

各種発泡体の緩衝性能評価に関する重錘落下実験

Weight falling tests on evaluation of shock absorbing performance of various foamed material

室蘭工業大学 (株)JSP 室蘭工業大学大学院 正 員 小室雅人 (Masato Komuro)
 ○ 学生員 村田 匠 (Takumi Murata) 非会員 小暮直親 (Naochika Kogure)

室蘭工業大学大学院 正 員 栗橋祐介 (Yusuke Kurihashi) (株)JSP 非会員 新田真一 (Shin-ichi Nitta)

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、落石規模が設計当初に想定していたよりも大きくなり、落石防護構造物が変状する事例が報告されている。このような状況下、近年では、衝撃力を緩衝するために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。

また、発泡材料の緩衝効果を向上させる方法として敷砂やRC版を発泡体ブロックの上に積層する三層緩衝構造¹⁾が開発され、実用化されている。このような緩衝構造に種々の発泡材料を用いることで緩衝性能をさらに向上させることが可能であると考えられる。しかしながら、発泡材料の緩衝性能に及ぼす材料特性の影響についてはほとんど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、発泡材料の種類および落下高さを変化させ、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、エネルギー取支関係から伝達衝撃応力の分散の程度を評価した。

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材料特性を一覧にして示している。本研究に用いた発泡材料は、ポリスチレン (ST)、ポリプロピレン (PP)、ポリエチレン・ポリスチレン複合体 (EST) である。

表-1 発泡材料の材料特性

| 発泡材料の種類 | 主成分 | 発泡倍率 |
|---------|------------------|------|
| ST | ポリスチレン | 50 |
| PP | ポリプロピレン | 45 |
| EST | ポリエチレン・ポリスチレン複合体 | 30 |

表-2 試験体一覧

| 試験体名 | 芯材の有無 | 発泡材料の種類 | 設定重錘落下高さ (mm) |
|-------|-------|---------|-------------------------|
| N-ST | なし | ST | 50, 100, 150, 200 |
| N-PP | | PP | 50, 100, 150 |
| N-EST | | EST | 50, 100, 150, 200, 300 |
| C-ST | あり | ST | 200, 300, 400 |
| C-PP | | PP | 200, 300 |
| C-EST | | EST | 200, 300, 400, 500, 600 |

図-1には、JIS K 7220²⁾に準拠した各種発泡材料の圧縮試験結果を示している。また、表-2には、試験体の一覧を示している。試験体数は、芯材の有無、発泡材の種類、設定重錘落下高さをそれぞれ変化させた全22ケースである。表-2において試験体名の第一項は芯材の有無 (N: なし, C: あり)、第二項は発泡材料の種類 (表-1参照)を表している。

2.2 実験方法と測定項目

図-2(a), (b)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240mm四方、厚さ50mmの発泡体である。芯材ありの場合には、厚さ12.5mmの石膏ボード (JIS A 6901 適合品)を発泡体の上に設置した。重錘落下実験は、質量20kg、先端直径60mmの鋼製重錘を所定の高さからリアールを介して発泡体の中央部に自由落下させる形で行った。発泡体は、応力計を埋設した鋼製の底盤上に設置し、その伝達衝撃応力分布を計測した。

図-2(c)には、実験状況を示している。実験では、発泡体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。本実験における測定項目は、重錘衝撃力、重錘貫入量および伝達衝撃応力である。

