

I-34

三層緩衝構造の緩衝特性

北海道開発局 正員 中野 修
 開発土木研究所 正員 佐藤 昌志
 室蘭工業大学 正員 岸 徳光

1. はじめに

著者らは、落石覆工構造物の安全性向上工法の一方法として、覆工屋根上に設置される緩衝構造に着目し、従来の敷砂緩衝工に代わる新しい緩衝システムの開発を行ってきた。その緩衝システムとは、表材、芯材、裏材としてそれぞれ敷砂、RC版およびEPS材を組み合わせた三層緩衝構造である。また、この三層緩衝構造の他にも、EPS積層構造や表裏材とともにEPS材とした場合あるいは敷砂材とした場合など緩衝構造に関する数多くの実規模実験を実施してきている^{1)~5)}。その結果、90 tfm 程度までの落下エネルギー（落石重量×落下高さ）に対しては、三層緩衝構造の基本形（敷砂 50 cm 厚＋RC版 20 cm 厚＋EPS材 50 cm 厚）は、荷重分散性およびエネルギー吸収性に優れ、本体構造への作用荷重（伝達衝撃力と呼ぶ）を低減できることが明らかとなっている。また、実施工を考えた場合も本三層緩衝構造はほぼメンテナンスフリーという条件も満たしていることを確認している。

しかしながら、実際の落石覆工では 90 tfm 以上の落下エネルギーを想定しなければならないことも多いと考えられる。本研究では、既設のRC覆工の設計例などを参考に、この点を考慮して、落下エネルギーで 200 tfm 程度、あるいは落石対策便覧⁶⁾の衝撃力評価式より算定した 400 tf 程度までの範囲における三層緩衝構造の緩衝特性、実用性について検討を行った。ここでは、重量 3 tf または 5 tf の重錘を最大 40 m の高さより落下させる落錘衝撃実験を実施し、裏材 EPS 材または芯材 RC 版の剛性を変化させることによって、伝達衝撃力の制御を行うこととした。

2. 実験の概要

2.1. 実験方法

実験の概要を図-1に示す。実験は、約 7 m 四方の鉄筋コンクリート剛基礎上に三層緩衝構造を設置し、その中央部に重量 3 tf あるいは 5 tf（直径 100 cm、高さ 97 cm で底部が球状）の重錘を所定の落下高さより自由落下させて行っている。重錘には容量 500 ～ 1000 G の加速度計を取り付け、重錘の加速度波形を測定できるようにしている。また、コンクリート基礎上には、緩衝材底部における伝達衝撃応力を測定するため、衝撃荷重測定用のロードセルを設置している。

