

各種発泡材料の緩衝性能評価に関する重錘落下衝撃実験

Investigation of impact absorbing capacity for various expanded materials due to falling-weight impact loading tests

栗橋祐介[†], 小暮直親^{*}, 新田真一^{**}, 小室雅人^{***}, 戸上卓也^{****}

Yusuke Kurihashi, Naochika Kogure, Shin-ichi Nitta, Masato Komuro, and Takuya Togami

[†]博(工), 室蘭工業大学講師, 大学院工学研究科 暮らし環境系領域(〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

^{*}(株) JSP 第一事業本部 建築土木資材事業部 (〒100-0005 東京都千代田区丸の内3丁目4番2号)

^{**}(株) JSP 札幌営業所 (〒060-0003 札幌市中央区北3条西1丁目1番地)

^{***}博(工), 室蘭工業大学准教授, 大学院工学研究科 暮らし環境系領域(〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

^{****}室蘭工業大学大学院 博士前期課程 環境創生工学専攻(〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

In this study, in order to investigate absorbing capacity for various expanded materials, falling-weight impact loading tests were conducted taking the kind of expanded material and falling height of weight as variables. After that, the impact loading tests with setting a core slab on upper surface of those expanded materials were conducted. The results obtained from these experiments are as follows: 1) relationships between transmitted impact stress and penetration strain behave similarly to each static loading test result irrespective of with/without core slab; 2) the larger the compressive strength of expanded material, the wider the distributed area of transmitted impact stress; and 3) putting core slab on the expanded material of high compressive strength, the absorbing capacity tends to be more increased.

Key Words: expanded materials, core slab, stress dispersion, impact absorbing capacity, impact loading tests

キーワード：発泡材料, 芯材, 応力分散, 緩衝性能

1. はじめに

近年, 異常気象や大規模地震などの影響により, 建設時に想定していた荷重よりも大きな落石荷重に対する安全性の検討事例が増加している. その一方で, 耐衝撃用途構造物の設計法においては, 実大実験や信頼性の高い数値解析で安全性を照査する性能照査設計法の確立に向けた検討が進められている^{1),2)}. そのため, 新材料や新工法を活用した自由度の高い合理的な設計法の適用が可能になってくるものと考えられる.

耐衝撃用途構造物の一つである落石覆工の場合には, 頂版上部に落石荷重への緩衝材として砂や現地発生土を用いる他, より大きな落石エネルギーへの対策として, 発泡材料の一つである発泡スチロール (Expanded PolyStyrol: EPS) の上に RC 版と砂を積層した三層緩衝構造^{3),4)} が用いられている (図-1参照). これは, RC 版によって衝撃荷重を広範囲に分散させることで EPS の有する緩衝性能を有効に活用する高エネルギー吸収型

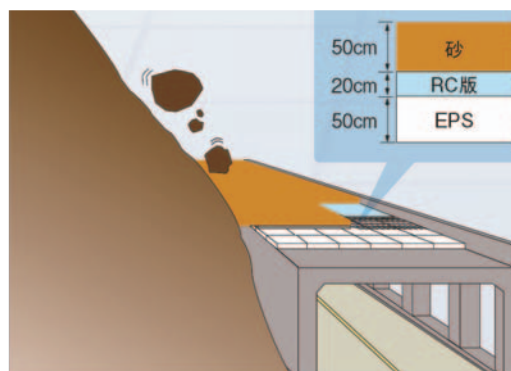


図-1 三層緩衝構造の概要

の緩衝構造である.

一方, 近年, 様々な用途で多種多様な材料特性を有する発泡材料が開発されている. 一般的に圧縮強度特性の高い発泡材料は, 衝撃荷重作用時における伝達衝撃応力が大きくなる傾向にあるものの, エネルギー吸収性能も高い. また, 前述の三層緩衝構造に適用する場合には, 伝達衝撃応力の分布範囲をより広くできる可能性がある.

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: kuri@mmm.muroran-it.ac.jp

表－1 発泡材料の材料特性

発泡材の記号	主成分	発泡倍率	単位体積重量 (kN/m ³)	主な用途
ST	ポリスチレン	50	0.212	地盤沈下対策, 落石緩和対策など
PP	ポリプロピレン	45	0.195	防舷材, 自動車のバンパー
EST	ポリエチレン・ポリスチレン複合体	30	0.304	精密機器・家電のクッション材など

表－2 試験体一覧

試験体名	芯材の有無	発泡材の種類	設定落下高さ (mm)	実測衝突速度 (m/s)	入力エネルギー E_k (J)
N-ST-H50	なし	ST	50	0.99	9.77
N-ST-H100			100	1.40	19.7
N-ST-H150			150	1.74	30.3
N-ST-H200			200	1.98	39.1
N-PP-H50		PP	50	0.97	9.34
N-PP-H100			100	1.40	19.7
N-PP-H150			150	1.74	30.3
N-EST-H50		EST	50	0.97	9.34
N-EST-H100			100	1.40	19.7
N-EST-H150			150	1.81	32.9
N-EST-H200			200	1.98	39.1
N-EST-H300			300	2.56	65.5
C-ST-H200	あり		ST	200	2.07
C-ST-H300		300		2.42	58.4
C-ST-H400		400		2.72	73.9
C-PP-H200		PP	200	1.98	39.1
C-PP-H300			300	2.56	65.5
C-EST-H200		EST	200	2.07	42.9
C-EST-H300			300	2.42	58.4
C-EST-H400			400	2.90	84.1
C-EST-H500			500	3.11	96.5
C-EST-H600			600	3.35	112.0

このように、従来の発泡材料とは強度特性の異なる材料を用いることにより、三層緩衝構造の緩衝性能を向上できる可能性があるものと考えられる。しかしながら、発泡材料の緩衝性能に及ぼす圧縮強度特性の影響については、検討されていないのが現状である。

このような観点より、本研究では、圧縮強度特性の異なる各種発泡材料の緩衝効果を検討することを目的に、落下高さを変化させた重錘落下衝撃実験を行った。また、伝達衝撃応力を分散するための芯材を積層する場合についても実験を行い、それらの緩衝性能に及ぼす発泡材料の圧縮強度特性の影響について比較検討した。さらに、エネルギー収支関係から伝達衝撃応力の分散度合いを評価した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表－1には、検討対象とした発泡材料の特性を一覧にして示している。本研究に用いた発泡体は、ポリスチレン発泡材 (ST)、ポリプロピレン発泡材 (PP)、ポリエチレン・ポリスチレン複合発泡材 (EST) である。ここで、ポリスチレン発泡材 (ST) は、いわゆる発泡スチロールであり、これまで土木資材として軟弱地盤対策や落石緩和対策に広く用いられている。

また、ポリプロピレン発泡材 (PP) は、寸法安定性に優れ大きな圧縮変形後も元の形状に復元する特性を有しており、防舷材や自動車のバンパーなどに広く用いられ

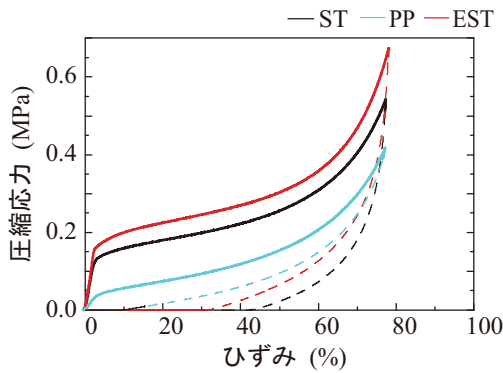


図-2 各発泡材料の圧縮強度試験⁵⁾の結果

ている。ポリエチレン・ポリスチレン発泡材 (EST) は、他の発泡材よりも粘り強さや圧縮強度が高いため、精密機器や家電の梱包材として適用されている。

図-2には、各種発泡材料の圧縮試験結果を示している。試験は JIS K 7220 (硬質発泡プラスチック 圧縮特性の求め方)⁵⁾に準拠して、1辺 50 mm の立方体を対象に実施した。図より、いずれの発泡材も、圧縮ひずみ 2% 程度までは弾性的に応力が增大するものの、60~70% 程度まで小さな増加勾配で推移し、それ以降は急激に応力が増加する傾向を示している。ただし、同一ひずみ時における圧縮応力は各発泡材料で異なっており、このことが衝撃载荷時における伝達衝撃応力に影響を与えるものと推察される。

