

三層緩衝構造の緩衝性能に関する大型屋外実験

PROTOTYPE IMPACT TEST ON ABSORBING CAPACITY OF THREE-LAYERED ABSORBING SYSTEMS

岸 徳光* 佐藤昌志** 中野 修***

Norimitsu KISHI, Masashi SATO and Osamu NAKANO

* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050 室蘭市水元町27-1)

** 開発土木研究所室長 構造研究室 (〒062 札幌市豊平区平岸1-3)

*** 工博 旭川開発建設部次長 (〒070 旭川市8-12)

Usually sand cushion has been used to decrease impact forces generated by falling rocks on the roof of rock-shed structure. However, it is made clear that sand cushion does not effectively work for decreasing and dispersing the transmitted impact forces. In order to improve the absorbing capacity of sand cushion, three-layered absorbing system was developed which is normally composed of 50 cm thick upper sand layer, 20 cm RC core slab and 50 cm thick EPS layer.

In this paper, the study on absorbing capacity of the three-layered absorbing systems is reported based on the field impact tests. Different types of the three-layered absorbing system, varying the materials and thicknesses of upper and lower layers are used for comparison of absorbing capacity. From these results, it is made clear that the normal type of absorbing system is the best one among them against a 3 tf rock dropping from a maximum 30 m height.

Key Words: three-layered absorbing system, rock-shed, impact load

1. はじめに

急峻な山岳地帯や海岸地域における道路を、落石等の危険から保護するための安全施設である落石覆工の頂版部には、落石衝撃力を緩和する目的で緩衝構造が設置されている。この緩衝構造に要求される性能は、落石エネルギーを効率的に吸収するとともに、落石荷重をできるだけ広い範囲に分散させ、覆工本体に作用する衝撃力を緩和できることである。その緩衝構造としては、現行の落石対策便覧¹⁾等では敷砂を使用することを推奨している。敷砂緩衝材の緩衝性能に関する研究は、鋼材クラブをはじめ、北海道開発局開発土木研究所(旧土木試験所)²⁾や金沢大学³⁾等の実験的研究があり、著者等も剛基礎上に設置した敷砂緩衝材に関する緩衝性能実験を行っている⁴⁾。特に著者らが行った敷砂底部への伝達応力の詳細な測定結果によれば、敷砂を緩衝材として用いた場合には、1) 落石対策便覧での規定よりも荷重分散性が劣り、覆工本体へ作用する衝撃力の緩和は同便覧の規定ほど期待できないこと、2) 緩衝性能の向上には敷厚を大きくすることが必要であるが、死荷重が増すため覆工本体がトップヘビー構造になり、地震時の安全性確保のために下部工が大がかりになること、3) 物性値の経時変化によって、緩衝材としての機能が低下することなど、問題点の多いことが明らかとなっている。

これらの敷砂材の欠点を補うことのできる緩衝材として、軽量で、緩衝性能に優れている EPS 材 (Expanded Poly-Styrol) を利用する研究が行われている⁵⁾。しかしながら、EPS 材を単独で用いる場合には、これが低強度

材料であることより、落石等の衝突部分にせん断破壊を起し易いため、EPS 材の優れた緩衝性能を効率的に利用することができない。一方、著者らは先に緩衝材の緩衝特性を理論的に検討することを目的として、敷砂を層状弾性体にモデル化し、応力波伝播特性を考慮した解析を行い、その特性を明らかにするとともに、敷砂と RC 部材等異質な材料からなる多層構造の緩衝特性についても検討している⁶⁾。その結果、1) 基盤上に置かれた敷砂材は表面に作用する衝撃力を増幅して基盤に伝えること、2) これに対して、芯材として RC 版のような剛性の大きな部材を挿入した多層構造は、表面に作用した衝撃力を芯材によって分散し、基盤に伝達される衝撃力を減少させる特性があることを明らかにしている。

著者らは、これらの研究を基に、より緩衝性能に優れた緩衝構造の開発を目的として、従来の単層構造とは異なる発想の基に、各材料の利点を組み合わせた複層緩衝構造「三層緩衝構造」の開発を行った。三層緩衝構造は、敷砂や EPS 材等の応力波伝播速度が遅く高歪能力をもつ材料には衝撃力そのものの緩和作用を、RC 版のように伝播速度の速い材料には衝撃力の分散効果を期待し、構造全体として緩衝効果を高めようとするものである。この考えから著者らは、まず芯材を RC 版とし、表裏層材を EPS 材とした三層緩衝構造に対する室内実験を行い、EPS 材を単独で用いた場合よりも優れた緩衝性能を有することを明らかにしている⁷⁾。しかしながら、表層の EPS 材は EPS 材単層の場合と同様に衝突部分のせん断破壊により、大きな衝撃力に対しては十分な緩衝効

果を期待できないことが予想されることや、実構造を想定した場合の維持管理性を考慮して、三層緩衝構造の基本的な材料構成として、表層材を敷砂、芯材を RC 版、裏層材を EPS 材とすることとした。

本論文は、これまでに行われた各種三層緩衝構造の緩衝性能に関する屋外大型実験結果をとりまとめ、三層緩衝構造の有効性を確認するとともに、表裏層材の特性が緩衝性能に及ぼす影響を検討したものである。実験は、6.8 m × 6.8 m の剛基礎の上に各種三層緩衝構造を設置し、重量 3 tf の重錘を 10 m ~ 30 m の高さより自由落下させて行った。本研究では、重錘衝突時の加速度より算定する衝撃力（以後、これを重錘衝撃力と呼ぶ）、および緩衝構造を伝達して基礎部へ伝達される衝撃力（以後、これを伝達衝撃力と呼ぶ）、芯材 RC 版の変形性状等を用いて比較検討を行っている。

