

## 落石防護擁壁用途二層緩衝構造の伝達衝撃力算定式の定式化

An evaluation method of impact force transmitted through two-layered absorbing system for rockfall retaining wall

岸 徳光\*, 川瀬良司\*\*, 今野久志\*\*\*, 岡田慎哉\*\*\*\*

Norimitsu KISHI, Ryoji KAWASE, Hisashi KONNO and Shin-ya OKADA

\*工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\* (株) 構研エンジニアリング部長 防災施設部 (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目)

\*\*\* 博 (工) 北海道開発土木研究所主任研究員 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

\*\*\*\* 修 (工) 北海道開発土木研究所研究員 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

A two-layered absorbing system, which is composed of RC slab layer (outer layer) and EPS (Expanded Poly-Styrol) layer (inner layer), was proposed by the authors. It has been made clear experimentally that impact resistant performance of the traditional rockfall retaining wall can be improved by providing the two-layered absorbing system on the back of the wall. In this paper, in order to apply this system in practical design, an evaluation method of the impact force transmitted through the two-layered absorbing system was proposed and its applicability was experimentally discussed. Comparing the results obtained using the proposed method with experimental ones, the proposed method can be applied for practical design in the safety side.

**Key Words :** impact, rockfall retaining wall, two-layered absorbing system, transmitted impact force

キーワード： 衝撃，落石防護擁壁，二層緩衝構造，伝達衝撃力

### 1. はじめに

我が国の山岳道路沿いには、小規模の落石等に対する道路防災対策の一つとして落石防護擁壁（以後、擁壁）が設置されている。現在、擁壁は落石対策便覧<sup>1)</sup>に基づき、擁壁本体を剛体と仮定して落石の持つ運動エネルギーと支持地盤の弾塑性挙動時の最大ポテンシャルエネルギーが等価であるとの考えのもとに設計が行われている。したがって、通常無筋コンクリート製（以後、C製）の重力式擁壁が用いられている。しかしながら、現実には小規模落石によるひび割れやコンクリート片の剥離、剥落が度々発生している。

著者らは、擁壁の耐衝撃性向上の一環としてC製擁壁の重錘衝突実験<sup>2)</sup>を行っている。その結果、損傷形態は実現象に対応しており、比較的衝突エネルギーの小さい段階から、1) 曲げひび割れや壁厚方向のせん断ひび割れが発生すること、2) 上端近傍への衝突の場合にはブロック化したコンクリートが剥離する場合もあること、等を検証している。また、これらC製擁壁の耐衝撃性を向上させるために、鉄筋コンクリート製（以後、RC製）とする場合についても実規模実験<sup>3)</sup>を行い、その耐荷性状を把握している。その結果、上述のC製擁壁と同様の曲げやせん断ひび割れが発生するものの、異形鉄筋の補強効果によって大幅に耐衝撃性

を向上可能であることを明らかにしている。

さらに、擁壁に伝達される衝撃力を緩和しかつ分散させる目的で、擁壁の落石衝突面に二層緩衝構造を設置する手法を提案し、その緩衝性能および応力分散性能に関する検討も行っている<sup>4)</sup>。提案の二層緩衝構造は、表層材がRC版、裏層材が発泡スチロール（以後、EPS）材から構成されている。図-1に二層緩衝構造の概略図を示している。本構造は二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、優れた緩衝性能および荷重分散効果を得ようとするものである。また、それらの効果は二層緩衝構造を設置した実

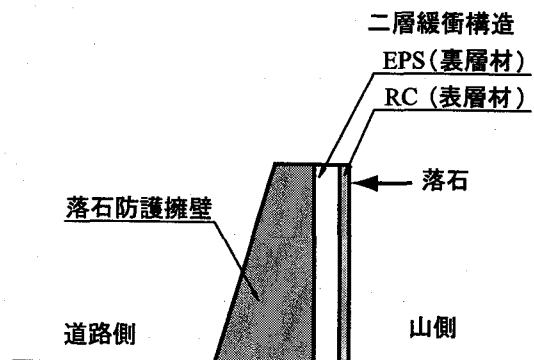


図-1 二層緩衝構造の概略図

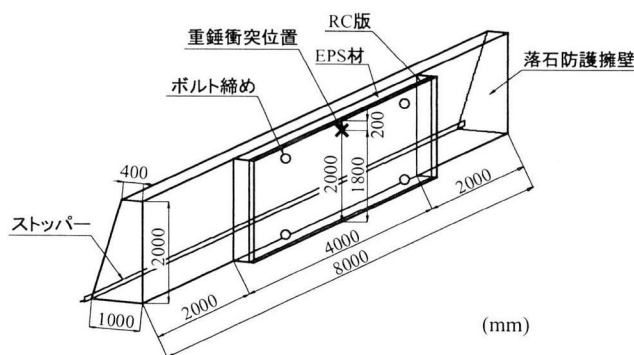


図-2 実規模重錘衝撃実験の C 製擁壁模型



写真-1 実験風景

規模 C 製擁壁の重錘衝突実験<sup>5),6)</sup>によって確認されている。これまでに得られた知見を整理すると、1) 二層緩衝構造を設置することによって、エネルギー的にそれぞれ C 製、RC 製の 6 倍、3 倍以上の緩衝効果が期待できる。2) 最大重錘衝撃力は、C 製、RC 製の場合に比較して、それぞれ 1/4、1/3 以下に緩和可能となる。3) 擁壁高さが 2 m の場合には、表層 RC 版厚 10 cm、裏層 EPS 材厚を 25 cm とすることにより、121 kJ 程度の落石エネルギーまで耐衝撃的に安全性を確保できる。

また、これまでの実験結果から、二層緩衝構造を通して擁壁本体構造に伝えられる最大伝達衝撃力は、EPS 材のエネルギー吸収効果によって重錘衝撃力より小さくなることが明らかとなっている。しかしながら、擁壁本体構造の設計において重要となる最大伝達衝撃力を評価するための算定式は、未だ提案されるに至っていない。

このような観点から、本論文では、実規模重錘衝突実験結果<sup>6)</sup>に基づき、二層緩衝構造各層の動特性を考慮しかつエネルギー論的な考えに基づいて、二層緩衝構造から擁壁本体に伝達される最大伝達衝撃力を評価するための算定式の定式化を試みることにした。なお、本研究では、現場で最もよく建設されかつ実規模実験においても採用されている、高さ 2 m の擁壁を対象として検討を行うことにした。なお、二層緩衝構造を設置しない C 製擁壁の場合は、本研究と同条件での重錘衝突実験において、衝撃エネルギー  $E = 16 \text{ kJ}$  で重錘衝突位置近傍のコンクリートがひび割れ貫通し、終局に至っている。

