

## (49) 三層緩衝構造の伝達衝撃力算定法に関する一考察

A CONSIDERATION ON TRANSMITTED IMPACT FORCE  
OF THREE-LAYERED ABSORBING SYSTEM

佐藤 昌志\*, 岸 徳光\*\*, 松岡 健一\*\*\*, 西 弘明\*\*\*\*

Masashi SATO, Norimitsu KISHI, Ken-ichi. G. MATSUOKA and Hiroaki NISHI

\* 北海道開発局 開発土木研究所室長 構造研究室 (〒062 北海道札幌市豊平区平岸 1-3)

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

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

\*\*\*\* 工修 北海道開発局 開発土木研究所研究員 構造研究室 (〒062 北海道札幌市豊平区平岸 1-3)

キーワード: 落石覆工, 三層緩衝構造, 伝達衝撃力

(rock-shed, three-layered absorbing system, transmitted impact force)

## 1. はじめに

平成元年に起きた福井県越前海岸での大規模な落石災害を契機として, 落石覆工構造物の安全性に関する研究が盛んに行われるようになった。落石覆工の安全性確保のためには, 1) 落石等によって構造物本体に作用する衝撃力の適切な評価, 2) 落石覆工構造物の耐衝撃特性の解明, 3) 緩衝性能や荷重分散性に優れた緩衝構造の開発, などが必要であり, これらの問題に関し精力的な研究が続けられている<sup>1)~5)</sup>。いずれの問題も落石覆工の安全性に対して重要な課題であるが, 特に落石等によって発生する衝撃力の算定は設計の基本的条件の設定として重要であるものと考えられる。これまでの研究により, 従来からの敷砂緩衝材を緩衝構造として用いる場合には, 落石等の衝突によって発生する敷砂への衝撃力と本体構造へ伝達される衝撃力(伝達衝撃力)は大きく異なることが明らかとなっている<sup>4)</sup>。

一方, 著者らは敷砂緩衝材より優れた緩衝性能を有する緩衝構造として三層緩衝構造を開発し, 種々の実験的研究を行ってきた<sup>6)~10)</sup>。三層緩衝構造は表層に敷砂, 芯材としてコンクリート(RC)床版, 裏層に発泡スチロール(EPS)材を用いたものである。本構造は三種類の異なる波動伝播特性を有する材料の組み合わせにより, 優れた緩衝性能を得ようとするものであり, その効果は実規模の実験によって確認されている<sup>8)~10)</sup>。これまでの実験的研究によれば, 三層緩衝構造によって覆工本体構造へ伝えられる伝達衝撃力は重錘や緩衝構造表面が受ける衝突衝撃力より小さいことが明らかとなっている。しかしながら, 未だ三層緩衝構造を用いた場合の伝達衝撃力算定に関する理論的な取扱いがなされていない。三層緩衝構造は物理的, 力学的特性が大きく異なる3つの材料から構成される構造であることから, この緩衝性能を各材料の動特性を考慮して理論的に定式化することはかなりの困難を伴うものと考えられる。しかしながら, 三層緩衝構造を落石覆工の実設計に適用するためには, 衝撃力評価式の定式化を行う必要がある。本論文では, 実証実験結果に基づいた三層緩衝構造の各層の動特性を考慮し, エネルギー論的観点から三層緩衝構造の伝達衝撃力評価式の定式化を試みた。

## 2. 伝達衝撃力算定のための基本的な考え方

本論文で対象とする三層緩衝構造は, 表層に50 cm厚の敷砂, 芯材として20~30 cm厚のRC床版, 裏層に50~100 cm厚のEPS材を用いた標準的な構成を基本とし, 大きさは4×4(m)とする。著者らは, これまでこの種

の緩衝構造に関する詳細な重錘落下衝撃実験を行い、重錘衝突時の減速加速度から得られる重錘衝撃力（加速度に重錘質量を乗じて算定）及び裏層底面から覆工本体構造へ伝達すると考えられる伝達衝撃力（裏層底面に設置した衝撃応力測定用ロードセルによる応力分布の総和として算定）を測定し検討を行ってきた。本緩衝構造は落石等による衝撃力を主に表層材及び裏層材で吸収する構造であり、特に裏層 EPS 材による吸収量が大いものと判断される。表裏層材の緩衝特性を検討する場合において、表層材の敷砂は粒状体であり、これを理論的に取扱うことは困難である。一方、裏層材の EPS 材は材料の力学的特性が明らかであることより、裏層 EPS 材のエネルギー吸収特性を論ずることは比較的容易である。吉田等は重錘衝撃を受ける EPS 材単層の伝達衝撃力を理論的に推定している<sup>11)</sup>。

