

I-25

EPSを用いた複層緩衝構造の落錘衝撃実験

室蘭工業大学	正員	岸 徳光
室蘭工業大学	正員	松岡 健一
開発土木研究所	正員	中野 修
室蘭工業大学	正員	菅田 紀之
室蘭工業大学	学生員	西 弘明

1. はじめに

道路網の安全施設としてのロックシェッドには、崩落土砂、落石などによって生じる衝撃力を緩和させる目的で山砂または山土などが敷かれている。この種の構造物には静的荷重の数十～数百倍の荷重が作用するため、如何に効率的に落石エネルギーを吸収して衝撃力を低下させるかが問題である。効率的な敷砂やシェッド部の設計のために金沢大学や開発局土試において継続的な研究が行われているが、最適の緩衝効果を得るためには約1m程度の敷厚が必要であることが明らかになっている。しかしながら、緩衝材として敷砂を用いる場合は衝撃荷重の分散効果が小さく、また、その重量の大きさによりシェッドがトップヘビー構造となるため地震時の安全性確保のため下部工が大がかりになることも指摘されている。

本論文では、これらの問題点を解消するために、新素材を用いた緩衝システムに注目し、種々の基礎的室内実験を行いその効果について検討を行った。ここで採用した緩衝用新素材はEPS(Expanded Poly-Styrol)材であり、EPS材単独で用いた場合や、PCやRCのスラブを併用した複層構造とした場合の緩衝効果について実験を行い、相互に比較検討を行っている。

2. 実験概要

2.1. 実験装置

衝撃荷重載荷は、室蘭工大に設置している落下衝撃試験装置を用いて行った。衝撃荷重は直径15cmの鋼円柱で、重量70kgf(平底)および100kgf(2mmの高さの球底)の重錘を所定の高さにセットし、自由落下させることによって発生させている。重錘の衝突速度は1m/sec～7m/secの間で変化させ、試験体中央部に載荷している。また、重錘には100Gおよび500G、1000Gの歪ゲージ型の加速度計を腹部に取付け、重錘加速度を精度良く計測できるようにしている。

2.2. ロードセル

緩衝材底部で得られる伝達衝撃力を効率的に計測するために、本実験では以下のような2タイプのロードセルを用いている。

- 1) EPS材の一次元的な衝撃吸収効果を検討するために重錘と同一直径に整形したEPS材を用いることを前提にして、その全衝撃力を検知するためのロードセル(図-1)

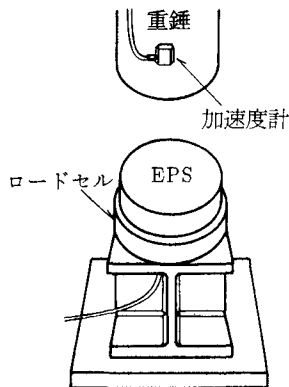


図-1 EPS一次元衝撃試験用ロードセル

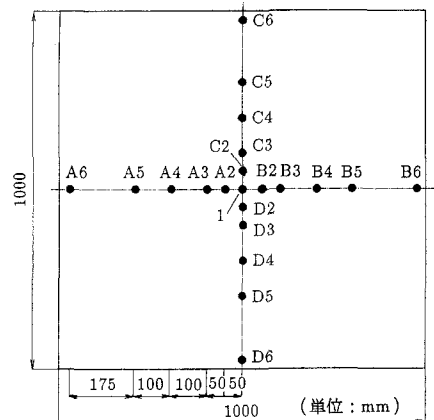


図-2 ロードセル板

Experimental Study on the Characteristics of Multi-layered Absorber System

by Norimitsu KISHI, Ken-ichi MATSUOKA, Osamu NAKANO, Noriyuki SUGATA and Hiroaki NISHI

