

EPS緩衝材のひずみ履歴特性を考慮した 棟間衝突解析

Seismic Pounding Analysis of Buildings Considering Strain Hysteresis of EPS Cushioning Material

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, strain hysteresis of an EPS cushioning material was considered by compiling a database, and seismic pounding analysis of neighboring midrise buildings with the EPS cushioning material in between was conducted. The numerical results showed that EPS cushioning material with a higher foam ratio could further reduce response acceleration caused by collision between two buildings than that with a lower foam ratio; it reached plateau region during collision and absorbed more energy than the lower ones.

Key Words : Seismic pounding analysis, EPS, Strain hysteresis, 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(図-1), それぞれのビルは固有周期の違いから異なる揺れ方をする。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。実際、1985年に発生したメキシコ地震においては、隣接した同一形状の3棟の団地で、建築構造の耐力低下や地盤の不同沈下による固有周期の変化により隣接する建築物がそれぞれ異なる揺れ方をしたため、棟間衝突による被害が発生している(図-2) [1]。

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[2]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。すなわち、EPS材の弾性係数をひずみ履歴に依らず一定としていたため、衝撃緩和効果が十分正確に評価されていたとは言い難い。

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緩衝材の発泡倍率毎に比較し、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種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[3]を用いた。



図-1 隣接したビルの様子
(東京・銀座一丁目)



図-2 1985年メキシコ地震において倒壊被害を受けた Nuevo Leon 棟
(写真: Marco Antonio Cruz)

2. EPS材のモデル化

2.1 EPS材の材料特性

EPSとは、Expanded PolyStyreneの略称であり、原料である球状のポリスチレンを発泡させた発泡プラスチックの一種である。一般的には発泡スチロールと呼ばれることが多い。EPS材は材料内部に無数の気泡を含有しており、各

気泡は内壁によって区切られている。この内部構造に起因し、EPS材は一般的な金属や樹脂とは異なる材料特性を持つ。

a) 応力-ひずみ関係

図-3にEPS材の一軸圧縮試験によって得られた発泡倍率毎の応力-ひずみ線図（積水化成品工業（株）提供）を示す。EPS材の応力-ひずみ関係は、内部構造の状態の変化によって3つに分類することができる。まず、気泡によってできた壁の曲げ変形が支配的となる弾性領域、続いて、壁の座屈によって応力変化がなだらかになるプラトー領域、そしてほぼ全ての壁が座屈することで、原料そのものの圧縮特性に近い挙動を示す緻密化領域である[4]。

b) ひずみ速度依存性

ひずみ速度依存性とは、ひずみ速度が高くなるとプラトー領域へと移行する点での応力（以下、降伏応力とする）が高くなるという性質であり、二川ら[5]によっても確認されている。発泡倍率33倍のEPS材に対して異なるひずみ速度で一軸圧縮応力を与えた実験では、図-4（積水化成品工業（株）提供）に示すようにひずみ速度が高いほど降伏応

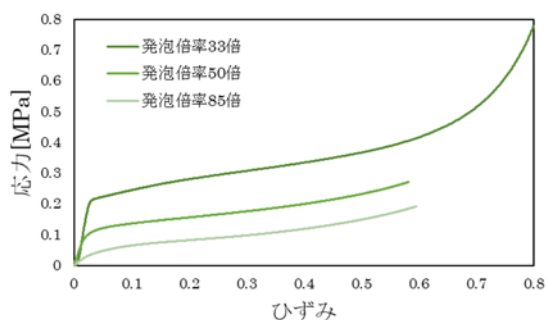


図-3 発泡倍率毎の応力-ひずみ線図

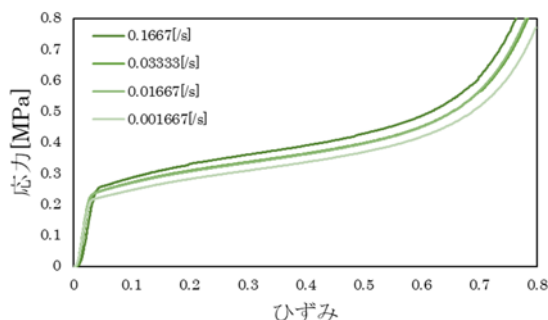


図-4 ひずみ速度毎の応力-ひずみ線図
(発泡倍率 33 倍)

