

落石防護擁壁の耐衝撃向上工法に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON ANTI-IMPACT UPGRADING METHOD OF ROCK KEEPING WALL

川瀬良司*, 池田憲二**, 今野久志***, 岸 徳光****

Ryoji KAWASE, Kenji IKEDA, Hisashi KONNO and Norimitsu KISHI

*(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)

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

***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)

****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)

キーワード：落石防護擁壁，耐衝撃性，2層緩衝構造，重錘衝突実験

(rock keeping wall, anti-impact, two-layered absorbing system, falling-weight impact test)

1. はじめに

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、山岳道路沿いに設置されている。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て、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、擁壁の耐衝撃性を把握するために 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た。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）材から構成される 2 層緩衝構造を設置する工法を提案し、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。

本研究では、落石防護擁壁の耐衝撃性の向上効果を把握することを目的として、C 製、RC 製、2 層緩衝構造を設置した C 製の実規模の重錘衝突実験を実施し、C 製と比較することで、耐衝撃性向上効果について検討を行った。実験に用いた擁壁には、高さ 2

m、延長 8 m の実規模模型で、2 層緩衝構造に用いた EPS 材、RC 版の厚さは、それぞれ 50 cm、15 cm である。

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载荷することとした。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 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 とし終局に至るまで繰り返し载荷を行い終局時の载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载荷させている。その結果、C 製、RC 製の場合の最大衝突速度はそれぞれ $V=4$ m/s、6 m/s となっている。2 層緩衝構造を用いる実験では、衝突速度が $V=11$ m/s まで擁壁に損傷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実験

を実施することとした。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）による重錘加速度波形，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り，実験終了時のひび割れ分布も観察している。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 $H=2.0$ 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の有効幅を考慮し，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，CA：2層緩衝構造を設置した無筋構造），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，幅方向中央点で全て設計時の最も厳しい条件である基部からの高さ $0.9 H (= 1.8$ m) の点に限定した。なお，緩衝構造を設置する実験ケースの場合には，衝突速度 $V=11$ 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。

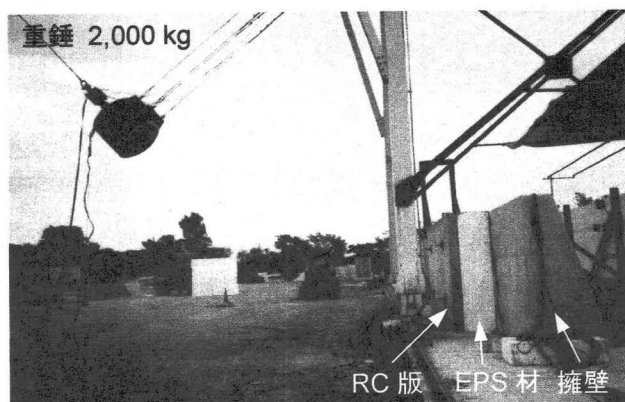
RC製の鉄筋量は，断面に対して 0.2 % 程度とし D16-SD345 を幅および高さ方向に 300 mm ピッチで配筋している。図－1には，2層緩衝構造を設置する場合の擁壁形状と緩衝構造の設置状況および緩衝構造の一部である RC 版の形状寸法と配筋状況を示している。緩衝構造用の RC 版は，図－1(b) に示しているように単鉄筋配置とし，直交方向の鉄筋比を等しく 1.0 % 程度とし，D19-SD345 を 200 mm ピッチに配置している。また，RC 版天端部には補強を目的として溝型鋼を設置し，縦方向鉄筋を溶接して定着させている。

実験時のコンクリートの平均圧縮強度は，C 製，RC 製，2層緩衝構造の擁壁および RC 版でそれぞれ $f'_c=18.7$ MPa，26.4 MPa，22.3 MPa，25.0 MPa であった。

3. 実験結果

3.1 重錘衝撃力波形

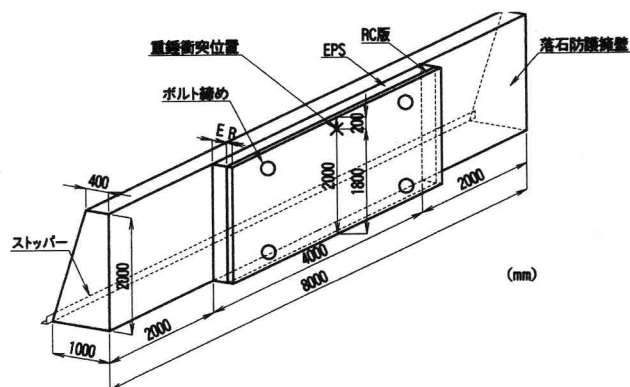
図－2には，C 製，RC 製，および2層緩衝構造を設置する CA 製に対する重錘衝突速度が最大である $V=11$ m/s 時の重錘衝撃力波形を示している。ただし，重錘衝撃力波形は衝突初期の高周波成分を除去