## 2. 実規模重錘衝突実験の概要

実規模重錘衝突実験<sup>6)</sup>に使用した擁壁は、上述のように現場で最もよく建設されている高さ  $H = 2 \text{ m}$  の標準的な断面を採用することとし、その延長を落石対策便覧で規定している 1 ブロックの長さと同様の、擁壁高さの 4 倍である 8.0 m としている。また、ここでは擁壁の転倒および損傷に着目していることから、重錘

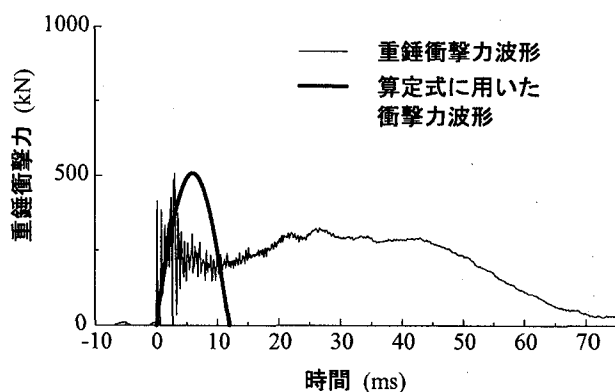
衝突位置を設計上で規定されている最も厳しい高さである  $0.9 H$  とし、基部前面にはストッパーを設けて水平移動を拘束した。このことから、擁壁の回転運動は基部前面を中心に起こることとなる。

図-2 には、本論文の基本としている二層緩衝構造を設定した実規模実験のための C 製擁壁模型を示している。また、写真-1 には実験風景を示している。二層緩衝構造は、表層材に 10～15 cm 厚の RC 版、裏層に 25～50 cm 厚の EPS 材を用いる場合を基本構成とし、緩衝構造の大きさを  $4 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  として実験を行っている。重錘は、質量  $M = 2,000 \text{ kg}$ 、直径  $D = 1.0 \text{ m}$  の円柱状であり、衝突部が半径 80 cm の球面状となっている。

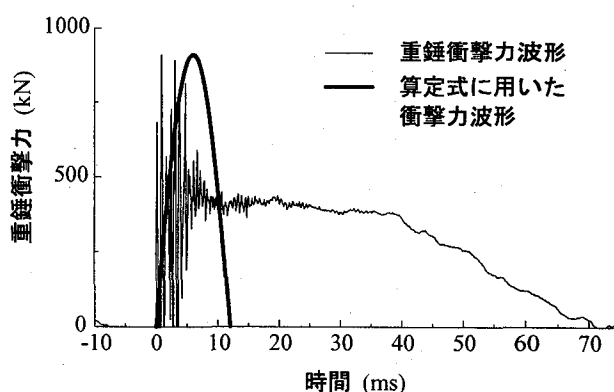
実験における測定項目は、鋼製重錘に埋設されている歪ゲージ型加速度計（容量 1,000 G、応答周波数特性 DC～7 kHz）による重錘加速度、擁壁表面に面一になるように埋設された衝撃応力測定用ロードセル（受圧

表-1 実験ケース一覧

| 実験ケース       | RC 版厚<br>$h_c$ (cm) | EPS 材厚<br>$h_e$ (cm) | 重錘衝突速度<br>$V$ (m/s) |
|-------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| R10-E25-V1  | 10                  | 25                   | 1                   |
| R10-E25-V3  |                     |                      | 3                   |
| R10-E25-V5  |                     |                      | 5                   |
| R10-E25-V7  |                     |                      | 7                   |
| R10-E25-V9  |                     |                      | 9                   |
| R10-E25-V11 |                     |                      | 11                  |
| R15-E50-V1  | 15                  | 50                   | 1                   |
| R15-E50-V3  |                     |                      | 3                   |
| R15-E50-V5  |                     |                      | 5                   |
| R15-E50-V7  |                     |                      | 7                   |
| R15-E50-V9  |                     |                      | 9                   |
| R15-E50-V11 |                     |                      | 11                  |
| R10-E50-V11 | 10                  |                      |                     |
| R15-E25-V11 | 15                  |                      |                     |



(a) R10-E25-V7



(b) R15-E50-V9

図-3 重錘衝撃力波形と算定式に用いた衝撃力波形

径 32 mm, 容量 9.8 MPa, 応答周波数 DC ~ 1 kHz) による伝達衝撃応力である。これらの波形は、広帯域用アナログデータレコーダに一括収録し、A/D 変換の後各物理量に変換している。

伝達衝撃力を評価するための算定式に関する定式化は、本実験結果を基に検討を行うことから、以下に実験結果の概要を述べる。実験ケースは、表-1 に示す 14 ケースである。表中、実験ケース名は、表層 RC 版厚  $h_c$  (cm), 裏層 EPS 材厚  $h_e$  (cm), 重錘衝突速度  $V$  (m/s) をそれぞれ R, E, V の略記号の後に明記し、これらをハイフンで結んで表している。なお、各実験ケースにおいて、二層緩衝構造の各部材は常に未使用材を用いることとした。しかしながら、擁壁本体は各実験において損傷が確認されないことより、同一の試験体を用いることとした。図-3, 4 には、実験結果の一例として、それぞれ R10-E25-V7, R15-E50-V9 の 2 ケースに関する重錘衝撃力波形と伝達衝撃応力分布波形を示している。なお、図-4 の伝達衝撃応力分布波形は、衝突位置を中心に擁壁の延長横方向、下方向に関する結果である。また、これらの実験ケースは、EPS 材の最大歪が 55 % で最大伝達衝撃応力が 0.22 MPa 前後に達し、衝突エネルギーが大きくかつ二層緩衝構造の損傷程度が比較的著しい場合である。また、図-5 には、最大重錘衝撃力に関して、衝突エネルギー  $E (= MV^2/2)$  を横軸に取って整理している。なお、重錘衝撃力は重錘質量に重錘加速度を乗じて評価している。

### 3. 最大伝達衝撃力算定のための基本的な考え方

本緩衝構造は、主に表層 RC 版で落石等による衝撃力を分散させ、裏層 EPS 材で衝撃エネルギーを吸収する構造となっている。裏層 EPS 材は、50 % 歪程度までの塑性応力が 0.2 MPa 程度であることより、大きな緩衝効果が期待できる。したがって、表層 RC 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