表-2には、試験体の一覧を示している。試験体数は、芯材なし/ありの両シリーズに対して、発泡材の種類、重錘落下高さをそれぞれ変化させた全 22 ケースである。なお、本実験では事前に全 9 種類の原材料や発泡倍率の異なる発泡材に関する重錘落下衝撃実験を実施し、汎用の ST 発泡材と圧縮強度特性が比較的大きく異なる材料を選定することとした。

表-2において試験体名の第 1 項は芯材の有無 (N: 無し, C: 有り)、第 2 項は発泡材の種類 (表-1参照)、第 3 項の英文字 H に付随する数値は落下高さ (mm) を表している。

2.2 実験方法と測定項目

図-3には、試験体と伝達衝撃応力測定の概要を示している。試験体は、平面寸法が 240 mm 四方で、厚さが 50 mm の発泡材である。芯材ありの場合には、厚さ 12.5 mm の石膏ボード (JIS A 6901⁶⁾ 適合品) を発泡材の上に設置した。なお、石膏ボードの厚さは、実用化されている三層緩衝構造における EPS ブロックと芯材 RC 版の厚さ比を参考にして、市販品の仕様から選定した。

重錘落下衝撃実験は、質量 20 kg、先端直径 60 mm の鋼製重錘を所定の高さからリニアールを介して発泡材の中央部に自由落下させる形で行った。発泡材は、応力計を埋設した鋼製の底盤上に設置し、その伝達衝撃応

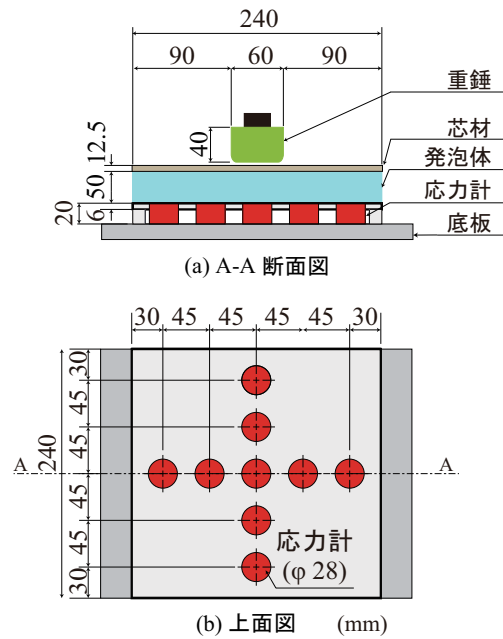


図-3 試験体と伝達衝撃応力測定の概要

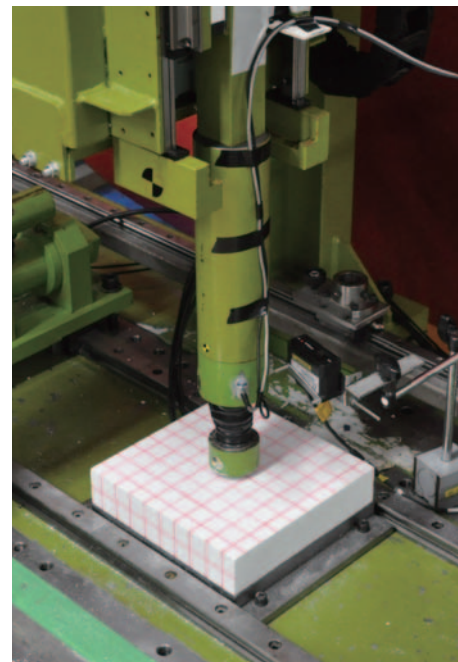


写真-1 重錘落下衝撃実験の状況

力分布を計測した。写真-1には、実験状況を示している。実験では、発泡材料の最大貫入ひずみが 75% を超過した時点を終局状態と定義した。すなわち、後述する重錘貫入量が 37.5 mm を上回るまで落下高さを増加させて実験を行った。これは、1) 図-2に示すように貫入ひずみが 75% を超過すると圧縮応力が急激に増加し、かつ 2) 後述の 図-6 や 図-10 に示すように発泡材の損傷が著しくなるため、実験装置が破損する可能性があるものと判断して設定した。

