

## 高性能材料を用いた積層緩衝構造の開発に関する実験的研究

Experimental study on development of multi-layered absorbing system with high-performance materials

稲生啓志<sup>1</sup>, 栗橋祐介<sup>2</sup>, 榎谷浩<sup>3</sup>

Hiroyuki Inao, Yusuke Kurihashi, Hiroshi Masuya

金沢大学, 理工学域 地球社会基盤学類 (〒 920-1192 金沢市角間町)

<sup>2</sup>博(工), 金沢大学准教授, 理工研究域 地球社会基盤学系 (〒 920-1192 金沢市角間町)<sup>3</sup>工博, 金沢大学教授, 理工研究域 地球社会基盤学系 (〒 920-1192 金沢市角間町)

キーワード: 積層緩衝構造, 重錘落下衝撃実験, 緩衝材料

Key words: multi-layered absorbing system, falling weight impact loading test, cushioning-material

## 1. はじめに

近年高速道路やトンネルなど多くのインフラ構造物が経年劣化を辿っており、数十年後には整備・更新が必要とされる構造物が集中的に出現する。また近年地震の頻発化及び気候変動に伴う大雨や土砂災害など自然災害の激甚化が進んでおり、構造物の整備・更新が今後急激に要される一方で災害規模が年々大きくなるという問題を抱えている。また、劣化問題を抱えた防災構造物の1つにロックシェッドがあり、近年の財政難、公共事業費の削減などを踏まえ、より安全性・経済性を考慮した積層緩衝構造の開発が求められている。

ロックシェッドの耐衝撃性能向上法として緩衝材により衝撃的外力を低減させる方法があり、本研究ではこの方法について検討を行う。従来の緩衝構造では砂・砕石などの土質材料や発泡材を用いた構造があり、またさらなる緩衝性能の向上を図るために砂や発泡材に加えRC版を用いた三層緩衝構造がある。三層緩衝構造は、これまで多数の室内外の実験と数値解析により設計法が確立され、実用化されている。設計法は落石対策便覧<sup>1)</sup>に示されている。

近年では発泡倍率や主成分を変化させることで多種多様な発泡材に、コンクリートに関しても400MPaを超える世界最高強度の無孔性コンクリート(PFC)が開発されている。また既往研究<sup>2)3)</sup>よりPFCの力学特性及び鋼繊維補強PFCと連続繊維FRPシートを組み合わせることで、軽量でかつ耐衝撃性に優れる構造部材を製作できることが明らかになっている。したがって、これらの新材料を用いることで軽量かつ小型で緩衝性能の高い積層緩衝構造を提案できるものと考えられる。しかしながら、現状ではこれら新材料を用いた積層緩衝構造の性能やその設計法に着目した検討がされていない。

このような背景から本研究では、力学特性の異なるポリスチレン製発泡材の上に2方向AFRPシート補強したPFC版を設置した積層緩衝構造について検討を行う。ここで発泡材とPFC版の間にはポリカーボネイト製発泡

材を設置し、PFC版の押抜きせん断破壊による急激な変形を吸収することとする。本研究では、力学特性の異なる発泡材の上にポリカーボネイト及びAFRPシート補強したPFC版を積層した三層緩衝構造の重錘落下衝撃実験を実施し、緩衝性能について検討した。図-1は本実験で用いた供試体概要となっている。

