

衝突作用を受ける RC はりの各種発泡材設置による損傷低減効果

Damage reduction effect by setting various foamed materials for RC beams subjected to collision action

栗橋祐介*, 榎谷浩**

Yusuke Kurihashi, Hiroshi Masuya

*博 (工), 金沢大学准教授, 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

** 工博, 金沢大学教授, 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

キーワード: RC 梁, 発泡樹脂, 緩衝効果, 耐衝撃挙動

Keywords: RC beam, foamed material, absorbing effect, impact resistant behavior

1. はじめに

これまで鉄筋コンクリート(RC)ロックシェッドなどの既設防災構造物は、衝突荷重を静的荷重に置き換え許容応力度法により設計されてきた。一方、近年の RC ロックシェッドに関する研究では、過大な衝突荷重を受けてシェッドの主鉄筋が降伏する場合においても、部材に曲げひび割れや残留変形を生じるものの、シェッド内部の安全性は十分に確保されることが明らかにされている。従来設計に対する安全余裕度は、入力エネルギーの観点からは 20~30 倍であることが知られている¹⁾。

従って、シェッドの塑性挙動も考慮した性能設計法を適用することにより、シェッドの耐衝撃性能を適切に評価可能になるものと考えられる。また、それにより、補修補強や高性能緩衝材の必要性の有無や、実状に即した対策を適切に立案できるようになるものと考えられる。数多くの既設防災構造物を安全かつ経済的に維持管理するためには、塑性挙動を考慮した性能設計法の確立が極めて重要である。

これまで多くの研究機関において、最も基本的な構造要素である RC はりを対象とした実験および数値解析的な研究が行われてきた²⁾⁵⁾。最近では、RC はりの重要な性能評価指標である最大変位量の推定方法が提案されている⁶⁾。一方、現在供用されている RC ロックシェッドの上部には、通常落石による衝撃力を緩和するための緩衝材が設置されている。砂や現地発生土などの土質材料を用いる場合が多い。また、設計で想定する落石規模が大きい場合には、発泡ポリスチレンなどの発泡材に置換する場合もある⁷⁾。しかしながら、RC ロックシェッドの塑性挙動と緩衝材の相互作用や構造物の最大変位の推定に着目した検討は極めて少ない。緩衝材と RC 部材の剛性は変形量に応じて大きく変化するため、それらの相乗効

果やエネルギー収支などについては詳細かつ多角的な検討が必要であるものと考えられる。

このような背景より、本研究では、種々の緩衝材を有する RC はりの耐衝撃挙動の解明や最大変位推定法の提案を目的に、重錘落下衝撃実験を実施した。RC はりは、設計上静的載荷時に曲げ破壊する複鉄筋 RC はりである。発泡材には、一般建設資材として適用実績のある単位体積重量の異なる 3 種類の発泡ポリスチレン⁸⁾と発泡ポリカーボネイトを用いた。これらの実験結果に基づいて、RC はりの耐衝撃挙動に及ぼす発泡材料の力学特性の影響を検討した。

2. 実験概要

表-1 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体は発泡材の有無や発泡材の種類を変化させた全 5 体の RC はりである。試験体名は緩衝材なしの場合には N、発泡ポリスチレンを用いる場合には S1~S3、発泡ポリカーボネイトを用いる場合には P としている。重錘

表-1 試験体の一覧

試験体名	緩衝材の種類	発泡倍率 (倍)	緩衝材の単位体積重量 (kN/m ³)
N	無	-	—
S1	発泡 ポリスチレン	60	0.16
S2		50	0.20
S3		33	0.30
P	発泡 ポリカーボネイト	12	0.98