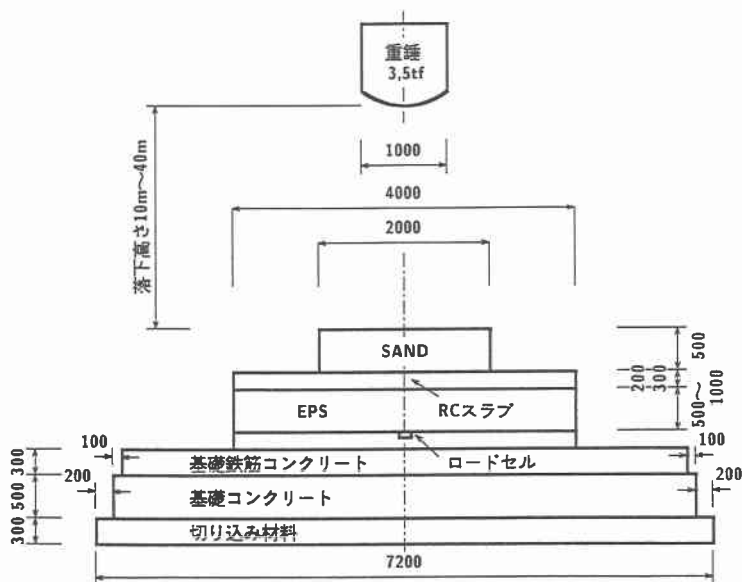


図-1 実験施設の概要

2.2.実験ケース

実験ケースの一覧を表－1に示す。三層緩衝構造では、裏材 EPS の変形および芯材 RC 版の変形（破壊）によって、エネルギー吸収を行っている。よって、そのエネルギー吸収能力を高めるためには、RC 版の剛性のある程度にとどめて、その破壊によるエネルギー吸収量を高め、EPS 材厚に余裕を持たせる方法、RC の剛性を増して、できるだけ広範囲に荷重を分散させ EPS 材の吸収率を高める方法の二通りが考えられる。本研究では、これまでの実験結果から勘案して、これらの組み合わせを決定している。すなわち、三層緩衝構造の基本形をもとに、重錘重量 3 tf に対しては裏材厚を 75 cm に、5 tf に対しては裏材厚を 100 cm に変化させた場合、あるいは裏材厚を 75 cm としさらに芯材 RC 版厚を 30 cm とした場合である。なお、実験においては、各ケース毎に芯材 RC 版、裏材 EPS 材を取り替えている。

2.3. 使用材料

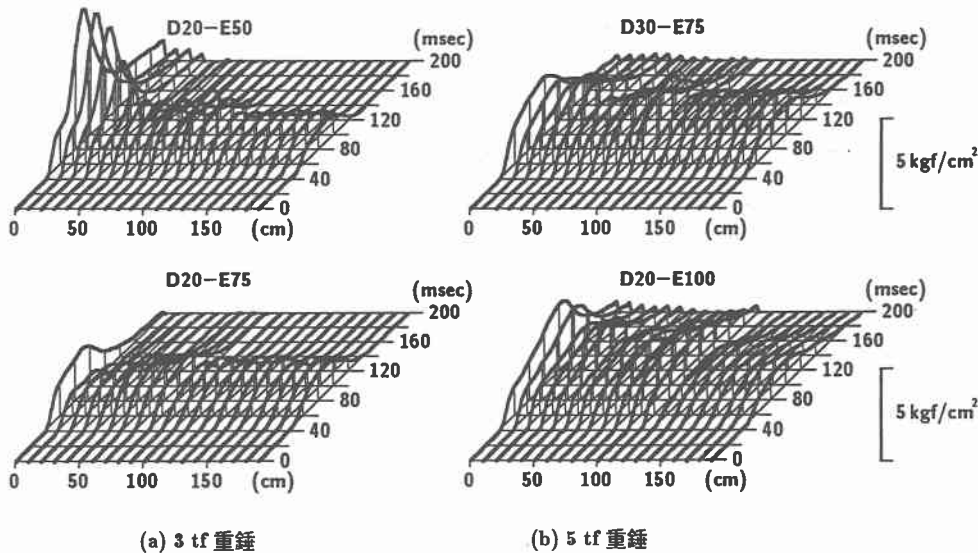
本実験で使用した表材の敷砂は、単位体積重量 1.638tf/m^3 、乾燥比重は 2.55、均等係数 $u_c=4.85$ の栗丘産砂である。敷砂は 20cm ごとに平均的に踏み固めて所定の厚さとした。また、裏材に用いた EPS 材は、型内発泡法で製造された密度 20 kg/m^3 、5 % 至時の圧縮強度 1.1 kgf/cm^2 、ポアソン比は 0.05 で、寸法 $200\text{ cm} \times 100\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ (25 cm) のブロックを組み合わせて設置している。

芯材に使用した RC 版は、寸法 $395\text{ cm} \times 395\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ (または 30 cm)、片側鉄筋比約 1 % の複鉄筋 RC 版である。コンクリートの設計基準強度は、 $f'_{ck} = 210\text{ kgf/cm}^2$ であるが、実験時における圧縮強度平均では約 250 kgf/cm^2 であった。