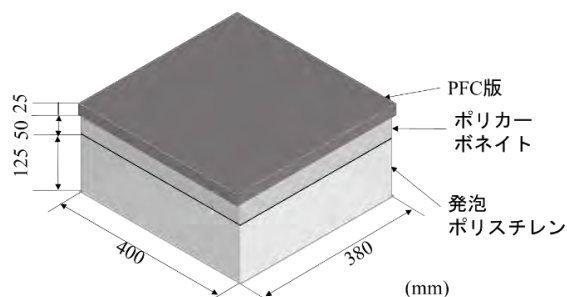


図-1 供試体概要

## 2. 実験概要

## 2.1 実験方法

写真-1は本実験で用いた実験装置と実験状況を示している。ここでは発泡材上にポリカーボネイトと2方向AFRPシートで補強したPFC版を設置した場合について示している。伝達衝撃力測定用装置は、鋼製底盤(400mm×380mm×25mm)と底盤を支持する4個の伝達衝撃力測定用ロードセル(以降、反力計)により構成される。PFC版を設置する場合には試験体の跳ね上がりや跳ね上がりによる実験装置の損傷を防止するための固定具を使用した。

本実験は、測定装置および試験体を鋼製レールによる重錘落下装置の下部中央に配置し、重錘落下による衝撃荷重を試験体中央部に载荷させた。使用した重錘は質量327kg、先端直径80mmであり、重錘落下高さは1500mmである。重錘落下高さの計測にはレーザー距離計(最大誤差±1mm)を使用した。

表-1 2方向AFRPシートの材料特性

目付(g/m <sup>2</sup> )	保証耐力(kN/m)	設計厚(mm)	引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数(N/mm <sup>2</sup> )
650	392/392	0.193	2060	118000

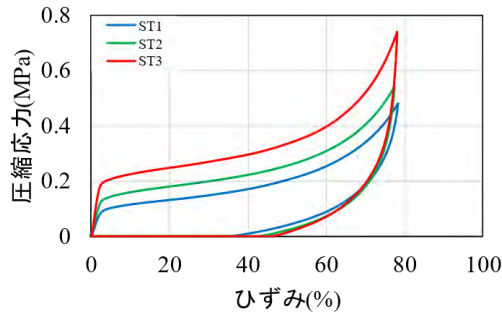


図-2 発泡ポリスチレンの材料試験結果

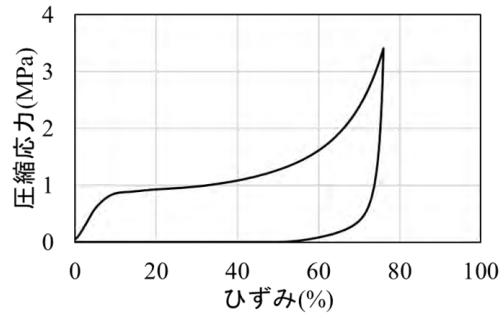


図-3 ポリカーボネイトの材料試験結果

表-2 発泡材の種類

発泡材名称	材質	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	発泡倍率 (倍)
ST1	ポリスチレン	0.16	60
ST2		0.20	50
ST3		0.30	33

表-3 高速度カメラの設定値

項目	単位	設定
フレームレイト	FPS	1000
シャッター速度	s	1/5000
解像度	mm/pixel	0.75
使用機器		HAS-U1, Ditect社
解析ソフト		DIPP-Motion V, Ditect社

図-2及び表-2に示す。発泡ポリスチレンの平面寸法は400mm×380mm、厚さ125mmである。またポリカーボネイトの平面寸法は400mm×350mm、厚さ50mm、単位体積重量は0.98kN/m<sup>3</sup>であり、材料試験結果は図-3に示す。