本実験における測定項目は、重錘衝撃力、重錘貫入量

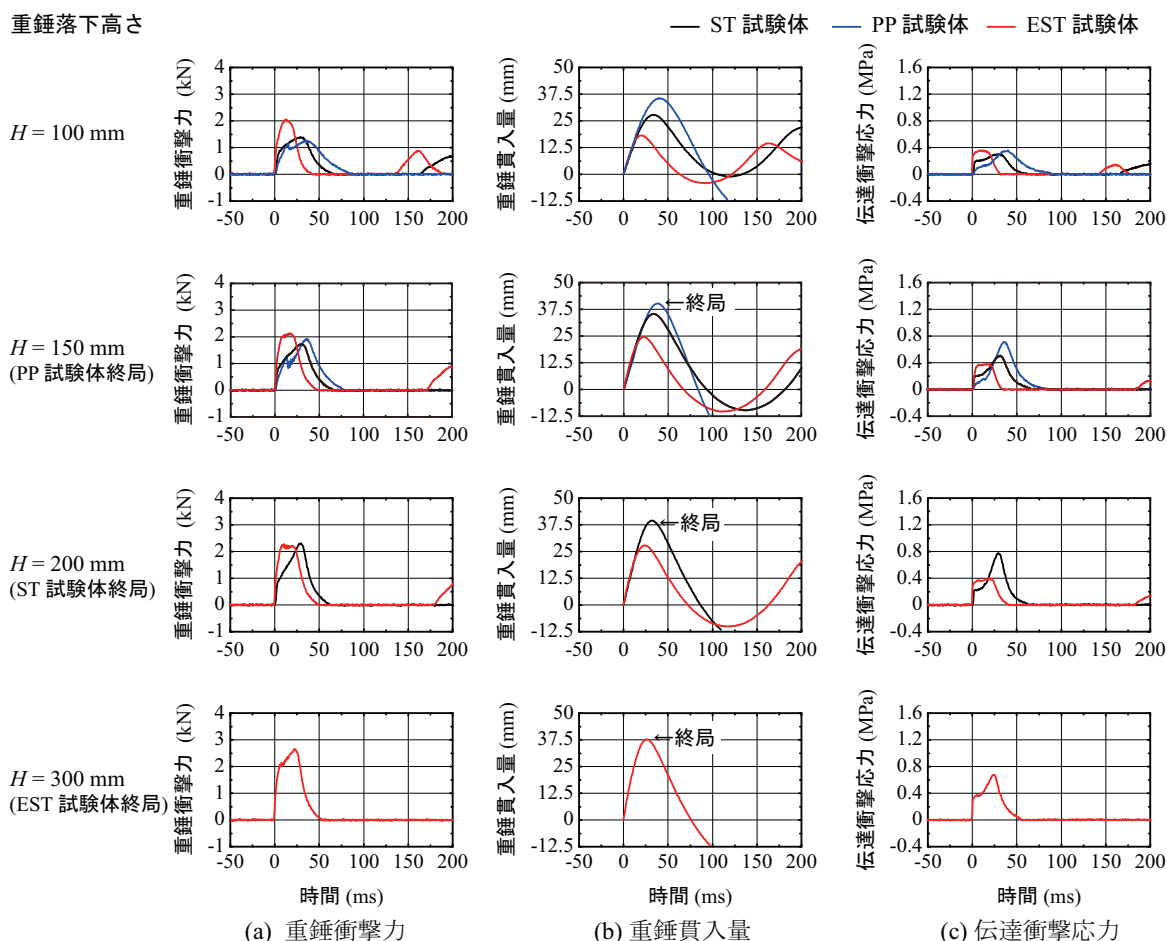


図-4 芯材なしの場合における各種時刻歴応答波形

および伝達衝撃応力分布である。重錘衝撃力は、容量 25 kN の衝撃荷重測定用ロードセルを用いて測定した。重錘貫入量は、レーザ式変位計を鉛直上向きに設置し、重錘に取り付けた L 字アングルとの距離を測定する形で評価した。伝達衝撃応力分布は、図-3 に示しているように、容量 7 MPa の応力計を載荷点およびその前後左右に 45 mm 間隔で配置して測定した。

また、衝突速度は、レーザセンサーを用い、重錘に取り付けた長さ 30 mm の白色プレートが通過する時間を計測して算出した。実験では、これらの計測値を、メモリレコーダを用いて、サンプリング周波数 2 kHz で一括収録した。実験終了後には、発泡材を中央部で切断して、破壊性状を観察した。

3. 芯材なしの場合の実験結果

3.1 各種応答波形

図-4には、芯材なしの場合における重錘衝撃力、重錘貫入量、および載荷点直下の伝達衝撃応力(以下、単に伝達衝撃応力)に関する時刻歴応答波形を重錘落下高さ H ごとに示している。図より、重錘衝撃力は、最大振幅が 1.5 ~ 2.5 kN 程度で、継続時間が 50 ~ 75 ms 程

度の波形を示していることが分かる。また、前述の材料試験における圧縮強度特性が大きい場合ほど、立ち上がり勾配や最大衝撃力が大きく、かつ主波動継続時間は短くなる傾向にある。

重錘貫入量は、最大値を示した後、大きく復元して衝突点よりも高くリバウンドする傾向を示している。また、圧縮強度特性が大きい場合ほど、最大重錘貫入量が小さく主波動継続時間も短い。最大重錘貫入量は、落下高さの増加に伴って大きくなっており、各発泡材料の最大落下高さにおいてはいずれも 37.5 mm (終局状態) を超過していることが確認できる。

伝達衝撃応力は、重錘衝撃力の場合と同様に重錘衝突時に急激に立ち上がり、その後勾配が大きく変化する性状を示している。また、勾配変化時の伝達衝撃応力は、図-2の圧縮強度試験結果の勾配変化点と概ね対応している。ただし、EST 試験体の場合には、材料試験結果の圧縮応力の変曲点 (0.18MPa) よりも大きな伝達衝撃応力を示しているが、この点については、今後さらに検討する必要があるものと考えられる。

なお、伝達衝撃応力は、重錘落下高さ H の増加に伴って大きくなる傾向を示しており、各発泡材料の最大落下高さにおいては、経過時間 25 ms 程度以降に再度急

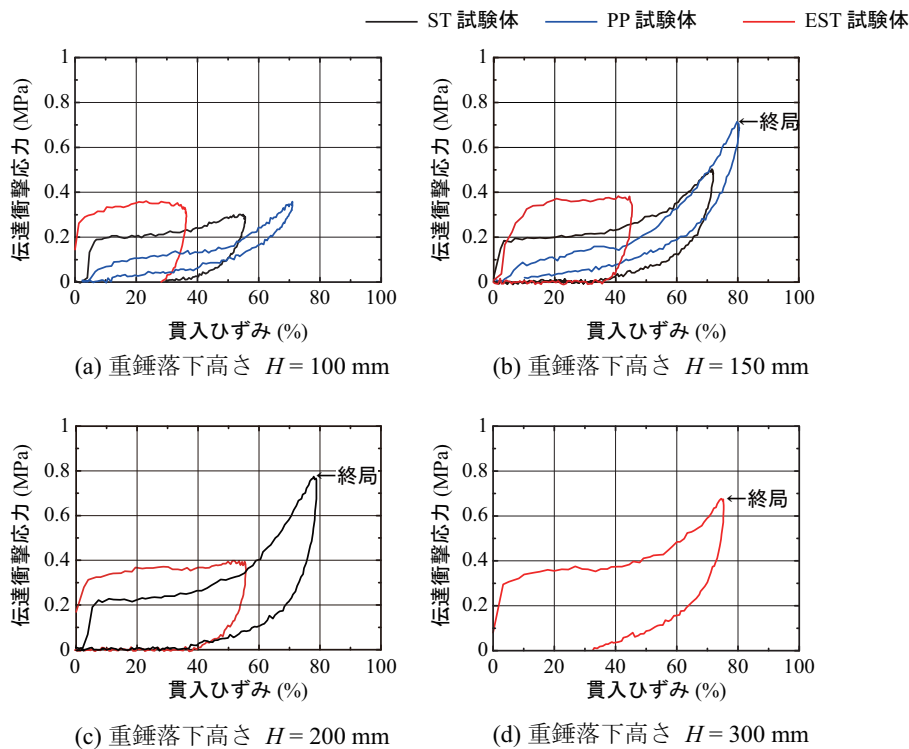


図-5 芯材なしの場合における伝達衝撃応力-貫入ひずみ履歴曲線

激に大きくなる傾向を示している。これは、発泡材料のひずみが75%程度に至る過程で圧縮応力が急増したことによるものと考えられる。

3.2 伝達衝撃応力-貫入ひずみ履歴曲線

図-5には、芯材なしの場合における伝達衝撃応力-貫入ひずみ履歴曲線を示している。なお、貫入ひずみは、重錘貫入量を発泡材の厚さで除して求めた。図より、伝達衝撃応力-貫入ひずみ履歴曲線は、落下高さの増加に伴って応力とひずみから得られるループ面積が大きくなる傾向にある。また、貫入ひずみが40%程度まではほぼ一定の伝達衝撃応力を示しているものの、50~60%以降では応力の増加勾配が大きくなる傾向を示しており、その形状は図-2の圧縮強度試験結果とほぼ同様であることが分かる。

ただし、EST試験体の場合には、貫入ひずみ40%程度までの伝達衝撃応力が材料試験による圧縮応力よりも大きい。このことから、ESTは速度依存性が高い可能性が示唆されるが、この点についてはデータを蓄積し、今後さらに検討を進める必要がある。

3.3 発泡材の損傷状況

図-6には、芯材なしの場合における実験終了後の各試験体の切断面を示している。なお、切断面は写真-2に示すように、載荷点を通る中心線に沿って切断した面である。各切断面の図には、実験時における最大貫入ひずみ ε_p も記している。