が貫通することなく、衝撃力を広く分散させて EPS 材に伝達させる性能を保持していなければならない。

本論文では、二層緩衝構造の裏層 EPS 材から擁壁に伝達される最大衝撃力に関する算定式を定式化するために、表層 RC 版の機能維持のための版厚の確保を前提として、佐藤らが定式化した三層緩衝構造に関する最大伝達衝撃力算定式<sup>7)</sup>の考え方を拠り所にして検討を行うこととする。最大伝達衝撃力の算定を、佐藤らの三層緩衝構造の場合と同様に裏層 EPS 材のエネルギー吸収特性を考慮して行うためには、裏層 EPS 材に作用する衝撃エネルギーを推定しなければならない。

二層緩衝構造の場合には、落石が直接表層 RC 版に衝突するため、その損傷の程度も大きく吸収エネルギー量も無視できないものと推察される。しかしながら、それらを定量的に評価することは困難である。ここでは、落石が RC 版に衝突することによって発生する衝撃力波形のみを実験結果より推定し、衝突後はその力積によって RC 版が運動するものと簡略化した。これにより、裏層 EPS 材への入力エネルギーは、落石の衝突力積と RC 版の運動量を等価とすることにより、算定可能となる。

以上の考えに基づいた伝達衝撃力算定のための基本的な考え方を整理すれば以下ようになる。

#### 3.1 表層材 RC 版に作用する衝撃力の推定

- 1) 上述の仮定に従って重錘衝撃力波形を特定する。

図-3 には、前述のように二層緩衝構造を設置した場合の重錘衝撃力波形を示している。図より、重錘衝撃力波形は、重錘が RC 版に衝突する際に発生する衝突初期の衝撃力波形と、後続の裏層 EPS 材も含む全体系の挙動によって生ずる衝撃力波形から構成されていることが分かる。

- 2) 最大重錘衝撃力を算定評価するために、ここでは、Hertz の接触理論に基づく振動便覧式<sup>8)</sup>の適用を試みる。振動便覧式は式 (1) のように示される。

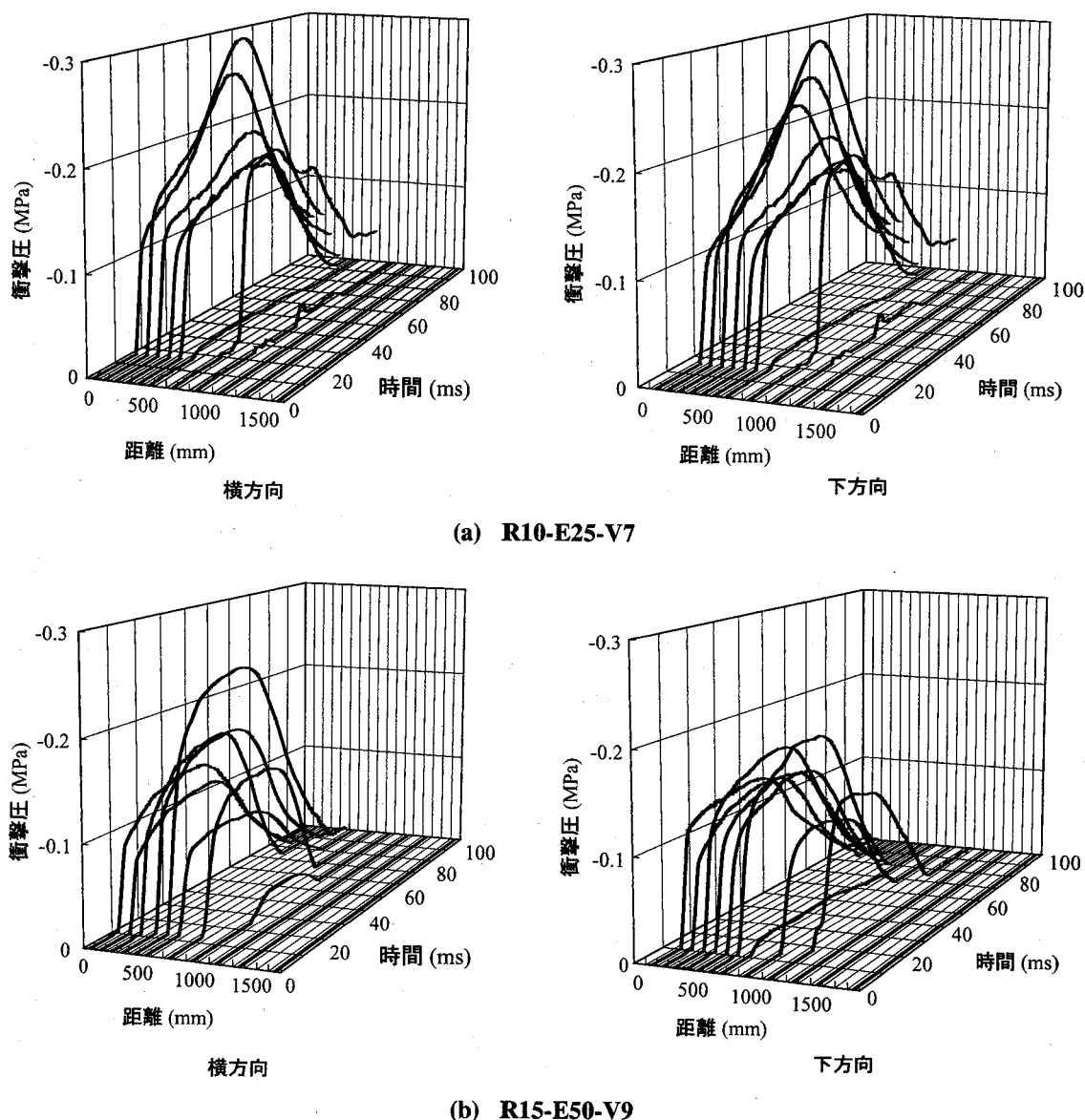


図-4 伝達衝撃応力分布波形

$$P_a = 2.108\lambda^{2/5}H^{3/5}W^{2/3} \quad (1)$$

ここで、 $P_a$ ：最大重錘衝撃力 (kN)， $\lambda$ ：裏層 EPS 材の剛性特性を考慮した RC 版の見かけのラームの定数 ( $\text{kN/m}^2$ )， $H$ ：落石の落下高さ (m)， $W$ ：落石等の重量 (kN) である。

