

論文 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

川瀬 良司*1・岸 徳光*2・今野 久志*3・岡田 慎哉*4

要旨：耐衝撃性に優れた落石防護擁壁の設計手法を確立することを目的として、10～15 cm 厚の RC 版と 25～50 cm 厚の EPS 材から構成される 2 層緩衝構造を擁壁の落石衝突面に設置する手法を提案し、高さ 2 m の実規模擁壁を用いた重錘衝突実験を実施した。検討結果、提案の緩衝構造を設置することにより、1) 従来の無筋コンクリート製に比較してエネルギー的に 6 倍の緩衝効果を期待できること、2) 最大重錘衝撃力を 1/4 以下に、また荷重継続時間を 10 倍以上に延長させることが可能であること、等が明らかとなった。

キーワード：落石防護擁壁、2 層緩衝構造、耐衝撃性、EPS 材

1. はじめに

我が国の山岳道路沿いには、小規模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¹⁾に基づき、擁壁本体を剛体と仮定し、落石の持つ運動エネルギーと支持地盤の弾性振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基に設計が行われている。従って、通常無筋コンクリート製（以下、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に関する研究の一環として C 製擁壁の重錘衝突実験²⁾を行い、その損傷形態および耐衝撃性を検証している。また、耐衝撃性を向上させる簡易的な方法として、鉄筋コンクリート構造（以下、RC 製）とする場合の実験³⁾も行っている。さらに、擁壁の落石衝突面に 2 層緩衝構造を設置する手法を提案し、緩衝性能および応力分散性能に関する検討⁴⁾も行っている。提案の 2 層緩衝構造は、表層材が RC 版、裏層材が発泡ス

チロール（以下、EPS）材から構成されている。

本研究では、2 層緩衝構造を設置した実規模 C 製擁壁の重錘衝突実験を実施し、これまでの C 製、RC 製に関する重錘衝突実験結果と比較することにより、2 層緩衝構造を設置する場合の耐衝撃性向上効果について検討を行った。また、緩衝材厚が緩衝効果に及ぼす影響を把握するために、RC 版厚と EPS 厚を変化させた場合についても実験を実施し、検討を行っている。実験に用いた擁壁は、高さ 2 m、延長 8 m の実規模模型である。実験時の測定項目は、重錘衝撃力波形、擁壁各点の変位であり、実験終了



写真-1 実験風景

*1 (株) 構研エンジニアリング部長 防災対策部 (正会員)

*2 室蘭工業大学教授 建設システム工学科 工博 (正会員)

*3 北海道開発土木研究所主任研究員 構造研究室 博(工) (正会員)

*4 北海道開発土木研究所研究員 構造研究室 工修

時のひび割れ分布も観察している。

2. 実験概要

2.1 実験方法

擁壁は一般的に良質な支持層に根入れされていることから、本実験では擁壁の転倒および損傷のみに着目することとし、コンクリート基礎上にストッパーを設けて水平移動を拘束することとした。衝撃荷重は、門型フレームに吊り下げられた重錘をトラッククレーンで所定の高さまで吊り上げ、振り子運動によって擁壁に衝突させ載荷することとした。重錘は質量 2,000 kg の鋼製であり、直径 1 m、高さ 97 cm の円柱状で、衝突部が高さ 17.5 cm、半径 80 cm の球面状になっている。本研究の 2 層緩衝構造を用いる実験では、実験装置の性能限界である衝突速度 $V = 11 \text{ m/s}$ まで擁壁にひび割れが発生しないことより、各衝突速度に対して緩衝構造のみを未使用のものに取り替え単一載荷実験を実施することとした。C 製および RC 製に関する実験は、予備試験体を用い初期および増分衝突速度を 1 m/s として終局に至るまで繰り返し載荷を行い終局時の載荷速度を把握した後に、その衝突速度と同一の速度によって単一に載荷させている。その結果、C 製、RC 製の場合の最大衝突速度は、後述のようにそれぞれ $V = 4 \text{ m/s}$ 、 6 m/s となっている。測定項目は、歪ゲージ型加速度計（容量：200 G、応答周波数：DC ~ 3.5 kHz）