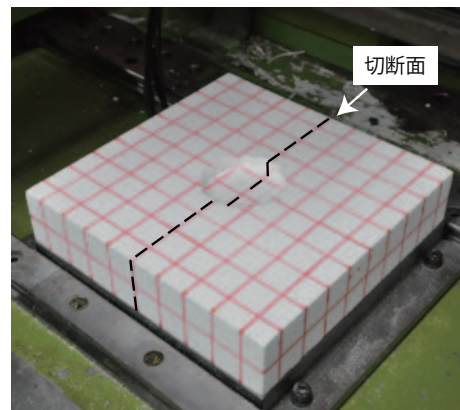


写真-2 発泡材切断面の位置

図より、いずれの発泡材も、重錘落下高さ H の増加に伴って、残留変形が大きくなり斜め下方に進展する亀裂も長く、その幅も広くなる傾向にあることが分かる。また、PP試験体はST試験体よりも最大貫入ひずみ ε_p が大きいかかわらず、損傷が小さいことから、復元性能に優れていることが分かる。一方、EST試験体は、ST試験体よりも同一落下高さにおける変形や損傷が小さいことから、衝撃に対する抵抗性やエネルギー吸収性能に優れていることが分かる。

3.4 最大変位時の伝達衝撃応力分布

図-7には、芯材なしの場合における最大変位時の伝達衝撃応力分布を各重錘落下高さ H と比較して示している。

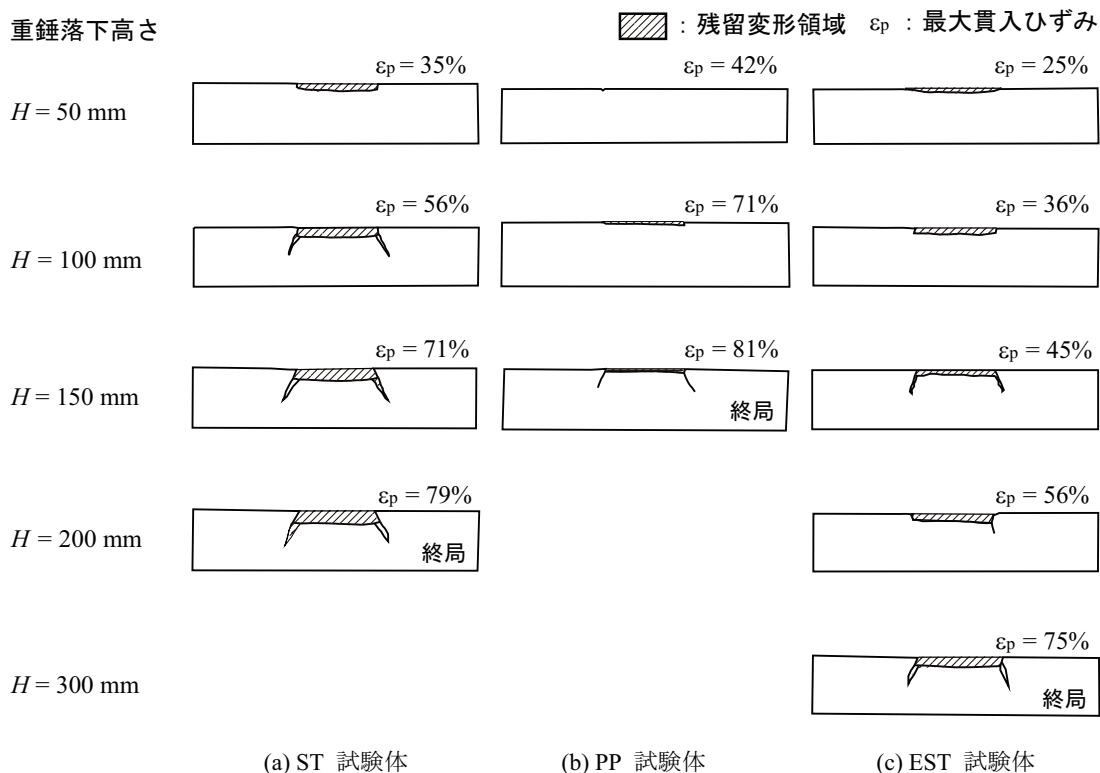


図-6 芯材なしの場合における発泡材切断面の状況

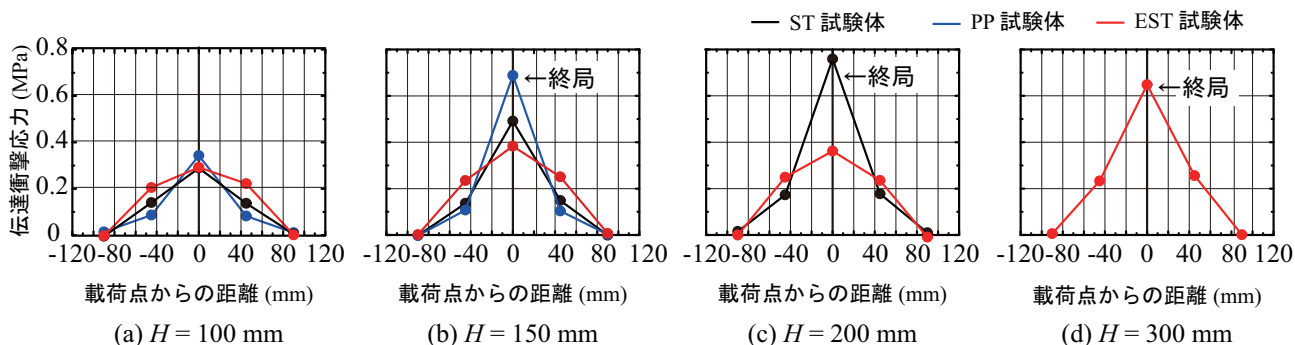


図-7 芯材なしの場合における最大変位時の伝達衝撃応力分布

図より、落下高さにかかわらず、いずれの試験体も载荷点直下の伝達衝撃応力が最も大きくなっていることが分かる。ST および PP 試験体の場合には、载荷点の伝達衝撃応力が突出して大きくなる傾向を示している。このような载荷点の伝達衝撃応力値が突出する傾向は、 $H = 150 \text{ mm}$ の場合に顕在化し、この時点で PP 試験体は終局に至っている。さらに $H = 200 \text{ mm}$ では、ST 試験体が終局に至っている。

これに対し、EST 試験体の場合には、伝達衝撃応力の分布形状は、 $H = 200 \text{ mm}$ までは底辺の広い五角形状を示し、 $H = 300 \text{ mm}$ において载荷点の伝達衝撃応力が突出する形状を示している。これらのことから、圧縮強度の大きい EST 試験体の伝達衝撃応力が最も広く分散する傾向にあることが明らかになった。

4. 芯材ありの場合の実験結果

4.1 各種応答波形

図-8には、芯材ありの場合における重錘衝撃力、重錘貫入量、および伝達衝撃応力に関する時刻歴応答波形を示している。図より、重錘衝撃力は、芯材なしの場合と異なり重錘衝突直後、急激に 2 kN 程度まで増加し、その後一度除荷状態になり、再度载荷状態を呈している。これは、後述するように重錘が芯材に衝突し突き抜けた後、発泡材を変形させているためである。なお、各重錘落下高さ H における最大重錘衝撃力は、芯材なしの場合と同様に PP 試験体が最も小さく、EST 試験体が最も大きい。