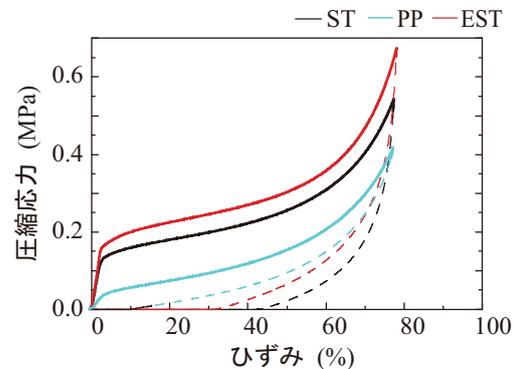


図-1 各種発泡材料の圧縮強度試験の結果

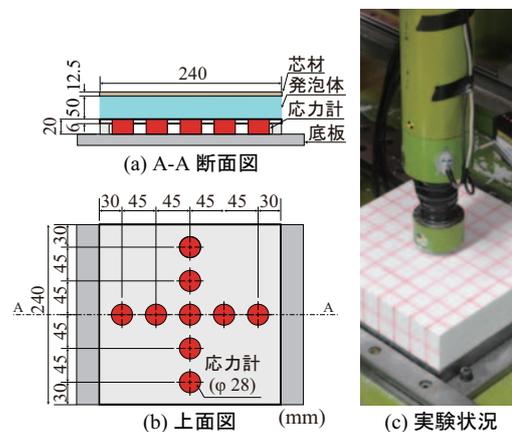


図-2 試験体と伝達衝撃応力測定の概要

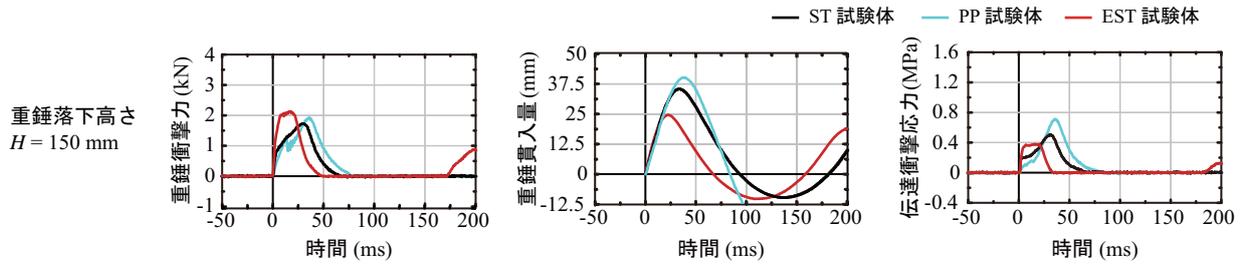


図-3 芯材なしの場合における時刻歴応答波形

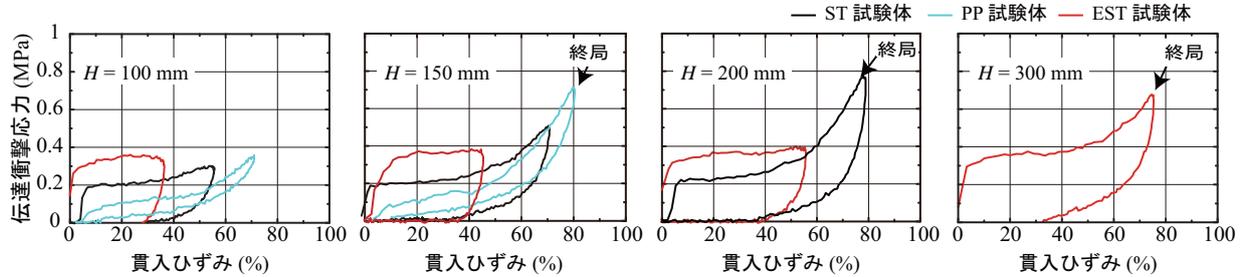


図-4 芯材なしの場合における伝達衝撃応力-貫入ひずみ履歴曲線

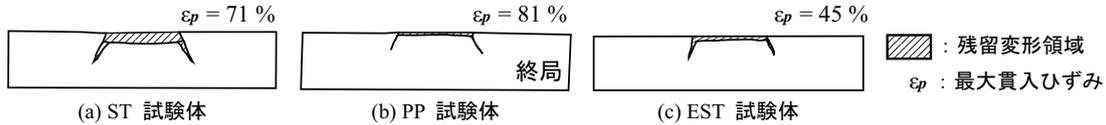


図-5 芯材なしの場合における発泡体切断面の状況 (重錘落下高さ $H=150\text{ mm}$)

3. 実験結果

3.1 芯材なしの場合

図-3には、重錘落下高さ $H=150\text{ mm}$ における重錘衝撃力、重錘貫入量および伝達衝撃応力の時刻歴応答波形を示している。図より、重錘衝撃力の波形は最大振幅 2 kN 程度、継続時間 $50\sim 75\text{ ms}$ 程度を示している。また、圧縮強度が大きい場合ほど、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くなる。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立ち上がり、 30 ms 程度で最大値に至っている。ただし、EST試験体の場合には、重錘衝突時に急激に立ち上がり、 0.4 MPa 程度の一定値を示している。

図-4には、伝達衝撃応力-貫入ひずみ履歴曲線を示している。貫入ひずみは、重錘貫入量を発泡体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曲線で囲まれる面積が大きくなる傾向にあることが分かる。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、 $50\sim 60\%$ 以降では応力の増加勾配が大きくなる傾向を示している。その形状は図-1の圧縮強度試験結果とほぼ同様であることが分かる。

図-5には、芯材なしの場合における実験終了後の試験体の中央部切断面を示している。PP試験体はST試験体よりも最大貫入ひずみ ϵ_p が大きいにもかかわらず、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およびPP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。

3.2 芯材ありの場合

図-6には、重錘落下高さ $H=300\text{ mm}$ における重錘衝撃力、重錘貫入量および伝達衝撃応力の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、発泡体を変形させているためである。重錘貫入量および伝達衝撃応力に関する応答波形は、芯材なしの場合と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、その後芯材なしの場合と類似の変形挙動を示したことから考えられる。