表-1 実験ケース一覧

実験 ケース	重錘 重量 (kgf)	落下 速度 (m/sec)	EPS 厚さ (cm)	実験 ケース	重錘 重量 (kgf)	落下 速度 (m/sec)	EPS 厚さ (cm)	実験 ケース	重錘 重量 (kgf)	落下 速度 (m/sec)	上部 EPS 厚さ (cm)	中間 スラブ	下部 EPS 厚さ (cm)
EPS 一次元	70	2	0.5	EPS (Load Cell)	70	3	2	EPS + SLB + EPS (Load Cell)	100	6	5	PC- SLB	2
			1.0			//	3				//		5
			2.0			//	5				//		10
			3.0			//	10				20		2
			4.0			//	15				//		5
			5.0			//	20				//		10
			8.0		100	3	2		100	6	5	RC- SLB	2
			10.0			//	3				//		5
			12.5			//	5				//		10
			15.0			//	10				20		2
						//	15				//		5
						//	20				//		10
	70	3	0.5	EPS+ PC-SLB (4辺単純 支持)	100	1	5	EPS + SLB + EPS + PC-SLB (4辺単純 支持)	100	6	5	RC- SLB	2
			1.0			2	//				//		5
			2.0			3	//				//		10
			3.0			4	//				20		2
			4.0								//		5
			5.0								//		10
	70	4	0.5	EPS+ PC-SLB (4辺単純 支持)	100	3	2		100	6	5	AsC- SLB	2
			1.0			//	3				//		5
			2.0			//	5				//		10
			3.0			//	10				20		2
			4.0			//	15				//		5
			5.0			//	20				//		10
	70	4	0.5	EPS+ PC-SLB (4辺単純 支持)	100	1	5		100	6	5	AC- SLB	2
			1.0			2	//				//		5
			2.0			3	//				//		10
			3.0			4	//				20		2
			4.0			5	//				//		5
			5.0			6	//				//		10

2) 2次元的な広がりを持つEPS材を用いた場合や、EPS材とPCやRCなどのスラブからなる複層体を用いた場合の衝撃力の2次元的な分散効果の検討を可能とするための21個のロードセルが埋込まれたロードセル板 (図-2)

3. 実験結果

2.で示された実験装置およびロードセルを用い、表-1に示す各ケースについて実験を行った。以下に主な実験結果について考察を行う。なお、本実験では全て 20kgf/m^3 のEPS材を使用している。

3.1. EPS材の一次元衝撃実験結果

EPS材の基本的な緩衝効果を知る目的で、重錘外形と同一の径に整形したEPS材を上記2.2.1) に示したロードセル上にセットして重錘落下実験を行った。本実験を特に「EPS材の一次元衝撃実験」と名付けることとする。実験は平底70kgfの重錘を用い、落下速度 $V=2\sim 4\text{m/sec}$ についてEPS材を最小1cmから15cmまで種々変化させて行った。

写真-1に落下速度 $V=3\text{m/sec}$ における異なる3ケースについて重錘加速度(W)とロードセル(LC)の時間方向分布を示している。写真より、EPS厚が厚くなるにしたがい応答時間は長く(10msecから70msec)、また応答波形は徐々にゆるやかになっている様子がわかる。またEPS厚が5、10cmの場合はW、LCとも時間的にほぼ同一の分布波形を示しているが、2cmの