一方、芯材 RC 床版の機能は、表層の敷砂で受けた落石等の衝撃力を広く分散させて裏層 EPS 材へ伝播させるものである。従って、芯材 RC 床版は衝撃力による多少の塑性変形は許容するものの、落石等の衝突物が貫通することを防止する能力をもつことが必要である。

本論文では、これまで著者等によって実施された実証実験結果<sup>9),10)</sup>を基に芯材 RC 床版の機能維持のための床版厚の確保を前提として、裏層 EPS 材のエネルギー吸収特性を考慮した三層緩衝構造の伝達衝撃力算定法を検討する。伝達衝撃力算定のための基本的な考え方を整理すれば、

a) 芯材 RC 床版に作用する衝撃力の推定：

- 1) 三層緩衝構造に関する実験結果<sup>9)</sup>より落石等が表層敷砂材を介して RC 床版に衝突する状態は、RC 床版の剛性が比較的高く作用時間が短いことより、敷砂単層上に衝突する状態と類似なものであると考えられる。
- 2) また、表層敷砂厚が 50 cm と比較的薄く、かつ表層敷砂材は主に RC 床版に対する緩衝材として機能していると考えられることより、RC 床版に作用する衝撃力は重錘衝撃力に等しいと仮定するものとする。
- 3) その最大値はラーメの定数  $\lambda$  が  $\lambda = 200 \text{ tf/m}^2$  とする振動便覧式<sup>12)</sup>を用いて近似出来るものとする<sup>9)</sup>。

b) 裏層 EPS 材に作用する衝撃エネルギーの推定：

- 4) 大きな衝撃力が芯材 RC 床版に作用する場合、芯材 RC 床版の大変形や貫入あるいは貫通によってエネルギー吸収があるものと考えられるが、設計的に安全側で衝撃エネルギーを評価することとし、これを無視する。
- 5) 従って、衝突によって発生した重錘衝撃力は全て裏層材である EPS 材に伝達されるものと仮定する。
- 6) また、最大重錘衝撃力は 3) で与えられ、その波形は、作用時間が 30 msec の正弦半波であると仮定する。
- 7) ただし、その衝撃力は芯材 RC 床版によって均等に分散するものとし、裏層 EPS 材のエネルギー吸収も一次的に評価できるものと仮定する。

c) 伝達衝撃力の算定：

- 8) b) で推定した衝撃エネルギーは、全て裏層材である EPS 材の塑性変形によって吸収されるものとする。その時に発生する EPS 材の塑性応力が伝達衝撃応力に等しいとして評価するものとする。

d) 最小裏層 EPS 材厚の算定：

- 9) b) に示されるように、衝撃エネルギーは EPS 材に作用する合質点が剛体であるものと仮定して評価しているが、落石等が芯材 RC 床版を貫通し裏層 EPS 材中に貫入する場合に対しても、緩衝構造はその機能を果たす程度の安全余裕度が必要である。本文では、このような条件を満足するための最小裏層 EPS 材厚を規定することとする。
- 10) その最小裏層 EPS 材厚は、落石等による芯材 RC 床版裏面の押し抜きせん断領域にある裏層 EPS 材のみが b) で推定した衝撃エネルギーを吸収するものとして算定する。

### 3. 芯材 RC 床版厚の決定

2.で述べたように、三層緩衝構造において RC 床版が芯材としての機能を維持するためには、芯材 RC 床版が落石等の貫通を防止するための耐力を有することが必要である。すなわち芯材 RC 床版のせん断耐力は落石等による衝突衝撃力より大きくなければならない。

ここで、落石等による衝突衝撃力(重錘衝撃力)  $P_0$  は 2.3) の仮定より次のように示される。

$$P_a = 2.455 W_w^{2/3} \lambda^{2/5} H^{3/5} \quad (tf) \quad (1)$$

ただし、 $W_w$ ：落石等の重量 (tf)、 $H$ ：落石の落下高さ (m)、 $\lambda$ ：敷砂のラーメの定数 ( $tf/m^2$ )、ここでは前述の仮定より  $\lambda = 200 \text{ tf}/m^2$  とする。