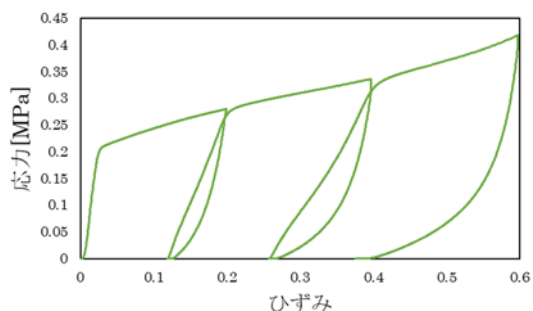


図-5 一軸繰返し载荷試験結果
(発泡倍率 33 倍)

力が増加する。

c) ひずみ履歴特性

ひずみ履歴特性とは、プラトー領域に達した後に除荷・再圧縮を行うと、その際の剛性が低下するという性質であり、二川ら[5]によっても確認されている。発泡倍率33倍のEPS材に対する一軸繰返し圧縮試験では、図-5（積水化成品工業（株）提供）に示すように再载荷ごとに剛性が低下している様子が確認できる。

2.2 はり要素によるEPS緩衝材のモデル化

HSV 材は弾性領域では線形的な応力変化が起きるが、プラトー領域以降の応力-ひずみ関係は载荷条件や内部構造の状態に依存するため、構成則による一意な定式化は難しい。そのため、本研究では HSV 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を作成し、解析中に計算されたひずみの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。 #

HSV 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 $F_{rz} \cdot \frac{v}{v_0}$ の式を用いて