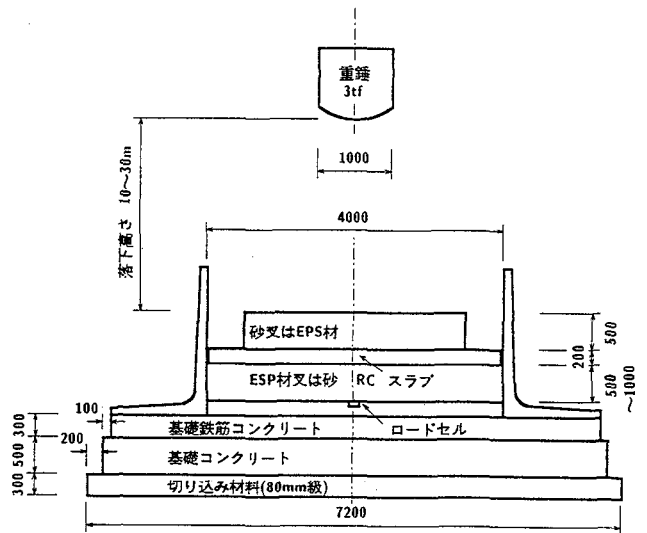


図-1 実験概要

2. 実験の概要

実験は、図-1 に示すような 6.8 m × 6.8 m × 1.0 m のコンクリート剛基礎上の L 形擁壁に囲まれた 4 m × 4 m の実験施設内に緩衝構造を設置し、その中央部に重量 3 tf の重錘を所定の高さより自由落下させることによって行っている。なお、重錘は鋼製円筒（高さ 97 cm、直径 100 cm、底部が半径 80 cm の球状）で、内部に鋼塊とコンクリートを充填して重量を調整している。

2.1 使用材料

(1) 敷砂材

本実験で用いた敷砂材は、単位体積重量 1.61 gf/cm³、絶乾比重 2.59、吸水率 5.3 %、均等係数 5.72 の栗丘産の生コンクリート用の砂である。敷砂材は 20 cm 毎に平均的に踏み固めを行い、所定の敷厚を形成するとともに砂の物理的状態を知るために、層厚 30 cm 毎にサンプルを回収し、湿潤密度、含水比および相対密度の測定も行っている。なお、採取試料の測定は各実験毎に行っているがほぼ一定であり、平均湿潤密度 1.5~1.6 g/cm³、平均含水比 4 ~ 6 %、相対密度 50 ~ 60 % であった。

(2) EPS 材

本実験で使用した EPS 材は型内発泡法により製造された単位体積重量 20 kgf/m³、形状寸法 200 cm × 100 cm × 50 cm のブロック材で、これを組み合わせて所定の寸法に設置している。また、JIS K 7220 による圧縮強さは 1.21 kgf/cm² で、弾性挙動を示す範囲は圧縮歪が 1 % 程度以下であり、このときの応力は圧縮強さの約 1/2 である。EPS 材の材料特性を図-2 に示す。

(3) 芯材 RC 版

三層緩衝構造に使用した芯材 RC 版は、形状寸法が 4.0 m × 4.0 m × 20 cm であり、設計強度 210 kgf/cm² のレデーミックスコンクリートを使用して実験ケースの数だけ製作している。コンクリートの実験時の圧縮強度は 211 kgf/cm² であった。また、鉄筋比は片側 1 % の複鉄筋配筋としており、D13 をかぶり 3 cm で 8 cm

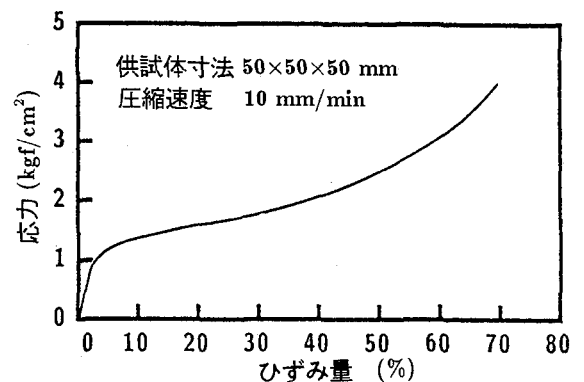


図-2 EPS 材の応力 - 歪関係

表-1 実験ケース

実験ケース の呼称	表層材		裏層材	
	材料	敷厚(cm)	材料	敷厚(cm)
S90	敷砂	90		
S50-E50	敷砂	50	EPS	50
S50-E25	敷砂	50	EPS	25
S50-E75	敷砂	50	EPS	75
S50-E100	敷砂	50	EPS	100
S25-E50	敷砂	25	EPS	50
S25-E75	敷砂	25	EPS	75
S25-E100	敷砂	25	EPS	100
S50-S50	敷砂	50	敷砂	50
E50-E50	EPS	50	EPS	50

間隔に配置している。なお、版厚は緩衝構造体の自重を小さくすることと現場の施工性を考慮に入れ 20 cm に限定した。

2.2 実験ケース

表-1 に実験ケースの一覧を示す。本文では、各実験

ケースをわかりやすくするため、表裏層材の材料（S：敷砂，E：EPS材）および各層厚（cm）をハイフンで結び簡略化して示している。

本研究では、三層緩衝構造の基本形を表層材：敷砂 50 cm 厚，芯材 RC 版：20 cm 厚，裏層材：EPS材 50 cm 厚と設定し、表裏層の材料および敷厚を種々変化した場合の緩衝特性について、敷砂単層緩衝構造の場合（S90）の実験結果（文献4）より引用）とあわせて検討を行っている。なお、衝撃実験は各実験毎に芯材 RC 版や EPS 材を新しいものに取り替えている。

2.3 計測項目

本実験における計測項目は、重錘の中心底部に埋設した歪ゲージ型加速度変換器（共和電業製 AS-HA 型）による重錘加速度および剛基礎上に設置したロードセルによる伝達衝撃応力である。加速度変換器の定格容量は、いずれの緩衝構造にも、また全ての重錘落下高にも対応できるように 200 G と 500 G（応答周波数範囲がそれぞれ DC～3.5 kHz と DC～5 kHz）を 2 台ずつ使用している。ここで採用したロードセルは受圧部直径 32 mm，容量 100 kgf/cm²，周波数帯域が DC～600 Hz の衝撃荷重測定用ロードセル⁸⁾である。ロードセルの設置に当たっては、剛基礎上のロードセル近傍の応力に乱れが生じないように、基礎コンクリート表面と面一になるようにし、中心線上に一直線に 10 cm 間隔で計 39 個埋設している。なお、ロードセル出力は、各設置点における直径 32 mm の円内に作用する荷重として出力されるが、本実験では剛基礎上への伝達衝撃応力を評価するために用いていることより、応力の単位に換算して表している。本研究では、この伝達衝撃応力を落下中心に軸対称に分布するものと仮定し、台形則を用いて集積することによって伝達衝撃力を算定している。