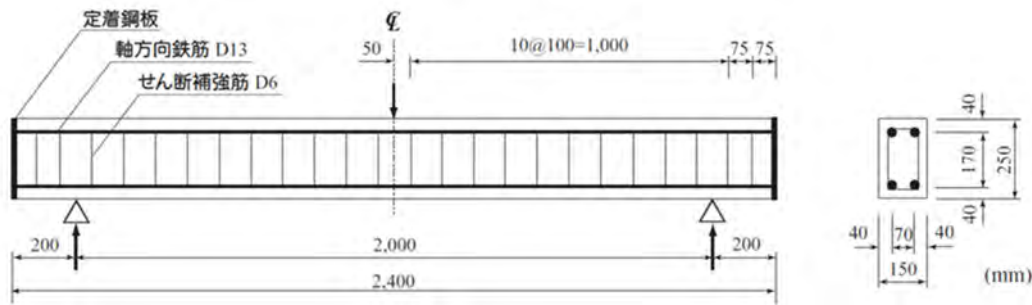


図-1 試験体の形状寸法

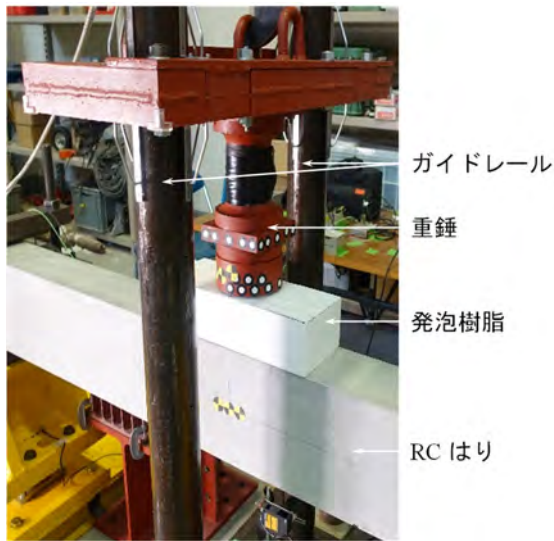
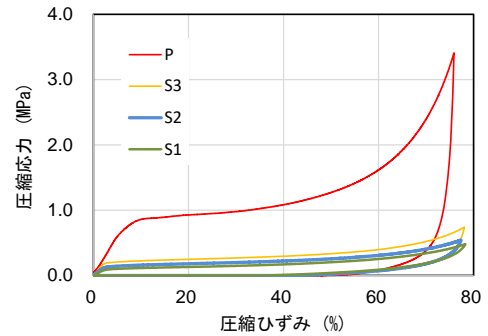


図-2 実験状況

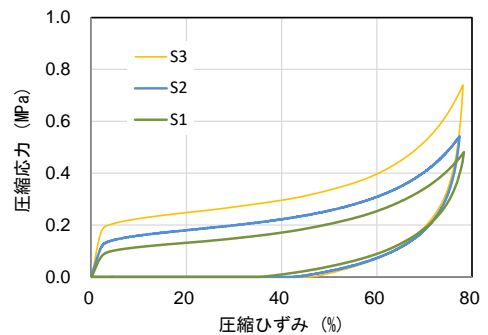
の質量は161 kg であり, その落下高さは1.835 m である。これは, 重錘衝突速度を $V=6\text{ m/s}$ とするために設定した高さである。

本実験に用いた RC はり試験体の形状寸法および断面寸法を図-1 に示す。試験体は断面幅が 150 mm, 断面高さが 250 mm の複鉄筋矩形 RC はりである。スパン長は 2000 mm で, 軸方向鉄筋には D13 (SD295A) を上下 2 本ずつ, せん断補強筋には D6 (SD295A) を 100 mm 間隔に配筋している。発泡樹脂の厚さは 100 mm とし, はり部材方向に 400 mm, はり幅方向に 150 mm 領域に設置した (図-2 参照)。なお, 本研究では, 衝突作用により RC はりが曲げ降伏し残留変位を生ずる状況を設定した。また, 発泡樹脂の厚さは, エネルギー吸収能を試算し, RC はりの変形量抑制効果が期待できる厚さとした。

実験時におけるコンクリートの平均圧縮強度は 44.1 MPa であった。軸方向鉄筋およびせん断補強筋の降伏強度は, それぞれ 350 および 356 MPa であった。発泡樹脂の材料試験結果を図-3 に示す。試験方法は, 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 に準拠している。図より, 単位体積重量の大きい発泡樹脂ほど, 圧縮応力が大きくなる傾向にある。特に,



(a) 全発泡樹脂



(b) 発泡ポリスチレン (S1~S3)

図-3 発泡樹脂の応力-ひずみ関係

発泡ポリカーボネイトは, その傾向が顕著である。

本実験における計測項目は, 重錘衝撃力, 重錘移動量, および RC はりスパン中央部のたわみである。また, 重錘衝突時の挙動は, 高速度カメラで撮影した。フレームレートは 1,000 fps である。