次に芯材 RC 床版のせん断耐力の評価を試みる。三層緩衝構造に関する実験結果<sup>10)</sup>を参考に、本研究では RC 床版が重錘径と同一な形状にせん断破壊するものと仮定してそのせん断耐力を算定評価するものとした。

今、RC 床版の有効高さを  $d$ 、鉄筋比を  $p$ 、落石等の衝突による載荷面の直径を  $D$ 、コンクリートのせん断強度を  $\tau_{cu}$ 、鉄筋のせん断強度を  $\tau_{su}$  とする。このとき RC 床版のせん断破壊耐力は図-1を参考に、次のように評価算定できるものと仮定する。すなわち、コンクリートが抵抗するせん断力 ( $S_c$ )は、

$$S_c = \pi D d \tau_{cu} \quad (2)$$

と与えられる。また、この載荷面によってせん断力が作用する鉄筋量は、図-1の  $x$  方向の配筋に対して複鉄筋を考慮すれば  $2Ddp \times 2$  となる。 $y$  方向鉄筋に対しても同様であることより、鉄筋が抵抗するせん断力 ( $S_s$ )は

$$S_s = 4Ddp\tau_{su} \times 2 = 8Ddp\tau_{su} \quad (3)$$

となる。従って、せん断耐力の合計 ( $S$ )は、

$$S = S_c + S_s = \pi D d \tau_{cu} + 8Ddp\tau_{su} = Dd (\pi \tau_{cu} + 8p\tau_{su}) \quad (4)$$

必要な RC 床版厚 (設計基準床版厚とする)は、安全係数を  $\gamma$  として、式 (1)、(4) から

$$d = \frac{P_a}{D (\pi \tau_{cu} + 8p\tau_{su}) \gamma} \quad (5)$$

と決定される。なお、 $\tau_{su}$  は鉄筋の引張強度を  $\sigma_{su}$  として、Von Mises の降伏条件を準用し、純せん断状態を仮定すると、 $\tau_{su} = \sigma_{su}/\sqrt{3} = 2,367 \text{ kgf}/cm^2$  ( $\sigma_{su} = 4,100 \text{ kgf}/cm^2$ )、 $\tau_{cu}$  は、文献 13)を参考にコンクリートの圧縮強度  $\sigma_{cu}$  の  $1/10$  と仮定し、 $\tau_{cu} = \sigma_{cu}/10 = 21 \text{ kgf}/cm^2$  ( $\sigma_{cu} = 210 \text{ kgf}/cm^2$ )となる。また、 $p = 0.01$ 、 $D = 1.0 \text{ m}$ 、 $H = 30 \text{ m}$ 、 $\gamma = 1.1$  とし、RC 床版の有効高さ  $d$  及び設計基準床版厚  $h_c$  を算定した結果を表-1に示す。

#### 4. 伝達衝撃力算定式の定式化

2.に述べた基本的な考え方にに基づき、まず、落石等の衝突によって発生する衝撃力波形を決定し、次に落石衝突後に裏層 EPS 材に作用する衝撃エネルギーを算定する。最後に、この衝撃エネルギーが全て裏層 EPS 材の塑性変形によって吸収されるものと仮定し、その時の裏層 EPS 材の塑性応力 (伝達衝撃応力)を算定する。

##### 4.1 落石等の衝突によって発生する最大衝撃力及び衝撃力波形の決定

芯材 RC 床版上に発生する最大衝撃力は式 (1) で与えられ、その波形は次式のように示されるものと仮定する。

$$P = P_a \sin \frac{\pi}{T} t \quad (6)$$

ただし、 $P_a$ ：最大衝撃力、 $T$ ：衝撃力の作用時間、本研究では実験結果に基づいて、 $T = 30 \text{ msec}$  と仮定する。

##### 4.2 合質点に作用する衝撃エネルギーの推定

落石等の衝突によって、表層敷砂材・芯材 RC 床版に力積荷重が作用するものと仮定すると、これらの合質点を得る速度は、力積が運動量の変化に等しいことより、次のように示される。いま、合質点 (落石・表層敷砂材・芯材 RC 床版)の質量を  $m$ 、合質点の重量を  $W$ 、合質点を得る速度を  $v$  とすると、

$$mv = \int_0^T P dt \quad \therefore \quad v = \frac{1}{m} \int_0^T P dt \quad (7)$$