実験に用いた計測システムについては既に文献4)に述べられているのでここでは省略する。

3. 実験結果および考察

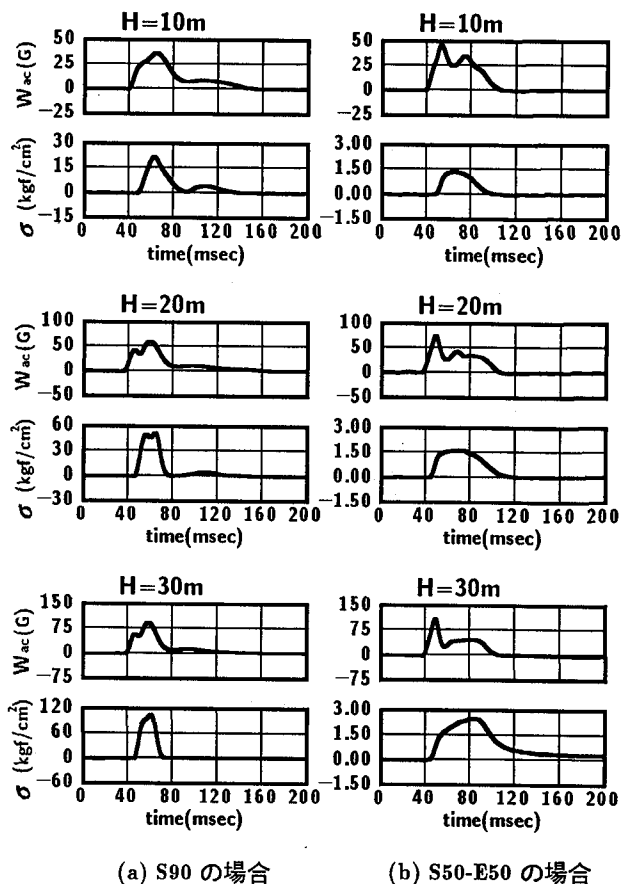
3.1 敷砂緩衝材と三層緩衝構造の緩衝特性

これまで落石覆工には敷砂材が緩衝材として用いられてきた。敷砂材の緩衝性能に関しては先に述べたように、各種の研究がなされている。著者らも文献4)のように種々の条件で野外大型実験を行い、敷砂材の緩衝特性を詳細に検討し報告している。ここでは、三層緩衝構造の緩衝特性に関して、敷砂単層（S90）と基本形（S50-E50）とを比較する形で検討を行うこととする。

(1) 重錘加速度及び伝達衝撃応力の時刻歴特性

図-3に敷砂単層（S90）と三層緩衝構造の基本形を用いた場合（S50-E50）の重錘加速度波形（ W_{ac} ）と重錘落下中心点の伝達衝撃応力波形（ σ ）を示す。重錘の落下高さはそれぞれ $H = 10, 20, 30$ m である。

まず、敷砂単層を用いた場合（S90）について考察する。落下高さ $H = 10$ m では最初のピークは明瞭ではないが、



(a) S90 の場合 (b) S50-E50 の場合
 図-3 重錘加速度 (W_{ac}) および伝達衝撃応力 (σ) の時系列分布

いずれの場合も重錘加速度波形は2つのピークを持っており最大値は第2ピークにある。第2ピークを示した後波形は急激に減少している。主波動の継続時間は、落下高さが $H = 10, 20, 30$ m と高くなるにしたがって、それぞれ約 50, 45, 40 msec と短くなっているようである。その後最大ピーク値の 1/5～1/10 程度の加速度がなだらかに続き、全体としては 110 msec 程度の現象となっている。一方、伝達衝撃応力波形は立ち上がり加速度波形より約 10 msec 遅れるものの比較的単純な鋭いピークを持つ波形となっている。主たる応答の継続時間は、落下高さ $H = 10$ m の場合には小さな第2波が現れるため、これを含めると約 80 msec となるが、第1波の継続時間は約 40 msec であり、 $H = 20, 30$ m 落下では約 25 msec と、さらに短くなっている。また、最大加速度は落下高さにほぼ比例して大きくなる傾向にあるが、最大伝達衝撃応力は 17.9, 57.0, 105.4 kgf/cm² と急激に大きくなっている。

次に三層緩衝構造の場合（S50-E50）であるが、加速度波形はどの落下高さにおいても2つのピークを持つ波形となる。その状態は重錘の衝突と同時に急激に立ち上がり、約 15 msec 後に最大値に達し、その後第2ピークを示している。落下高さが高くなると第1ピークに対する第2ピークの割合は小さくなる傾向にある。主波

