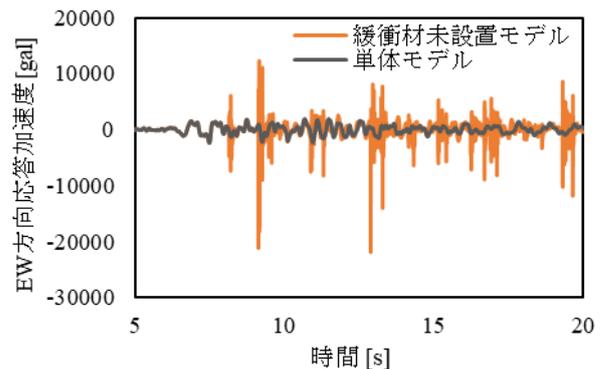


図-10 応答加速度 (単体vs未設置, 低層モデル)

の面積など、その他の解析条件は第4章に述べたものと同一とする。

まず、発泡倍率ごとの履歴曲線を図-14に示す。高い発泡倍率を用いることで、生じるひずみが大きくなっており、特に発泡倍率85倍ではプラトー領域に到達後さらにひずみが進行していることが分かる。一方、厚さの違いによる有意な差は見られない。次に、低層モデルについて、解析終了時の塑性化率を表-4に、そして最大応答加速度を表-5にそれぞれ示す。いずれの場合においても、緩衝材が未設置の場合と比較すると被害を抑制できているという結果が得られ、また、パラメータの相違による有意な差は見られない。

以上の結果から、発泡倍率及び緩衝材の厚さによって効果に大きな違いは見られなかったことから、EPS緩衝材は弾性領域における減衰性能によって、棟間衝突の被害を十分に低減できる効果を持つことが示唆された。

7. 建築物に設置する緩衝材に関する提言

3.1節で述べたように、図-1のような材料特性を持つEPS緩衝材は、エネルギー吸収の観点からみれば降伏点以降の領域においてより高い効果を得られると考えられる。しかし、降伏点以降は内部構造におけるセルの破壊を伴って進行するため、荷重が完全に除荷されても一度破壊されたセルは元に戻らず、地震が発生するたびに交換が必要になるなど、ランニングコストの増大を招きかねない。また、厚い緩衝材を設置すると、クリアランスの減少によって建築物同士が高い速度を持つタイミングで棟間衝突が起き、さらに衝突回数も多くなってしまいう可能性がある。そして、第6章で述べたように、EPS緩衝材は弾性領域における減衰性能によって棟間衝突の被害を十分に低減できることが示唆されている。

したがって、建築物に設置する緩衝材としては、棟間衝突によって降伏応力を超えない程度の強度を持ち、かつできる限り薄い緩衝材が適していると考えられる。ただし、同じ厚さのEPS緩衝材でも、設置面積が変われば受ける応力も変化することが予想される。設置面積が小さくなればEPS緩衝材が受ける応力は大きくなるため、より低い発泡倍率を選定し降伏応力を高くすることで、プラトー領域に到達しないように設計することができる。すなわち、高い発泡倍率で設置面積が大きく厚いEPS緩衝材と、低い発泡倍率で設置面積が小さく薄いEPS緩衝材が同等の衝撃緩和効果を持つと考えられる。そのため、建築物に設置する緩衝材としては、低めの発泡倍率を選定することにより、小さく薄い形状で十分な棟間衝突の被害低減効果を得ることができる他、緩衝材の小型化により設置時のコスト低減や建築物外観への影響を最小限に抑える副次的効果も期待できる。

例えば、本研究で設定した条件である棟間距離200 [mm]、神戸波EW方向1軸加振の場合、発泡倍率33倍、厚さ80 [mm]、設置面積40 [m²]の緩衝材では、解析における