一方、衝撃力波形  $P$  は上の仮定に基づき図-2のように示されることより、

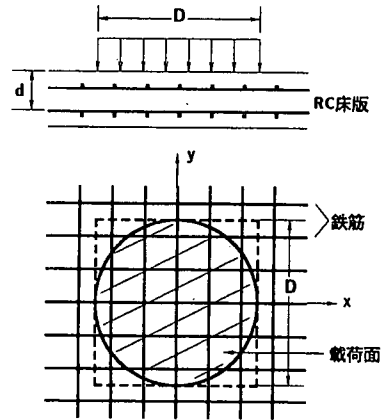


図-1 RC 床版の衝撃力載荷状況

表-1 設計基準床版厚の例

落石重量 $W_w$ (tf)	2	3	5
衝撃力 $P_a$ (tf)	250	327	460
有効高さ $d$ (cm)	11	14	20
設計基準床版厚 $h_c$ (cm)	約15	約20	約25

$$\int_0^T P dt = \int_0^T P_a \sin \frac{\pi}{T} t dt = \frac{2T}{\pi} P_a \quad (8)$$

以上より、合質点の速度  $v$  は、

$$v = \frac{2T}{m\pi} P_a = \frac{2Tg}{W\pi} P_a \quad (9)$$

となる。ただし、 $g$  は重力加速度で  $9.8 \text{ m/sec}^2$  である。従って、合質点の衝撃エネルギー  $E_w$  は、

$$E_w = \frac{mv^2}{2} = \frac{2gT^2}{\pi^2 W} P_a^2 \quad (10)$$

ここで、表層敷砂材、芯材 RC 床版の単位体積重量を実験結果に基づいて、 $1.6 \text{ tf/m}^3$ 、 $2.5 \text{ tf/m}^3$  とし、RC 床版厚を  $h_c$  (m)、表層敷砂材、芯材 RC 床版および重錘の重量をそれぞれ  $W_s$ 、 $W_c$ 、 $W_w$  とすると、合質点の重量  $W$  は、

$$W = W_s + W_c + W_w = (1.6 \times 0.5 + 2.5 h_c) \times 16 + W_w = (12.8 + 40 h_c + W_w) \quad (tf) \quad (11)$$

従って、合質点に作用する衝撃エネルギー  $E_w$  は、

$$E_w = \frac{2 \times 9.8 \times 0.03^2}{\pi^2 (12.8 + 40 h_c + W_w)} P_a^2 = \frac{P_a^2}{559.5 (12.8 + 40 h_c + W_w)} \quad (tfm) \quad (12)$$

#### 4.3 エネルギー吸収時の裏層 EPS 材の塑性応力 (伝達衝撃応力) の算定

式 (10) によって与えられる衝撃エネルギーが  $4 \times 4$  (m) の裏層 EPS 材によって全て吸収されるものとして、そのエネルギー吸収時の裏層 EPS 材の塑性応力を算定する。

本研究では、EPS 材の応力-歪曲線を載荷速度  $10 \text{ mm/min}$  における静的載荷試験結果を用いて次のような多折線に近似することとする (図-3 参照)。すなわち、添え数字を EPS 材の歪値 (%) として、 $\sigma_5 = 11 \text{ tf/m}^2$  (弾性範囲内)、 $\sigma_{55} = 22 \text{ tf/m}^2$ 、 $\sigma_{70} = 38 \text{ tf/m}^2$  とし、対応する歪をそれぞれ  $\epsilon_5$ 、 $\epsilon_{55}$ 、 $\epsilon_{70}$  とする。なお、十分な緩衝効果と安全余裕度が必要であることを考慮して、EPS 材の歪は 55 % 以内にあることを前提とする。後の解析のために、衝撃荷重が分散される領域の裏層 EPS 材の全面積を  $A (= 4 \times 4 \text{ m}^2)$  として、各歪値に対する衝撃力を示すと、