図-5 には、実験結果の最大重錘衝撃力分布と振動便覧式による結果を比較して示している。図より、表層 RC 版に作用する最大重錘衝撃力は、RC 版厚が 10、15 cm に対して RC 版の見かけ上のラームの定数をそれぞれ  $\lambda = 2,000$ 、 $6,000 \text{ kN/m}^2$  と仮定することにより、実験結果の最大重錘衝撃力と大略対応することが分かる。

### 3.2 最小表層 RC 版厚 $h_{cr}$ の算定

二層緩衝構造が機能を保持するためには、落石が

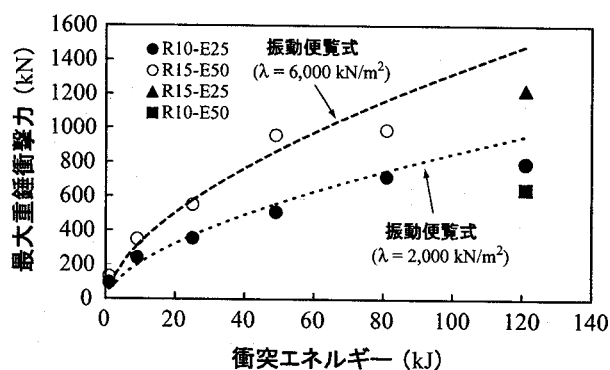


図-5 最大重錘衝撃力と衝突エネルギーの関係

RC 版を貫通することを防止しなければならない。本論文では、重錘径と同様に直径 1 m で衝突面が球状の落石が衝突する場合を想定し、落石がせん

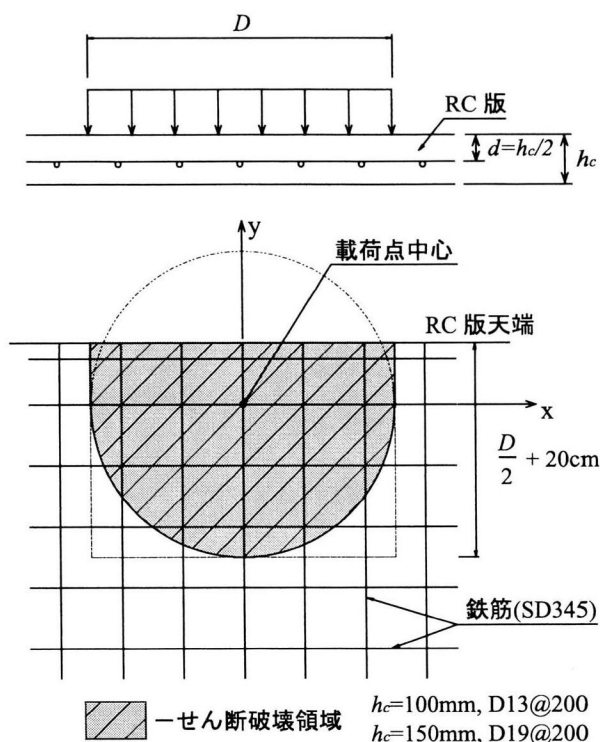


図-6 RC版のせん断破壊領域

断破壊によって貫通することを防止するために必要な最小 RC 版厚  $h_{cr}$  を決定することとする。具体的には、安全側で設計を行うために 図-6 に示すように、载荷点を中心とする直径  $D$  の円形状にかつ表面に対して直角状にせん断破壊されるものと仮定した。擁壁天端からの载荷中心点は、天端から  $0.1H$  と仮定していることより、擁壁高さが  $H = 2\text{ m}$  の場合の値は  $20\text{ cm}$  となる。

### 3.3 裏層 EPS 材に作用する衝撃エネルギーの推定

- 1) 表層 RC 版に大きな衝撃荷重が作用する場合には、表層 RC 版の大変形や落石の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。しかしながら、ここでは設計的に安全側で衝撃エネルギーを評価することとし、これを無視するものとする。
- 2) したがって、落石の衝突によって発生した衝撃力は、全て裏層 EPS 材に伝達されるものと仮定する。
- 3) 重錘衝撃力波形は 図-3 に示され、衝撃初期の RC 版への衝突による成分と、二層緩衝構造が一体となって挙動する成分から構成されているものと考えられる。また、前者の成分は高周波成分が顕在化している間作用しているものと推察される。これより、本研究では、RC 版への作用衝撃力を設計的に安全側で評価するために正弦半波とし、その振幅は式 (1) から与えられるものと仮定することとする。また、荷重継続時間は 図-3 の実験結

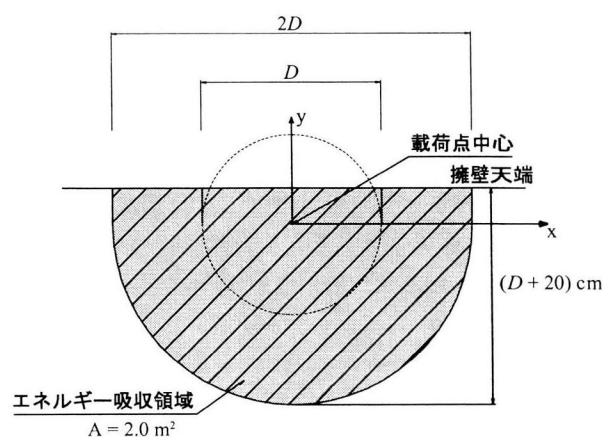


図-7 裏層 EPS 材のエネルギー吸収領域

果より高周波成分が顕在化している  $12\text{ ms}$  と設定した。

- 4) 図-4 に示した伝達衝撃応力波形分布から、衝撃力は高さ方向、横方向とも载荷点中心からほぼ半径  $1\text{ m}$  ( $1.0D$ ,  $D$ : 落石等の直径) の範囲に伝達していることが分かる。ここでは、これらの結果を踏まえ、衝撃力が 図-7 に示すような領域に伝達されるものと仮定する。

### 3.4 伝達衝撃力の算定

前節で推定した衝撃エネルギーは、全て裏層 EPS 材の弾塑性変形によって吸収されるものとする。その時発生する裏層 EPS 材の弾塑性応力は、最大伝達衝撃力（以後、簡略化して単に伝達衝撃力）に等しいとして評価するものとする。

