

I-30 5 トン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

開発土木研究所 正員 佐藤 昌志
 開発土木研究所 正員 西 弘明
 室蘭工業大学 正員 松岡 健一
 開発土木研究所 正員 佐藤 京

1. はじめに

著者らは、落石覆工構造物の合理的な設計手法を確立するために、これまで種々の理論的、実験的研究を行ってきた。実験的研究に関しては、敷砂を緩衝材とする場合の緩衝特性について、より詳細な実構造物規模の実験を行っている。その結果、砂の均等係数が $U_c > 4$ の場合には、伝達衝撃力は重錘衝撃力の 1.5 倍以上の値になることや、衝撃力の分散範囲が落石対策便覧¹⁾の規定より小さくなることを明らかにしている。また、このような緩衝材の欠点を克服するために、表材、芯材、裏材としてそれぞれ敷砂、RC 版、EPS 材を用いた三層緩衝構造を独自に開発し、その緩衝特性の検討も行ってきた²⁾。これまでの研究成果より、敷砂厚 50 cm、芯材厚 20 cm、EPS 材厚 50 cm とする三層緩衝構造は重錘重量 3 tf、最大落下高さ 30 m の衝撃エネルギーに対して、十分その機能を果たすことが明らかになっている。特に、落下高さ 30 m の場合にはラーメ定数を $\lambda = 40 \text{tf/m}^2$ とする振動便覧式よりも小さな衝撃力となり、落石対策便覧で規定している $\lambda = 100 \text{tf/m}^2$ の場合の 1/1.5 以下とすることができる。しかしながら、より大きな落石に対する適用性についての検討の必要性も指摘されている。

本研究では、新しい緩衝構造である三層緩衝構造のより広範囲な実用性を検討するために重錘重量を 5 tf、最大落下高さ 30 m に対する性能実験を行ったのでその結果を報告する。本研究では、表材厚（敷砂）を 50 cm と一定にし、裏材厚を変化させた場合や芯材の剛性を変化させた場合について、比較のために 120 cm 厚の敷砂単層についての実験も行い種々検討を行った。

2. 実験の概要

2.1. 実験方法

実験施設の概要を図-1に示す。約 7 m 四方の鉄筋コンクリート剛基礎上の L 型擁壁に囲まれた約 4 m 四方の空間内に三層緩衝構造を設置し、その中央部に重量 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 100 ~ 500 G のひずみゲージ型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。

2.2. 実験ケース

実験は三層緩衝構造の基本構造として、敷砂（50 cm 厚）、芯材 RC 版（20 cm 厚、設計基準

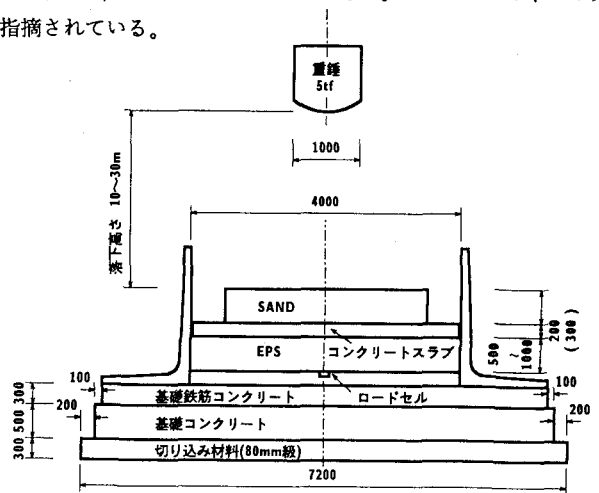


図-1 実験施設の概要

表-1 実験ケース一覧

実験ケースの呼称	芯材RC版厚(cm) 強度(kgf/cm ²)	裏材EPS材 の厚さ(cm)	落下高さ (m)
D20-210-E50	20,210	50	10,20,30
D20-210-E75	20,210	75	30
D20-210-E100	20,210	100	30
D20-500-E50	20,500	50	30
D30-210-E50	20,210	50	30
S120（敷砂単層）			10,20,30