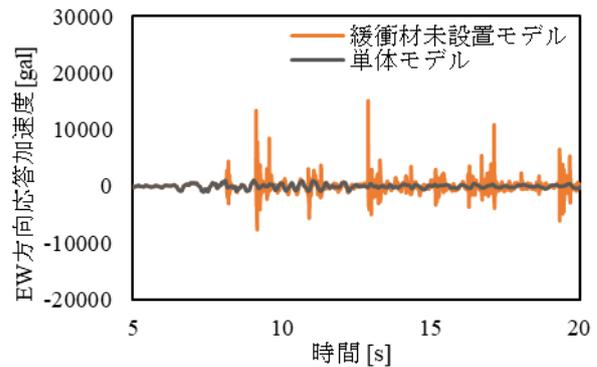


図-11 応答加速度 (単体vs未設置, 高層モデル)

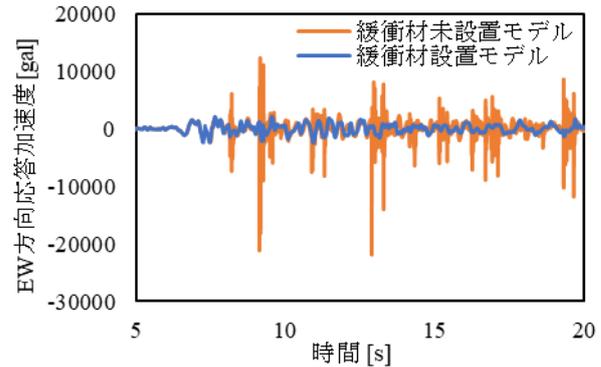


図-12 応答加速度 (未設置vs設置, 低層モデル)

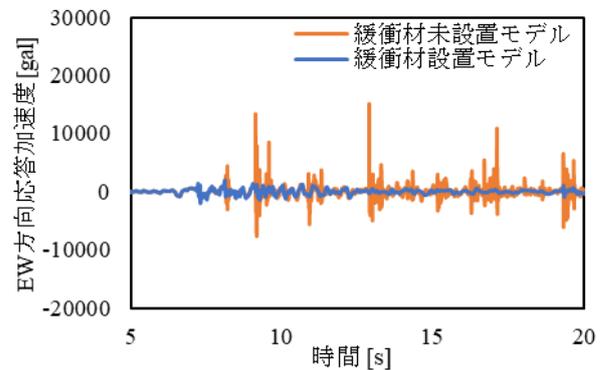
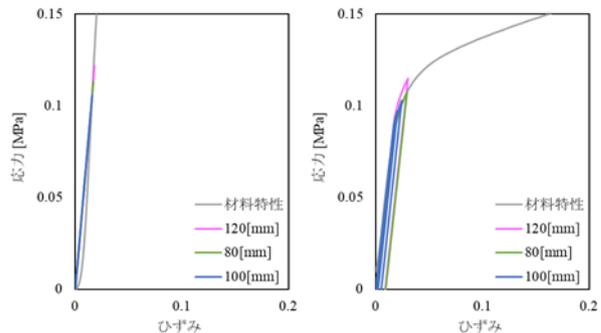


図-13 応答加速度 (未設置vs設置, 高層モデル)

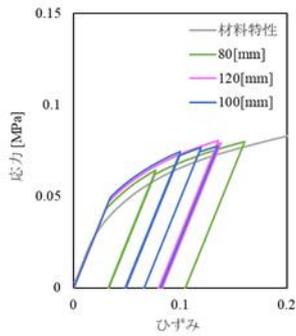


(a) 発泡倍率33倍

(b) 発泡倍率50倍

図-14 厚さの異なるEPS緩衝材の履歴曲線

最大圧縮応力が0.113 [MPa]であった (図-14 (a))。発泡倍率33倍のEPSの降伏応力は0.21 [MPa]程度であるため、設置面積をおよそ21.5 [m²]まで小さくすることができる。