3. 実験結果

3.1 重錘衝撃力

図-4 には, 各試験体の重錘衝撃力波形を示している。なお, 経過時間については, 重錘が RC はりもしくは発泡材に接触した時点をも 0 msec としている。

図より, 発泡樹脂を設置していない N 試験体の場合には, 重錘衝突直後, 振幅が大きく継続時間の短い正弦半波が急激に立ち上がっていることが分かる。

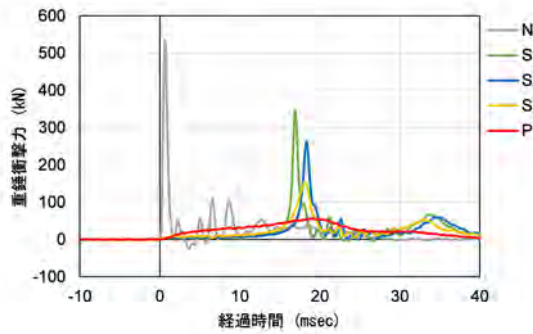


図-4 重錘衝撃力波形

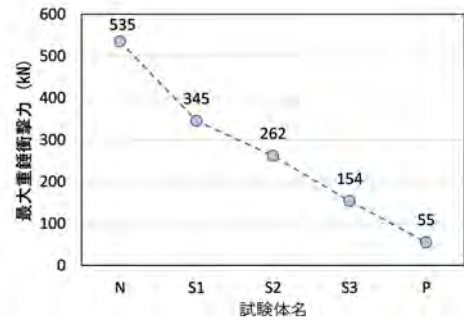


図-5 最大重錘衝撃力

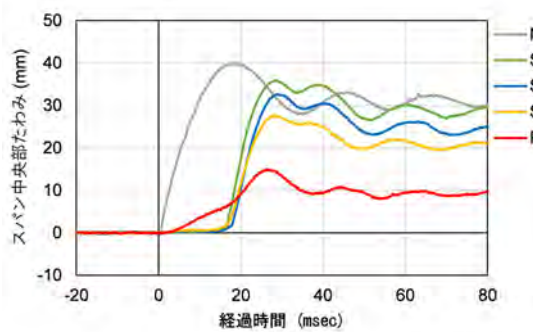


図-6 スパン中央部たわみ波形

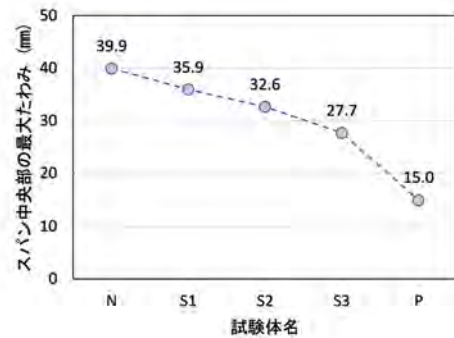


図-7 スパン中央部の最大たわみ

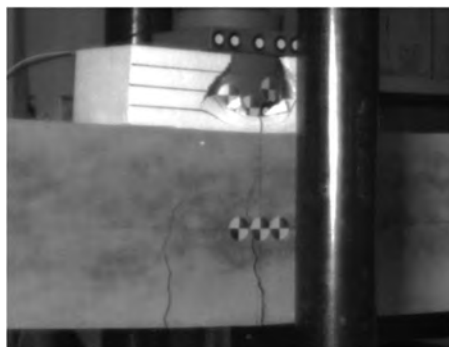


図-8 破壊状況の一例 (S3)

一方、発泡ポリスチレンを設置した S1～S3 試験体の場合には、経過時間 $t = 15$ msec 以降に振幅の大きい波形が見られる。また、発泡ポリカーボネイトを設置した P 試験体の場合には、衝撃力が緩やかに増大していることが分かる。

図-5 には、各試験体の最大重錘衝撃力を示している。図より、発泡樹脂を設置することにより重錘衝撃力が低下し、その傾向は発泡樹脂の単位体積重量が大きい場合ほど顕著に現れていることが分かる。

3.2 スパン中央部たわみ

図-6 には、各試験体のスパン中央部たわみ波形を示している。図より、N 試験体の場合には、重錘衝突直後、たわみが急激に増大していることが分かる。一方、S1～S3 試験体の場合には、経過時間 $t = 18$ msec 程度におい