表材：50 cm 厚の敷砂

Impact Test with 5 tf Weight on Absorbing Effect of 3-Layered Shock-Absorbing System
 by Masashi SATOH, Hiroaki NISHI, Ken-ichi MATSUOKA and Takashi SATOH

強度 $f'_{ck}=210\text{kgf/cm}^2$ ）、EPS 材（50 cm 厚）を組み合わせたと、比較のため敷砂単層 120 cm 厚を設置した場合について落下高さ 10、20、30 m に対して行った。また、落下高さを 30 m に、表材厚を 50 cm に固定し、裏材厚を 75 cm、100 cm に変化させた場合、および芯材剛性を変化させた場合として版厚を 30 cm、または設計基準強度 $f'_{ck}=500\text{kgf/cm}^2$ として同様な実験を行った。実験ケースの一覧を表-1 に示す。なお、D20-210-E50 の場合は各落下高さごとに、芯材 RC 版、裏材 EPS 材を取り替えて実験を行っている。

2.3. 使用材料

(1) 表材、裏材

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 % 歪時の圧縮強度 1.1 kgf/cm^2 、ポアソン比は 0.05 で、寸法 $200\text{ cm} \times 100\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ のブロックを組み合わせ設置している。

(2) 芯材 RC 版

三層緩衝構造の芯材に使用した 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、 $f'_{ck}=210\text{kgf/cm}^2$ および 500kgf/cm^2 である。なお、実験時の圧縮強度は、それぞれ $f'_c=214$ 、 514 kgf/cm^2 、弾性係数は $E_c=2.64 \times 10^5$ 、 $3.78 \times 10^5\text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比は $\nu_c=0.173$ 、 0.209 であった。

3. 実験結果および考察

3.1. 衝撃特性

三層緩衝構造の基本構造である D20-210-E50 の緩衝特性に関して、敷砂単層である S120 の場合と、落下高さを $H = 10\text{ m}$ 、 20 m 、 30 m と変化させて比較検討を行った。以下、各項目に分けて検討を行う。

(1) 伝達応力の時系列分布

図-2 に、各ケースの伝達応力の時系列分布を示す。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。なお、測定時間は全てのケースで 200 msec である。

まず、三層緩衝構造である D20-210-E50 の場合の伝達応力の分散性状について述べる。落下高 $H = 10\text{ m}$ の場合には、緩衝構造全体にほぼ均等に 2 kgf/cm^2 程度の応力が発生している。落下高 $H = 20\text{ m}$ の場合においても載荷点