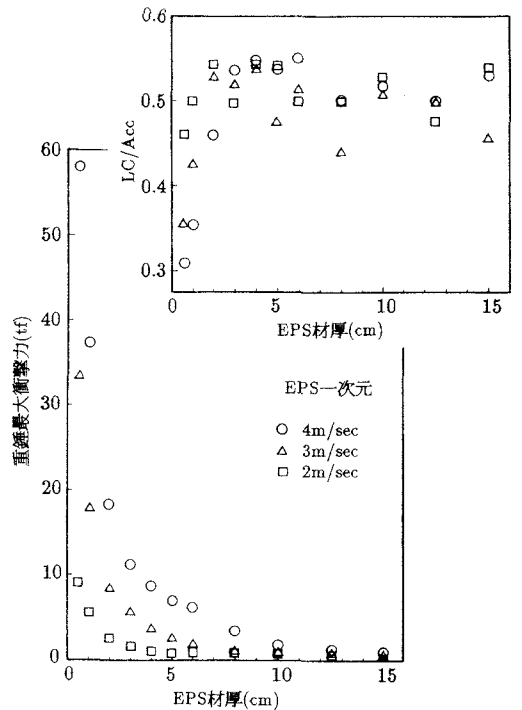


図-3 重錘最大衝撃力およびLC/AccとEPS材厚の関係

場合は重錘加速度において高周波成分が示されている。

図-3には重錘において発生した最大加速度に重錘重量を乗じて得られる重錘最大衝撃力と、ロードセル波形から求められる最大衝撃力の比について、EPS材厚を横軸にとって整理している。まず、重錘最大衝撃力に関しては、いずれの落下速度に対してもEPS材厚が増加するにしたがい急激に減少し、EPS材厚が10cm以上の場合は落下速度にかかわらずほぼ一定の値になっているようである。一方、LC/Accから衝撃力の基盤部への伝達率を調べると、EPS材が3cmより薄い場合は薄いほど伝達率が小さくなっているが、3cmより厚い場合はほぼ50%程度となっているようであり、EPS材は基部への衝撃波動伝播時も大きな減衰性能を有していることがわかる。

3.2. 矩形形状(50cm×50cm)のEPS材を用いた衝撃実験

3.1では重錘と同一径のEPS材

を用いた一次元的な衝撃実験を行ったが、ここでは板状のEPS材を用いた場合の基部（あるいは底部）における衝撃力の分散効果を調べるためにロードセルを平面状に配置したロードセル板上に50cm×50cmの矩形EPS材を設置し実験を行った。

写真-2に写真-1と同一のEPS材厚についての応答波形分布を示す。ただし、LCは中央部

ロードセルの応答波形である。重錘加速度波形に多少ノイズがのっているが、応答波形形状は写真-1とほぼ同一であることがわかる。

特に最大重錘加速度値に注目すれば、EPS材厚5cmの場合は多少異なるようであるが、他の2ケースは類似の値を示している。

また、写真-3には重錘重量100kgfでEPS材厚を5cmに固定した場合における各落下速度に対する応答波形を示している。写真-2と応答波形を比較すると、それぞれ、落下速度 $V=1\text{m/sec}$ の場合はEPS材厚 $h=10\text{cm}$ に、 $V=3\text{m/sec}$ が $h=5\text{cm}$ に、 $V=4\text{m/sec}$ は $h=2\text{cm}$ に対応してほぼ同一の分布形状を示している。

重錘重量100kgfにおけるロードセルより求められた伝達応力をプロットしたのが図-4であ

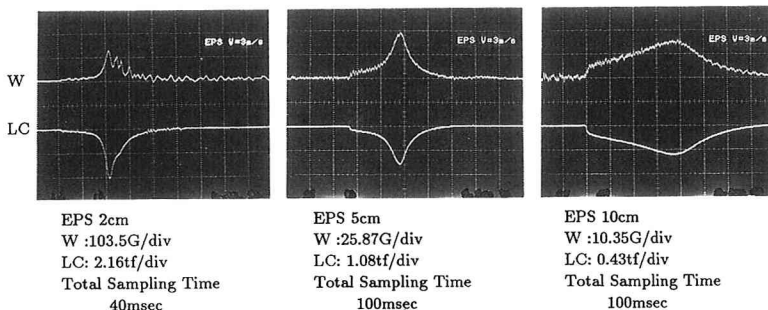


写真-1 重錘加速度およびロードセルの応答波形分布
(EPS一次元 落下速度 $V=3\text{m/sec}$ 重錘重量70kgf)