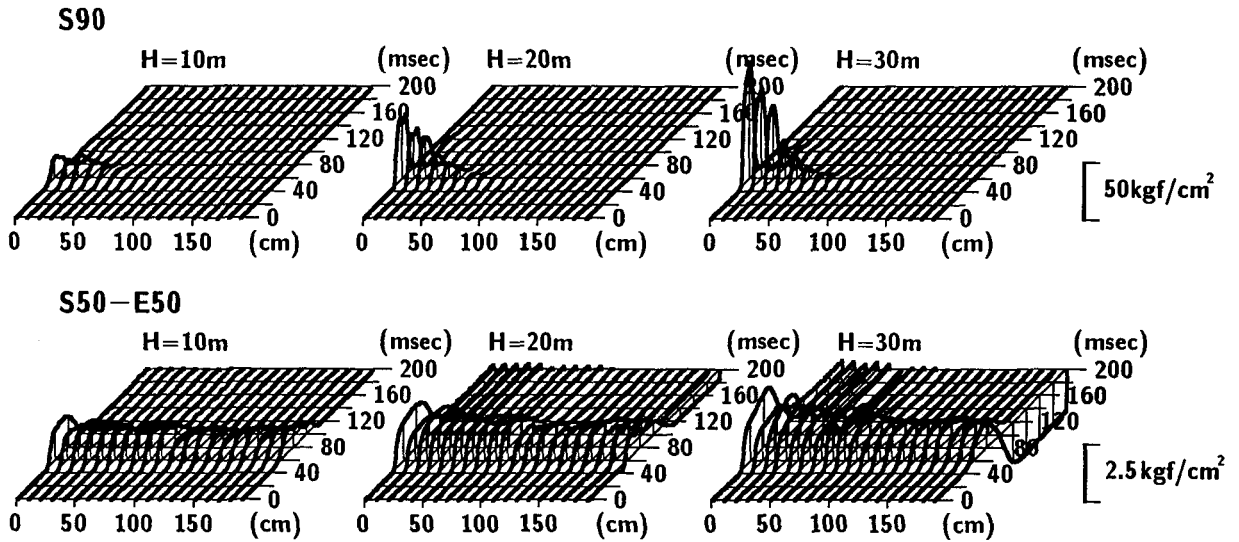


図-4 伝達衝撃応力の分布性状

動の継続時間はいずれもほぼ 60 msec で、その後はほぼ零となっている。また、重錘加速度の最大値は、敷砂単層の場合 (S90) に比較して平均 25 % 程度大きな値となっている。これは三層緩衝構造の表層の敷砂層が 50 cm と薄いため、敷砂としての緩衝効果が小さくなるためであると考えられるが、増加の程度はそれほど大きくない。伝達衝撃応力波形は敷砂単層の場合 (S90) と同様 加速度波形より約 10 msec 程度遅れて立ち上がり、比較的ゆるやかな台形分布を示し、継続時間約 60 ~ 80 msec で終了している。なお、落下高さ $H = 30$ m の場合には、重錘落下終了後も若干応力が残留している。伝達衝撃応力の最大値は $1.6 \sim 2.1 \text{ kgf/cm}^2$ であり、敷砂単層の場合 (S90) の $1/10 \sim 1/50$ と非常に小さくなっている。

(2) 伝達衝撃応力の分布性状

前項と同様のケースに対して、伝達衝撃応力波形を三次元的に表示したものを図-4に示す。図は横軸に重錘落下中心を原点としたロードセル位置を、奥行き方向に時間軸を、縦軸に伝達衝撃応力値をとって整理したものである。なお、表示時間はいずれも全計測時間を 200 msec としている。

図より、敷砂単層の場合 (S90) には、応力分布は重錘径とほぼ等しい領域に分布しており、また、継続時間も前項で述べているように 40 ~ 50 msec 程度と短いことがわかる。一方、三層緩衝構造の場合 (S50-E50) には、いずれの落下高さに対しても時間的にほぼ台形上の分布性状となっており、同程度の大きさの応力が構造全体に発生し、荷重分散性に優れていることがわかる。なお、三層緩衝構造の端部において、 $H = 20$ m, 30 m の場合の主波動終了後に負の伝達応力が発生している。これは、重錘落下によって三層緩衝構造の端部が跳ね上が

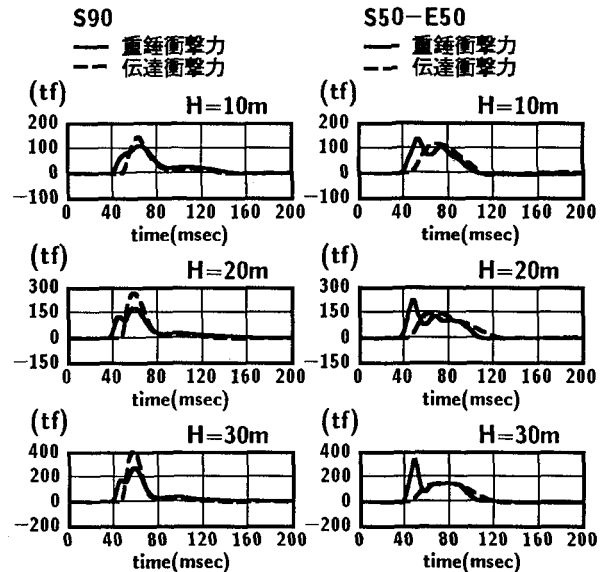


図-5 重錘衝撃力および伝達衝撃力の時系列分布

り状態となり、作用応力が初期状態よりも小さくなったためと考えられる。

(3) 重錘衝撃力および伝達衝撃力

図-5に、重錘衝撃力および伝達衝撃力の時系列分布を示した。重錘衝撃力波形は加速度波形と同様である。伝達衝撃力波形もいずれの落下高さに対しても、載荷点中央部の伝達衝撃応力波形とはほぼ同じ傾向となっている。ここでは、応答解析や実設計上問題となると考えられる衝撃力の最大値と、衝撃継続時間について検討を加える。

最大重錘衝撃力と最大伝達衝撃力を比較すると、敷砂単層の場合 (S90) は伝達衝撃力の方が重錘衝撃力より大きく、その比は約 $1.31 \sim 1.48$ となっている。これは、

前項で述べたように敷砂単層の場合は衝撃力の分散性が悪く、重錘直下の敷砂が一端自由他端固定の一次元弾性波動伝播状態に似た現象となるためと考えられる。これに対して三層緩衝構造の場合（S50-E50）は、いずれの落下高さに対しても伝達衝撃力が重錘衝撃力より小さく、その比は約 0.86 ~ 0.45 となっており、重錘落下高が高いほど緩衝効果が大きいことがわかる。これは落下高さが高くなり、衝撃力が大きくなるにしたがって、芯材 RC 版および EPS 材の変形も大きくなることより、これらの変形によるエネルギー吸収量が增大するためと考えられる。最大伝達衝撃力について三層緩衝構造（S50-E50）と敷砂単層（S90）の場合を比較すると、両者の比は各落下高さに対して 0.82, 0.54, 0.38 となっている。敷砂単層との比較からも、三層緩衝構造は落下高さが高くなるほど緩衝効果が大きくなることがわかる。

また、衝撃継続時間についてみると、落下高さが $H = 30\text{ m}$ の場合には、三層緩衝構造（S50-E50）では重錘衝撃力と伝達衝撃力で約 70 msec と類似の値となっている。これに対して、敷砂単層（S90）の場合の主たる衝撃の継続時間は重錘衝撃力（約 40 msec）より伝達衝撃力（約 30 msec）の方が波形の立ち上がり時間差だけ短くなっていることがわかる。特に、伝達衝撃力波形の主波動継続時間について S50-E50 と S90 の場合を比較すると、前者が後者の 2 倍以上長くなっていることがわかる。