図-7には、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、重錘貫入量を発泡体の厚さで除して求めた。これは、芯材の圧縮変形は発泡体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設定重錘落下高さ H の増加に伴って曲線で囲まれる面積が大きくなる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、芯材により発泡体に伝達される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。

図-8には、芯材ありの場合における実験終了後の試験体の中央部切断面を示している。図より、STおよびEST

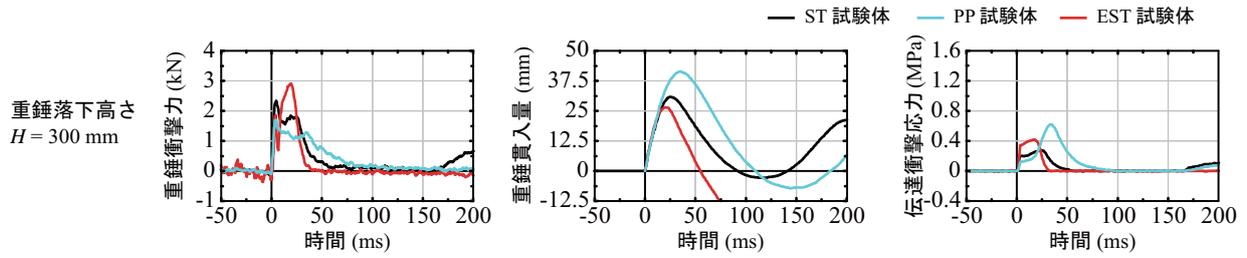


図-6 芯材ありの場合における時刻歴応答波形

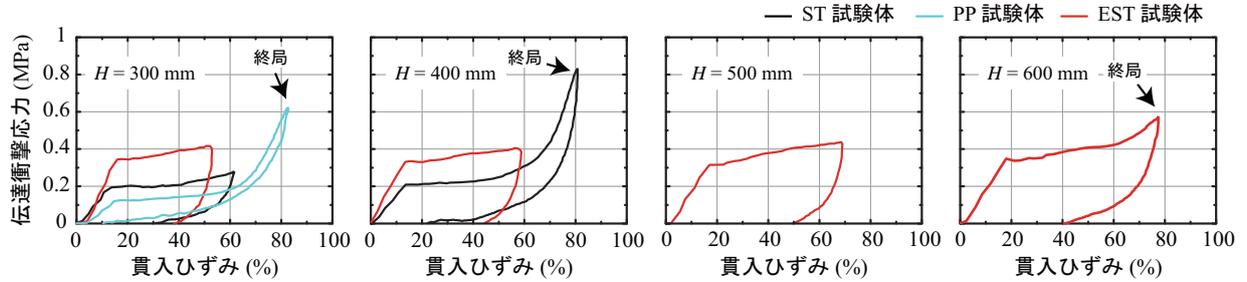


図-7 芯材ありの場合における伝達衝撃応力-貫入ひずみ履歴曲線

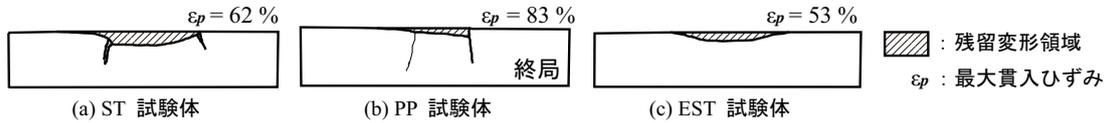


図-8 芯材ありの場合における発泡体切断面の状況 (重錘落下高さ $H=300$ mm)

試験体の場合には、図-5の芯材なしの場合よりも発泡体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で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、発泡材料の種類によらず、芯材を設置することにより発泡体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、本実験においては、発泡材料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結果となった。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、倍増することを意味している。従って、芯材設置によるエネルギー吸収能の向上効果は、圧縮強度の大きい発泡体ほど効率的に発揮されることが明らかになった。

4. 応力分散係数と最大貫入ひずみの推定

4.1 応力分散係数

表-3には、本実験におけるエネルギー収支関係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、また重錘直下の発泡体の吸収エネルギー E_{a1} は、図-7に示した載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-9 参照), H : 発泡体の高さ (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 と発泡体の吸収エネルギー E_a が等価であるものと考え、次式により求めた係数である。

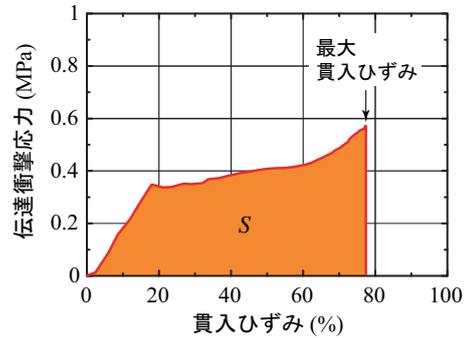


図-9 最大貫入ひずみまでの積分値

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

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

この式より、応力分散係数 α は伝達衝撃応力の広がりを出す指標であることが分かる。表-3より、芯材なし/ありの応力分散係数 α を比較すると、設定重錘落下高さが2倍程度になると応力分散係数 α も対応して倍増している。このことから、芯材を積層することによって伝達衝撃応力の分布範囲が広くなり、エネルギー吸収能の向上効果が効率的に発揮されることが分かる。