### 3.5 最小裏層 EPS 材厚 $h_{er}$ の算定

前節に示されているように、衝撃エネルギーは、表層 RC 版が大変形や貫通等の著しい損傷がなく剛体であるものと仮定して評価している。したがって、最小裏層 EPS 材厚  $h_{er}$  は、図-7 で示した裏層 EPS 材のエネルギー吸収領域において、平均伝達衝撃応力が EPS 材の歪が  $55\%$  以下となるようにして決定されるものと仮定する。

## 4. 表層 RC 版厚 $h_{cr}$ の決定

3 章で述べたように、二層緩衝構造において RC 版が表層材としての機能を維持するためには、表層 RC 版が落石等の貫通を防止する耐力を有することが必要である。すなわち、表層 RC 版のせん断耐力は、式 (1) で評価される落石等による衝突衝撃力より大きくなければならない。

ここでは、最小 RC 版厚  $h_{cr}$  は、前述のように重錘径と同様な円形状のせん断破壊を仮定し、その時のせん

断耐力が衝突衝撃力よりも大きいことを条件として決定することとした。

その耐力は、三層緩衝構造<sup>7)</sup>の場合と同様に RC 版が純せん断的に破壊するものと仮定し、コンクリートのせん断強度に基づくせん断耐力と、補強鉄筋のせん断強度に基づくせん断耐力の合計として与えられるものとする。今、RC 版の全高  $h_c$ 、有効高さを  $d$ 、一方向の鉄筋比を  $p$ 、コンクリートのせん断強度を  $\tau_{cu}$ 、鉄筋のせん断強度を  $\tau_{su}$  とし、コンクリートが全断面有効であると仮定すると、コンクリートのせん断耐力  $S_c$  は

$$S_c = D_1 h_c \tau_{cu} \quad (2)$$

ただし、

$$D_1 = \frac{\pi D}{2} + 0.4$$

鉄筋のせん断耐力  $S_s$  は、有効高さ  $d = h_c/2$  であるから、

$$S_s = D_2 \frac{h_c}{2} p \tau_{su} \quad (3)$$

ただし、

$$D_2 = 2D + 0.4$$

したがって、せん断耐力の合計  $S$  は、

$$S = S_c + S_s = D_1 h_c \tau_{cu} + D_2 \frac{h_c}{2} p \tau_{su} \quad (4)$$

必要な RC 版厚  $h_{cr}$  は、式 (1) に示す最大重錘衝撃力  $P_a$  と必要せん断力を等価とすれば、式 (4) から

$$h_{cr} = \frac{P_a}{(D_1 \tau_{cu} + \frac{1}{2} D_2 p \tau_{su})} \quad (5)$$

として決定される。なお、鉄筋のせん断強度  $\tau_{su}$  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、 $\tau_{su} = \sigma_{su} / \sqrt{3}$  となる。また、コンクリートのせん断強度  $\tau_{cu}$  は、文献 9) を参考にコンクリートの圧縮強度  $f'_c$  の 1/10 と仮定する。

したがって、各パラメータは、 $\tau_{cu} = 2.4 \text{ MPa}$  ( $f'_c = 24 \text{ MPa}$ )、 $\tau_{su} = \sigma_{su} / \sqrt{3} = 237 \text{ MPa}$  ( $\sigma_{su} = 410 \text{ MPa}$ )、 $p = 0.01$  となる。なお、 $D$  は実験結果に基づき、 $D = 1 \text{ m}$  とする。

## 5. 伝達衝撃力算定式の定式化

3 章に述べた基本的な考え方にに基づき、伝達衝撃力算定式を定式化する。すなわち、1) 落石等の衝突によって発生する衝撃力波形を決定する。2) 得られた衝撃力波形を用いて落石衝突後に裏層 EPS 材に作用する衝撃エネルギーを算定する。3) 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

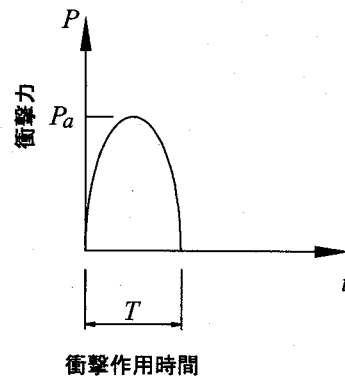


図-8 重錘衝撃力波形の仮定

と仮定し、その時の裏層 EPS 材の弾塑性応力を算定する。これが伝達衝撃応力となる。4) 伝達衝撃力は、この裏層 EPS 材の塑性応力を集積することにより求めることができる。

### 5.1 落石等の衝突によって発生する最大衝撃力および衝撃力波形の決定

3 章 3 節 3) の仮定より、落石の衝突によって表層 RC 版上に発生する衝撃力の最大値は式 (1) で与えられ、その波形は次のように示されるものと仮定する。

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

ここで、 $T$ ：衝撃力の作用時間。本研究では、3 章 3 節 3) より  $T = 12 \text{ ms}$  と仮定した。 $P_a$ ：表層 RC 版に作用する最大衝撃力である。

### 5.2 表層材 RC 版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、生じる力積と RC 版の運動量が等価であると仮定すると、RC 版の得る速度は次のようにして示される。いま、表層 RC 版の質量、重量および RC 版に生じる速度を、それぞれ  $m, W, v$  とすると、

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

一方、落石による衝撃力波形  $P$  は、上述の仮定に基づき図-8 のように示されることより、上式の積分部分は以下のように求められる。

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

これより、RC 版に生じる速度  $v$  は、式 (8) を式 (7) に代入して

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

となる。ただし、 $g$  は重力加速度で、 $9.8 \text{ m/s}^2$  である。  
したがって、RC 版の得る衝撃エネルギー  $E_w$  は

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

ここで、RC 版の得る衝撃エネルギーを、これまで仮定した値を用いて概算する。伝達衝撃力算定のための有効領域における表層 RC 版の密度を  $2,500 \text{ kg/m}^3$ 、RC 版厚を  $h_c$  (m) として有効領域における重量  $W$  を算定すると、3 章 5 節の仮定より、衝撃荷重の分散領域を  $A = 2.0 \text{ m}^2$  と設定して、

$$\begin{aligned} W &= 2.5h_c \times 2 \times 9.8 \\ &= 49h_c \text{ (kN)} \end{aligned} \quad (11)$$