$$P_5 = \sigma_5 A = 176 \quad (tf) \quad (13)$$

$$P_t = \frac{\sigma_5}{\epsilon_5} \epsilon A = P_5 \frac{100\epsilon}{5} \quad 0 < \epsilon < 0.05 \quad (14)$$

$$P_t = P_5 + \frac{P_{55} - P_5}{\epsilon_{55} - \epsilon_5} (\epsilon - \epsilon_5) = P_5 + (P_{55} - P_5) \left( \frac{100\epsilon}{50} - \frac{5}{50} \right) \quad 0.05 < \epsilon < 0.55 \quad (15)$$

$$P_{55} = \sigma_{55} A = 352 \quad (tf) \quad (16)$$

また、式 (15) を  $\epsilon$  に関して解くと、

$$\epsilon = \frac{50}{100} \frac{(P_t - P_5)}{(P_{55} - P_5)} + \frac{5}{100} \quad (17)$$

いま、歪エネルギーの総和を求めると、裏層 EPS 材厚を  $h_e$  (m) として、

$$E_w = \begin{cases} \frac{\sigma_5 \epsilon}{2} A h_e & 0 < \epsilon < 0.05 \\ \left[ \frac{\sigma_5 \epsilon_5}{2} + \frac{(\sigma_5 + \sigma) (\epsilon - \epsilon_5)}{2} \right] A h_e & 0.05 < \epsilon < 0.55 \end{cases} \quad (18)$$

式 (18) に式 (13) ~ (17) を考慮して整理すると、伝達衝撃力  $P_t$  (tf) は

$$P_t^2 = \begin{cases} 40 P_5 \frac{E_w}{h_e} & 0 < \epsilon < 0.05 \\ P_5^2 + \frac{100}{25} (P_{55} - P_5) \left( \frac{E_w}{h_e} - \frac{0.05}{2} P_5 \right) & 0.05 < \epsilon < 0.55 \end{cases} \quad (19)$$

となる。 $P_5 = 11 \times 16 = 176$  (tf)、 $P_{55} = 22 \times 16 = 352$  (tf) を代入すると、最終的に伝達衝撃力  $P_t$  (tf) は次式のようにして決定される。

$$P_t = \begin{cases} \sqrt{7040 \frac{E_w}{h_e}} \quad (tf) & 0 < \epsilon < 0.05 \\ 176 \sqrt{0.9 + \frac{E_w}{44 h_e}} \quad (tf) & 0.05 < \epsilon < 0.55 \end{cases} \quad (20)$$

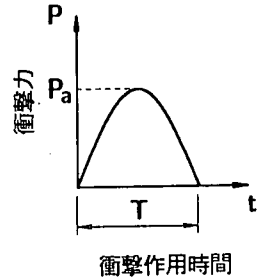


図-2 衝撃力波形

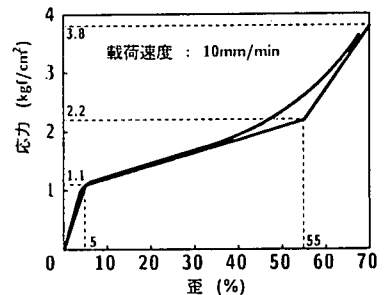


図-3 EPS 材の応力-歪関係

5. 最小裏層 EPS 材厚の決定

表一 最小裏層 EPS 材厚の算定例

2.d) に述べた基本的な考え方に基づき、裏層 EPS 材の最小厚さを決定する。今、芯材 RC 床版が押し抜きせん断破壊を起こした時の裏層 EPS 材の最大歪量を仮定より  $\epsilon < 0.55$  とし、このときの裏層 EPS 材の受圧面積を  $A'$  ( $m^2$ ) とする。衝撃エネルギーがこの部分の EPS 材によって吸収されるものと仮定すれば、必要裏層 EPS 材厚  $h_e$  は、式 (18) の第 2 式より、

$$h_e \geq \frac{40 E_w}{341 A'} \quad (m) \quad (21)$$

ただし、受圧面積  $A'$  は基本的に落石等による芯材 RC 床版裏面の押し抜きせん断破壊領域とし、ここでは矩形領域に簡略化し、 $A'$  を (落石等の直径 + 芯材 RC 床版厚の 2 倍)<sup>2</sup> とした。ここで、実験結果<sup>9),10)</sup> に基づき重錘径を 1 m として表一 に対する最小裏層 EPS 材厚を算定すると、表一 のように示される。