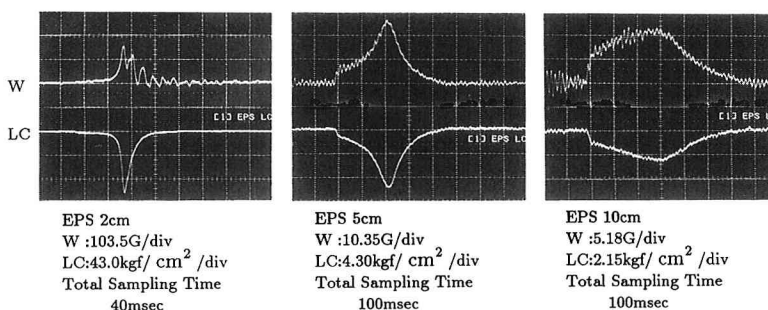


写真-2 重錘加速度およびロードセルの応答波形分布
(EPS(LC) 落下速度 $V=3\text{m/sec}$ 重錘重量70kgf)

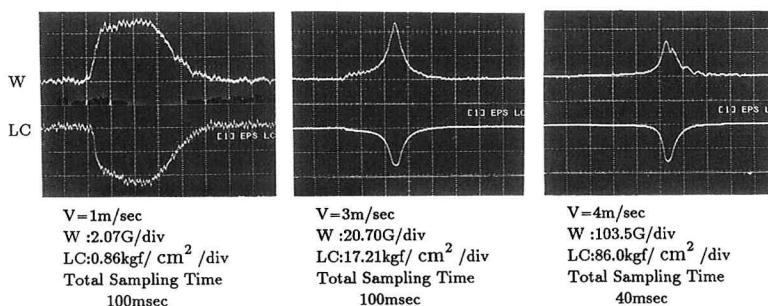


写真-3 重錘加速度およびロードセルの応答波形分布
(EPS(LC) EPS材厚5cm 重錘重量100kgf)

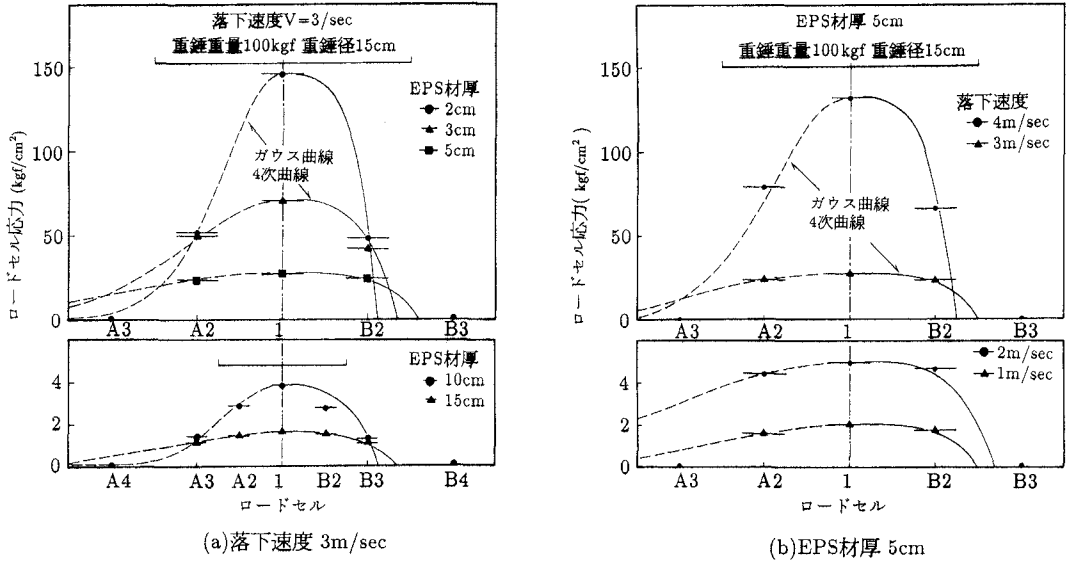


図-4 ロードセル応力分布図

る。(a)が落下速度を $V=3\text{m/sec}$ としてEPS材厚を変化させた場合であり、(b)がEPS材厚を5cmに固定して落下速度を変化させた場合である。厚さが厚い場合や落下速度が小さい場合は、値も小さく偏平な応力分布となっているが、他は中央部に集中した分布を示している。図において実線、破線で示されている曲線は総伝達力を評価するため1, A2における応力値を用いてガウス曲線である $y = Ae^{-ax^2}$ と4次曲線である $y = A(1-Bx^4)$ の関数式を決定し描いたものである。ロードセルの数が少ない