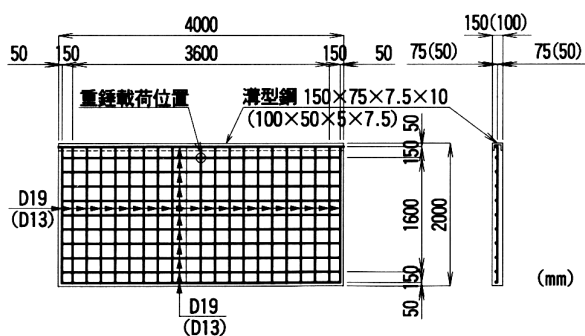
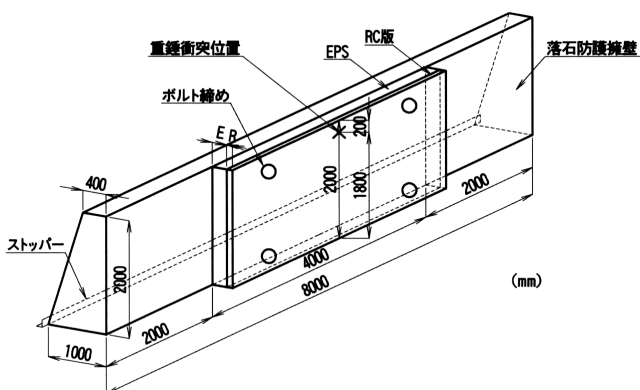
による重錘加速度、レーザ式変位計（容量：200 mm、応答周波数：DC ~ 915 kHz）による擁壁各点の変位波形である。写真-1には実験風景を示している。

2.2 実験ケース

擁壁の断面形状は、実構造で多用されている標準断面を参考に、全ての試験体を擁壁高さ $H = 2.0 \text{ m}$ 、天端および基部の壁厚をそれぞれ 0.4 m、1.0 m とした。延長は落石対策便覧に則して有効幅を擁壁高さの 4 倍である 8.0 m とした。表-1には実験ケースの一覧を示している。表中の実験ケースは、擁壁の構造形式（C：無筋構造、RC：鉄筋コンクリート構造）、2 層緩衝構造を設

表-1 実験ケース一覧

実験ケース	構造形式	緩衝構造		衝突速度 V (m/s)		
		EPS 厚さ (cm)	RC 版厚さ (cm)			
C-V4	無筋構造	-	-	4		
RC-V6	鉄筋構造	-	-	6		
C-E25-R10-V1	無筋構造	25	10	1		
C-E25-R10-V3				3		
C-E25-R10-V5				5		
C-E25-R10-V7				7		
C-E25-R10-V9				9		
C-E25-R10-V11				11		
C-E25-R15-V11				15	15	11
C-E50-R15-V1						1
C-E50-R15-V3						3
C-E50-R15-V5						5
C-E50-R15-V7						7
C-E50-R15-V9	9					
C-E50-R15-V11	11					
C-E50-R10-V11	10	11				



(a) 2 層緩衝構造を設置した落石防護擁壁形状 (b) RC 版厚 15 cm (10 cm) の寸法および配筋状況

図-1 2 層緩衝構造試験体形状と RC 版形状配筋状況

置したケースについては、EPS 厚 E (cm)、RC 版厚 R (cm)、衝突速度 V (m/s) をハイフンで結び表している。重錘衝突位置は、実務設計に則し幅方向中央点で擁壁の転倒や損傷に対して最も厳しい条件である基部からの高さ $0.9H$ ($=1.8\text{ m}$) の点に限定した。図-1には、2層緩衝構造を設置する場合の擁壁形状と緩衝構造の設置状況および緩衝構造の一部である RC 版の形状寸法と配筋状況を示している。

なお、緩衝構造を設置する実験ケースの内、C-E25-R10 の場合には、衝突速度 $V=11\text{ m/s}$ で擁壁の載荷点を中心に鉛直方向に大きなひび割れが発生し終局に至った。一方、C-E50-R15 の場合には、衝突速度 $V=11\text{ m/s}$ で擁壁にひび割れ等の損傷は生じていないものの、実験装置の能力の限界により実験を終了している。

実験時のコンクリートの平均圧縮強度は、C 製、RC 製、2層緩衝構造を設置する場合の C 製擁壁および RC 版でそれぞれ $f'_c = 18.7\text{ MPa}$, 26.4 MPa , 22.3 MPa , 25.0 MPa であった。RC 製の場合の鉄筋量は、断面に対して 0.2% 程度とし D16-SD345 を幅および高さ方向に 300 mm ピッチで配筋している (図-2 参照)。緩衝構造用の RC 版は、図-1 に示しているように単鉄筋配置とし、鉄筋量は直交方向の鉄筋比を等しく 1.0% 程度とし、RC 版厚 10 cm , 15 cm の各々に対して D13-, D19-SD345 を 200 mm ピッチに配置している。また、RC 版天端部には補強を目的として溝型鋼を設置し、縦方向鉄筋を溶接して定着させている。