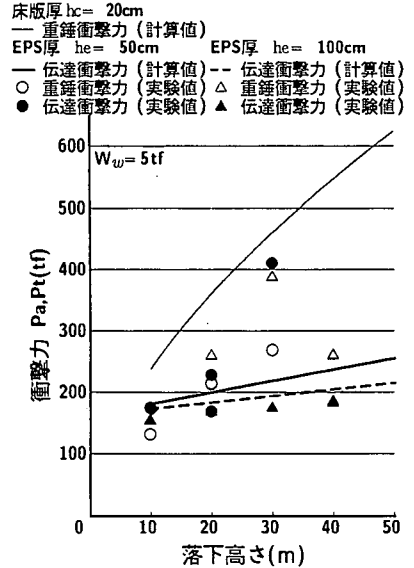
6. 算定値と実験値の比較

ここでは三層緩衝構造に関する重錘重量  $W_w = 5 \text{ tf}$  とした場合の実験ケースと算定式との比較を行うこととする。

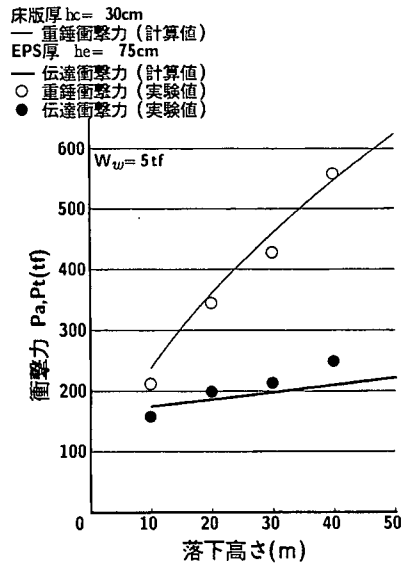
図一 4 には表層敷砂厚  $h_s = 50 \text{ cm}$ 、芯材 RC 床版厚  $h_c = 20 \text{ cm}$ 、裏層 EPS 材厚  $h_e = 50 \text{ cm}$ 、 $100 \text{ cm}$  とした場合の結果を示している。実験値と計算値を比較すると、重錘衝撃力に関する計算値は実験値に比較して著しく過大に評価されている。これは実験に用いられている芯材 RC 床版厚が  $h_c = 20 \text{ cm}$  で設計基準厚より薄いことより、重錘落下によって芯材 RC 床版が著しい損傷を受け剛性が低下したためと考えられる。裏層 EPS 材厚が  $h_e = 50 \text{ cm}$  の場合の伝達衝撃力に関する実験値は、計算値より大きな値となっている。特に、落下高さが  $H = 30 \text{ m}$  の場合には実験値の重錘衝撃力よりも大きく示されている。これは、芯材 RC 床版厚が設計基準厚よりも薄く裏層 EPS 材も規定量より小さいため、重錘落下位置の芯材 RC 床版が貫通等局部的に著しい損傷を受け、さらにこの部分の裏層 EPS 材が大変形して  $\epsilon_{55}$  を越えたためと考えられる。一方、裏層 EPS 材厚が  $h_e = 100 \text{ cm}$  の場合には、落下高さ  $H = 10 \text{ m}$  において、伝達衝撃力の実験値は計算値よりやや大きいものの、 $H > 20 \text{ m}$  では両者がよく一致していることがわかる。これは重錘が芯材 RC 床版を貫通し、裏層 EPS 材に貫入するもの規定量以上の EPS 材厚があることより、当初の緩衝能力が発揮されていることを意味している。以上より、RC 床版厚が設計基準厚以下の場合には、RC 床版の損傷が激しく裏層 EPS 材厚  $h_e = 50 \text{ cm}$  では三層緩衝構造の設計が不可能であるものと考えられるが、この場合でも規定量以上の裏層 EPS 材厚を確保することにより (例えば、 $h_e = 100 \text{ cm}$ )、伝達衝撃力を抑制することができることも明らかになった。