したがって、RC 版が得る衝撃エネルギー  $E_w$  は、次式で与えられる。

$$E_w = \frac{2 \times 9.8 \times 0.012^2}{49\pi^2 h_c} P_a^2 \quad (12)$$

### 5.3 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裏層 EPS 材の有効領域内 ( $A = 2 \text{ m}^2$ ) に入力し、吸収される時の EPS 材に発生する弾塑性応力を算定する。

本研究では、三層緩衝構造の場合と同様に裏層材として、密度  $\rho_e = 20 \text{ kg/m}^3$  の EPS 材を用いることとし、その応力-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した (図-9 参照)。すなわち、添え数字を裏層 EPS 材の歪値 (%) として、

$$\sigma_5 = 110 \text{ kN/m}^2 \text{ (弾性範囲内)}$$

$$\sigma_{55} = 220 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{70} = 380 \text{ kN/m}^2$$

とし、対応する歪をそれぞれ  $\varepsilon_5$ 、 $\varepsilon_{55}$ 、 $\varepsilon_{70}$  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、裏層 EPS 材の歪は 55 % 以内にあることを前提とする。裏層 EPS 材の有効面積を  $A = 2.0 \text{ m}^2$  と仮定して、各歪値に対応する衝撃力を求めると、 $\varepsilon = 5 \%$  時および 55 % 時の衝撃力  $P_5$ 、 $P_{55}$  はそれぞれ、

$$P_5 = \sigma_5 A = 220 \text{ (kN)} \quad (13)$$

$$P_{55} = \sigma_{55} A = 440 \text{ (kN)} \quad (14)$$

また、弾性、塑性領域内の衝撃力  $P_t$  はそれぞれ、

$$P_t = \frac{\sigma_5}{\varepsilon_5} \varepsilon A = P_5 \frac{100\varepsilon}{5} \quad 0 < \varepsilon < 0.05 \quad (15)$$

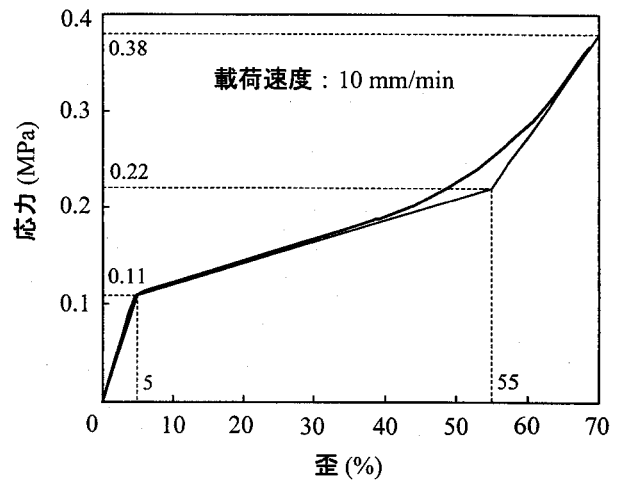


図-9 EPS 材の応力-歪関係

$$\begin{aligned} P_t &= P_5 + \frac{P_{55} - P_5}{\varepsilon_{55} - \varepsilon_5} (\varepsilon - \varepsilon_5) \\ &= P_5 + (P_{55} - P_5) \left( \frac{100\varepsilon}{50} - \frac{5}{50} \right) \quad 0.05 < \varepsilon < 0.55 \end{aligned} \quad (16)$$

式 (16) を  $\varepsilon$  に関して解くと、

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

以上より、弾性、弾塑性領域内の歪エネルギーの総和を求めると、裏層 EPS 材厚を  $h_e$  として、

$$E_w = \begin{cases} \frac{\sigma_5 \varepsilon_5}{2} A h_e & 0 < \varepsilon < 0.05 \\ \left[ \frac{\sigma_5 \varepsilon_5}{2} + \frac{(\sigma_5 + \sigma) (\varepsilon - \varepsilon_5)}{2} \right] A h_e & 0.05 < \varepsilon < 0.55 \end{cases} \quad (18)$$

式 (18) に式 (13) ~ (17) を代入して整理すると、裏層 EPS 材底部から伝達される衝撃力  $P_t$  は、

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

となる。ここで、 $P_5$ 、 $P_{55}$  に上述の値を代入して整理すると、最終的に伝達衝撃力  $P_t$  は、次式のように決定される。

$$P_t = \begin{cases} \sqrt{8800 \frac{E_w}{h_e}} \text{ (kN)} & 0 < \varepsilon < 0.05 \\ 220 \sqrt{\left( 0.9 + \frac{E_w}{55 h_e} \right)} \text{ (kN)} & 0.05 < \varepsilon < 0.55 \end{cases} \quad (20)$$

表-2 計算結果一覧表

|                  | 衝突速度 $V$ (m/s) |   |    |    |    |     |
|------------------|----------------|---|----|----|----|-----|
|                  | 1              | 3 | 5  | 7  | 9  | 11  |
| 衝突エネルギー $E$ (kJ) | 1              | 9 | 25 | 49 | 81 | 121 |

(a) R10-E25 の場合

|                         |    |     |     |     |     |     |
|-------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 重錘衝撃力 $P_a$ (kN)        | 54 | 201 | 371 | 555 | 751 | 955 |
| 必要 RC 版厚 $h_{cr}$ (mm)  | 7  | 27  | 49  | 73  | 99  | 126 |
| 最小 EPS 材厚 $h_{er}$ (mm) | 1  | 14  | 47  | 106 | 193 | 312 |
| 伝達衝撃力 $P_t$ (kN)        | 77 | 228 | 268 | 327 | 399 | 481 |

(b) R15-E50 の場合

|                         |    |     |     |     |       |       |
|-------------------------|----|-----|-----|-----|-------|-------|
| 重錘衝撃力 $P_a$ (kN)        | 83 | 312 | 576 | 862 | 1,165 | 1,482 |
| 必要 RC 版厚 $h_{cr}$ (mm)  | 11 | 41  | 76  | 114 | 154   | 196   |
| 最小 EPS 材厚 $h_{er}$ (mm) | 2  | 22  | 76  | 169 | 310   | 501   |
| 伝達衝撃力 $P_t$ (kN)        | 69 | 224 | 257 | 307 | 369   | 441   |

(重錘質量 2,000 kg)