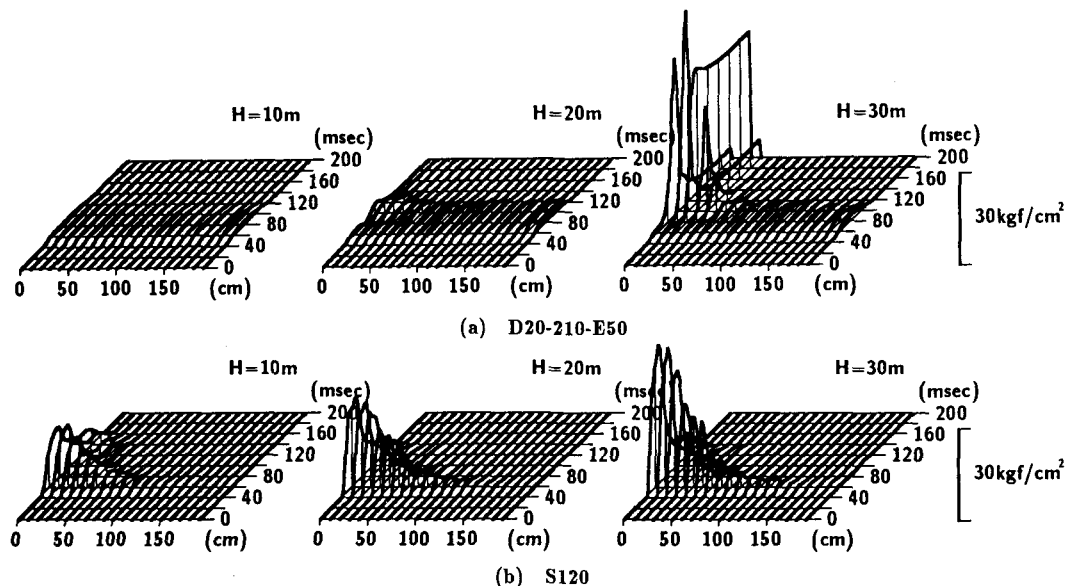


図-2 伝達応力の時系列変化

近傍で、 4.3 kgf/cm^2 程度の多少大きな応力が発生しているものの、いまだ良好な荷重分散性を保持している。これに対し、落下高 $H = 30 \text{ m}$ の場合には、中心点より 10 cm 離れた点において 60 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 材の圧縮変形量が過大となり、EPS 材の緩衝能力が低下したためと考えられる。

一方、敷砂単層である S120 の場合は、重錘落下部の伝達応力が落下高さとともに大きくなり、いずれの場合も指数関数的に減少している。これより、S120 の場合はいずれの場合も D20-210-E50 の $H = 10 \text{ m}$ 、 20 m に比較して、伝達応力の分散性が著しく悪いことがわかる。また、最大伝達応力は S120 の $H = 10 \text{ m}$ においても、 60 kgf/cm^2 と大きな値となっている。この値は D20-210-E50、 $H = 10 \text{ m}$ の 10 倍程度の値である。

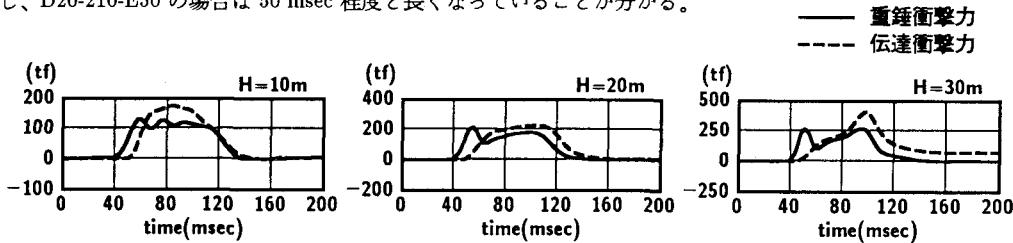
以上より、三層緩衝構造は芯材 RC 版が裏材 EPS 材の緩衝性能が著しく低下しない程度の損傷である場合には、敷砂単層に比較して大きな伝達応力の低減および分散効果が期待できるものと考えられる。

(2) 衝撃力の時系列分布

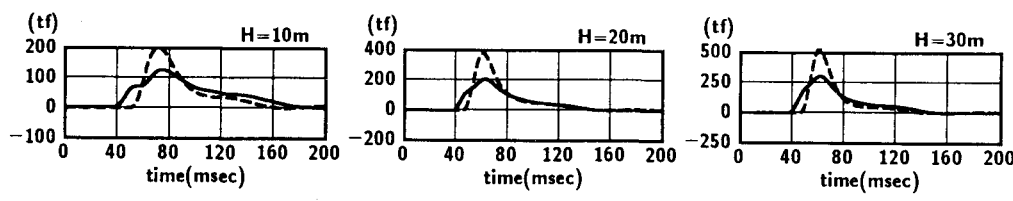
本研究では、衝撃力を衝突時の加速度に重錘重量を乗じて得られる重錘衝撃力および伝達衝撃力を総和して得られる伝達衝撃力の二つの方法で評価することとした。図-3 に、前項と同様なケースにおける重錘衝撃力、伝達衝撃力の経時変化をそれぞれ実線、破線で示している。