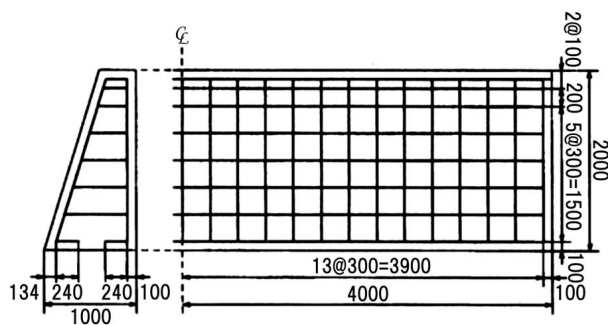


図-2 RC 製擁壁配筋図

3. 実験結果

3.1 重錘衝撃力波形

図-3には、C 製、RC 製、および 2 層緩衝構造を設置する場合の重錘衝突速度が最大である $V=11\text{ m/s}$ 時における重錘衝撃力波形を示している。ただし、重錘衝撃力波形は衝突初期の高周波成分を除去するために 2.5 ms の矩形移動平均処理を施し、重錘加速度に重錘質量を乗じて評価している。なお、波形は重錘衝突時点を 0 ms として整理している。

図より、波形分布性状を比較すると、C 製、RC 製の場合にはいずれも衝撃初期に最大値を示し、その後急激に除荷する三角形の分布性状を示しており、その継続時間は $5\sim 7\text{ ms}$ 程度である。

一方、2層緩衝構造を設置する場合には、いずれの場合も初期に 10 ms 程度の間高周波成分が励起しており、その後単純な波形性状を示している。C-E25-R15、C-E50-R10、C-E50-R15 の場合には、衝撃初期に最大応答値を示し、その後台形状の分布性状を示している。それに対して、RC 版厚と EPS 材厚が薄い C-E25-R10 の場合には重錘衝突後 35 ms 経過後に最大応答値を示し、前者と性状が異なる。これは、前述のように入力エネルギーが RC 版や EPS 材のエネルギー吸収能力を超える程度に大きいため RC 版がせん断破壊し、かつ EPS 材も局所的に 70% 以上に圧縮されることによって、RC 版が擁壁に接触するような状況になったためと考えられる。図-4には本実験で使用した EPS 材の応力-ひずみ曲線を示している。

前 3 ケースの波動分布を詳細に比較すると、RC 版厚が 15 cm の場合 (C-E25/E50-R15) には、EPS 材厚を増加させることにより波動継続時間が $15\sim 20\text{ ms}$ 程度延長している。一方、EPS 材厚が 50 cm の場合 (C-E50-R10/R15) には、RC 版厚を薄くすることにより、さらに $30\sim 35\text{ ms}$ 程度継続時間が延長することが分かる。3 ケースで最も波動継続時間が短い C-E25-R15-V11 の場合には、波動継続時間が 75