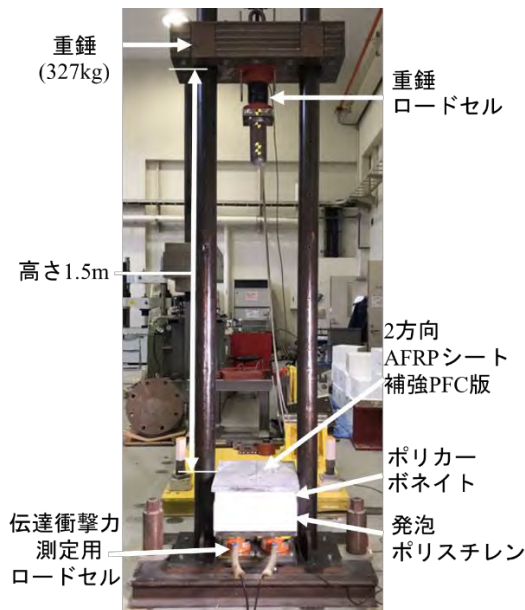


写真-1 実験装置

### 2.3測定項目

本実験の測定項目は、重錘衝撃力、伝達衝撃力、重錘移動量、重錘落下速度、発泡材の最大ひずみ、残留変形量である。伝達衝撃力は前述の反力計により測定した4点の反力の合計である。重錘衝撃力は重錘内のロードセル、重錘移動量は高速度カメラで撮影した映像の画像解析により測定する。重錘落下速度は重錘移動量データを時間微分することで取得し、発泡材の最大ひずみは重錘移動量を発泡材の変形量として算出する。

各計測機器の詳細については以下に示す。

重錘内のロードセルは起歪柱型ロードセルであり、容量は1000kN、応答周波数は4.0kHzとなっている。伝達衝撃力の計測機器は東京測器社製の圧縮センターホール型ロードセルであり、容量は500kN、固有振動数は16kHzとなっている。高速度カメラはDitect社製品を用い、設定は表-3のようにになっている。

### 2.2 供試体概要

PFC版の平面寸法は400mm×400mm、厚さは25mmであり、鋼繊維混合率2%の試験体を用いた。なお、PFC版の圧縮強度は315N/mm<sup>2</sup>であった。また表-1は2方向AFRPシートの材料特性を示す。