D20-210-E50 の場合において、重錘衝撃力の分布性状は落下高さごとに異なっているようである。 $H = 10 \text{ m}$ の場合はほぼ台形分布を示しており、 $H = 20 \text{ m}$ の場合は 3 tf 重錘を用いた実験結果と同様、初期に最大ピーク値が発生する分布となっている。 $H = 30 \text{ m}$ の場合は、2つのピーク値がほぼ同程度の大きさになっている。一方、伝達衝撃力分布に関しては、 $H = 10 \text{ m}$ の場合は重錘衝撃力分布と類似の分布となっている。 $H = 20, 30 \text{ m}$ の場合は重錘衝撃力波形の第 2 ピーク発生時に最大値となっている。この場合の重錘衝撃力波形の第 1 ピークは、重錘と芯材 RC 版の激しい衝突によって発生したものと考えられるが、その時に発生した衝撃エネルギーが効率よく裏材である EPS 材によって吸収されるため、その時点における伝達応力が小さくなっているものと考えられる。

S120 の場合はいずれの衝撃力分布も落下高さに依存せず同様の傾向を示している。その特性は、伝達衝撃力は重錘衝撃力より数〜数十 msec 遅れて急激に立ち上がり、両者ほぼ同時刻に最大値を示しその後減衰状態に至っている。最大値は重量 3 tf の重錘を用いた場合と同様、伝達衝撃力が重錘衝撃力の 1.5 ～ 1.9 倍程度の値となっている。S120 の場合の覆工の動的応答性状に影響するものと考えられる主波動の継続時間は、ほぼ 40 msec 程度であるのに対し、D20-210-E50 の場合は 50 msec 程度と長くなっていることが分かる。



(a) D20-210-E50



(b) S120

図-3 重錘衝撃力、伝達衝撃力の経時変化

(3) 最大衝撃力

図-4に、最大重錘衝撃力および最大伝達衝撃力と重錘の衝突速度との関係を示している。

図より、三層緩衝構造である D20-210-E50 の場合の重錘衝撃力は、重錘の衝突速度にほぼ比例していることが分かる。伝達衝撃力は落下高さ $H = 10\text{ m}$ 、 20 m の場合には重錘衝撃力と同程度であるが、 $H = 30\text{ m}$ の場合は増加率が急激に大きくなっている。これは、前述のように芯材 RC 版の損傷の程度が著しいために裏材の EPS 材のエネルギー吸収能力が低下したためと考えられる。

一方、敷砂単層である S120 の場合は、両衝撃力とも D20-210-E50 の伝達衝撃力と同様に、 $H = 30\text{ m}$ の値が $H = 10\text{ m}$ 、 20 m の場合に比べて増加率が大きくなっている。また、伝達衝撃力が重錘衝撃力の $1.6 \sim 1.9$ 倍程度になっているのは前述のとおりである。 $H = 10\text{ m}$ 、 20 m の場合における伝達衝撃力を振動便覧式と比較すると、D20-210-E50、S120の結果はそれぞれ $\lambda = 100\text{ tf/m}^2$ 、 200 tf/m^2 とする場合に対応しているようである。

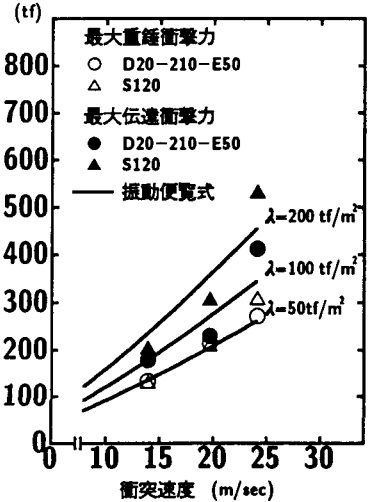


図-4 最大衝撃力と衝突速度

3.2. 裏材厚および芯材剛性の影響

ここでは、裏材 EPS 材厚や芯材 RC 版の剛性が三層緩衝構造の緩衝性能に与える影響について検討する。EPS 材厚の影響に関しては D20-210-E50、E75、E100 についての比較検討を、芯材 RC 版の剛性に関しては D20-210-E50、D20-500-E50、D30-210-E50 の 3 ケースを対象にして比較検討を行っている。いずれも重錘の落下高 $H = 30\text{ m}$ の場合である。