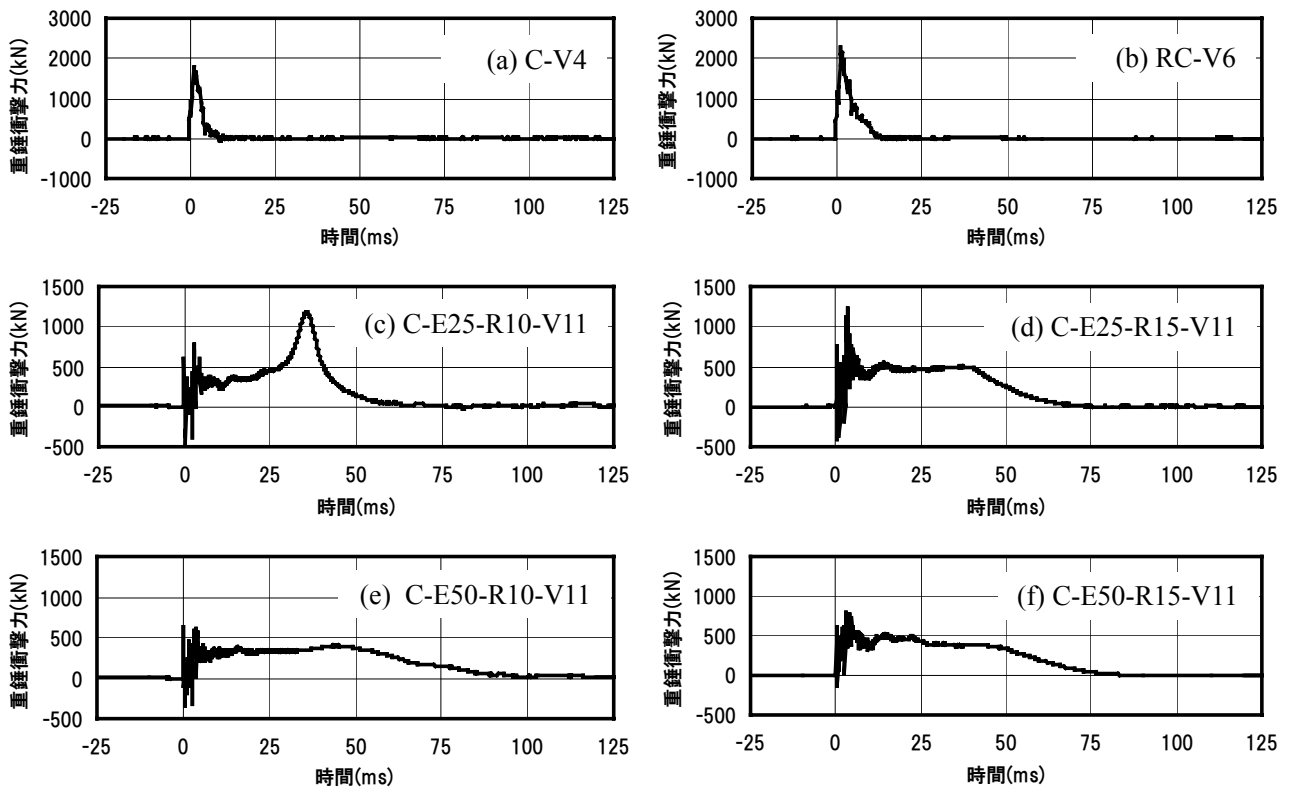


図-3 C 製, RC 製, 2 層緩衝構造の重錘衝撃力波形

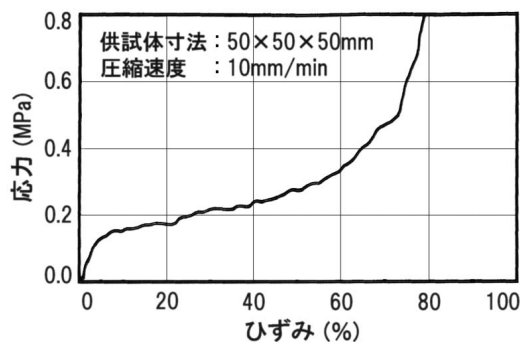


図-4 使用した EPS 材の応力-ひずみ曲線

ms となり, C 製, RC 製の 5 ~ 7 ms に対して 10 ~ 15 倍程度延長し, 衝撃力を効率よく緩和していることが分かる。

最大重錘衝撃力に着目すると, C 製, RC 製の場合には, それぞれ 1,500, 2,000 kN 程度である。一方, 2 層緩衝構造を設置する場合には, C-E25-R15-V11 の場合で, 重錘が RC 版に衝突する時点では 1,000 kN 程度, その後の衝撃荷重が擁壁本体に作用する時点では 500 kN 程度となっている。これより, 各ケースで衝突エネルギーが異なることを前提に最大衝撃力を比較すると, 2層緩衝構造を設置する場合には RC 版へ

衝突する衝撃初期の時点では C 製, RC 製に対して 1.5 ~ 2 倍の緩衝能力が, また擁壁本体に荷重が作用する時点に対しては 3 ~ 4 倍の緩衝能力を有していることが分かる。

3.2 重錘衝撃力と入力エネルギーの関係

前項で述べているように, 2 層緩衝構造を設置する場合の重錘衝撃力波形は, 初期の重錘と RC 版との衝突による応答と, その後の重錘と EPS 材を介した擁壁本体との応答から成り立っている。ここでは, 擁壁の耐衝撃設計の観点から, 後者の応答に着目し, この時点の最大重錘衝撃力について検討を行うこととする。

図-5 には擁壁本体との応答時における最大重錘衝撃力と衝突エネルギー E_k との関係に関する実験結果を示している。C 製, RC 製と 2 層緩衝構造を設置する場合の比較については前述のとおりであることより, ここでは 2 層緩衝構造を設置する場合についてのみ考察することとする。