発泡材には単位体積重量の異なる3種類の発泡ポリスチレンを使用し、材料試験結果及び材料特性については

## 3. 実験結果

### 3.1 時刻歴応答波形

図-4には、各試験体の重錘衝撃力、重錘移動量及び伝

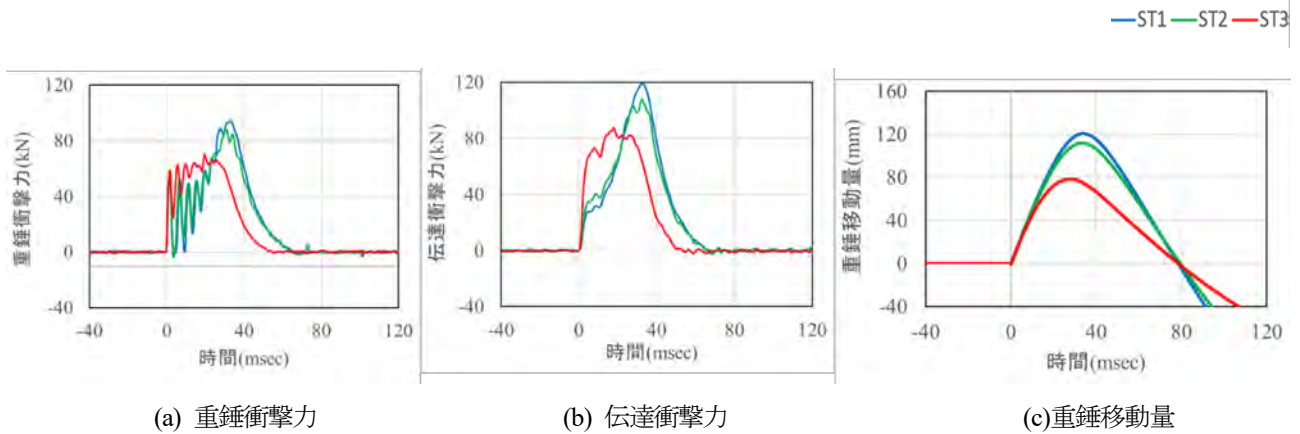


図4 時刻歴応答波形

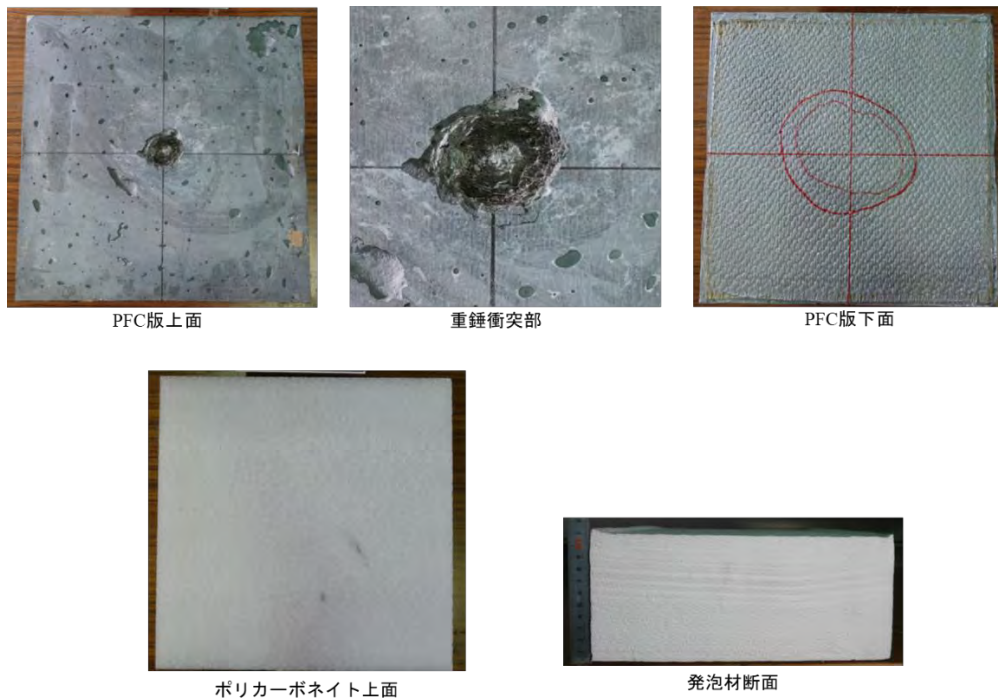


写真-2 破壊性状(ST2 の例)

達衝撃力の時刻歴応答波形を示している。

図4より、重錘衝撃力は重錘の衝突とともに波形が急激に立ち上がり、その後短い時間で複数回の衝突を得て最大値に達することが分かる。設置した発泡材の圧縮強度が高いほど短時間で重錘衝撃力が最大値へと達し、継続時間が短くなる傾向にある。伝達衝撃力も同様に重錘の衝突とともに急激に波形が立ち上がり、最大値に達した。設置した発泡材の圧縮強度が高いほど短時間で伝達衝撃力が最大値に達し、継続時間が短くなる傾向にあり、概ね重錘衝撃力の時刻歴応答波形の挙動と対応していると言える。

また、設置した発泡材の圧縮強度が高いほど重錘衝撃力・伝達衝撃力両方の最大値が小さくなる傾向にある。既往研究<sup>49)</sup>によると圧縮強度が高い発泡材ほど重錘衝撃力が大きくなる傾向にあり、本実験結果とは異なる結果を得ている。これは本実験において ST1・ST2 を設置

した場合の最大ひずみが90%程度となっていることから、用いた発泡材の材料特性を上回る衝撃力が加わったことにより十分な緩衝性能を発揮できなかったものと考えられる。重錘移動量は既往研究と同様に設置した発泡材の圧縮強度が高いほど重錘移動量の最大値が小さくなる傾向にある。

### 3.2 破壊性状

写真-2 は ST2 のケースにおける PFC 版、ポリカーボネイト、発泡材の破壊性状を示している。写真-2 より発泡材の変形は重錘衝突点の局所的な変形とは異なり、上面に設置してあったポリカーボネイトとの接触面に沿った変形であった。これは PFC 版及びポリカーボネイトの積層効果により衝撃の分散が十分になされ、発泡材がポリカーボネイトとの接触面積全体で衝撃を受けたため