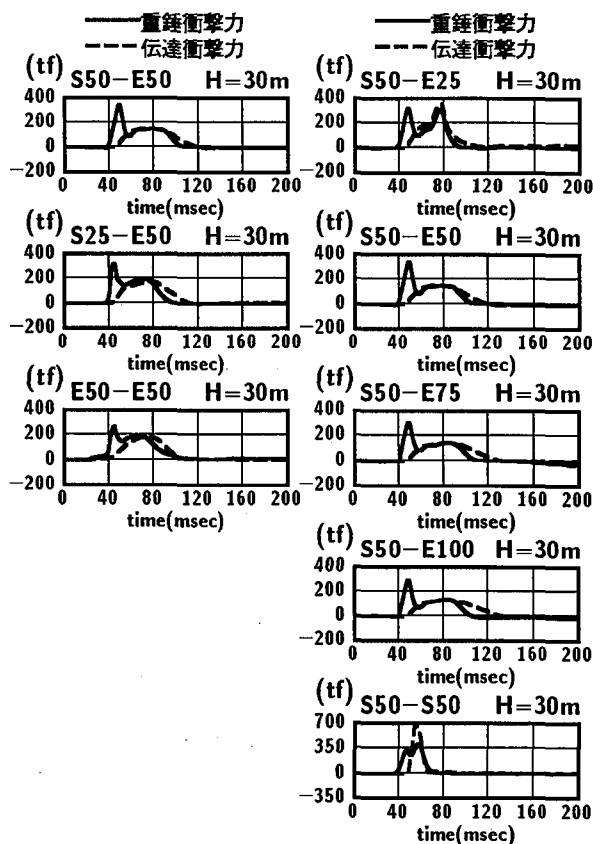
このように、三層緩衝構造（基本形、S50-E50）は、重錘衝撃力こそ敷砂単層（S90）の場合より大きくなるものの、覆工本体に直接作用すると考えられる伝達力に関しては、応力度を著しく減少させるとともに、衝撃継続時間を延ばす効果に優れ、さらにその総和である伝達衝撃力も低減できるなど緩衝効果が大きいことが明らかになった。特に、落下高が高いほど緩衝効果が大きくなるということは、安全余裕度を増加させることも意味する。これは、緩衝構造としての大きな利点であると考えられる。

3.2 三層緩衝構造の表裏層材の影響

三層緩衝構造は、既に述べたように異なる材料の波動伝播特性を巧みに組み合わせて全体としての緩衝性能を高めようとするシステムである。従って、表裏層材および芯材の特性が緩衝性能に大きく影響するものと考えられる。ここでは、表裏層材の緩衝性能に与える影響を検討するために、重錘落下高を $H = 30\text{ m}$ 、芯材の床版厚を 20 cm と一定にして、表裏層材の材質、層厚を変化させた場合について検討することとした。なお、比較検討は衝撃力波形および衝撃継続時間、芯材 RC 版のひび割れの状態に関して行なっている。

(1) 表層材の影響

図-6(a)に、裏層材を全て 50 cm 厚の EPS 材とし、表層材として 25 cm 厚の敷砂とした場合（S25-E50）と 50 cm 厚の EPS 材とした場合（E50-E50）の重錘衝撃



(a) 表層材の影響 (b) 裏層材の影響

図-6 衝撃力の時系列分布 ($H = 30\text{ m}$)

力と伝達衝撃力波形を、三層緩衝構造の基本形の場合（S50-E50）とともに示した。

まず、敷砂厚 25 cm の場合（S25-E50）は基本形に比較して、重錘衝撃力の衝撃初期の立ち上がりが急で継続時間も多少短くなっているが、重錘衝撃力の最大値はほぼ同程度である。また、伝達衝撃力は基本形と比較して約 10% 大きくなっているものの、全体としては基本形と同程度の緩衝性能を有していると考えられる。

一方、50 cm 厚の EPS 材を用いた場合（E50-E50）には、重錘衝撃力は衝撃の極初期になだらかな立ち上りを示し、その後急激に最大値に至っている。最大重錘衝撃力は約 265 tf で、基本構造の 77% 程度であるが、その後緩やかに減少し、継続時間も初期からみると約 90 msec と長くなっている。従って伝達衝撃力も初期になだらかに上昇し、衝撃の後半に最大値を示している。基本構造と比較すると重錘衝撃力が小さいにもかかわらず、伝達衝撃力が約 18% 大きくなっており、多少緩衝性能は劣るものの、十分な緩衝能力をもっていることが認められる。

(2) 裏層材の影響

裏層材の影響を検討するため、表層材を敷砂 50 cm 厚に固定し、裏層材を EPS 材厚 25 cm ~ 100 cm とした場合（S50-E25~E100）と 50 cm 厚の敷砂とした場

合 (S50-S50) の結果を図-6(b)に示した。

まず、EPS材厚を変化させた場合 (S50-E25~E100) の結果を考察すると、最大重錘衝撃力はEPS材の厚さが増すほどわずかではあるが小さくなっている。これはEPS材厚が厚くなることにより芯材の全体変形が大きくなり芯材の剛性が見かけ上低下するようになるためと考えられる。また、EPS材25cm厚の場合 (S50-E25) の波形に特色がみられる。すなわち、はっきりとした2つのピークを持つとともに衝撃継続時間も他の場合に比べてやや短くなっている。三層緩衝構造は、前述のように主に芯材によって分散された衝撃力を裏層材 (この場合はEPS材) の塑性変形エネルギーによって緩衝させるものである。EPS材厚25cmの場合 (S50-E25) にはEPS材の敷厚が薄いことより、EPS材に伝達された衝撃エネルギーをEPS材が完全に吸収することができず、比較的大きな衝撃力が基盤に伝達されるためと考えられる。伝達衝撃力波形もEPS材厚50cm以上では、最大値が厚さとともに多少減少するものの、波形にはほとんど変化はない。これに対しEPS材厚25cmでは、重錘衝撃力の第2ピーク発生時に最大となり、大きさも重錘衝撃力より大きく、他のケースの2倍以上になっている。このことから、重量3tf、落下高さH=30m程度の落下エネルギーに対しては、裏層EPS材厚は25cmでは十分でないものと考えられる。