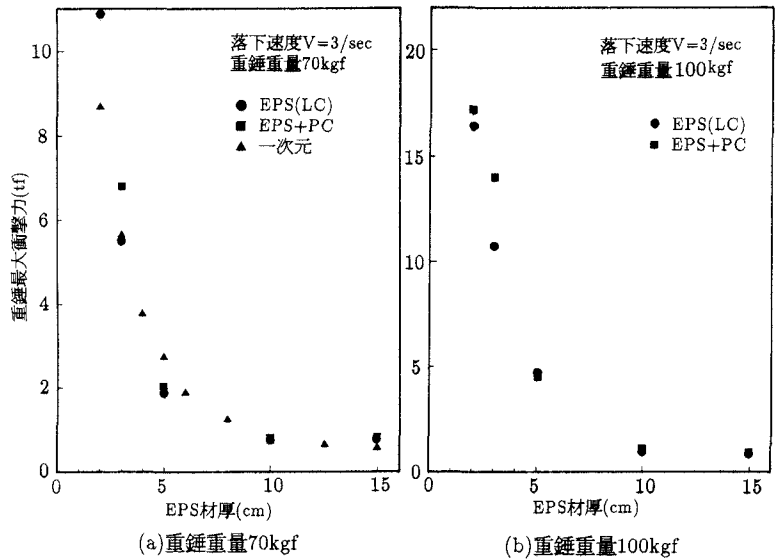


図-5 重錘最大衝撃力とEPS材厚の関係

ため、応力が中央部に集中して分布が急激に減少している場合は、明確な分布曲線を求めることが不可能であるが、上記二関数を用いた試算では後者の4次曲線がより実験結果に合うようである。

図-5には最大重錘加速度について、支点間距離が125cmの四辺単純支持PC床板上に同じく50cm×50cmの矩形EPS材を設置した場合や、3.1の一次元衝撃実験の結果と比較して示している。(a)は重錘重量が70kgf、(b)が100kgfの場合である。両図ともEPS材厚が5cmより薄い場合は各実験で多少大きな誤差が生じているようであるが、5cmより厚い場合は(a)、(b)ともほぼ同一の値を示しているようである。これより本実験の範囲では、EPS材を緩衝材として用いる場合、PC床板程度の剛性を有する基礎上に設置する場合はほぼ剛基礎上と同一の結果を示すことが明かになった。

3.3. EPS材を用いた複層緩衝構造についての衝撃実験

3.3.1. 基部にロードセル板を設置した場合

3.2で検討を行ったように、矩形形状のEPS材単層を用いた実験においては、EPS材が厚い場合や落下速度が小さい場合を除いて重錘落下部に衝撃力が集中し、応力分散性が小さいことが明らかとなった。ここでは応力分散性を向上させるために、表材として矩形形状EPS材(50cm×50cm×5cm)、芯材としてPCあるいはRC床板(150cm×150cm×10cm、鉄筋比片側約1%の複鉄筋断面)、裏材として床板と同一寸法のEPS材、基部にロードセル板を設置し実験を行った。なお、PCおよびRC床版は重錘による数回の衝撃载荷を受けたものを使用した。RC床版には多くのひび割れが生じているが、PC床版は平均応力 50kgf/cm² のプレストレスを導入しているため、目視可能なひび割れは生じていない。また、重錘重量は100kgf、落下速度はV=6m/secに固定し、裏材としてのEPS材の厚さを2、5、10 cmと変化させて実験を行った。