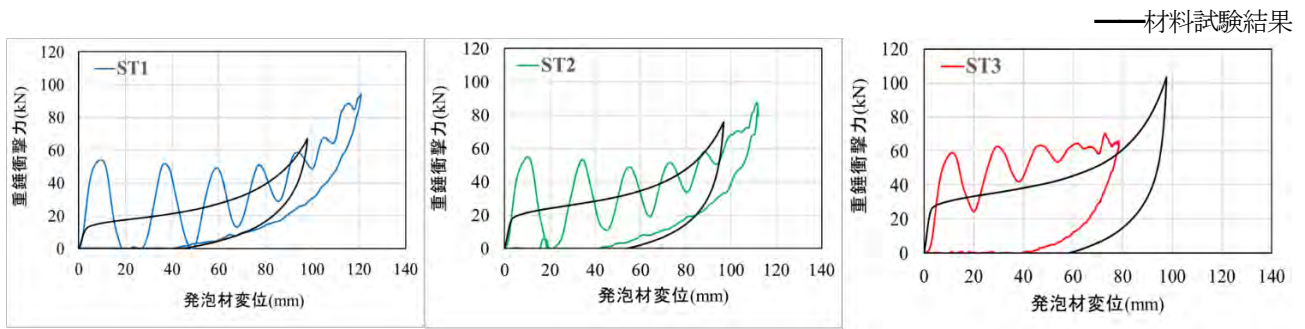


図-5 重錘衝撃力ー発泡材変位関係

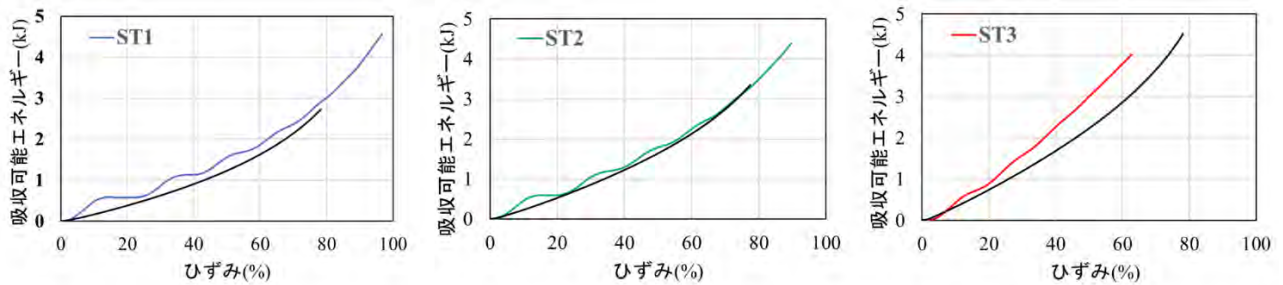


図-6 ひずみ発生時における吸収可能エネルギー

表-4 残留変位

試験体	発泡材	ポリカーボネイト	
	実験後 層厚 (mm)	実験後 中央部層厚 (mm)	中央部 変形量 (mm)
ST1	108.3	50.0	0.0
ST2	106.0	50.0	0.0
ST3	100.5	50.0	6.0

あると考えられる。ポリカーボネイトは外見上特に変形や破壊は見られなかった。PFC版は重錘衝突面においてAFRPシートとの接着が確認されたが、その周囲では押し抜きせん断破壊が発生しており、押し抜け部分は概ね重錘との接触面に沿った形となっていた。

表-4は実験後の発泡材及びポリカーボネイトの層厚を示している。表-4より設置した発泡材の圧縮強度が高いほど実験後の発泡材の層厚は小さくなる傾向にあり、ポリカーボネイトに関しては実験前後で中央部の層厚が変化していなかった。