## 6. 最小裏層 EPS 材厚 $h_{er}$ の決定

3章5節に述べた基本的な考え方に基づき、前述のように裏層 EPS 材が 55 % の歪の範囲内で衝撃エネルギーを吸収するものとすれば、最小裏層 EPS 材厚  $h_{er}$  は、式 (18) の第 2 式より、以下のように決定される。すなわち、

$$h_{er} \geq \frac{4E_w}{341A} \quad (21)$$

表-2 には、以上の算定式に基づき、質量 2,000 kg で直径が  $D = 1.0$  m の重錘を用いる場合について試算した結果を整理している。(a) 表は、R10-E25 の場合、(b) 表は R15-E50 の場合である。試算方法は、設定した二層緩衝構造に対して、各設定衝突速度に対応させた衝突エネルギーから衝撃力を求め、表層 RC 版厚の必要厚  $h_{cr}$  と最小裏層 EPS 材厚  $h_{er}$  を算定した。さらに、構成した表層 RC 版、裏層 EPS 材から伝達衝撃力を算出することとした。

表より、R10-E25 の場合には、衝突速度  $V = 9$  m/s 程度以上から表層 RC 版の必要厚さおよび最小裏層 EPS 材厚を満足しないことがわかる。また、R15-E50 の場合には、衝突速度  $V = 9$  m/s で表層 RC 版の必要厚と設定厚が同程度となることが分かる。また、最小裏層 EPS 材厚が、衝突速度  $V = 11$  m/s の状態で設定厚と同程度であることが示されている。

## 7. 衝撃力に関する実験結果と算定値の比較

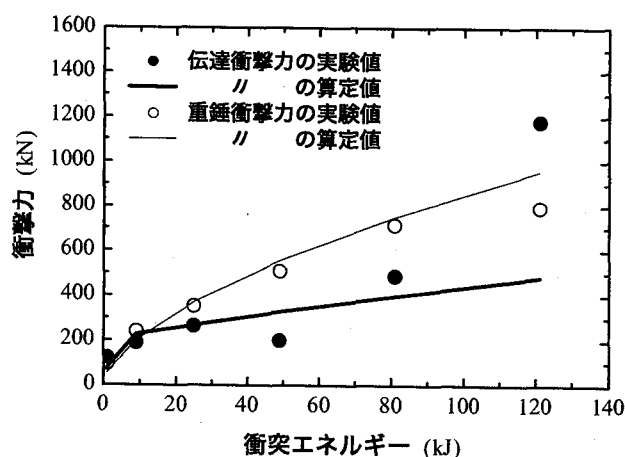
ここでは、実験結果の伝達衝撃力と本文で提案の算定式に基づいて得られた伝達衝撃力の比較を行い、算定式の妥当性を検証する。実験結果の各衝撃力は、2

章に述べた実規模衝撃実験結果を用いている。すなわち、最大重錘衝撃力は、重錘加速度を用いて評価しており、最大伝達衝撃力は、実験結果で得られた伝達衝撃応力分布を集積し積分することにより算定した。

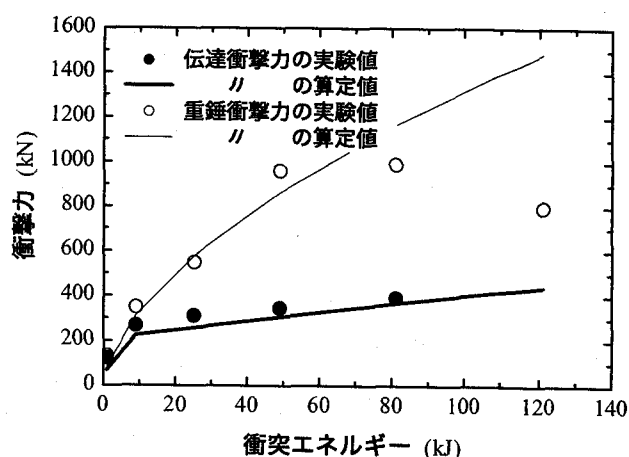
図-10 には、衝撃力と衝突エネルギーに関する実験結果と算定式による結果を比較して示している。(a) 図は、R10-E25 の場合、(b) 図は、R15-E50 の場合である。図は、縦軸に衝撃力（重錘衝撃力および伝達衝撃力）を、横軸に衝突エネルギー  $E$  を取って整理している。図中、式 (1) から得られる重錘衝撃力の算定値は細実線で、式 (20) から得られる伝達衝撃力値は太実線で示している。また、実験値の重錘衝撃力を○印で、伝達衝撃力を●印で示している。

図-10(a) より、伝達衝撃力の算定式から得られる分布性状は、衝突エネルギーに対して、ほぼバイリニア型の直線で示されることが分かる。また、伝達衝撃力に関する算定値と重錘衝撃力のそれを比較すると、衝突エネルギーが小さい領域 ( $E < 9$  kJ) において、伝達衝撃力と重錘衝撃力は同程度の値を示しているが、その後衝突エネルギーの増大とともに両者の差は大きくなっていることがわかる。なお、衝突エネルギー  $E = 81$  kJ における伝達衝撃力の算定値は、重錘衝撃力のその約 1/2 となっている。このことから、衝突エネルギーが  $E = 9$  kJ までは、裏層 EPS 材歪が小さく弾性範囲内にあり、それ以上の衝突エネルギーに対しては、裏層 EPS 材が塑性域に入るため大きな緩衝効果が期待できるものと判断される。

伝達衝撃力に関する実験値と算定値を比較すると、いずれの場合においても衝突エネルギーが  $E = 81$  kJ で、実験値が算定値よりも僅かに大きな値を示しているが、それ以下の衝撃エネルギー内では、両者同程度の値を示している。衝突エネルギー  $E = 121$  kJ の場合



(a) R10-E25



(b) R15-E50

図-10 衝撃力と衝突エネルギーの関係

の伝達衝撃力に関する算定値は、実験結果の 1/2.5 程度を示している。これは、表層 RC 版の必要厚が  $h_{cr} = 12.6$  cm, 最小裏層 EPS 材の厚さが  $h_{er} = 31.2$  cm であるのに対して、実験では表層 RC 版厚  $h_c = 10$  cm, 裏層 EPS 材厚  $h_e = 25$  cm としているために、計算値より小さく、EPS 材の 55 % を超える大歪が発生したことにより、大きな伝達衝撃力が生じたものと考えられる。