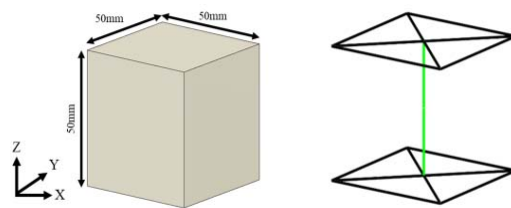


図-6 EPS 緩衝材の模式図（左）とモデル図（右）

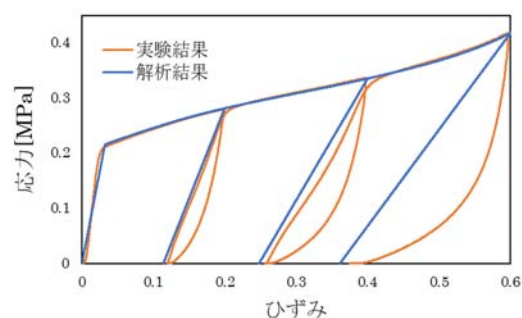


図-7 繰返し载荷試験と再現解析の結果

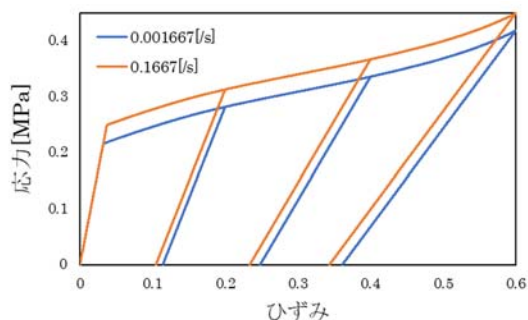


図-8 異なるひずみ速度における再現解析結果

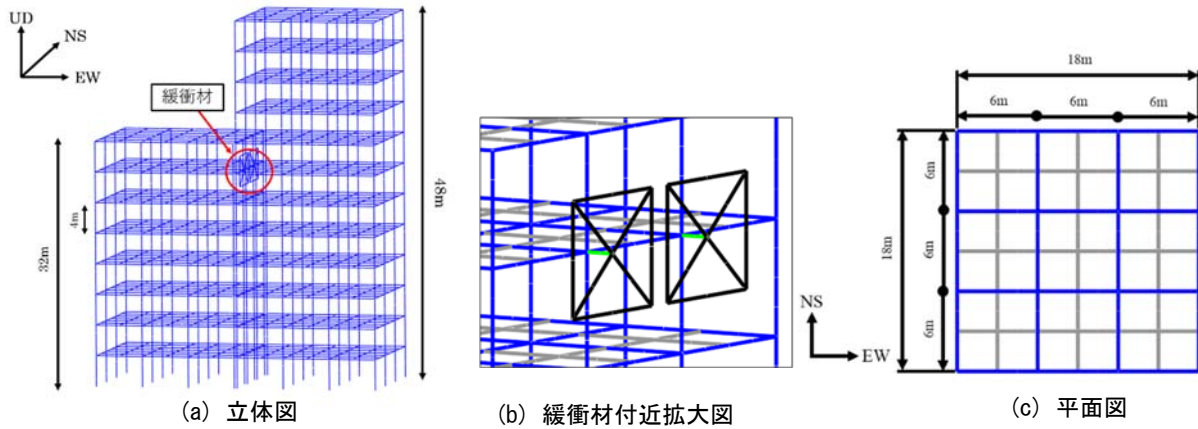


図-9 解析モデルの概観

降伏応力を計算した。 #

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

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 66 倍の HSV 材をひずみ速度 3133499: # $\frac{1}{s}$ で一軸圧縮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も考慮するために、発泡倍率 66 倍の HSV 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。 #

$$\frac{E}{E_0} = -8.7603\varepsilon_{ul}^3 + 11.65\varepsilon_{ul}^2 - 5.3334\varepsilon_{ul} + 1.1591 \quad \#5, \#$$

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、本研究では除荷時の弾性係数は再載荷時と同じとした。 #

図10にHSV緩衝材の模式図とはり要素によるモデル図を示す。本研究では、HSV緩衝材をはり要素でモデル化するにあたり、HSV材の軸方向圧縮特性を表現するためのHSV要素（図中、緑色の要素）と、緩衝材の形状を表現するフレーム要素（図中、黒色の要素）の5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。 #

2.3 材料試験の再現解析

以上で示した解析モデルの妥当性を検証するため、EPS材（発泡倍率33倍）の一軸繰返し載荷試験（積水化成品工業（株）提供）の再現解析を行った。再現解析では解析モデルの寸法を試験体と同じく50 [mm]角の立方体とし、フレーム要素上部の4節点に試験と同様に0.001667 [s]のひず

み速度で一軸圧縮荷重を加えた。EPS要素のひずみがそれぞれ0.2, 0.4, 0.6に到達した際に除荷を行った。試験結果と再現解析結果を比較したグラフを図-7に示す。図より、プラトー領域の特性と再載荷時の剛性低下を表現できていることが確認できる。さらに、ひずみ速度を0.1667 [s]とした場合の解析結果を併せて図-8に示す。図より、載荷時のひずみ速度に応じて降伏応力も増加し、ひずみ速度依存性が定性的に再現できていることが確認できる。

3. 棟間衝突解析

3.1 隣接した建築物のモデル化

本研究では、HSV緩衝材による棟間衝突被害の低減効果を評価するために、異なる固有周期を持つ、隣接した5棟の中高層建築物のモデル化を行った。図11にそのモデルを示す。ベースシア係数は低層モデルが31565、高層モデルが3149:である。共に階高713#p、スパン長913#pとし、それぞれ；層6×6スパン、45層6×6スパン、棟間距離は533#pである。また、構造部材は線形W1p rvkhqnrはり要素を用いてモデル化しており、柱、梁ともに7要素分割としている。柱部材は角型鋼管、梁部材はK型鋼とし、共に材料はvv733としている。床部材は十字状にモデル化し、厚さ633#p、幅6333#p、材料は普通コンクリートとした。最上階では床荷重を6863#[N/m²]、それ以外の階は7<36#[N/m²]とした。固有周期は、HZ方向、QV方向共に低層モデルが31<6#v、高層モデルが416: #vである。HSV緩衝材は幅8333#p、高さ7333#p、厚さを棟間距離の半分の433#pとしており、大きな衝突が予想される；階部分の低層モデル側壁面の柱梁接合部に計2枚剛接している。 #