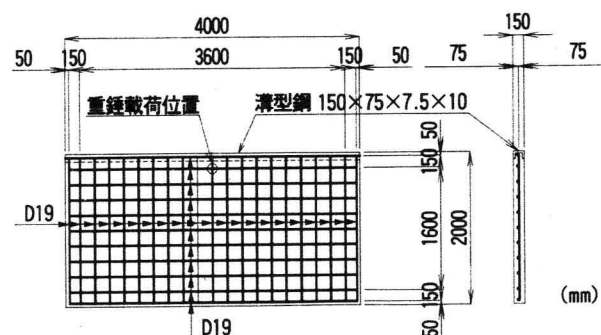
写真－1 実験風景 (2層緩衝構造の場合)

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 (m/s)
		EPS 材厚 (cm)	RC 版厚 (cm)	
C-V4	無筋構造	-	-	4.0
RC-V6	鉄筋構造	-	-	6.0
CA-V1	無筋構造	50	15	1.0
CA-V3				3.0
CA-V5				5.0
CA-V7				7.0
CA-V9				9.0
CA-V11				11.0



(a) 2層緩衝構造を設置した落石防護擁壁形状



(b) RC版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

するために 2.5 msec 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 msec 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 ～ 7 msec 程度である。

一方、2 層緩衝構造を設置する CA 製の場合には、初期の 10 msec 程度に高周波成分が励起するとともに、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。また、継続時間は、75 msec 程度であることから、C 製、RC 製に対して 10 ～ 15 倍程度延長し、衝撃力を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 CA 製の場合には、重錘が RC 版に衝突する時点では 800 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、2 層緩衝構造を設置する場合には擁壁本体に荷重が作用する時点で C 製、RC 製に対して 3 ～ 4 倍の緩衝能力を有していることが分かる。

3.2 重錘衝撃力と衝突エネルギーの関係

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-3 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。

衝突エネルギーに着目すると、C 製では $E_k = 16$ kJ (-V4)、RC 製では $E_k = 36$ kJ (-V6)、2 層緩衝構造を設置した CA 製の場合は、 $E_k = 121$ kJ (-V11) であり、耐衝撃性は C 製に比較して RC 製が 2 倍強、2 層緩衝構造を用いた CA 製の場合は、7.5 倍以上の耐衝撃性向上が期待できることが明らかとなった。

2 層緩衝構造を設置する CA 製の場合における最大重錘衝撃力に着目すると、衝突エネルギーが増加するのに対して最大重錘衝撃力が 500 kN 程度に漸近する傾向を示している。これは、EPS 材の優れたエネルギー吸収能によるものと推察される。