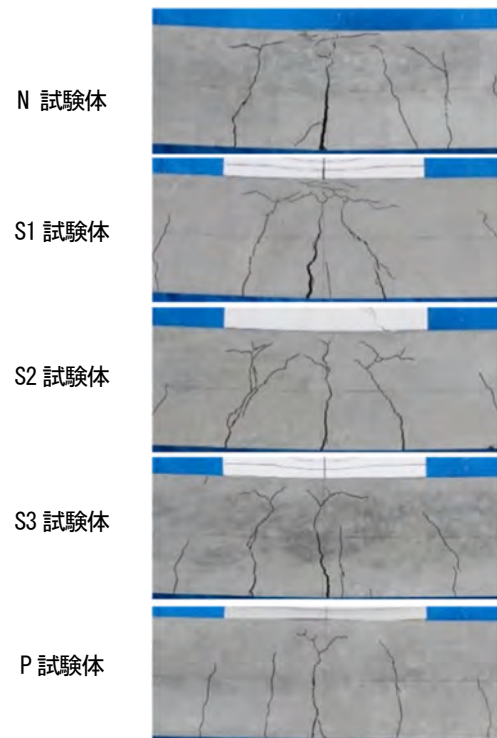


図-9 スパン中央部のひび割れ状況

て、たわみが急激に増大している。また、P 試験体の場合には、経過時間 $t = 5$ msec 程度以降において、たわみが徐々に増加し、 $t = 18$ msec 以降においてたわみの増加割合が大きくなっていることが分かる。

図-7 には、各試験体の最大たわみを示している。図よ

り、発泡樹脂を設置することにより最大たわみが低下し、その傾向は発泡樹脂の単位体積重量が大きい場合ほど顕著であることが分かる。

3.3 破壊性状

図-8には、破壊性状の一例として、高速度カメラで撮影した S3 試験体のスパン中央部近傍における最大たわみ時の状況を示している。図より、発泡樹脂に重錘が貫入し、かつ RC はり中央部には曲げひび割れが発生していることが分かる。

図-9には、各試験体のスパン中央部近傍におけるひび割れ性状を示している。図より、N 試験体の場合には、はり中央部において複数の曲げおよび曲げせん断ひび割れが発生し、中央部では大きく開口していることが分かる。このような傾向は、発泡樹脂を設置した試験体の場合においても概ね同様であるものの、はり中央部のひび割れ幅は、発泡樹脂の単位体積重量が大きい場合ほど小さい。

以上の結果より、発泡樹脂を設置することにより、RC はりの作用する衝撃力や RC はりのたわみ、およびはり中央部のひび割れ幅を低減できることが明らかになった。また、このような傾向は、単位体積重量が大きく、エネルギー吸収能の高い発泡樹脂を用いる場合において顕著であることが明らかになった。

4 発泡樹脂と RC はりの相互作用

4.1 発泡樹脂と RC はりの変形挙動

図-10には、重錘移動量と RC はりの変形挙動を試験体ごとに比較して示している。なお、重錘移動量は、高速度カメラによる画像解析による測定結果であり、RC はりもしくは発泡樹脂に接触する位置を 0 mm としている。

図より、N 試験体の場合には、重錘衝突後、重錘と RC はりは一体となって挙動していることが分かる。一方、発泡ポリスチレンを設置した S1～S3 試験体の場合には、経過時間 $t=17$ msec までは重錘のみが移動し、その後 RC はりのたわみが増加していることが分かる。また、P 試験体の場合には、 $t=5$ msec 以降から RC はりのたわみが生じているものの、S1～S3 と同様の傾向を示している。

なお、重錘移動量と RC はりのたわみの差は、発泡樹脂の変形量に相当する。図より、S1～S3 試験体の場合には、発泡樹脂は 90 mm 以上変形していることが分かる。P 試験体も 70 mm 程度変形している。RC はりに設置した発泡樹脂の厚さは 100 mm であることから、重錘衝突により大きく変形していることが分かる。