重錘貫入量および伝達衝撃応力に関する応答波形は、

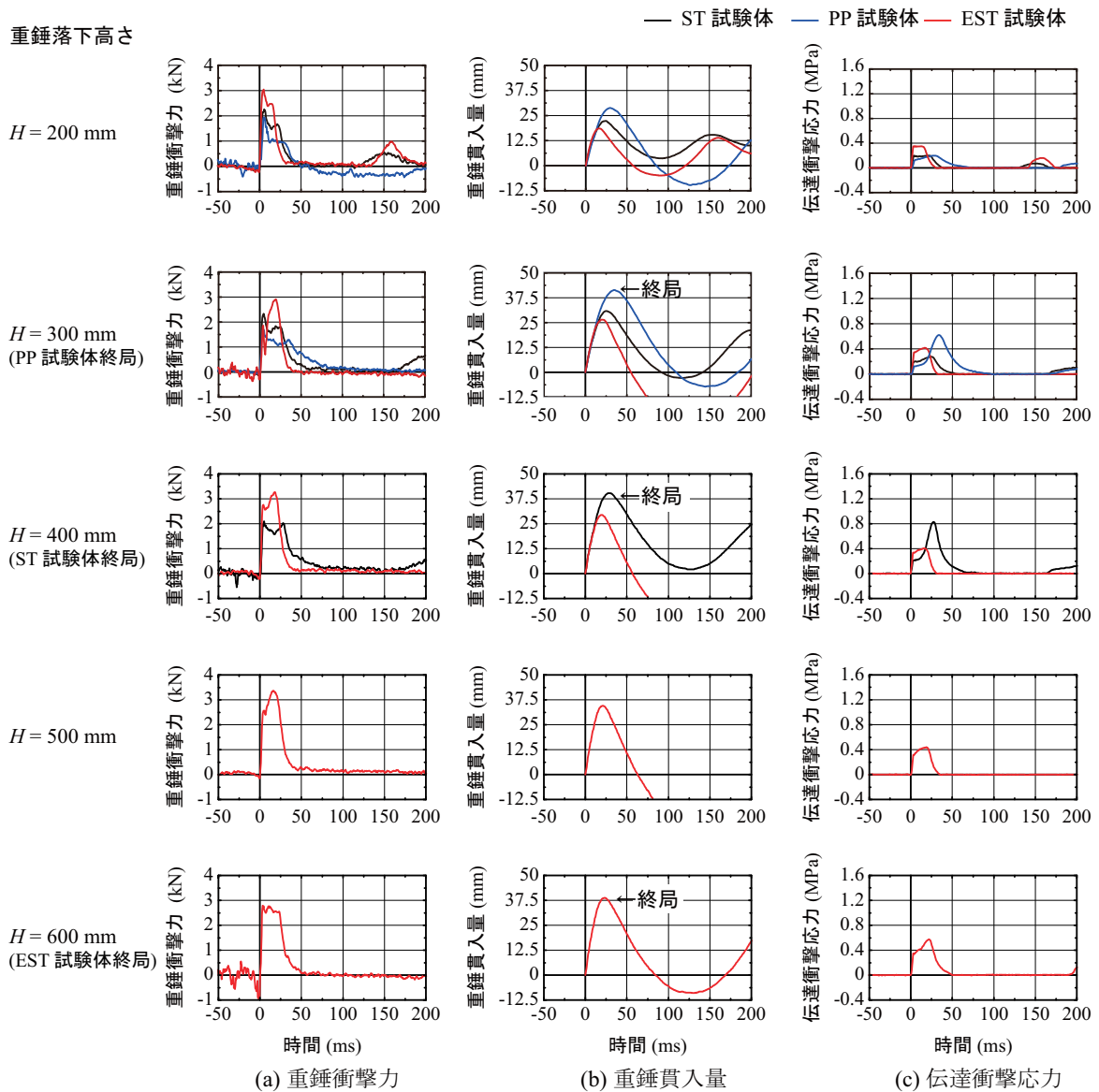


図-8 芯材ありの場合における各種時刻歴応答波形

芯材なしの場合とほぼ同様の性状を示している。これは、重錘衝突直後に芯材が押し抜け、その後は芯材なしの場合と類似の変形挙動を示したことによるものと考えられる。なお、ST、PP および EST 試験体はそれぞれ、重錘落下高さ $H = 400, 300$ および 600 mm で载荷した後終局に至っている。

4.2 伝達衝撃応力-貫入ひずみ履歴曲線

図-9には、芯材ありの場合における伝達衝撃応力-貫入ひずみ履歴曲線を示している。なお、貫入ひずみは、芯材の厚さを無視し、重錘貫入量を発泡材の厚さで除して求めた。これは、芯材の圧縮変形は発泡材の場合に比較して極めて小さいことを破壊性状から確認しているためである。

図より、伝達衝撃応力-貫入ひずみ履歴曲線は、芯材なしの場合と同様に重錘落下高さ H の増加に伴って大きなループを描く傾向にあることが分かる。なお、初期

勾配は、芯材なしの場合よりも緩やかである。これは、芯材により伝達衝撃応力が分散され、载荷点直下の伝達衝撃応力が小さくなったことによるものと考えられる。

また、貫入ひずみが 20 % 以降の履歴曲線は、前述の材料試験結果と概ね同様の性状を示している。これは、芯材が押し抜けた後では、芯材なしの場合とほぼ同様のエネルギー吸収特性を示すことによるものと考えられる。

4.3 芯材および発泡体の損傷状況

写真-3には、C-ST-H400 試験体を例に、実験終了後における (a) 芯材表面、(b) 芯材裏面、(c) 芯材撤去後の発泡材表面、(d) 発泡材の陥没状況を示している。写真-3(a), (b) より、芯材には重錘先端部直径とほぼ同じ大きさの孔があき、押抜きせん断破壊に至っていることが分かる。また、写真-3(c) より、発泡材上面には芯材から分離した押抜きせん断コーンが見られる。また、写真-3(d) より、発泡材は芯材の押抜きせん断破壊の影響