図-6は(a)が芯材としてPC床板を、(b)がRC床板を用いた場合の最大応力発生時のロードセルから求められた応力分布図である。図-3よりPCあるいはRC床版中央部には25tonf(150kgf/cm²×重錘底部接地面積)程度の衝撃力が载荷しているものと推察できるが、さらに床版底部にEPS材を設置することにより、図-6に示されているように最大2kgf/cm²程度に減少し、かつその分布も偏平なものとなっていることがわかる。これは表材としてのEPS材からの集中的な伝達力が芯材としての床板の弾性挙動によって床版全体に伝播されて平均化され、さらに裏材としてのEPS材によって低減されたものと考えられる。特に裏材EPSに関しては、スラブの存在により、EPS材の局所的な損傷を防ぐことができるため、面全体においてほぼ均等な緩衝効果が期待できるものと考えられる。(a)図、(b)図を比較すると、芯材のPC、RCの違いによる顕著な差はみられず、ほぼ類似の挙動を示しているものと考えられる。また、裏材EPS材厚の効果に関しては、厚さが厚いほど応力値は低減しているものの、直接重錘をEPS材上に落下させた場合とは異なり、その効果は比較的小さいことがわかる。

3.3.2. 基部に四辺単純支持PC床板を接地した場合

3.3.1では、EPS材とPCあるいはRC床板との三層構

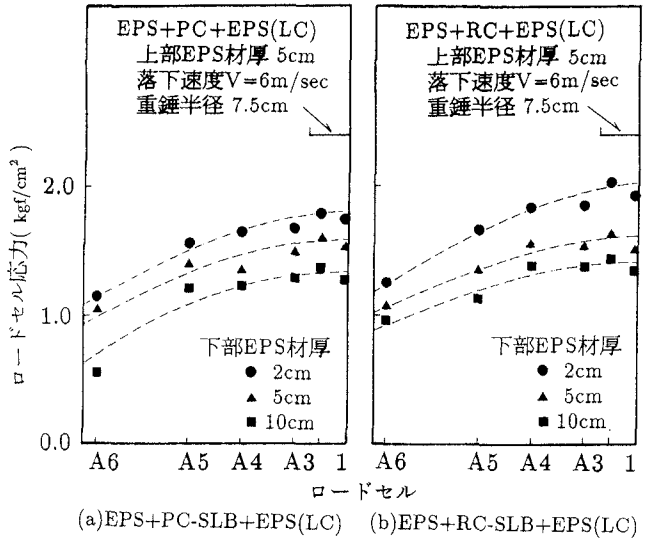


図-6 ロードセル応力分布図

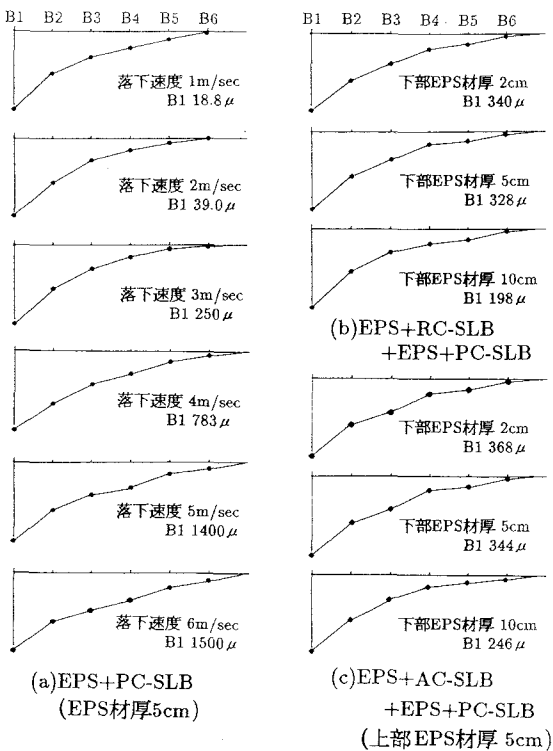


図-7 PC-SLB下部主鉄筋の歪分布図

造とした場合の基部における伝達衝撃力分布について検討を行った。ここでは、ロードセルの代わりに四辺単純支持PC床板を設置し、動的応答結果としての歪波形を求めることによって緩衝効果について検討を行うこととする。したがって、ここで求められる歪波形はPC床板上に載荷される全衝撃力に対する応答結果である。