一方、裏層材を50cm厚の敷砂とした場合 (S50-S50) には、重錘衝撃力は基本構造に比べて最大値で20%程度大きく、継続時間は約30msecと短い。伝達衝撃力に関しては、継続時間が約20msecとさらに集中しており、最大値も約676tfとなって基本構造の4.3倍と著しく大きい値になっている。このケースも敷砂単層の場合 (S90) と同様、重錘衝撃力より伝達衝撃力の方が大きく、約1.6倍となっている。これは、裏層材の敷砂が、RC版や表層材 (敷砂) の重量によって締められると同時に、RC版の摩擦などにより側方移動も拘束されるため、全体として敷砂単層の場合 (S90) と同様に一端自由他端固定の一次元弾性波動状態に似た現象になるためと考えられる。

(3) 芯材RC版の変形に及ぼす表裏層材の影響

三層緩衝構造の芯材RC版は、表層材で受けた衝撃力を裏層材に広く分散させる効果を期待しているため、落石等の衝撃による著しい変形やせん断破壊による貫通等の現象が生じないことが望ましいと考えられる。従って、三層緩衝構造の表裏層材の条件を決定する上では、芯材RC版の変形状況を検討することも重要である。図-7は前2項で取り上げた主要な実験ケースの実験後の芯材RC版のひび割れによる損傷状況を示したものである。

三層緩衝構造の基本形 (S50-E50) では、表面はほぼ重錘の大きさの範囲でコンクリートの剝離がみられる他周方向に広がったひび割れが発生している。裏面は一部

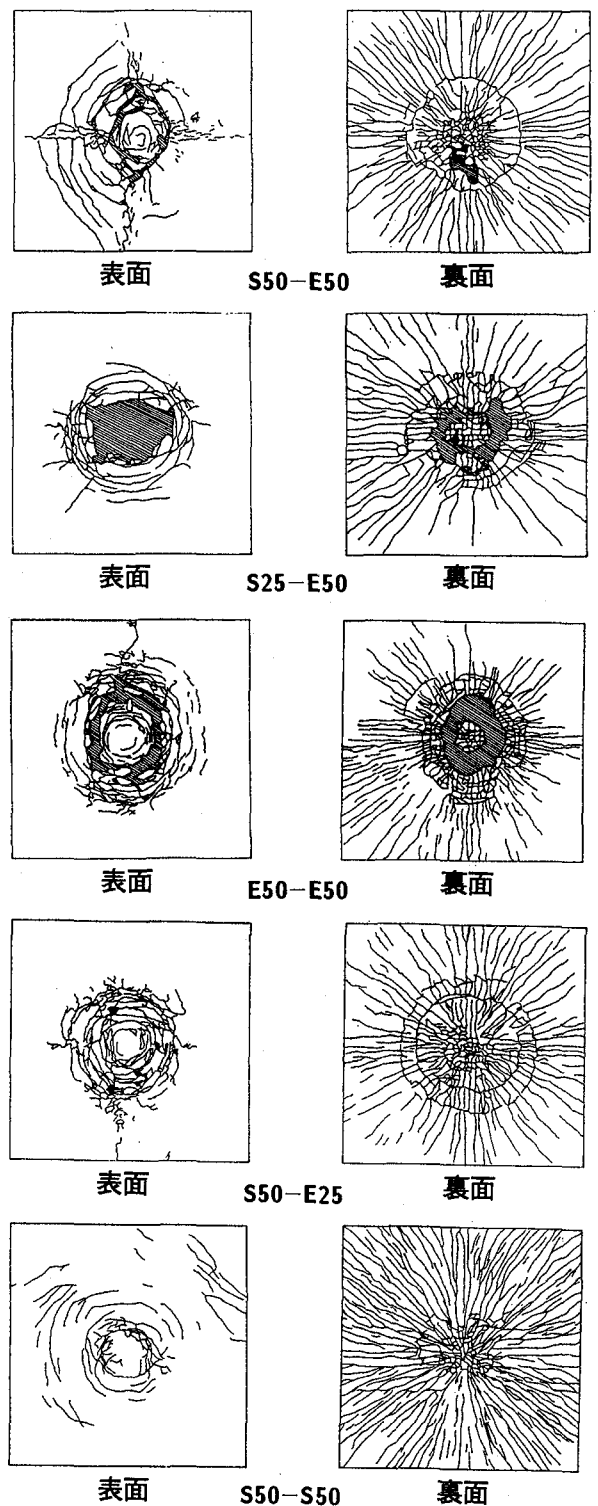


図-7 芯材RC版の変形性状 (H=30m)

にコンクリートの剝離がみられ、連続した周方向のひび割れおよび全面に放射状のひび割れが発生している。

これに対して、表層を25cm厚の敷砂とした場合 (S25-E50) や50cm厚のEPS材とした場合 (E50-E50) は、表面の損傷が激しく、しかもそれが重錘衝突部に集中していることがわかる。また、S25-E50とE50-E50とで

表-2 実験終了後の RC 版および EPS 材の載荷点直下の変形量

実験ケース	落下高さ (m)	RC 版変形量 (cm)	EPS 材変形量 (cm)
S50-E50	10	1.40	0.90 (1.8%)
	20	11.90	8.90 (17.8%)
	30	23.05	16.86 (33.7%)
S50-S50	10	1.30	-
	20	2.85	-
	30	5.45	-

は、S25-E50 の損傷が大きいようである。これは先に述べたように重錘衝撃力の大きさに対応しているものと考えられる。一方、裏面の状況も S25-E50 における損傷が大きい。いずれも基本形に比較するとかなり損傷が激しいものとなっている。

また、裏層 EPS 材厚を変化させた場合については、EPS 材厚が 50 cm 以上の場合にはあまり大きな変化がないことより、ここでは省略することとした。EPS 材厚が 25 cm の場合 (S50-E25) には、表裏面とも他のケースに比較して損傷の程度は少ないようである。これは、裏層 EPS 材厚が薄く、RC 版の変形が抑えられたためと考えられ、この場合の伝達衝撃力が他の場合に比べ大きいことと対応している。