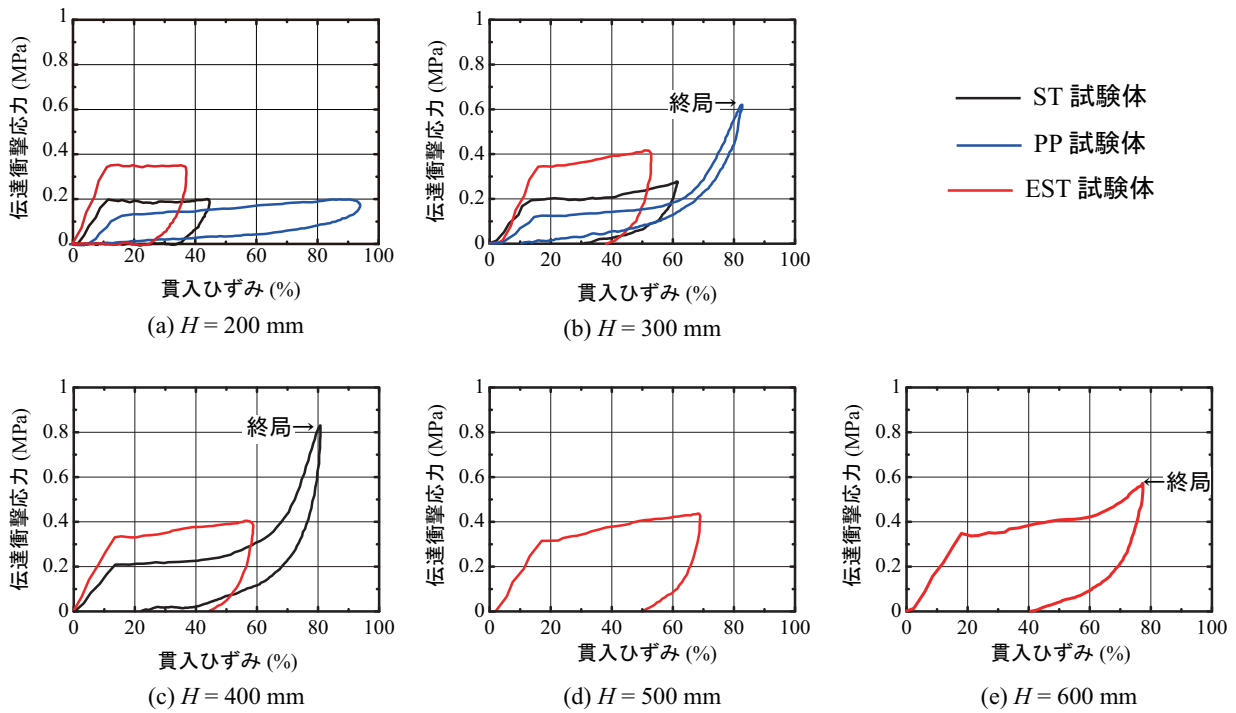


図-9 芯材ありの場合における伝達衝撃応力-貫入ひずみ履歴曲線

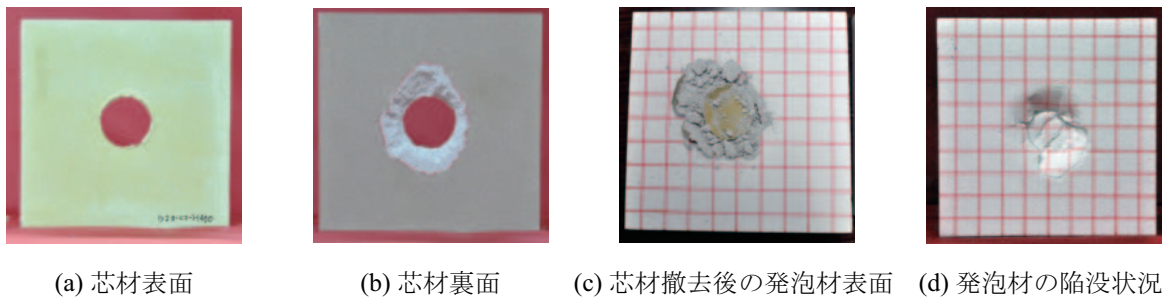


写真-3 実験終了後における C-ST-H400 試験体の芯材および発泡体の損傷状況

により、重錘先端部直径よりも大きな範囲で圧縮変形していることが分かる。このような傾向は、既往の RC 版と EPS から成る二層緩衝構造の重錘落下衝撃実験⁷⁾においても確認されている。

図-10には、実験終了後における発泡材の切断面を示している。図より、ST および EST 試験体の場合には、図-6の芯材なしの場合よりも発泡材の残留変形領域が大きいことが分かる。これは、芯材を設置することにより衝撃力が分散されたことによるものと考えられる。このことから、発泡材の種類によらず、芯材を設置することにより発泡材のエネルギー吸収性能が効率的に発揮されていることが分かる。

なお、芯材がない場合には、ST、PP および EST 試験体は、それぞれ $H = 200, 150$ および 300 mm で終局に至っているのに対し、芯材がある場合には、それぞれ $H = 400, 300$ および 600 mm で終局に至っている。このことから、本実験においては、発泡材の種類によらず芯材を積

層するとエネルギー吸収能が倍増していることが分かる。これは、芯材設置によりエネルギー吸収能が加算的に増加するのではなく、倍増していることから、芯材設置によるエネルギー吸収能の向上効果は、圧縮強度特性の大きい場合ほど効率的に発揮されることが明らかになった。

4.4 最大変位時の伝達衝撃応力分布

図-11には、芯材ありの場合における最大変位時の伝達衝撃応力分布を各重錘落下高さ H で比較して示している。

図より、重錘落下高さ $H = 300$ mm の場合には、芯材なしの $H = 100$ mm と同様に EST 試験体の伝達衝撃応力分布は底辺の広い五角形状になっているのに対し、ST および PP 試験体の場合には、载荷点の伝達衝撃応力が突出して大きくなる傾向を示している。なお、PP 試験体はこの時点で終局に至り、ST 試験体は $H = 400$ mm で終局に至っている。