### 3.3 エネルギー吸収性能

図-5は各試験体の衝撃実験で計測された重錘衝撃力と発泡材変位関係及び各種発泡材の材料試験結果に基づき算出した載荷荷重と発泡材変位関係を示している。ここで衝撃実験の発泡材変位は重錘移動量とし、材料試験結果の載荷荷重、発泡材変位は実験で使用した発泡材を想定し、載荷荷重の作用面積を400mm×380mm、発泡材の厚さを125mmとして算出した。

図-6は図-5で示した衝撃実験及び材料試験結果の衝撃力と発泡材変位関係より発泡材の各ひずみ状態における吸収可能エネルギーを算出した結果となっている。図-6より発泡材の圧縮強度が高いほど吸収可能エネルギー量

が大きくなる傾向にあることが分かる。また各ケースにおいて衝撃実験結果から算出した発泡材のエネルギー吸収量は、材料試験結果からの試算に近い吸収効果を発揮した。ただし、ST3は衝撃実験結果が材料試験結果より大きく上回る結果となった。これはST3を使用したケースは衝撃に対する応力ーひずみ関係がST1・ST2とは異なる特徴を示すことが関係していると考えられる。既往研究<sup>4)</sup>よりST3のような圧縮強度が高い発泡材は材料試験結果を上回る応力が生じる傾向があることが確認されており、これに伴いST3の吸収可能エネルギー量に関しても衝撃実験結果が材料試験結果を上回ったのではないかと考えられる。

### 4. 結論

本研究では、PFC版等の新材料を用いた高性能な積層緩衝構造の開発を目的として、発泡材の種類や積層構成を変化させた重錘落下衝撃実験を行った。本研究で得られた知見をまとめると以下ようになる。

- 1) 発泡材の種類に関わらず、ポリカーボネイトとAFRPシート補強したPFC版を設置することによりエネルギー吸収性能が飛躍的に向上する。これは積層に伴う衝撃分散効果により発泡材の局所的な変形を防ぎ、発泡材層全体でエネルギー吸収を行ったためと考えられる。また、PFC版が押し抜けた場合においても衝撃分散効果が発揮され、十分な緩衝効果を発揮する。
- 2) ポリカーボネイトとAFRPシート補強したPFC版を積層した各種発泡材の重錘衝撃力ー変形量曲線は、材料試験結果をもとに算出した曲線と同様の性状を示す。ただし圧縮強度の高い発泡材については圧縮応力が材料試験結果よりも大きくなる傾向があることに留意する必要がある。

- 3) 圧縮強度が高い発泡材の場合ほどエネルギー吸収性能に優れ、緩衝構造の層厚を薄く設計することが可能である。一方で圧縮強度が高い発泡材を使用する場合ほど伝達衝撃力、重錘衝撃力が大きくなる傾向にあるため、緩衝構造下の落石防護構造物の耐衝撃性能や劣化状態に応じた発泡材、設計ひずみの適用が必要である。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり PFC 版は太平洋セメント(株)中央研究所よりご提供頂き、アラミド繊維シートはファイベックス(株)にご提供いただいた。また、各種発泡材は(株)JSPにご提供頂いた。ここに記し3社に感謝の意を示します。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2017.12
- 2) 栗橋祐介，河野克哉，曾根涼太，小室雅人，多田克彦：圧縮強度 400N/mm<sup>2</sup> を有する鋼繊維補強コンクリート梁の耐衝撃挙動，構造工学論文集，Vol.63A，2017.3
- 3) 栗橋祐介，河野克哉，安田瑛紀，木内洋介，小室雅人：AFRP シート曲げ補強した PFC はりの耐衝撃性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.65A，2019.3
- 4) 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 A1，76 巻，3 号，P.442~455
- 5) 栗橋祐介，小暮直親，新田真一，小室雅人，戸上卓也：各種発泡材の緩衝性能評価に関する重錘落下衝撃 実験，構造工学論文集，Vol.64A，2018.3