図より, C-E25-R10 における $E_k = 121 \text{ kJ} (-V11)$ の場合を除いて, C-E25-R15, C-E50-R15とも最大重錘衝撃力が 500 kN 程度に漸近する傾向を

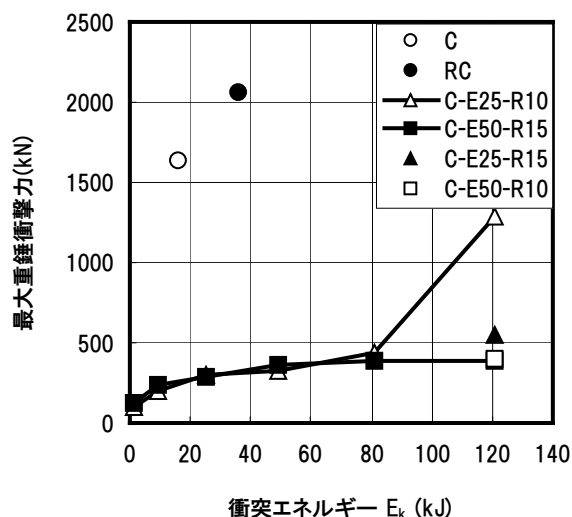


図-5 擁壁本体との応答時における最大重錘衝撃力と衝突エネルギーの関係

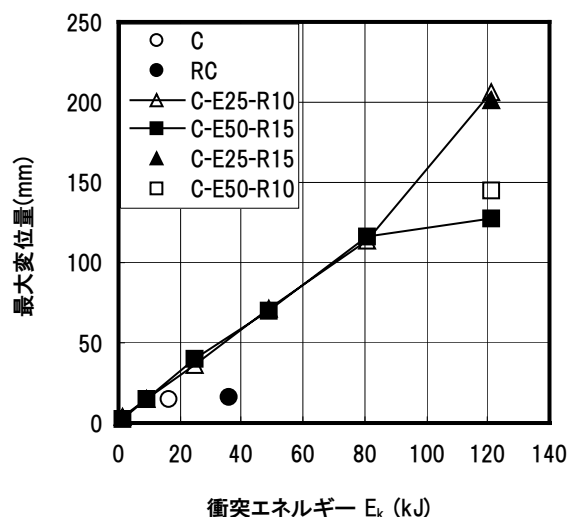


図-6 载荷点位置の最大変位量と衝突エネルギーの関係

示していることが分かる。特に $E_k = 121$ kJ (-V11) の場合のみに着目すると、C-E25-R15、C-E50-R10 は共に C-E50-R15 と同様の値を示しており、C-E25-R10 の $E_k = 121$ kJ (-V11) を除いたいずれの場合も EPS 材が過度に変形せずに十分な緩衝性能を示していることが分かる。これより、E25-R15あるいはE50-R10やE50-R15の2層緩衝構造を設置することにより、C製、RC製に比較して、それぞれ6倍、3倍以上の衝突エネルギーに対して、擁壁は安全性を保持できることが明らかとなった。

3.3 载荷位置の最大変位量と衝突エネルギーの関係

図-6には、各実験ケースにおける背面側の重錘衝突点(天端より20cm下方)と同一高さにおける最大変位量に関して、衝突エネルギー E_k を横軸にとって整理している。図より、C製、RC製の場合には15mm程度の値を示し、2層緩衝構造を設置する場合よりも小さいことが分かる。これは、後述のようにこの時点で擁壁にひび割れが発生して著しい損傷を受けていることを暗示している。

一方、2層緩衝構造を設置する場合の最大変位量は、衝突エネルギーが $E_k = 81$ kJ (-V9) までは緩衝構造のRC版厚やEPS材厚に拘わらず一様で、衝突エネルギーの増加に対応して

ほぼ線形に増加していることが分かる。これは、衝突エネルギーの増加と共に波動継続時間が延長するためと推察される。一方、 $E_k = 121$ kJ (-V11) の場合には、C-E25-R10/R15の場合が200mm前後、C-E50-R10/R15の場合が150mm程度の値を示し、EPS材の厚さに対応して最大変位が異なっている。これは、1) 同一衝突エネルギーに対してEPS材厚が両者で2倍の差があるため、同程度のエネルギーを吸収するためには歪量も2倍程度の差異となることや、2) 衝突エネルギーが大きいことにより、E25とE50で発生する応力分布特性にも明瞭な差異が生じることによるものと推察される。