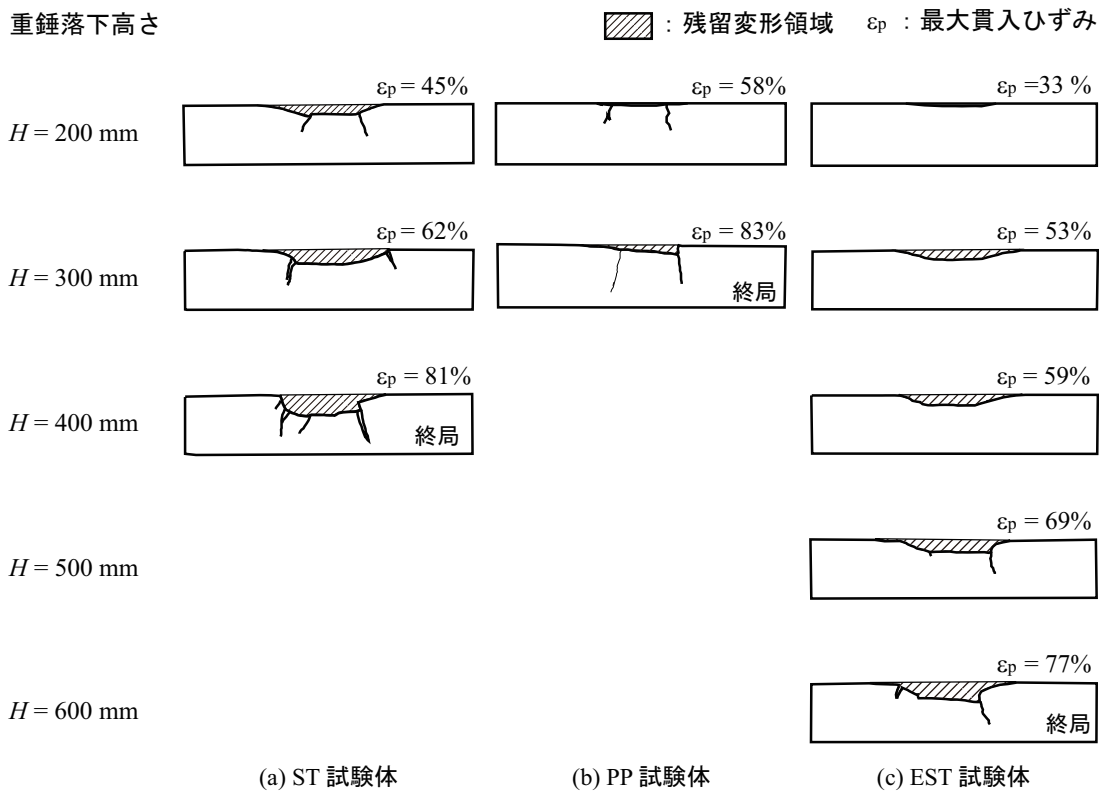


図-10 芯材ありの場合における発泡材切断面の状況

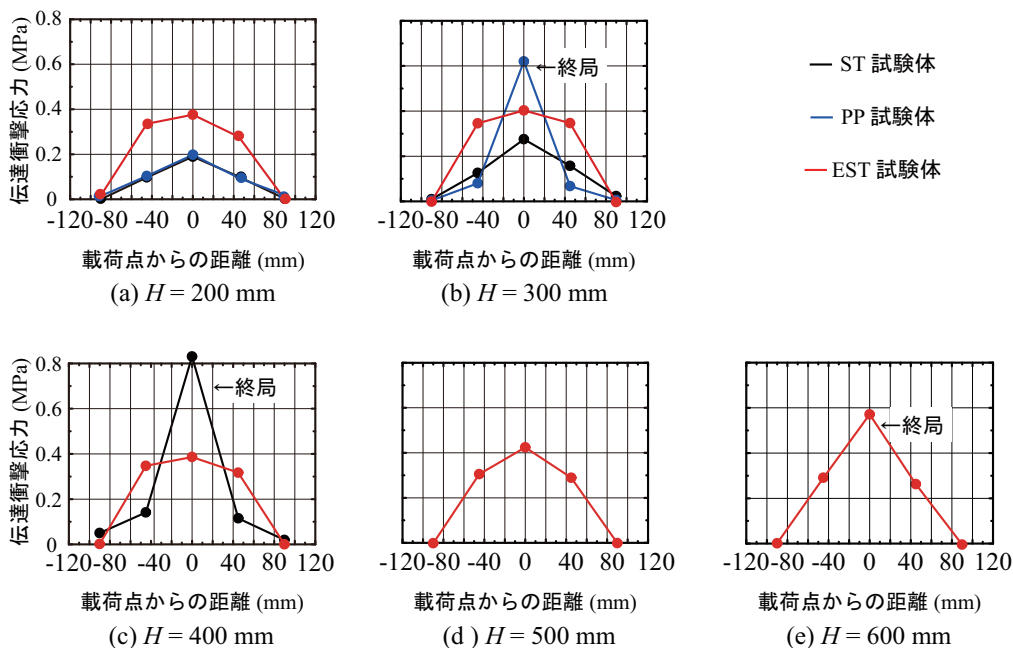


図-11 芯材ありの場合における最大変位時の伝達衝撃応力分布

一方、EST 試験体の場合には、伝達衝撃応力分布は、 $H = 500$ mm まで底辺の広い五角形状を示し、 $H = 600$ mm において、三角形形状を示し終局に至っている。

これらのことから、同一落下高さにおける伝達衝撃応力の分布範囲は、圧縮強度が最も大きい EST 試験体の場合において最も広くなることが明らかになった。

5. 応力分散係数を用いた最大貫入ひずみの推定

5.1 応力分散係数

表-3には、本実験におけるエネルギー収支に関する実験結果の一覧を示している。ここで、入力エネルギー E_k は実測衝突速度を用いて算出し、また重錘直下の発

表-3 エネルギー収支に関する実験結果の一覧

試験体名	芯材の有無	発泡材の種類	落下高さ (mm)	入力エネルギー E_k (J)	重錘直下の発泡材の吸収エネルギー E_{a1} (J)	応力分散係数 $\alpha = E_k / E_{a1}$
N-ST-H50	なし	ST	50	9.77	9.5	1.0
N-ST-H100			100	19.7	16.6	1.2
N-ST-H150			150	30.3	25.8	1.2
N-ST-H200			200	39.1	36.5	1.1
N-PP-H50		PP	50	9.34	6.3	1.5
N-PP-H100			100	19.7	14.5	1.4
N-PP-H150			150	30.3	26.8	1.1
N-EST-H50		EST	50	9.34	10.0	1.0
N-EST-H100			100	16.4	17.0	1.2
N-EST-H150			150	32.9	20.5	1.6
N-EST-H200			200	39.2	27.9	1.4
N-EST-H300			300	65.5	43.2	1.4
C-ST-H200	あり	ST	200	42.9	10.4	3.8
C-ST-H300			300	58.4	16.7	3.5
C-ST-H400			400	73.9	32.0	2.5
C-PP-H200		PP	200	39.1	10.4	3.8
C-PP-H300			300	65.5	21.3	2.8
C-EST-H200		EST	200	42.9	16.6	2.6
C-EST-H300			300	58.4	22.8	2.6
C-EST-H400			400	84.1	26.8	2.9
C-EST-H500			500	96.5	31.5	3.1
C-EST-H600			600	112.0	38.6	3.0

泡材の吸収エネルギー E_{a1} は、図-5 および 図-9 に示した载荷点直下の伝達衝撃応力と貫入ひずみとの履歴曲線を用いて下式のように算出した。

$$E_{a1} = S \times H \times A \quad (1)$$

ここで、 S : 伝達衝撃応力-貫入ひずみ履歴曲線における最大貫入ひずみまでの積分値 (MPa) (図-12 参照), H : 発泡材の高さ (mm), A : 重錘底面の面積 (mm^2) である。また、応力分散係数 α は、入力エネルギー E_k は発泡材の吸収エネルギー E_a と等価であるものと考え、下式により求めた係数である。

$$E_k = E_a = \alpha \times E_{a1} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{E_k}{E_{a1}} \quad (3)$$

この式より α は、発泡材料の全吸収エネルギー E_a (= 入力エネルギー E_k) を重錘直下の発泡材料の吸収エネルギー E_{a1} で除して求められる物理量であることが分かる。従って、 α は発泡材料のエネルギー吸収範囲の広がりを示す指標として評価可能であるものと考えられる。なお、芯材によるエネルギー吸収は、発泡材に比較すると極めて小さいものと考え、ここでは考慮しないこととした。

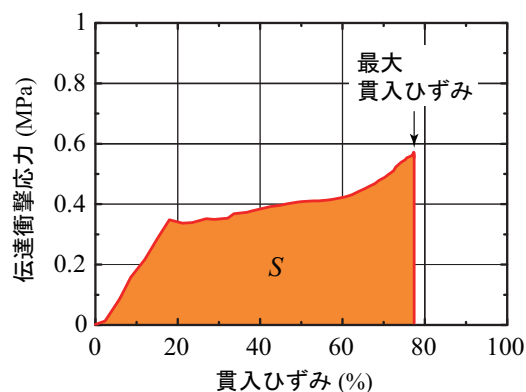


図-12 最大貫入ひずみまでの積分値

表より、応力分散係数 α は、芯材なしの場合には 1.0 ~ 1.6 であるのに対し、芯材ありの場合には 2.5 ~ 3.8 であることが分かる。このことから、芯材を設置することにより応力分散係数 α が増大しており、発泡材が広範囲に渡って効率的にエネルギーを吸収していることが定量的に明らかになった。

なお、応力分散係数 α は、図-13に示すように芯材が 45 度で押抜きせん断破壊するものと仮定し、重錘半径 R と芯材厚 t を用いて幾何学的に算定すると、下式の

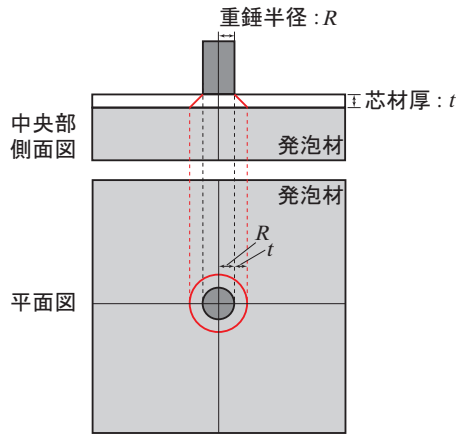


図-13 芯材の押抜きせん断破壊の概念図
(芯材のせん断ひび割れ角度 45° の場合)