3. 実験結果および考察

3.1. 伝達衝撃応力の時系列分布

図－2 に、落下高さ $H = 40\text{ m}$ のケースの伝達応力の時系列分布を示す。(a) 図は重錘重量 3 tf、(b) 図は 5 tf の



図－2 伝達応力の時系列変化

場合である。図中、横軸は載荷点中央からの距離を、奥行き方向は時間軸を示している。

まず、基本形の場合、3 tf 重錘では重錘落下中心部で 7 kgf/cm^2 程度の応力が発生しており、載荷点近傍に応力集中がみられる。これは、重錘衝突によって芯材 RC 版の載荷点部が大きく損傷したため、裏材 EPS 材の圧縮歪量が過大となり、載荷点部の応力が大きくなったものと考えられる。しかし、重錘半径より周辺部に向かっては、 2 kgf/cm^2 前後の応力値であることから、版の変形は局所的なものと考えられる。これに対し、裏材厚を 75 cm とした場合に、応力は中心部でやや大きいものの、緩衝構造全体に 2 kgf/cm^2 程度となっている。この場合、落下エネルギーは前ケースと同様であることから、芯材 RC 版の変形性状には大きな相違はないが EPS 材の歪量が静的変形特性で示される塑性変形領域にあるため、伝達応力は小さいものと考えられる。

5 tf 重錘で EPS 材厚のみを 100 cm にした場合には、中心部半径 100 cm の範囲内の応力は約 2.5 kgf/cm^2 、その周辺部が 1.3 kgf/cm^2 となっており、中心部にやや応力集中の傾向がみられる。この場合は 3 tf 重錘の場合に比較して落下エネルギーが大きいため、RC 版の局所的変形もかなり大きくなるが、EPS 材が十分に厚いため平均歪が小さく、基礎部への伝達衝撃応力が大きくならなかったものと考えられる。また、RC 版を 30 cm、EPS 材を 75 cm とした場合は、中央部が 3 kgf/cm^2 、端部が 2.2 kgf/cm^2 で、その間にはほぼ直線的な分布となっている。これは芯材剛性が高いことにより、載荷点部も大きな損傷を受けず、EPS 材の広い範囲でエネルギー吸収がなされているためと考えられる。

3.2. 衝撃力の時系列分布

本研究では、衝撃力を衝突時の加速度に重錘重量を乗じて得られる重錘衝撃力および前節の伝達衝撃応力を総和して得られる伝達衝撃力の二つの方法で評価している。ここで、実際に落石による覆工（緩衝構造）への衝突が生じた場合、本体構造に作用する衝撃荷重は後者の伝達衝撃力であり、構造体の設計においてはこれが重要になってくるものと考えられる。図-3 に、前項と同様なケースにおける重錘衝撃力、伝達衝撃力の経時変化をそれぞれ実線、破線で示している。

まず、3 tf 重錘の場合、重錘衝撃力波形には初期に RC 版への衝突加速度と思われる急激な立ち上がりが生じており、その約 30 msec 後に第二のピークがある。これに対し、伝達衝撃力波形は約 10 msec 遅れて立ち上がり、重錘衝撃力にみられた第一のピークは生じていない。これは、重錘と RC 版との衝突時に発生したエネルギーが RC 版の破壊および裏材の EPS の変形によって吸収されていることを示していると考えられる。また、伝達衝撃力の最大