図-7に最大応答時におけるPC床板中央部の下部主鉄筋の歪分布を示している。(a)図はPC床板上にEPS材を単独で設置し、重錘重量を100kgf、EPS材厚 $h=5\text{cm}$ とし、落下速度を $V=1\sim 6\text{m/sec}$ に変化させた場合の分布図である。また、(b)図は重錘重量100kgf、落下速度 $V=6\text{m/sec}$ とし、複層緩衝構造の芯材としてRC床板を用い、裏材としてのEPS材の厚さを変化させた場合の最大応答時の歪分布である。(c)図は同様にして芯材としてAFRPロッドで補強されたコンクリート床板を用いた場合の結果である。歪分布は(a)~(c)図ともほぼ類似の分布を示しているようである。最大応答歪に関しては、(a)図の場合は落下速度の増大にともない急激に増大し、 $V=6\text{m/sec}$ では 1500μ の歪値となっている。これに対し、(b)、(c)図では裏材としてEPS材を用いることにより、EPS材厚 2cm の場合で $340\sim 370\mu$ 程度の値となっている。この歪値は(a)図の $V=3\text{m/sec}$ 強の落下速度に対応し、また、 $V=6\text{m/sec}$ の状態と比較すると $1/5$ の大きさに低減されていることがわかる。

以上より、緩衝構造としてRC床板等比較的剛な構造部材を芯材として用いた三層構造とすることによって伝達衝撃力の分散性を向上させ、本構造の応答値を数分の1（本実験では $1/5\sim 1/7$ 程度）に低減できることが明らかとなった。

4. まとめ

道路網の安全施設としてのロックシェッドにおいて、落石等によって生じる衝撃力を効果的に緩和させる目的で、従来から用いられている敷砂材とは異なる新素材からなる緩衝システムに注目し、その基礎実験を行った。

本論文で採用したシステムは、基本的な緩衝材として表裏材にEPS材を、芯材としてRC等構造部材を用いる三層構造である。実験結果よりEPS材を単独で使用した場合には、敷砂等と同様に衝撃荷重の分散効果が小さいため、敷厚を厚くしなければならないことがわかり、また、三層構造にする場合は裏材EPS厚を薄くしても上記衝撃力の数分の1程度に低減できることが明らかとなった。

謝辞

本研究は、平成2年度文部省科学研究補助金一般研究(c)（課題番号02650320）の補助を受けて実施したものである。

また、本実験において用いられたEPS材は、三菱油化バーディッシュ(株) 遠藤 紘氏の御好意によりご提供戴いたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1). 岡田憲治, 中松俊裕: 覆道の衝撃実験について, 第23回北海道開発局技術研究発表会, 1979.2.
- 2). 吉田 博, 榊谷 浩, 鈴木哲治: 敷砂上の落石による衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第352号, pp.61~70, 1984.12.
- 3). 吉田 博, 榊谷 浩, 岡 衛: 落石覆工屋根上への落石による衝撃荷重特性について, 土木学会論文集, 第362号, pp.461~470, 1985.10.
- 4). 三上敬司, 能町純雄, 松岡健一: 落石覆工への落石による衝撃力衝撃力に関する評価, 第2回落石の衝撃力及びロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集別冊, pp.1~10, 1986.7.
- 5). 吉田 博, 榊谷 浩, 佐藤 真: 落石実験データベースの作成と落石の衝撃力評価についてについて, 構造工学論文集, Vol.33A, pp.571~583, 1987.3.