(c) 発泡倍率85倍

図-14 厚さの異なるEPS緩衝材の履歴曲線（つづき）

8. 結言

本研究では、最小限の要素分割数で骨組構造の挙動を解析できるASI-Gauss法を基に、EPS緩衝材のモデル化を行った。その上で、高さの異なる2棟の中高層建築物を対象とした棟間衝突解析によって、EPS緩衝材の衝撃緩和効果を定量的に評価した。さらに、EPS緩衝材に関するパラメータを変化させた場合における棟間衝突解析の結果から、パラメータの相違による衝撃緩和効果の違いを比較し、建築物に設置する緩衝材としての特性に関する考察を行った。

まず、EPS緩衝材の持つ非線形材料特性を数値解析に導入するために、材料モデルを構築した。具体的には、1軸圧縮試験の結果より作成した、微小なひずみ区間における弾性係数をリスト化したデータベースを参照し、ひずみ値に応じた弾性係数を逐次読み込む手法を用いた。また、材料特性を表現する要素と緩衝材の形状を表現する要素を組み合わせることでは要素によるEPS緩衝材のモデル化を行った。

次に、EPS緩衝材のモデルを導入した解析コードを用いて、隣接する2棟の中高層建築物を対象とした棟間衝突解析を実施し、EPS緩衝材の設置による被害低減効果に関して、塑性化率及び応答加速度による定量的な評価を行った。解析結果より、EPS緩衝材設置モデルにおいて塑性化率の増加を抑制できること、棟間衝突発生時における応答加速度の瞬間的なピークを大きく抑制できることが定量的に示された。このことから、EPS緩衝材の設置によって構造部材の損傷を低減させ、かつ非構造部材に与える影響を最小限に抑え、家具の転倒など二次被害の低減につながると考えられる。また、EPS緩衝材の発泡倍率や厚さを変化させた場合の解析結果より、低い発泡倍率でかつ薄い緩衝材でも十分な効果が得られることが示唆された。

表-4 解析終了時の塑性化率（低層モデル） [%]

発泡倍率	33倍	50倍	85倍
厚さ80mm	15.31	15.31	15.00
厚さ100mm	15.00	15.00	15.00
厚さ120mm	16.09	15.78	14.53

表-5 最大応答加速度（低層モデル） [gal]

発泡倍率	33倍	50倍	85倍
厚さ80mm	2427	2453	2551
厚さ100mm	2472	2483	2633
厚さ120mm	2774	2604	2613

以上より、隣接した建築物間にEPS緩衝材を設置することによって、地震時の棟間衝突による被害を低減できることが定量的に示された。また、EPS緩衝材は弾性領域における減衰性能によって棟間衝突の被害を十分に低減できる可能性が示唆された。このことから、建築物に設置する緩衝材としては、低い発泡倍率を選定することにより、小さく薄い形状で十分に棟間衝突被害の低減効果を得ることができ、都市部の防災性向上に寄与すると期待される。

謝辞

本研究の遂行にあたり、積水化成工業株式会社第1事業本部坪井宏人氏、中村英輔氏には、実験データの提供など、多大なる貢献を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] D. Isobe : Progressive Collapse Analysis of Structures: Numerical Codes and Applications, Elsevier, eBook ISBN: 9780128130421, Paperback ISBN: 9780128129753, 2018.
- [2] 磯部大吾郎, レティタイタン: 高層建築物の火災時崩壊挙動に関する数値解析的検証, 日本建築学会構造系論文集, 第76巻, 第667号, 2011, pp.1659-1664.
- [3] Jones.N: Structural Impact, Cambridge University Press, 1989.
- [4] 鈴木淳一ほか: 火災時における鋼架構の崩壊温度とリダンダンシー: 耐震設計が耐火性能に与える効果, 日本建築学会構造系論文集, 第608号, 2006, pp.157-164.
- [5] 高寺健太, 磯部大吾郎: 隣立する高層建築物の地震動下における安全な棟間距離の評価, 計算工学講演会論文集, Vol.19, 2014.