図一 5 に表層敷砂厚  $h_s = 50 \text{ cm}$ 、芯材 RC 床版厚  $h_c = 30 \text{ cm}$ 、裏層 EPS 材厚  $h_e = 75 \text{ cm}$  とした場合の結果を示している。実験値の重錘衝撃力は、芯材 RC 床版の厚さが  $h_c = 30 \text{ cm}$  と設計基準厚より厚いことより、計算値とよく一致している。実験値の伝達衝撃力も落下高さの増加とともに大きくなっているが、その増加の割合は重錘衝撃

落石重量	$W_w$ (tf)	2	3	5	
衝撃力	$P_a$ (tf)	250	327	460	
芯材 RC 床版厚	$h_c$ (cm)	20	20	20	30
最小 EPS 材厚	$h_e$ (cm)	29	48	88	58



図一 4  $h_c = 20 \text{ cm}$  の場合の衝撃力



図一 5  $h_c = 30 \text{ cm}$  の場合の衝撃力

力に比較して緩やかである。伝達衝撃力の計算値を実験値と比較すると、実験値が多少計算値を上回っているものの、裏層 EPS 材厚も十分であることより、計算値は実験値を比較的良好に評価しているものと考えられる。これより、芯材 RC 床版厚  $h_c$  が設計基準厚より大きく、かつ裏層 EPS 材厚が最小厚以上である場合には、本算定式は妥当な伝達衝撃力を与えるものと考えられる。

## 7. まとめ

各ケース毎の実験データは十分ではないが、ここでの検討の結果をまとめると以下のようである。

- 1) 芯材 RC 床版の機能を維持するために必要な設計基準床版厚は 3. に示したせん断耐力評価式により決定できることが示された。
- 2) 芯材 RC 床版厚が設計基準床版厚以上の場合、伝達衝撃力は、衝撃エネルギーの大きさにより多少の変動はあるものの、本算定式により実用的に評価可能であるものと判断される。
- 3) 芯材 RC 床版厚が設計基準床版厚より小さい場合でも、裏層 EPS 材厚が規定厚よりも大きい場合には伝達衝撃力を本算定式による値程度に減少させることが可能である。
- 4) 従って、芯材 RC 床版厚を設計基準床版厚以上とし、かつ裏層 EPS 材厚を規定厚以上にすることによって十分な緩衝効果と安全余裕度を保持した三層緩衝構造の設計が可能になるものと考えられる。

なお、算定の精度をより向上させるためには、落石等の衝突に伴うエネルギーの逸散や、RC 床版の変形に伴う EPS 材の局部変形の影響等を考慮する必要があるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 吉田 博, 榎谷 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, 土木学会論文報告集, 第 362 号/I-4, pp. 461 ~ 470, 1985.10
- 2) 中野 修, 岸 徳光, 松岡健一, 菅田紀之: 剛性マトリックス法を用いた落石覆工の衝撃応答解析, 構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 1597 ~ 1608, 1992.3
- 3) 園田恵一郎, 鬼頭宏明, 松浦幹佳: RC門形落石覆工の衝撃破壊解析, 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. 224 ~ 229, 1993.6
- 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) 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
- 6) 岸 徳光, 中野 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
- 7) 中野 修, 岸 徳光, 後藤雪夫, 遠藤 紘: 落石覆道における三層緩衝システムの開発, 土木学会誌, pp. 20 ~ 22, 1992.3
- 8) 三上 浩, 岸 徳光, 佐藤昌志, 中野 修, 松岡健一: AFRP 補強 RC 版を芯材とする三層緩衝構造体が緩衝性能に及ぼす表, 裏面材の影響, 構造工学論文集, Vol. 40A, pp. 1639 ~ 1646, 1994.3
- 9) 岸 徳光, 佐藤昌志, 中野 修: 三層緩衝構造の緩衝性能に関する大型野外実験, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp. 1257 ~ 1265, 1995.3
- 10) 中野 修, 佐藤昌志, 岸 徳光: 三層緩衝構造の緩衝性能, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 51 号 (A), pp. 162 ~ 167, 1995.2
- 11) 吉田 博, 松葉美晴, 法貴貫志郎, 久保田努: 発泡スチロールの落石に対する緩衝効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 427 号/V-14, pp. 143 ~ 152, 1991.3
- 12) 日本道路協会: 落石対策便覧, pp.18 ~ 27, p177, 1983.
- 13) 近藤泰夫, 坂 静雄監修: コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp. 313 ~ 315, 1967