表裏層材とも 50 cm 厚の敷砂とした場合 (S50-S50) は、裏面に多数のひび割れがみられるものの RC 版の損傷は、最も少ないことがわかる。これは、前述のように裏層敷砂材が締められかつ側方移動も拘束されることにより、変形係数が大きくなり弾性体に近い構造体になったため、RC 版の変形が抑制され損傷の程度も小さくなったものと考えられる。その結果、裏層材である敷砂が緩衝材としての十分な役割を果たせず、芯材からの衝撃力は敷砂単層の場合 (S90) と同様ほぼ弾性的に基部に伝達されているものと推察される。

3.3 最大重錘衝撃力と最大伝達衝撃力

三層緩衝構造の基本形 (S50-E50) および表裏層材を 50 cm 厚の敷砂材とした場合 (S50-S50)、90 cm 厚の敷砂単層の場合 (S90) の実験について、最大衝撃力と重錘落下高の関係を図-8 に示す。

最大重錘衝撃力に着目すると、三層緩衝構造の場合には共に落下高さの増加にほぼ比例して大きくなっており、振動便覧式のラーメ定数を $\lambda = 200 \text{ tf/m}^2$ として算出した衝撃力に近い値を示している。これは、両三層緩衝構造の表層材が共に敷砂で最大重錘衝撃力が重錘衝突初期の敷砂への貫入抵抗によって発生するためと考えられる。なお、基本形の場合 (S50-E50) の最大重錘衝撃力が裏層材を敷砂とした場合 (S50-S50) に比較し多少小さくなっているのは、裏層材の EPS 材の変形量が敷砂の場合より大きくなることによるものと考えられる。一方、これらを 90 cm 厚の敷砂単層の場合 (S90) と比較する

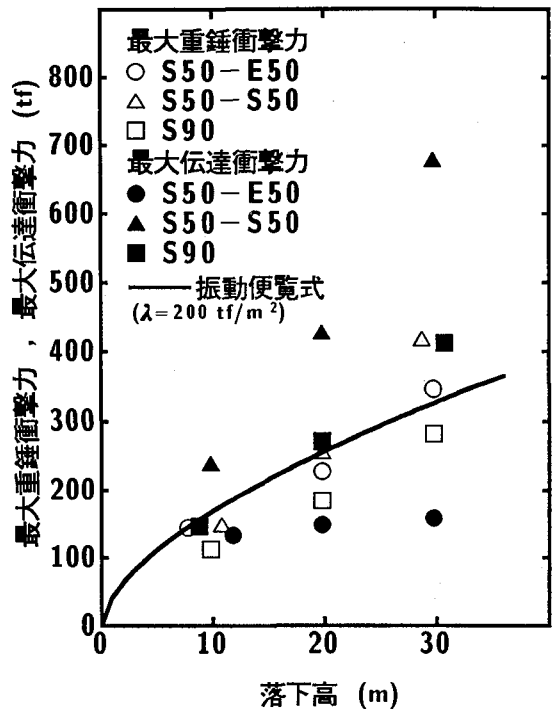


図-8 最大衝撃力と重錘落下高の関係

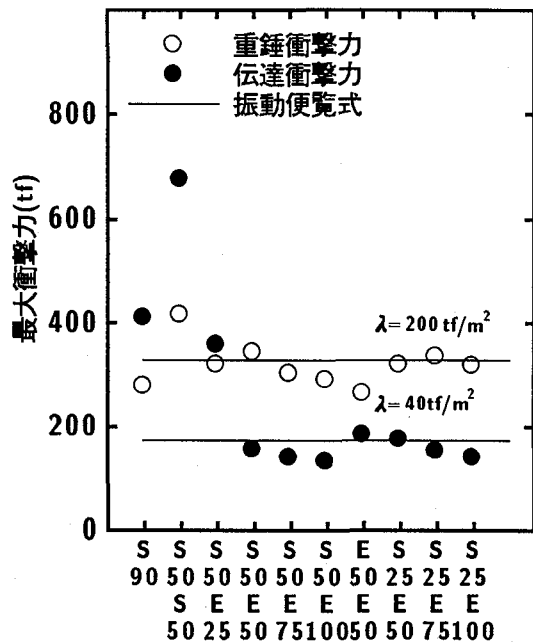


図-9 H = 30 m における最大衝撃力

と、三層緩衝構造はいずれも敷砂単層の場合より大きくなっている。これは表層敷砂厚の違いによるものと考えられる。

次に、最大伝達衝撃力に着目すると、裏層材が敷砂の場合 (S50-S50) には落下高さの増加と共にほぼ直線的に増加しており、その大きさは最大重錘衝撃力の約 1.6 倍、敷砂単層の場合 (S90) の伝達衝撃力の約 1.65 倍の大きさとなっている。これは前述のように、裏層敷砂

層における波動伝播機構が一端自由、他端固定支持の一次元弾性波動状態に近くなっているためと考えられる。

一方、基本形の場合 (S50-E50) の伝達衝撃力は、落下高 10 m で最大重錘衝撃力とほぼ同じ値であるが、それ以降の落下高さの増加による最大伝達衝撃力の変化は小さい。表-2 は、実験終了後の RC 版と RC 版撤去後の EPS 材表面の最大沈下量を示している。基本形の場合 (S50-E50) の RC 版の変形量は、裏層材を敷砂とした場合 (S50-S50) の変形量に比較して大きくなっている。また、EPS 材の残留歪量は 1.8~33.7% である。これらの歪領域は、前述の EPS 材の応力-歪曲線 (図-2) からわかるように応力があまり変化しない範囲にある。これより、基本形の場合 (S50-E50) の伝達衝撃力は裏層 EPS 材のこのような効率的なエネルギー吸収作用によって、重錘落下高さの変化に対して大きく変化しないものと考えられる。

図-9 に重錘落下高を $H = 30$ m とした場合の全実験ケースの最大重錘衝撃力と最大伝達衝撃力を比較して示している。最大重錘衝撃力に注目すると、表層を敷砂、裏層を EPS 材とした三層緩衝構造は、裏層 EPS 材の厚さの増加とともに多少減少する傾向にある。また表層の敷砂厚に関しても厚い場合が減少傾向にあるが、各ケースの差はそれほど大きくはない。基本形 (S50-E50) における値を基準として、裏層 EPS 材厚による変化をみると、表層が敷砂厚 50 cm の場合は裏層 EPS 材厚 25, 50, 75, 100 cm に対してそれぞれ、0.93, 1.0, 0.88, 0.85 となり、さらに表層の敷砂厚 25 cm の場合は、裏層 EPS 材厚 50, 75, 100 cm に対して 0.93, 0.98, 0.93 となっている。一方、表裏層材とも EPS 材とした場合 (E50-E50) は基本形の値に対して 0.80 程度と小さな値を示している。また表裏層材とも敷砂の場合 (S50-S50) には、上記結果と大きく異なることは既に考察したとおりである。