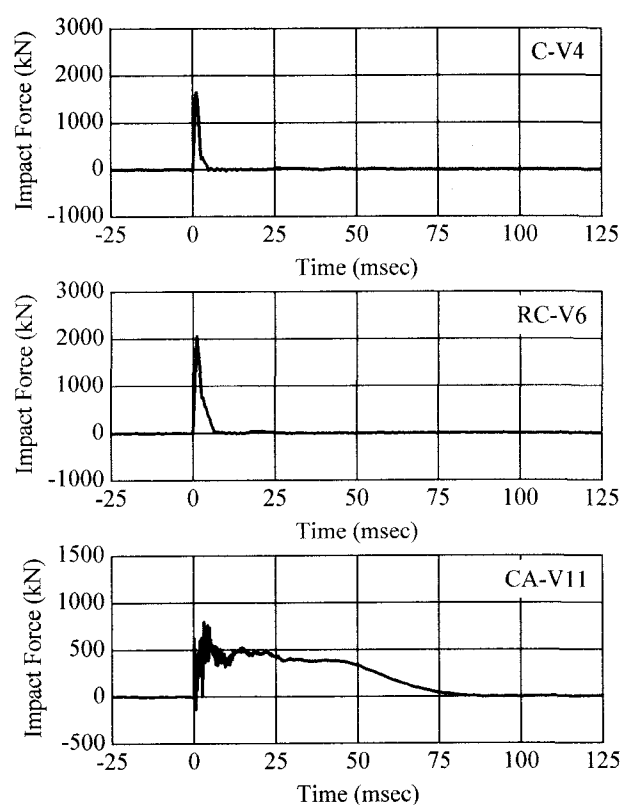


図-2 C 製、RC 製、CA 製に対する重錘衝撃力波形

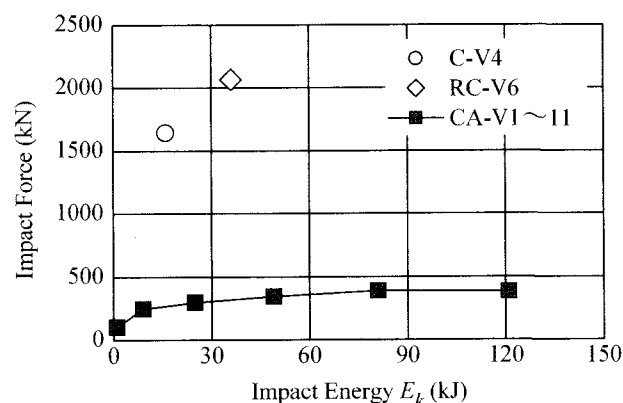


図-3 最大重錘衝撃力と衝突エネルギーの関係

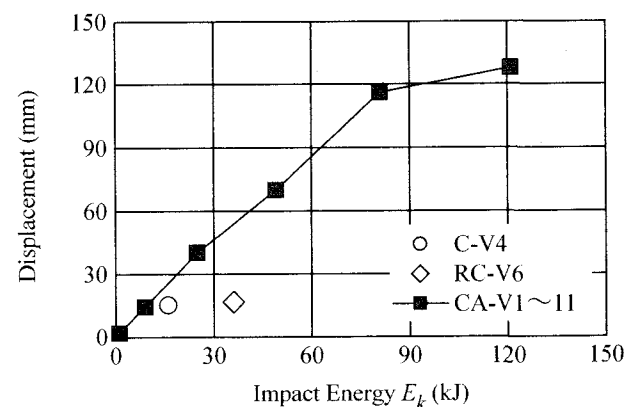
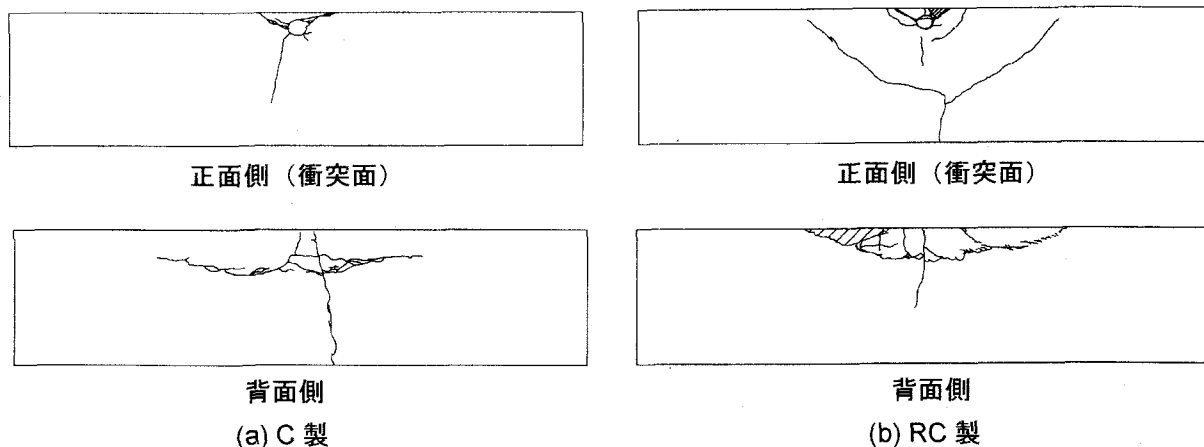


図-4 最大変位量と衝突エネルギーの関係



図－5 ひび割れ分布

3.3 載荷位置の最大変位量と衝突エネルギーの関係

図－4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 20 cm 下方）と同一高さにおける最大変位量を、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 15 mm 程度の値を示し、2 層緩衝構造を設置する CA 製の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 CA 製の場合には、衝突エネルギーが $E_k = 81 \text{ kJ}$ (-V9) までは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ともに波動継続時間が延長するためと推察される。一方、 $E_k = 121 \text{ kJ}$ (-V11) の場合には多少減少傾向を示し、130 mm 程度の値を示している。これは、EPS 材の変形によって衝撃エネルギーが効率よく吸収されているためと考えられる。

3.4 ひび割れ状況

図－5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。

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発生している。

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。

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の確立を目的として、無筋コンクリート製（C 製）、鉄筋コンクリート製（RC 製）、2 層緩衝構造を設置した無筋コンクリート製（CA 製）に関する実規模重錘衝突実験を行った。本研究により得られた結果を要約すると、以下のように示される。

- (1) エネルギー的には C 製に比べ、RC 製は 2 倍強、2 層緩衝構造を用いる CA 製は 7.5 倍以上の耐衝撃性の向上が期待できる。
- (2) CA 製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) 高さ 2 m の擁壁の場合には、CA 製は 121 kJ 程度の落石エネルギーに対して十分適用可能である。

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.