(1) 伝達応力の時系列分布

図-5にはそれぞれのケースに対する伝達応力の時系列分布を一覧にして示している。(a)図は裏材厚を変化させた場合であり、(b)図は芯材剛性を変化させた場合である。

(a)図より、基本構造である D20-210-E50 の場合は、前述のように芯材 RC 版の損傷程度が著しく EPS 材の衝撃吸収能力が低下したため、載荷点部に応力集中が発生している。一方、E75、E100 の場合には最大伝達応力が 4.8 kgf/cm^2 、 2.5 kgf/cm^2 となっており、分散性が改善されている。これより $H = 30\text{ m}$ の場合には、EPS 材の厚さが

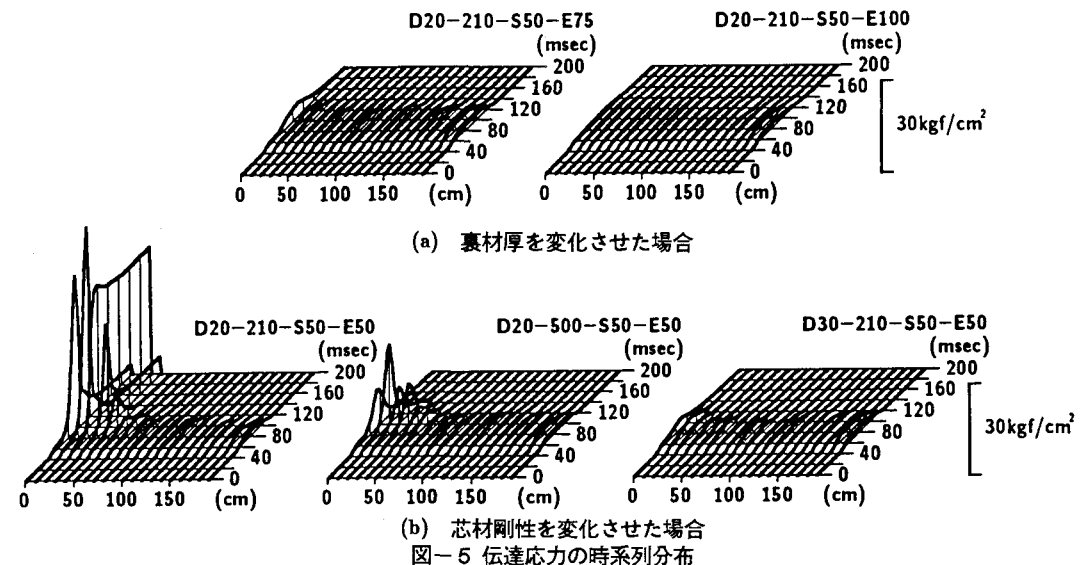


図-5 伝達応力の時系列分布

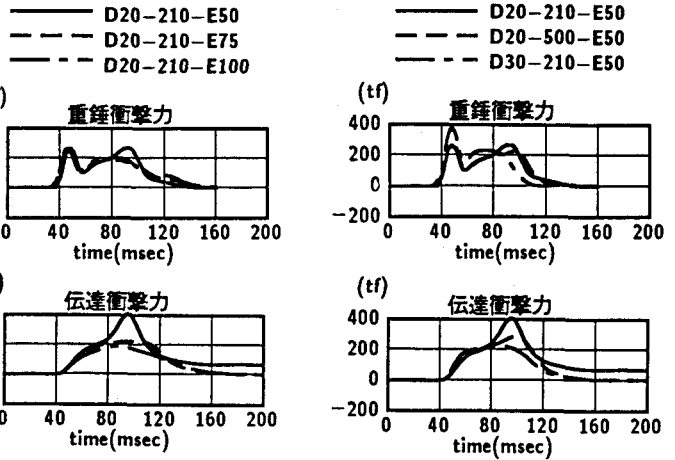
75 cm 程度必要であることが分かる。

(b)図の芯材剛性の影響について

検討すると、コンクリート強度を 210 kgf/cm^2 から 500 kgf/cm^2 とすることにより中心部で 40 kgf/cm^2 程度の応力が発生しているものの、載荷点部の応力集中も大幅に緩和されていることが分かる。また、D30-210-E50 の場合は最大伝達応力も 3.8 kgf/cm^2 となっており、D20-210-E50 の場合のような載荷点における応力集中も発生せず、優れた荷重分散性を発揮していることが分かる。

これより、本研究で考えた芯材剛性の実験ケースの範囲では、版厚

を30cmにする場合が応力分散性に関しては最も効果的であることが明らかになった。



(a) 裏材厚を変化させた場合 (b) 芯材剛性を変化させた場合

図-6 重錘衝撃力および伝達衝撃力の時系列分布

(2) 衝撃力の時系列分布