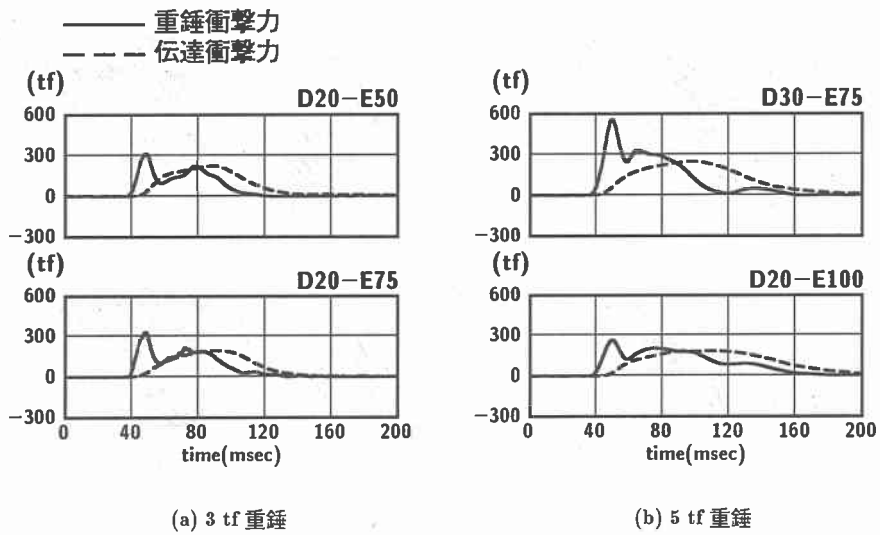


図-3 衝撃力の経時変化

値は重錘衝撃力の第二のピークからやや遅れて発生しているようであり、台形状の分布になっている。衝撃荷重の継続時間に関しては重錘および伝達衝撃力で大きな相違はなく、約 80 msec となっている。3 tf 重錘の場合は、それぞれの最大値に大きな差は生じていないようである。

一方、5 tf 重錘の場合では、重錘衝撃力波形は衝突とともに急激に立ち上がり第一ピークを示すが、第二ピークはケースにより異なっている。D30-E75 では僅かに nadir かな第二ピークを生じているが顕著ではない。これに対し、D20-E100 では第一ピークより小さい明確な第二ピークを示している。これらは重錘のリバウンドによるものと考えられ、EPS 材厚の厚い方が第一ピークに対する割合は大きな値を示している。伝達衝撃力波形は、やはり 3 tf の場合と同様に約 10 msec 程度遅れて遅れて立ち上がり、重錘衝撃力の第二ピークより 40 msec 程度遅れて最大値を示し、その後 nadir かに減少している。衝撃力の継続時間は両波形とも 140 msec 程度で、3 tf の場合に比較して長くなっていることがわかる。また、この場合の重錘衝撃力の最大値は両者にかかなりの相違がみられる。D30-E75 は芯材 RC 版の剛性が高いために大きな衝撃力を示しているが、D20-E100 は芯材 RC 版の損傷によると思われる剛性低下で衝撃力は小さな値となっている。これに対して、伝達衝撃力にはそれほど差は生じていない。

3.3. 最大衝撃力

図-4 に、最大衝撃力と重錘の衝突速度との関係を示している。

図 (a) より、3 tf 重錘の場合は、重錘衝撃力の最大値と衝突速度とはほぼ直線関係にあり、D20-E50 と D20-E75 では差はみられない。これは本実験の条件程度では重錘衝撃力に対する裏材厚の影響はほとんどないことを示しているものと考えられる。これに対し、伝達衝撃力は D20-E50 の場合は衝突速度に比例して増加する傾向がみられるが、裏材厚を増した D20-E75 の場合は衝突速度に対する変化の割合が小さい。この結果速度によって伝達衝撃力の逆転現象が生じている。この原因としては伝達衝撃応力の分布特性が関係していると考えられる。すなわち、図-2 に示すように EPS 材厚の薄い場合には応力分布が局部的で中心部の歪が塑性状態になりここで多くのエネルギーを吸収するため周辺部の応力は小さい。これに対して EPS 材厚が厚い場合は応力分布が均等になり全体としてエネルギーを吸収するため周辺部でも応力が大きくなる。このため落下エネルギーの小さな範囲で D20-E75 の伝達衝撃力が大きくなっていると考えられる。落下エネルギーの大きな場合は同じく図-2 に示すように D20-E50 では中心部の応力が過度に大きくなり吸収エネルギーの効率が悪く伝達衝撃力を大きくしている。D20-E75 では全体として塑性状態となり緩衝効果が発揮されているため D20-E50 より小さな伝達衝撃力となっていると考えられる。