3.2 解析結果

隣接した5棟の中高層建築物間に発泡倍率が；8倍および66倍のHSV材を設置した場合の比較を行う。入力地震波には、4<<8年兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で観測されたMPD神戸波原波を用いる。本研究では、問題を単純化するためにHZ方向の一軸加振とする。MPD神戸波のHZ方向加速度波形とHZ方向加速度応答スペクト

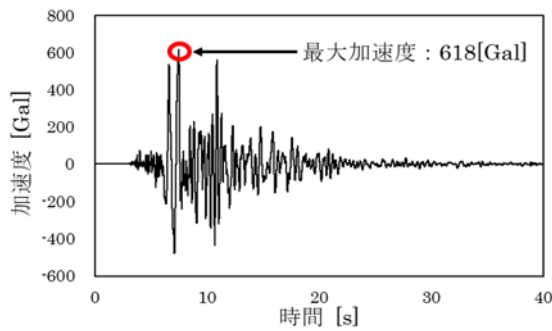


図-10 JMA 神戸波の EW 方向加速度波形

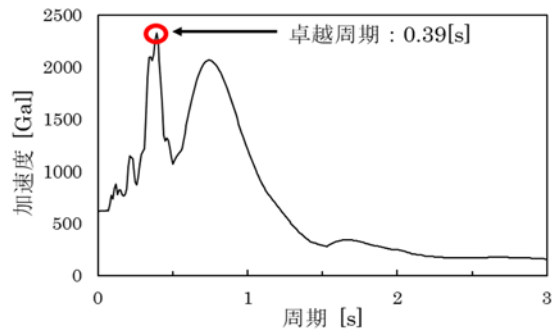


図-11 JMA 神戸波の EW 方向加速度応答スペクトル

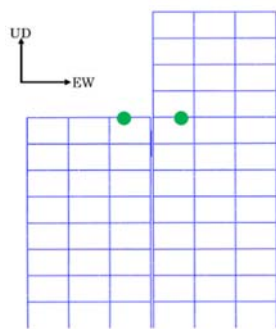


図-12 応答加速度の評価点

ルをそれぞれ図043 と図044 に示す．最大加速度は 94.8 Gal, 卓越周期は 0.39 s である．解析における時間増分は 0.01 s, 実時間は 0.73 s である．

図-12に示す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，そして低層モデルと高層モデルの塑性化率をそれぞれ図-13から図-15に示す．図-13および図-14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，図-15の塑性化率を見ると，発泡倍率の違いによる差異はほとんどなかった．

発泡倍率33倍と85倍のEPS要素の応力-ひずみ線図を図-16に示す．図より，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とが確認できる．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．