4.2 重錘のなす仕事量と RC はりのエネルギー吸収量の時間的变化

図-11には、重錘のなす仕事量と RC はりのエネルギー吸収量の時間的变化を各 RC はりの最大たわみ発生時まで示している。なお、これらの仕事量およびエネルギー

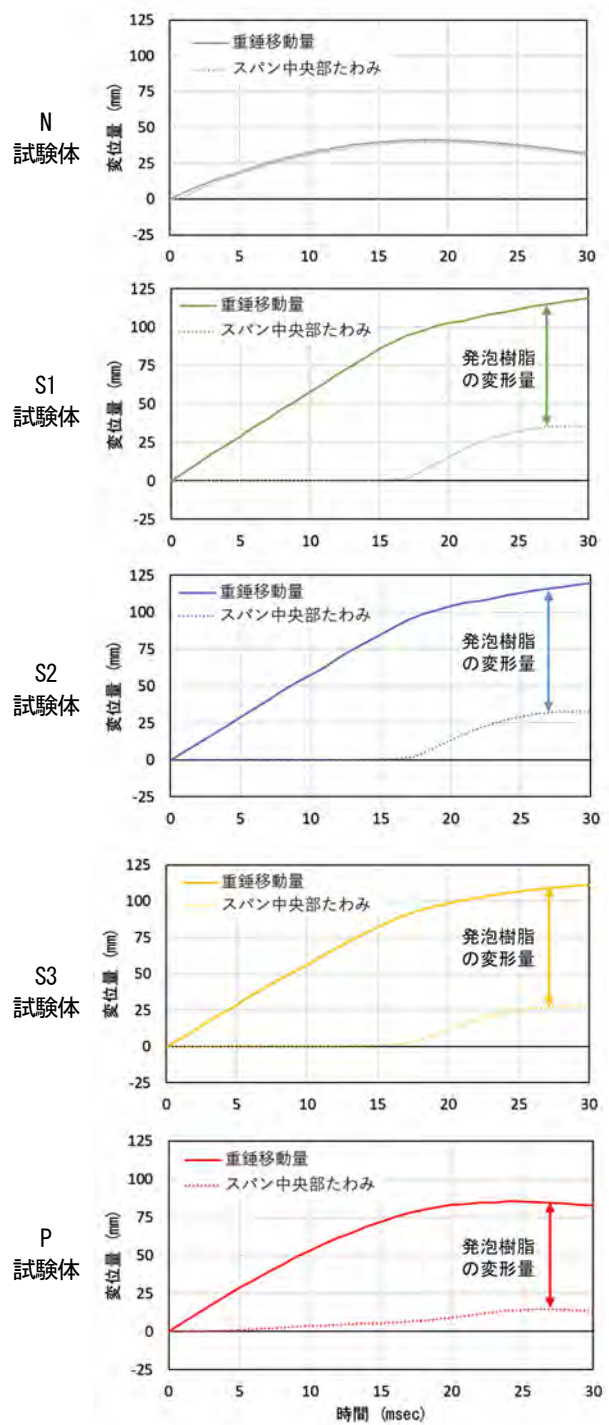
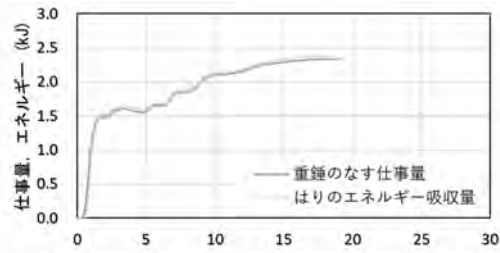


図-10 発泡樹脂および RC はりの変形量の比較

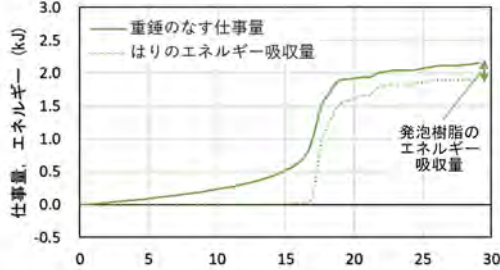
一吸収量は、それぞれ重錘移動量および RC はりのたわみと重錘衝撃力とで描かれる履歴曲線の内部の面積として求めた。

図より、N 試験体の場合には、重錘のなす仕事量と RC はりのエネルギー吸収量は、重錘衝突後ともに 1.5 kJ 程度まで急増し、その後 2.4 kJ 程度まで漸増していることが分かる。両者ともほぼ同様の性状を示しているが、これは、前述のとおり重錘衝突後、重錘と RC はりがほぼ一体となって挙動しているためである。なお、上述の最