以上より、高さが2mの擁壁に対して $E_k = 121$ kJ程度の衝突エネルギーを想定する場合には、C-E50-R10/R15がより適切であるものと判断される。

3.4 ひび割れ状況

図-7には、C製、RC製に関する実験終了後のひび割れ分布を示している。2層緩衝構造を設置する場合については、C-E25-R10-V11を除き擁壁本体にひび割れによる損傷が生じていないことから、ここでは省略することとする。C製の場合には、正面は重錘衝突位置近傍にひび割れが集中し、背面は水平方向に進展するひび割れと中心部で鉛直に貫通するひび割れが

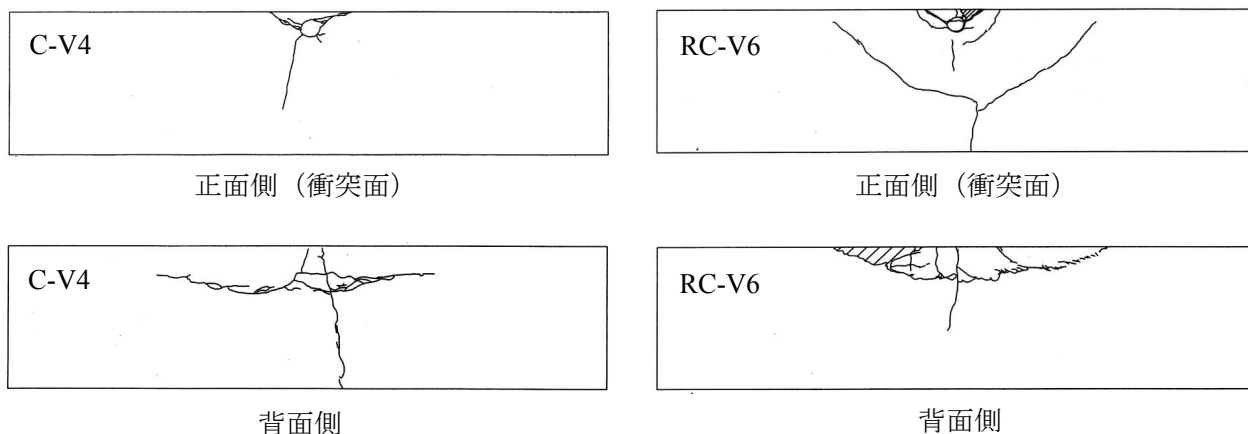


図-7 ひび割れ分布

発生している。特に水平方向に進展するひび割れは、断面方向に貫通する斜めひび割れの一部であり、これらのコンクリート塊は剥離・剥落の傾向にあるものと判断される。

一方、RC 製の場合には、正面には載荷点を中心とした同心円状のひび割れが発生しており、背面では載荷点より上の部分が広範囲に渡って剥離する傾向を示している。また、ひび割れは載荷点を中心とする半径 2 m 程度の領域に発生していることが分かる。なお、RC 製の場合は C 製よりも衝突エネルギーが大ききことにより、損傷の程度も大きくなっているものと判断される。

4. まとめ

本研究では、耐衝撃性に優れた落石防護擁壁の設計手法を確立することを目的として、落石衝突面に 2 層緩衝構造を設置する手法を提案し、高さ 2 m の実規模擁壁に設置した場合の重錘衝突実験を実施し、無筋コンクリート製 (C 製)、鉄筋コンクリート製 (RC 製) 擁壁に関する実験結果と比較する形でその耐衝撃性を検討した。提案の 2 層緩衝構造は表層から 10 ~ 15 cm 厚の RC 版と、25 ~ 50 cm 厚の EPS 材から構成されるものである。

本研究の中で、特に 15 cm 厚の RC 版と、25 ~ 50 cm 厚の EPS 材から成る 2 層緩衝構造を設置する場合の実験結果について整理すると、以下のとおりである。

- (1) 本 2 層緩衝構造を設置することによって、C 製、RC 製に比べてエネルギー的にそれぞれ 6 倍、3 倍以上の緩衝効果を期待できる。
- (2) また、擁壁応答時の最大重錘衝撃力は、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) 提案の手法は、高さ 2 m の擁壁の場合には、121 kJ 以下の落石エネルギーに対して耐衝撃的に十分適用可能である。

今後は、落石エネルギーに対応した 2 層緩衝構造の合理的設計法の確立に向け検討したいと考えている。

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，松岡健一：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，池田憲二：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，No.3，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.