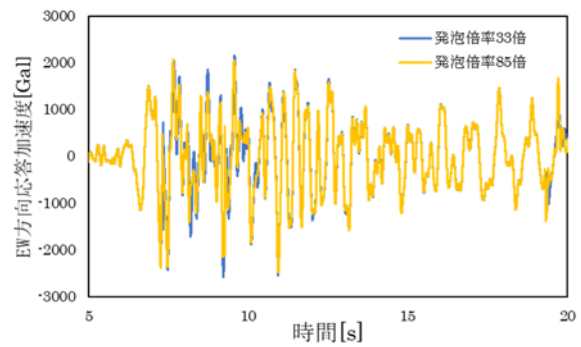


図-13 EW 方向応答加速度（低層モデル）

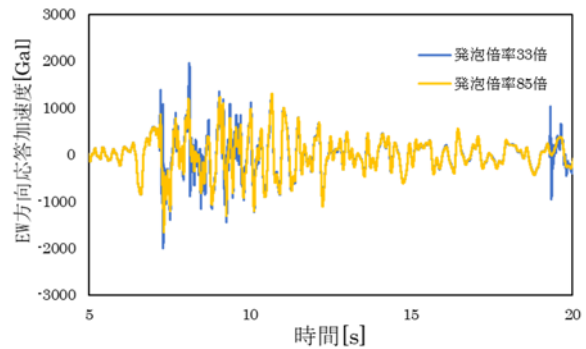


図-14 EW 方向応答加速度（高層モデル）

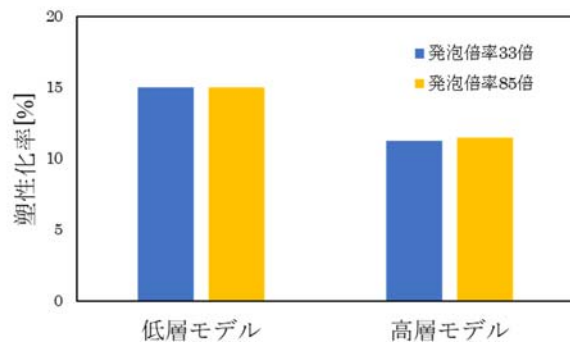


図-15 解析終了時の塑性化率

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，以下の知見が得られた．

- HSV 材のひずみ履歴特性モデルを導入した有限要素解析プログラムを用いて，一軸繰返し載荷試験の再現解析を行い，繰返し圧縮に伴う材料剛性の低下を妥当に再現できることを確認した．
- 低発泡倍率と高発泡倍率それぞれの HSV 緩衝材を設置した棟間衝突解析の結果から，発泡倍率の違いによる塑性化率の変化は見られなかった．一方で，棟間衝突に伴う応答加速度のピーク値については，高発泡倍率の方がより低減効果が高いことが示された．

以上より，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

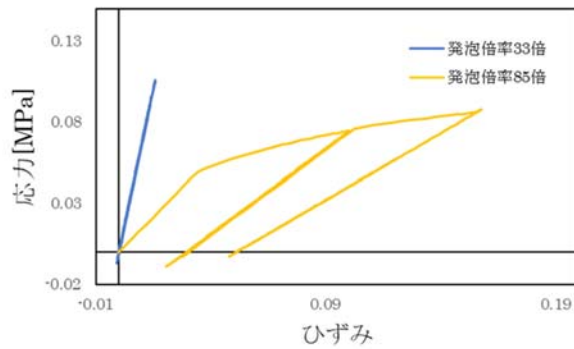


図-16 EPS 緩衝材の応力－ひずみ線図

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。他方、高発泡倍率の緩衝材はひずみがプラトー領域まで進行するため、永久ひずみが生じてしまう。そのため、棟間衝突が起きる度に交換が必要となる可能性がある。

今後は、緩衝材の厚さの違いによるクリアランスの変化を考慮した棟間衝突解析や、適切な設置面積の検討を行う必要がある。また、様々な建築物の組み合わせに対し、適切な緩衝材を提案できるガイドラインを作成することを目指している。

参考文献

- 4、 G 1 Lvreh/W1# R kwd/W1# Iqrxh# dqg# I1# P dwxhgd-## Vhlp lf# Srxqglqj# dqg# Frædsvh# Ehkdyhru# ri# Q h1jkerulqj# Exlqglqv# z 1k# G liihuhqw# Q dwxud# Shulrgv/1Q dwxud#Vflhgfh/17+;D ,1#s19;9Û9<6/1#3451#
- 5、 G 1 Lvreh#dqg#W1#Vklex |d#Suhdp lqdu|1Q xp hulfd# Vwkg|1# rq# wkh# Uhgxfwlrq# ri# Vhlp lf# Srxqglqj# G dp djh#wx#Exlqglqv#z 1k#H {sdqghg#Sro|vw|uhqh# Eαfnv/1H qj lghhulqj#1wuxfwxuhv/1#85/1#46:56/1#3551#
- [3] 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.
- 7、 O1 levrq/1dqg#P 1vke|1#FHOXODU#VR OIG V#1# Vwuxfwxuh#) 1Surshum1hv/1#F dp eulgjh#Vrdg#Vwdwh# Vflhgfh#1hulv/1#<<<1#
- 8、 二川曉美, 山崎真治1#発泡スチロールの衝撃による圧縮応力αひずみ特性, 材料, 55+566,, ss1#5<0466, 4<:6. 1#
- 9、 Q 1Mrqhv: Vwuxfwxud#p sdfw F dp eulgjh1# qlyhuvlw|1# Suhvv/1#<;<1#