4.2 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-1) 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。

図-10には、各入力エネルギー E_k に対する最大貫入ひ

表-3 エネルギー収支に関する実験結果一覧

| 試験体名 | 芯材の有無 | 発泡材の種類 | 設定重錘落下高さ (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 | 9.8 | 9.5 | 1.0 |
| N-ST-H100 | | | 100 | 19.6 | 16.6 | 1.2 |
| N-ST-H150 | | | 150 | 29.4 | 25.8 | 1.1 |
| N-ST-H200 | | | 200 | 39.2 | 36.5 | 1.1 |
| N-PP-H50 | | PP | 50 | 9.8 | 6.3 | 1.5 |
| N-PP-H100 | | | 100 | 19.6 | 14.5 | 1.4 |
| N-PP-H150 | | | 150 | 29.4 | 26.8 | 1.1 |
| N-EST-H50 | | EST | 50 | 9.8 | 10.0 | 1.0 |
| N-EST-H100 | | | 100 | 19.6 | 17.0 | 1.2 |
| N-EST-H150 | | | 150 | 29.4 | 20.5 | 1.4 |
| N-EST-H200 | | | 200 | 39.2 | 27.9 | 1.4 |
| N-EST-H300 | | | 300 | 58.8 | 43.2 | 1.4 |
| C-ST-H200 | あり | | ST | 200 | 39.2 | 10.4 |
| C-ST-H300 | | 300 | | 58.8 | 16.7 | 3.5 |
| C-ST-H400 | | 400 | | 78.5 | 32.0 | 2.5 |
| C-PP-H200 | | PP | 200 | 39.2 | 10.4 | 3.8 |
| C-PP-H300 | | | 300 | 58.8 | 21.3 | 2.8 |
| C-EST-H200 | | | EST | 200 | 39.2 | 16.6 |
| C-EST-H300 | | 300 | | 58.8 | 22.8 | 2.6 |
| C-EST-H400 | | 400 | | 78.5 | 26.8 | 2.9 |
| C-EST-H500 | | 500 | | 98.1 | 31.5 | 3.1 |
| C-EST-H600 | | 600 | | 117.7 | 38.6 | 3.0 |

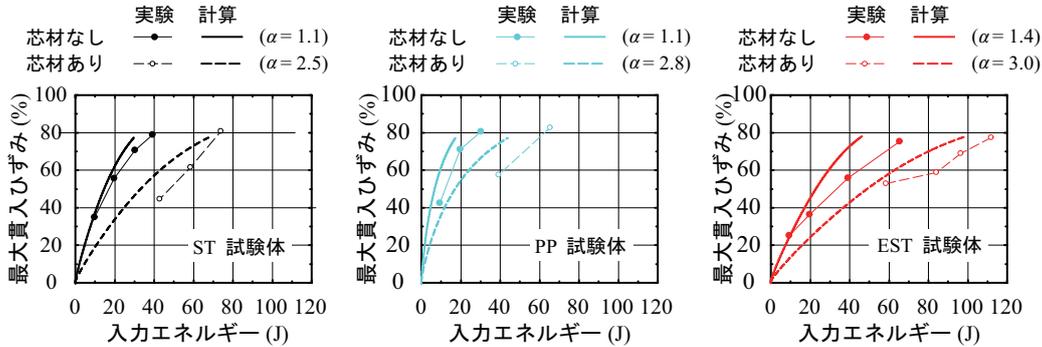


図-10 重錘貫入量-入力エネルギー関係

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。

$$E = \alpha \times S_a(\epsilon) \times H \times A \quad (4)$$

ここに、 $S_a(\epsilon)$: 材料試験結果(図-1)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。また、 α は表-3を参照し、各発泡体における最大落下高さ時の値を用いた。

図-10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。実験と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つ

て評価できることが明らかになった。

5. まとめ

- 1) 各種発泡体の載荷点直下の伝達衝撃応力-貫入ひずみ曲線は、圧縮強度試験結果と同様の性状を示す。
- 2) 圧縮強度が大きい発泡体の場合には、芯材の有無によらず伝達衝撃応力の分布範囲が大きく、エネルギー吸収能が高い。
- 3) 本実験においては、発泡体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体ほど、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。

参考文献

- 1) 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 製ロックシェッドの耐衝撃挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 2, pp. 535-540, 2014.7
- 2) 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