図 (b) は、5 tf 重錘の場合を示したものである。図より、重錘衝撃力は D30-E75 ではほぼ直線的に増加している

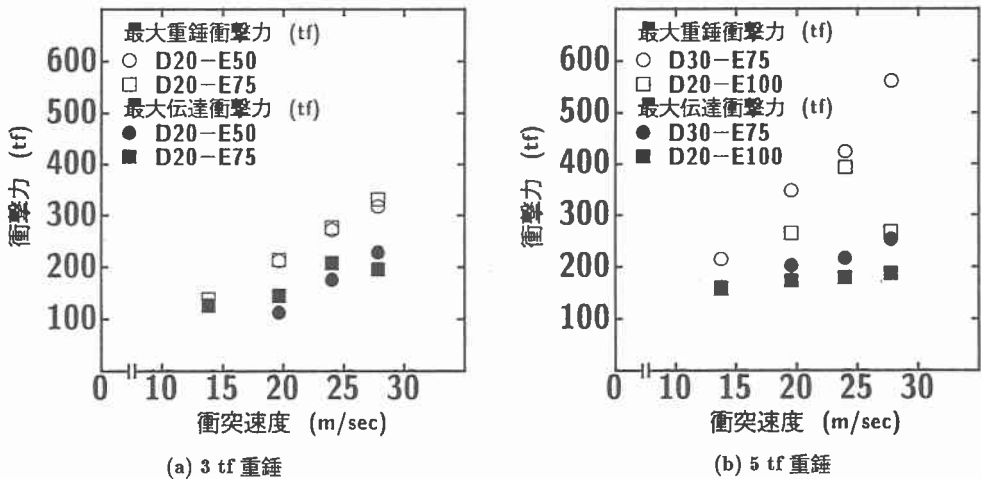
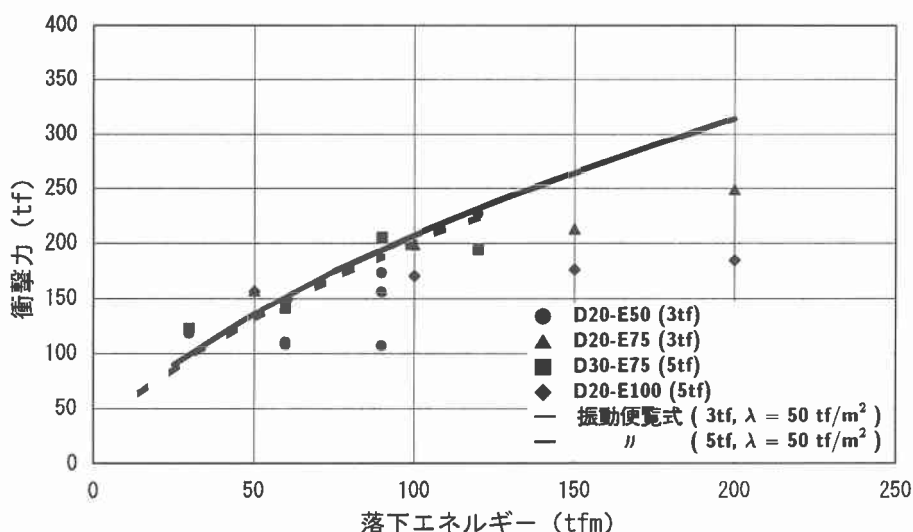


図-4 最大衝撃力と衝突速度の関係



図一5 最大衝撃力と落下エネルギーの関係

のに対し、D20-E100 では衝突速度 25 m/sec まではほぼ直線的であるが、28 m/sec で急激に小さくなっている。これは、先にも述べたとおり RC 版が落下エネルギーに抵抗できず載荷点で大きな破壊が生じたため、剛性が小さくなったことによると考えられる。一方、伝達衝撃力は D30-E75 では、重錘衝撃力よりかなり小さく勾配も緩やかであるが、ほぼ直線的に増加している。これに対して、D20-E100 では衝突速度の増加に対する伝達衝撃力の増加は僅かであり、ほぼ一定に近い値となっている。これは、落下エネルギーに対して EPS 材が緩衝効果を最も発揮できる塑性域にあるためと考えられる。これより、裏材 EPS 材が適当な厚さをもっている場合には、伝達応力に対して芯材 RC 版の変形の影響（応力集中など）が現れず、裏材 EPS 材は効率的にエネルギー吸収を行うものと考えられる。また、本実験条件では、単純に EPS 材厚を増加させた場合の方が、芯材の剛性を増加させたよりも緩衝効果の向上が期待できることがわかる。