一方、図-10(b)より、表層 RC 版厚  $h_c = 15$  cm, 裏層 EPS 材厚  $h_e = 50$  cm の場合には、衝突速度  $V = 11$  m/s (衝突エネルギー  $E = 121$  kJ) の伝達衝撃力の算定値が 440 kN 程度であり、重錘衝撃力を約 1/3 以下まで減少させていることがわかる。表-2(b)より、衝突速度  $V = 9$  m/s で衝撃エネルギーが  $E = 81$  kJ の場合には、実験値と算定値がよく対応している。これは、表層材 RC 版の必要厚が  $h_{cr} = 15.4$  cm であるのに対して、実験での採用厚が  $h_c = 15$  cm であり、算定値と類似の厚さとなっていることや、EPS 材の必要厚が  $h_{er} = 31.0$  cm であるのに対して、実験では  $h_e = 50$  cm の EPS 材を採用していることにより、効率よくエネルギーが吸収されたことによるものと推察される。

衝突速度  $V = 11$  m/s (衝突エネルギー  $E = 121$  kJ) の場合の算定値は、表層 RC 版の必要厚が  $h_{cr} = 19.6$  cm, 裏層 EPS 材の最小厚が  $h_{er} = 50.1$  cm である。一方、実験で採用した表層材 RC 版厚は  $h_c = 15$  cm で、必要厚よりも小さいが、裏層 EPS 材厚は  $h_e = 50$  cm で算定された最小厚と同程度である。実験時の伝達衝撃力は測定していないが、表層 RC 版の損傷が大きいものの、重錘が裏層 EPS 材に深く貫入する現象が生じず、擁壁にも損傷が生じていないことを確認している。

図-10において、(a) 図の R10-E25 と (b) 図の R15-E50 試験体における重錘衝撃力と伝達衝撃力を比較すると、表層材 RC 版を厚くすることにより、重錘衝撃力の算定値が 55 % 程度増加するが、伝達衝撃力は RC

版が薄い場合よりも小さな値を示している。これは、裏層 EPS 材厚が 25 cm から 50 cm と 2 倍に厚くしたことで効率的にエネルギーが吸収されることを意味している。

以上より、R10-E25 および R15-E50 の二層緩衝構造の伝達衝撃力は、RC 版の損傷が顕著にならない範囲内において、実験値と算定値が良く対応していることから、本研究で提案する伝達衝撃力算定式は妥当であるものと判断される。また、本二層緩衝構造に対する実設計として、重錘質量  $M = 2,000$  kg, 直径  $D = 1.0$  m の条件下で、R10-E25 を採用した場合は、衝突速度  $V = 7$  m/s (衝突エネルギー  $E = 49$  kJ) が限界入力エネルギーであるものと判断される。また、R15-E50 を採用する場合は、衝突速度  $V = 11$  m/s (衝突エネルギー  $E = 121$  kJ) に対する試算結果から、表層 RC 版厚が若干不足するものの、裏層 EPS 材厚を計算最小厚と同程度確保することにより、十分に緩衝効果が期待できることが明らかになった。

## 8. まとめ

二層緩衝構造の伝達衝撃力の算定法として、表層材 RC 版の機能保持を前提として、裏層 EPS 材のエネルギー吸収特性を考慮して算定する方法を示した。緩衝構造の実験範囲は、表層材 RC 版の厚さが 10 ~ 15 cm, 裏層 EPS 材の厚さが 25 ~ 50 cm であり、伝達衝撃力は、落石重量、衝突速度等によって変化すると考えられるが、本検討結果をまとめると、以下のようなものである。

- 1) 表層 RC 版の機能を保持するために必要な版厚は 3 章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) 表層 RC 版厚が必要厚以上の場合には、本提案の伝達衝撃力算定式は実設計に適用可能であるもの

と判断される。

- 3) 表層 RC 版厚が必要厚以下の場合においても、裏層 EPS 材厚が最小厚と同程度の厚さを確保することにより、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) 表層 RC 版厚、裏層 EPS 材厚を計算結果の最小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二層緩衝構造の設計が可能になるものと考えられる。

今後、伝達衝撃力算定のさらなる精度向上を図るためには、落石等の衝突に伴うエネルギーの逸散や、落石防護擁壁の本体の変形に伴うエネルギー吸収、RC 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。しかしながら、実設計を行う上では、本衝撃実験範囲内である衝突エネルギー  $E \leq 121 \text{ kJ}$  において、提案の算定式を用いることにより擁壁に伝達される衝撃力の評価や二層緩衝構造の設計が可能であるものと判断される。また、提案の手法を用いることにより、擁壁の転倒に関する検討も容易に可能となるものと推察される。

また、本二層緩衝構造を用いることにより、従来の C 製、RC 製の衝突部近傍の局部的なコンクリートの剥離、剥落を防止可能であるとともに、従来の設計落石規模以上に対しても落石防護擁壁が適用可能と考えられる。さらに、既存の落石防護擁壁に対しても二層緩衝構造の施工が簡易なことから、斜面の経年劣化とともに生じる落石規模の変化に追従し、補強工法としての採用が可能と考えられる。

謝辞：本論文をまとめるに当たり、室蘭工業大学大学院の構造力学講座の諸君に多大なる協力をいただいた

た。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：平成 12 年度版落石対策便覧，2000.6
- 2) 岸 徳光，佐藤 昌志，今野 久志，池田 憲二：落石防護擁壁の重錘衝突実験と数値解析的検討，構造工学論文集，Vol.45A，pp.1677-1688，1999.3
- 3) 川瀬 良司，岸 徳光，今野 久志，松岡 健一：RC 製落石防護擁壁の耐衝撃性向上効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No3，pp.1357-1362，2001.7
- 4) 岸 徳光，川瀬 良司，池田 憲二，松岡 健一：二層緩衝構造の緩衝特性に関する重錘落下実験と数値解析的検討，構造工学論文集，Vol.47A，pp.1621-1632，2001.3
- 5) 岸 徳光，川瀬 良司，今野 久志，岡田 慎哉：二層緩衝構造を用いた落石防護擁壁の重錘衝突実験と数値解析的検討，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1567-1578，2002.3
- 6) 川瀬 良司，岸 徳光，今野 久志，岡田 慎哉：2 層緩衝構造を設置した落石防護擁壁の耐衝撃向上効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No2，pp.973-978，2002.7
- 7) 佐藤 昌志，岸 徳光，松岡 健一：三層緩衝構造の伝達衝撃力算定式の定式化，構造工学論文集，Vol.42A，pp.1337-1346，1996.3
- 8) 土木学会：土木技術者のための振動便覧，第 2 版（昭和 60 年），pp.514-520
- 9) 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

(2002年9月13日受付)