図-6には、(a) 裏材厚を変化させた場合、(b) 芯材剛性を変化させた場合の重錘衝撃力および伝達衝撃力の時系列分布を示す。

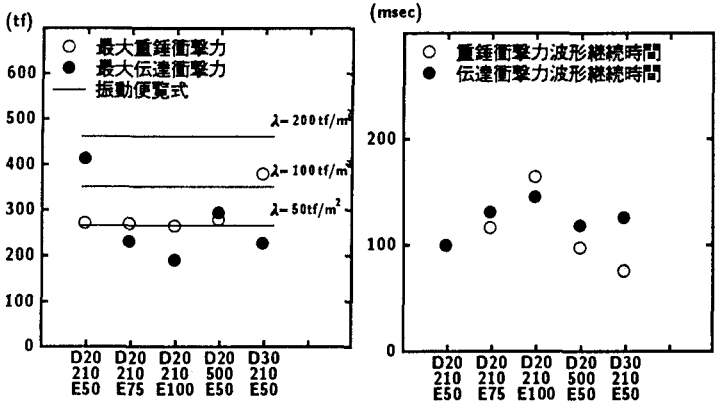
(a)図の重錘衝撃力波形に関しては D20-210-E50 の場合で第2ピークが第1ピークと同程度の大きさになっているが、裏材厚 E75、E100 の場合は図3(a)の落下高 $H = 20 \text{ m}$ の場合と同様、第2ピークがなだらかな分布状態となっている。また、伝達衝撃力波形に関しても E75、E100 の場合は図3(a)の $H = 20 \text{ m}$ と類似の分布性状を示していることが分かる。

(b)図の芯材の剛性を変化させた場合の重錘衝撃力波形に関しては、伝達応力の分散性が最も改善されている D30-210-E50 の場合が最も第1ピークが大きく、継続時間も短くなっている。他、D20-210-E50 と D20-500-E50は、両者類似の分布性状を示している。伝達衝撃力に関しては、いずれも重錘衝撃力の第2ピーク発生時に大きな値を示している。その大きさは、D20-210-、D20-500-、D30-210- の順に小さくなっている。この順序は伝達応力の分散性の程度と対応している。

(3) 最大衝撃力および衝撃力の継続時間

図-7(a)に最大衝撃力を、(b)図に衝撃力の継続時間を、裏材 EPS 材厚を変化させた場合と芯材 RC 版の剛性を変化させた場合について同一の図で整理している。

(a)図の裏材 EPS 材厚を変化させた場合の重錘衝撃力は、E50、E75、E100 とともに類似の値となっている。これより本実験範囲においては、重錘衝撃力は裏材 EPS 材厚にほとんど影響されないことが分かる。それに対し、伝達衝撃力は EPS 材厚が厚くなるほど小さな値となっており、EPS 材厚が伝達衝撃力