次に、最大伝達衝撃力に注目すると、表層を敷砂、裏層を EPS 材とした三層緩衝構造は、裏層の EPS 材厚を 25 cm とした場合 (S50-E25) を除くとそれほど大きな差はない。重錘衝撃力と同じように基本形 (S50-E50) を 1 として各ケースの比をとると、表層が敷砂厚 50 cm の場合には裏層の EPS 材厚 75, 100 cm に対して 0.90, 0.85, 表層が敷砂厚 25 cm の場合には EPS 材厚 50, 75, 100 cm に対して 1.12, 0.98, 0.90 となり、重錘衝撃力と同様の傾向となっていることがわかる。

以上のことから、重量 3 tf の落石が、30 m の高さから落下する場合を想定すれば、ここで取り上げた表層を敷砂、芯材に RC 床版、裏層に EPS 材を組み合わせた三層緩衝構造の緩衝性能には大きな相違はないが、芯材 RC 床版の損傷状況などを考慮すれば、基本形とした S50-E50 の組み合わせが最も合理的な緩衝構造と考えられる。

4. まとめ

落石覆工構造物の安全性向上に対して重要な役割を担う緩衝構造として、従来の敷砂構造とは異なる発想の基に開発した三層緩衝構造の緩衝性能を検討するため、屋外大型実験を行った。実験は、三層緩衝構造の基本形を表層材：敷砂 50 cm 厚、芯材：RC 版 20 cm 厚、裏層材：EPS 材 50 cm 厚とし、表裏層の材料および敷厚を種々変化させた場合について、落下高さを最大 30 m とした重錘落下衝撃実験を行い、既に行われた敷砂単層を緩衝材 (敷厚 90 cm) とした同様の実験結果と比較することにより検討を加えた。本実験で得られた結果を要約すると、

三層緩衝構造の基本形と敷砂単層材との比較では：

- 1) 重錘衝撃力は、重錘落下高が等しい場合は敷砂単層材のみの場合より三層緩衝構造の方が若干大きく示される。これは、RC 床版上の敷砂厚が 50 cm と敷砂単層の場合 (敷厚 90 cm) に比較して薄いためである。
- 2) 伝達衝撃力は、敷砂単層のみの場合には時間的にも空間的にも集中しているのに対して、三層緩衝構造の場合には広範囲に平均的に分散され、継続時間も長くなる。三層緩衝構造の重錘落下中心点での最大応力値は敷砂単層の場合の $1/10 \sim 1/50$ と非常に小さな値となる。
- 3) 本体構造に作用すると考えられる伝達衝撃力に関して、落下高さ 30 m の場合において三層緩衝構造の場合の最大値は敷砂単層の場合の約 4 割程度であり、継続時間に関しても敷砂単層の場合の 2 倍以上の長さであることがわかった。これより、三層緩衝構造は本体構造に作用する衝撃荷重強度を低減させ、かつ荷重の継続時間を長くする等、優れた緩衝能力を有することが確認された。

三層緩衝構造の表裏層材を変化させた実験結果より：

- 4) 裏層を 50 cm 厚の EPS 材とし、表層を敷砂厚 25 cm や EPS 厚 50 cm とした場合には、芯材 RC 床版の損傷は大きいものの基本形の三層緩衝構造と同程度の緩衝効果が得られる。
- 5) 表層を 50 cm 厚の敷砂とした場合、裏層が EPS 材厚 25 cm 程度では十分な緩衝効果が期待できない。
- 6) 表裏層材とも敷砂とする場合は、最大重錘衝撃力は他のケースと比較し大差はないが、最大伝達衝撃力は敷砂単層の場合の 1.6 倍以上であり、緩衝構造としては不適切である。

以上、三層緩衝構造は、従来からの敷砂単層緩衝工に比較して優れた緩衝特性を有していること、および重量 3 tf の落石が高さ 30 m より自由落下する場合の落石エネルギーに対してまでは、基本形としての S50-E50 の組み合わせが最も合理的であることが確認できた。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，日本道路協会，1983.
- 2) 岡田治憲，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，pp. 112～123，1979. 2.
- 3) 吉田 博，石塚 賢吉，細川 豊：落石によるロック・シェッド上の落石による衝撃力の推定法に関する研究，道路，No. 444，pp. 38～43，1978. 2.
- 4) 岸 徳光・中野 修・松岡健一・西 弘明：野外実験による敷砂の緩衝性能，構造工学論文集，Vol. 39A，pp. 1587～1597，1993.3.
- 5) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ 6，1993.12.
- 6) 岸 徳光，吉田絃一，松岡健一，能町純雄：層状弾性体にモデル化した覆工敷砂部の衝撃応答解析，構造工学論文集，Vol. 34A，pp. 817～826，1988. 3.
- 7) 岸 徳光，中野 修修・今野久志・松岡健一：三層緩衝構造の緩衝効果に関する室内実験，構造工学論文集，Vol. 38A，pp. 1577～1586，1992. 3.
- 8) 中野 修，岸 徳光，松岡健一，後藤雪夫：衝撃荷重測定用ロードセルの試作，土木学会論文集，No. 453/VI-17，pp.155～161，1992.9.
- 9) Osamu NAKANO, Norimitsu KISHI, Ken-Ichi MATSUOKA and Jin YOSHIMURA: Development of 3-Layered Shock-Absorbing System for Rock Sheds, Proceedings of the International Symposium on Impact Engineering, Vol. 2, pp. 725～729, 1992.9.
- 10) Norimitsu KISHI, Osamu NAKANO, Ken-Ichi MATSUOKA and Noriyuki SUGATA: Field Test on Shock-Absorbing Effect of Three-Layered Absorbing System, SMiRT-12, pp. 357～362, 1993.8.

(1994年9月14日受付)