図一5には、最大伝達衝撃力と落下エネルギーとの関係を、これまでの実験結果もあわせて整理している。ここでは、本実験程度の落下エネルギーに対して、三層緩衝構造を採用した場合の衝撃力の評価式として、従来からの敷砂材を用いた場合の振動便覧式を適用することが可能かどうかを検討することとする。図中の実線および破線はラメ定数を $\lambda = 50 \text{ tf/m}^2$ とした場合の振動便覧式より算定した衝撃力である。図より、振動便覧式は衝撃エネルギーが小さい場合には実験値とほぼ同程度の値を与えるが、衝撃エネルギーが大きい場合は過大評価となるような傾向を示している。従って、落下エネルギーが大きい場合の伝達衝撃力は、裏材 EPS 材の変形特性等を考慮した算定式によって適切に評価することが必要と思われる。また、この図から芯材 RC 版厚を 20 cm と固定した場合の裏材 EPS 材厚を検討することも可能である。すなわち、落下エネルギーが 90 tfm 程度以下の場合には EPS 材厚を 50 cm、落下エネルギーが 90 ~ 120 tfm 程度の場合には 75 cm、120 tfm 程度以上の場合には 100 cm とすることが合理的であることを示していると考えられる。

4. まとめ

落石覆工構造物の新しい緩衝材である三層緩衝構造のより広範囲な実用性について検討するため、重量 3 tf、および 5 tf の重錘を用いた落下衝撃実験を行った。実験は、振動便覧式より算定した衝撃力で 400 tf 程度、落下エネルギーで 200 tf 程度までの落石を想定したものである。本研究では、敷砂（50 cm 厚）、RC 版（20 cm 厚、設計基準強

度 $f'_{ck} = 210 \text{ kgf/cm}^2$)、EPS 材 (50 cm 厚) の組み合わせを三層緩衝構造の基本構造とし、裏材厚または芯材剛性を変化させることによって、エネルギー吸収効果の向上、伝達衝撃力の制御を行うこととした。本研究で得られた成果を以下に列挙する。

- 1) 落下エネルギーに対して十分な裏材 EPS 厚が確保されない場合には、載荷点部の過度の応力集中がみられる。このため、伝達衝撃力も大きな値となる。
- 2) 過度に大きな落下エネルギーでなければ (150 tfm 程度)、重錘衝撃力は裏材厚の影響をそれほど受けないようである。
- 3) 芯材 RC 版が大きな損傷を受けるような場合には、当然のことながら重錘衝撃力は減少する。
- 4) 落下エネルギーに対して、裏材 EPS 材の厚さが十分であれば伝達衝撃力を十分に小さく制御できる。
- 5) 落下エネルギーの小さな場合には、三層緩衝構造の伝達衝撃力の評価式としてラーメ定数を適切に設定した振動便覧式を適用できる可能性がある。しかし、落下エネルギーが大きい場合には、EPS 材の変形特性等を考慮した評価式が必要である。
- 6) 過大な落石エネルギーが作用した場合に対する安全余裕度を増すことを想定すると、芯材剛性を増すよりは裏材 EPS 厚を増すことがより効果的な方法となると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 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
- 2) 岸徳光、中野 修、今野久志、松岡健一、西 弘明：芯材を RC スラブとした場合の三層緩衝構造の緩衝特性、平成3年度土木学会北海道支部論文報告集、pp.155~160、1992.2.
- 3) 中野 修、岸 徳光、松岡健一、遠藤 紘：三層緩衝構造の緩衝性能に及ぼす裏面材の影響、第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、pp.230~235、1993.6.
- 4) 中野 修、今野久志、岸 徳光、三上 浩、遠藤 紘：各種緩衝構造を用いた落石覆工の実証実験、第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、pp.230~235、1993.6.
- 5) 佐藤 昌志、西 弘明、松岡健一、佐藤 京：5 tf の重錘を用いた三層緩衝構造の緩衝性能に関する実験的研究、平成5年度土木学会北海道支部論文報告集、pp.136~141、1994.2.
- 6) 日本道路協会：落石対策便覧、pp. 1~239、1983. 7.