ようになる。

$$\alpha_p = \frac{\pi(R+t)^2}{\pi R^2} = \left(1 + \frac{t}{R}\right)^2 \quad (4)$$

ここで、 α_p : 押抜きせん断モデルによる応力分散係数の理論値である。本実験では重錘半径 $R = 30 \text{ mm}$ 、芯材厚 $t = 12.5 \text{ mm}$ であることから、応力分散係数 $\alpha_p = 2.01$ となる。このことより、本実験では、図-13の仮定よりも広範囲に伝達衝撃応力が分散していることものと考えられる。

5.2 最大貫入ひずみの推定

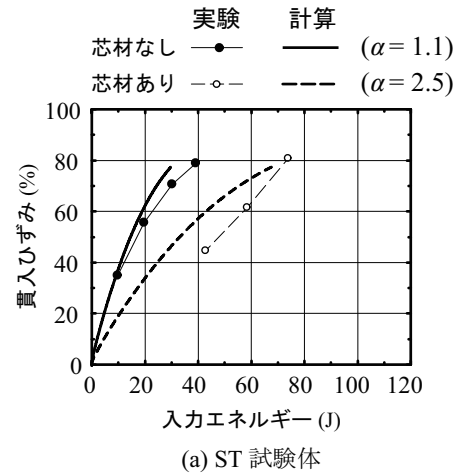
ここでは、応力分散係数 α と材料試験に基づく圧縮応力-ひずみ関係 (図-2) を用いて、最大重錘貫入量を算定し実験結果と比較検討する。なお、各試験体の応力分散係数 α は、最大入力エネルギー時における値を用いることとした。

図-14には、各入力エネルギー E_k に対する最大貫入ひずみ ε_p の実験結果をプロットし、計算結果による貫入ひずみ-入力エネルギー曲線と比較して示している。ここで、計算結果は、任意の貫入ひずみ ε における入力エネルギー E を下式により求め、 ε - E 曲線として示したものである。

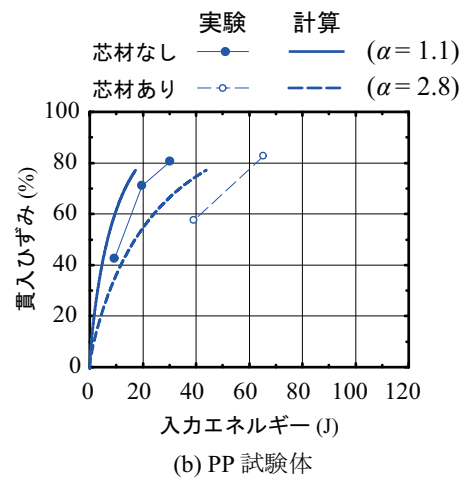
$$E = \alpha \times S_a \times H \times A \quad (5)$$

ここに、 S_a : 材料試験結果 (図-2) に基づく圧縮応力-ひずみ関係における任意のひずみ ε までの積分値である。

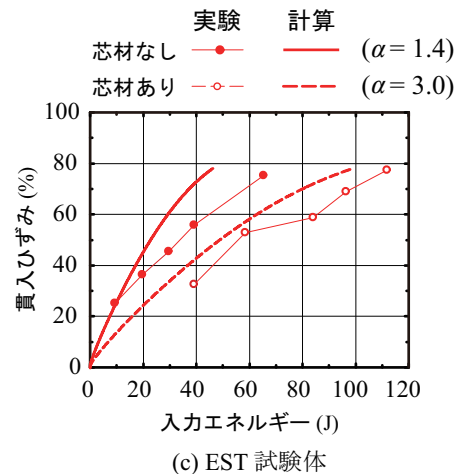
図より、いずれの試験体においても実験および計算結果ともに、芯材ありの場合が芯材なしよりも同一入力エネルギーにおける貫入ひずみが小さくなっていることが分かる。また、同一入力エネルギーにおける貫入ひずみは、EST 試験体が最も小さく、エネルギー吸収性能に優れていることが分かる。



(a) ST 試験体



(b) PP 試験体



(c) EST 試験体

図-14 重錘貫入量-入力エネルギー関係

実験および計算結果を比較すると、計算結果は実験結果の最大で 30% 程度大きい場合も見受けられるものの、入力エネルギーの増大に伴う貫入ひずみの増加傾向は概ね対応している。

従って、本研究の条件下においては、各種緩衝材や芯材に対応した応力分散係数 α を適切に設定し、材料試験に基づく圧縮応力-ひずみ関係を用いることで、最大重錘貫入ひずみ ε_p を最大で 30% 程度の安全余裕度を

持って評価できることが明らかになった。

なお、EST 試験体のように圧縮強度の大きい発泡材を用いると、対応して伝達衝撃力も大きくなるため、緩衝材の設計は、保護対象構造物の耐力も考慮して進める必要があることに留意しなければならない。また、本論文で提案した貫入量評価手法の精度を向上させるためには、1) 応力-ひずみ関係における材料試験結果と衝撃載荷実験結果の差異を明確にし、2) 各種発泡材に対応した α を評価することが必要であるものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、各種発泡材の緩衝性能を検討することを目的に、落下高さを変化させた重錘落下衝撃実験を行った。また、発泡材料の緩衝性能を効率的に活用するための芯材を積層した場合についても検討した。本研究で得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 各種発泡材の載荷点直下の伝達衝撃応力-貫入ひずみ曲線は、材料試験結果と同様の性状を示す。ただし、圧縮強度が高い発泡材の場合には、材料試験結果よりも圧縮応力が大きくなる傾向を示す。
- 2) 芯材の有無によらず、圧縮強度が大きい発泡材の場合には伝達衝撃応力の分布範囲が大きくなり、エネルギー吸収能が高い。
- 3) 本実験においては、発泡材の種類によらず芯材を積層するとエネルギー吸収能が倍増する。これは、圧縮強度が大きい発泡材ほど、芯材の積層によるエネルギー吸収能の向上効果が大きくなる可能性を示唆している。

今後は、本実験よりも寸法の大きい発泡材に対し、芯材に RC 床版を、表層に敷砂を積層した三層緩衝構造を用いてエネルギー吸収能に及ぼす発泡材種類の影響について検討し、各種発泡材に対応した三層緩衝構造の設計

法の提案を試みる予定である。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、船木隆史君、村田匠君をはじめとする室蘭工業大学構造力学研究室の大学院生および学部生に多大なるご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計—基準体系の指針, 土木学会, 構造工学シリーズ22, 2013
- 2) 爆発・衝撃作用を受ける土木構造物の安全性評価—希少事象に備える—, 土木学会, 構造工学シリーズ27, 2017
- 3) 今野久志, 山口 悟, 栗橋祐介, 岸 徳光: 三層緩衝構造を設置した実規模 RC 製ロックシェットの耐衝撃挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 2, pp. 535-540, 2014.7
- 4) 今野久志, 西 弘明, 牛渡裕二, 栗橋祐介, 岸 徳光: 三層緩衝構造を設置した RC 製ロックシェットの耐衝撃挙動に関する数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol. 61A, pp. 1024-1033, 2015.3
- 5) 日本工業規格: JIS K 7220, 硬質発泡プラスチック圧縮特性の求め方, 2006
- 6) 日本工業規格: JIS A 6901, セッコウボード製品, 2005
- 7) 岸 徳光, 川瀬良司, 今野久志, 池田憲二: 二層緩衝構造の緩衝特性に関する重錘落下実験と数値解析的検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 47A, pp. 1621-1632, 2001.3

(2017年9月25日受付)

(2018年2月1日受理)