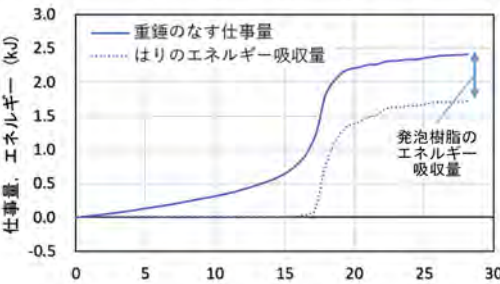
N
試験体



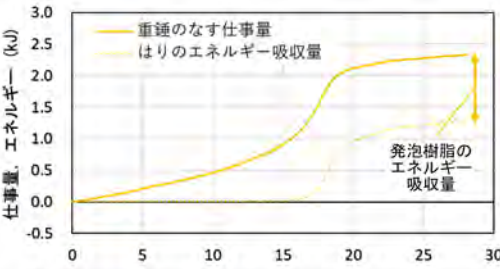
S1
試験体



S2
試験体



S3
試験体



P
試験体

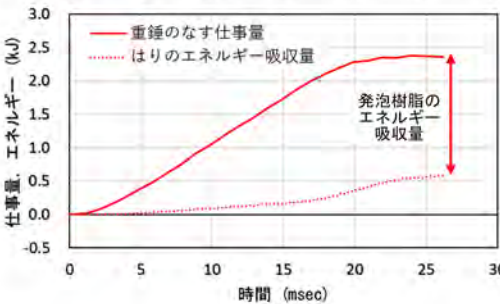


図-11 エネルギーの時間的変化

大値は、重錘落下による運動エネルギー $E_k = 2.90 \text{ kJ}$ ($= 0.161 \times 62/2$) より小さい。これは、重錘と RC はりの衝突により、エネルギー損失が生じたことによるものである。

一方、発泡ポリスチレンを設置した S1~S3 試験体の場合には、重錘のなす仕事量は、重錘衝突後緩やかに増加し、経過時間 $t = 15 \text{ msec}$ 程度以降において急激に増加する傾向を示している。また、RC はりのエネルギー吸収量は、経過時間 $t = 17 \text{ msec}$ 程度において急激に増加してい

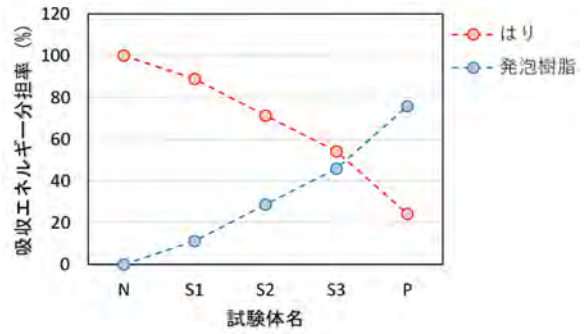


図-13 吸収エネルギーの分担率

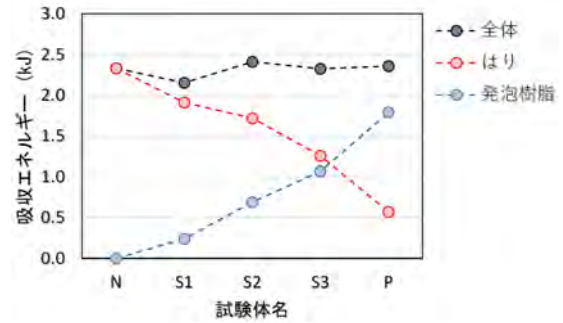


図-12 吸収エネルギーの分担当

る。ここで、重錘のなす仕事量と RC はりの吸収エネルギー量の差が、発泡樹脂の吸収エネルギーとなる。従って、 $t = 17 \text{ msec}$ 程度までは発泡樹脂のみでエネルギーを吸収し、その後 RC はりが変形してエネルギーを吸収しているものと考えられる。また、P 試験体の場合には、重錘のなす仕事量は $t = 20 \text{ msec}$ までほぼ線形的に増加していることが分かる。RC はりの吸収エネルギーは $t = 17 \text{ msec}$ まで緩やかに増加した後、その増加割合が大きくなっている。