(a) 最大衝撃力

(b) 衝撃力の継続時間

図-7 衝撃力の最大値および継続時間

の低減に効果的に寄与していることが分かる。その分布性状は、E100 の場合は E50 に対して 1/2 以下の伝達衝撃力になっており、D20-210-E50 を基準として EPS 材厚にほぼ逆比例していることが分かる。一方、芯材の剛性を変化させた場合には、重錘衝撃力は伝達応力の分散性の優れている順に値が大きくなっており、伝達衝撃力は逆に分散性に対応して減少していることが分かる。(a)図において全ケースについて比較すると、D20-210-E75 と D30-210-E50 の場合は重錘衝撃力が互いに異なるものの、伝達衝撃力はほぼ同一の値となっており、覆工本体に対しては同程度の緩衝能力を示すことが分かる。また、振動便覧式と比較すると、D20-210-E75、D20-210-E100、D30-210-E50 の場合の伝達衝撃力は $\lambda=50\text{tf/m}^2$ とする場合より小さな値を示している。これらのケースは荷重分散性も優れていることより、実用にも十分供することが可能であるものと考えられる。

(b)図の衝撃力の継続時間については、芯材の剛性が最も大きいと考えられる D30-210-E50 の重錘衝撃力波形が 80 msec 程度と最も短い値となっている。他のケースについては全て 100 msec 以上となっている。裏材 EPS 材厚を変化させた場合の伝達衝撃力波形においては、厚さにほぼ比例して継続時間が長くなっていることがわかる。また、D20-210-E75、D30-210-E50 の伝達衝撃力波形の継続時間も最大伝達衝撃力と同様、類似の値となっており、両者とも同程度の緩衝性能を有していることが再確認できる。

4. まとめ

落石覆工構造物の新しい緩衝材として、これまでその有効性を実証してきた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 5 tf の重錘を用いた落下衝撃実験を行った。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) から構成される三層構造を基本構造とし、敷砂単層 120 cm 厚を設置した場合の緩衝効果との比較検討を行っている。また、裏材厚または芯材剛性を変化させた場合についての実験もあわせて行い、種々検討を行った。本実験の範囲内で得られた結果をまとめると以下のようになる。三層緩衝構造の基本構造に関する実験より、

- 1) 三層緩衝構造は、芯材 RC 版が裏材 EPS 材の緩衝性能が低下しない程度の損傷である場合は、敷砂単層に比較して伝達衝撃力の分散、衝撃吸収効果が十分期待できる。
- 2) 落下高 $H = 30 \text{ m}$ の場合は、芯材 RC 版が大きな損傷を受け、裏材 EPS 材に過大な圧縮変形が生じるため緩衝性能が低下した。
- 3) 最大重錘衝撃力は、重錘の衝突速度にほぼ比例している。

裏材厚または芯材剛性を変化させた場合の実験より、

- 1) 本実験で考えた芯材剛性のケースでは、伝達応力の分散性に関しては、版厚を 30 cm とした場合が最も効果的であった。
- 2) 裏材 EPS 厚は、重錘衝撃力にはほとんど影響を与えないが、伝達衝撃力に関しては、その低減に大きく寄与している。D20-210-E100 の場合は基本構造に比較して約 2 倍の緩衝能力を有している。
- 3) 芯材剛性の影響については、重錘衝撃力は伝達応力の分散性に優れるほど大きく、伝達衝撃力は逆に分散性に対応して減少している。D20-210-E75 と D30-210-E50 は同程度の緩衝能力を有していることが明らかになった。
- 4) 基本構造を除いた全ての実験ケースは、 $H = 30 \text{ m}$ に対し、 $\lambda = 50 \text{ tf/m}^2$ とする振動便覧式の値より小さい衝撃力を与えることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会、落石対策便覧、pp. 1~239、1983. 7.
- 2) 岸徳光、中野修、今野久志、松岡健一、西弘明：芯材 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、後藤雪夫、遠藤紘：落石覆道における三層構造緩衝システムの開発、土木学会誌、pp.20~22、1992.3.
- 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.