以上のことから、発泡樹脂の設置により、発泡樹脂と RC はりが分担してエネルギーを吸収していることや、その分担率は発泡材の種類によって異なることが分かる。

図-13 には、両者の吸収エネルギーの分担率を示している。図より、発泡ポリスチレンを設置する場合には、単位体積重量が大きい場合ほど、発泡樹脂の吸収エネルギー分担率が大きくなり、S3 試験体の場合には、RC はりと同程度のエネルギーを吸収していることが分かる。また、単位体積重量が最も大きい発泡ポリカーボネイトを設置する場合には、発泡樹脂のエネルギー吸収量が RC はりの吸収量を上回っている。これは、図-3 に示しているように、発泡樹脂の単位体積重量が大きい場合ほど、材料のエネルギー吸収性能が高いため、より多くのエネルギーを吸収し、結果として RC はりの変形量や損傷を低減可能であることを示している。

なお、これらの発泡樹脂の特性として、単位体積重量が大きくエネルギー吸収性能が高いほど、大きな圧縮応力を生じることに留意する必要がある。すなわち、発泡樹脂の変形に伴って生じる圧縮応力が RC はりに作用

することを考慮した上で、衝突作用の規模に応じて発泡樹脂を選定する必要がある。

これまでの研究では、RC はりの最大たわみは、はりに伝達されるエネルギー E_t と RC はりのエネルギー吸収量 E_a が等価であるとの過程に基づいて推定できることを明らかにしている⁹⁾。本研究において、発泡樹脂のエネルギー吸収特性を明らかになったことから、今後は発泡樹脂を設置した RC はりの最大たわみ推定法の確立に向けた実験および数値解析を実施する必要があるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、種々の緩衝樹脂を設置した RC はりの耐衝撃挙動の解明や最大変位推定法の提案を目的に、重錘落下衝撃実験を実施した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) エネルギー吸収性能の高い発泡材を用いる場合ほど、重錘衝撃力や RC はりのたわみの抑制効果が大きい。また、ひび割れの開口も抑制される傾向にある。
- (2) 発泡材と RC はりのエネルギー分担率を実験結果に基づいて算出した。発泡ポリカーボネイトの場合には、RC はりよりも多くのエネルギーを吸収していることが明らかになった。
- (3) ただし、単位体積重量が大きくエネルギー吸収性能が高い発泡樹脂を用いる場合ほど、大きな圧縮応力を生じることに留意する必要がある。このことを考慮した上で、衝突作用の規模に応じて発泡樹脂を選定する必要がある。

今後は、エネルギー保存則に基づいた RC はりの耐衝撃設計法の確立に向けた検討を行う予定である。

謝辞

本研究は科研費(19H02394)の助成を受けたものである。また、各種発泡材は、(株)JSPよりご提供頂いた。ここに記して、感謝申しあげる次第である。

参考文献

- 1) 土木学会：爆発・衝撃作用を受ける土木構造物の安全性評価，構造工学シリーズ 27，2017
- 2) Tachibana, S., Masuya, H., Nakamura, S.: Performance based design of reinforced concrete beams under impact. J. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2010, 10, 1069–1078.
- 3) Fujikake, K., Li, B., and Soeun, S.: Impact response of reinforced concrete beam and its analytical evaluation. J. Struct. Eng ASCE V 2009, 135, 938–950.
- 4) Kishi, N., Hisashi, K., Mikami, H., and Okada, S.: A proposal of performance-based impact resistant design method for large scale RC girders. J. Struct. Eng. 2010, 56A, 1113–1122.
- 5) Hwang, H. J., Thomas, H., Kang, K., and Kim, C.S.: Numerical model for flexural behavior of reinforced concrete members subjected to low-velocity impact loads. ACI Struct. J. 2019, 116, 65–76.
- 6) Kurihashi, Y. and Masuya, H.: Simplified Estimation Method for Maximum Deflection in Bending-Failure-Type Reinforced Concrete Beams Subjected to Collision Action and Its Application Range, Appl. Sci. 2020, 10(19), 6941
- 7) 日本道路協会：落石対策便覧（平成 29 年版），2017
- 8) 栗橋祐介，小暮直親，新田真一：発泡材の力学特性を変化させた積層緩衝構造の縮小模型実験，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），76 巻 3 号 p.442-455, 2020.