

論文 RC 製落石防護擁壁の耐衝撃性向上効果

川瀬良司*1・岸 徳光*2・今野久志*3・池田憲二*4

要旨: 無筋コンクリート製 (C 製) の落石防護擁壁が耐衝撃性能に乏しいことに着目し, 鉄筋コンクリート (RC) 化する場合の耐衝撃性に関する実規模重錘衝突実験および数値解析を C 製と比較する形で実施した。検討結果, 1) 0.2% の鉄筋量で補強することにより, 耐衝撃性を重錘衝突エネルギー換算で 2 倍以上に向上できること。2) 落石防護擁壁の耐衝撃性評価は, 提案の数値解析法を用いることにより十分可能であること。等が明らかとなった。

キーワード: 落石防護擁壁, RC 構造, 耐衝撃性

1. はじめに

山岳道路沿いには, 小規模落石等に対する防災対策の一つとして落石防護擁壁が設置されている。現在, 落石防護擁壁は, 落石対策便覧¹⁾に基づいて, 擁壁を剛体と仮定し, 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とが等価であるとの考え方に基づき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) の重力式擁壁である。

しかしながら, 現実には落石衝突時にひび割れやコンクリート片の剝離, 剝落が度々発生している。また, 著者らが過去に実施した C 製落石防護擁壁に関する実験²⁾によれば, 重錘衝突位置が擁壁高さの 9 割程度の場合には, 衝突位置近傍部の損傷の他, 高さ方向および幅方向に曲げひび割れ, 壁厚方向にせん断ひび割れが発生することが明らかになっている。また, 剛基礎上では設計入力エネルギーの 1/2 以下の状態で終局に至ることも示されている。このような状況下, 落石防護擁壁の耐衝撃性を向上させる簡易な方法として, 鉄筋コンクリート化 (以下, RC) が考えられる。

本研究では, このような観点から, 重力式落石防護擁壁に RC 構造を適用した場合の耐衝撃性を把握することを目的として, 重錘衝突実験を実施

すると共に, 弾塑性衝撃応答解析を行い, C 製の場合と比較する形で検討を行った。実験時の測定項目は重錘衝撃力波形, 衝突点近傍の変位波形であり, 実験終了時のひび割れ分布も観察している。また, 弾塑性衝撃応答解析には非線形衝撃応答解析汎用プログラム LS-DYNA³⁾を用いた。

2. 実験概要

2.1 実験方法

落石防護擁壁 (以下擁壁) 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。重錘は, 直径 1m の円柱状で, 高さが 97 cm, 底部の高さ 17.5 cm 部が球状で, 質量が 1,000 kg あるいは 2,000 kg の鋼製である。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, 着脱装置による振り子運動によって作用させることとした。本研究では, まず各予備試験体を用い, 初期および増分衝突速度を 1 m/s とし終局に至るまで漸増させる繰り返し載荷によって終局時の載荷速度を把握し, その衝突速度と同一の速度による単一載荷実験を実施して, 比

*1 (株)構研エンジニアリング 次長 防災対策部 (正会員)

*2 室蘭工業大学 教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

*3 北海道開発局開発土木研究所 研究員 構造研究室 工修 (正会員)

*4 北海道開発局開発土木研究所 室長 構造研究室 (正会員)

較検討を行うこととした。測定項目は、歪ゲージ型加速度計による重錘加速度および、レーザ式変位計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、C 製、RC 製共に実構造で多用される標準断面⁴⁾を参考に、擁壁高さを $H = 2.0$ m、天端および基部の壁厚をそれぞれ 0.4 m、 1.0 m とし、擁壁延長は設計時と同様に $L = 2.0$ m とする場合と、実施工時と同様に $L = 8.0$ m の場合を設定した。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、構造形式 (RC 構造: RC, C 構造: C)、擁壁の幅 L (m)、載荷方法 (単一載荷: S) と重錘質量 (kg) を $1/1000$ にして整数化した値、衝突速度 V (m/s) をハイフンで結び表わしている。重錘衝突位置は、全て設計時の最も厳しい条件である基部から $0.9H$ (1.8 m) の点に限定した。

実験時のコンクリートの力学特性は、C 製、RC 製で材齢が 85 日、60 日、平均圧縮強度が $f'_c = 18.7$ MPa、 26.4 MPa である。RC 製の場合の鉄筋量は、断面に対して 0.2 % 程度とし、SD345D16 を幅および高さ方向に 300 mm ピッチで配置している。図-1には幅 $L = 8$ m の場合における RC 製擁壁の場合の配筋図を示している。なお、 $L = 2$ m の場合も $L = 8$ m の場合と同様のかぶりを設定して鉄筋を配筋している。

3. 解析仮定

本数値解析に用いた非線形衝撃応答解析用汎用プログラム LS-DYNA は、衝突体に衝突時の速度を与えることにより衝突体と非衝突体の一体解析が可能である。本研究では、実験と同様に表-1に示す 4 体の試験体を対象とし数値解析を行った。本数値解析に用いた要素は、全て 8 節点の三次元固体要素である。なお、擁壁部は弾塑性体と仮定しているが、その他の要素は実験終了後に塑性変形やひび割れが発生していないことを確認していることより、計算時間の短縮を考慮し、



写真-1 実験風景

表-1 実験および解析ケース一覧

ケース	構造形式	擁壁延長 (m)	載荷方法	重錘重量 (kN)	衝突速度 (m/s)
C-L2-S1-V5	C	2.0	単一	9.8	5.0
RC-L2-S2-V5	RC				5.0
C-L8-S2-V4	C	8.0		19.6	4.0
RC-L8-S2-V6	RC				6.0

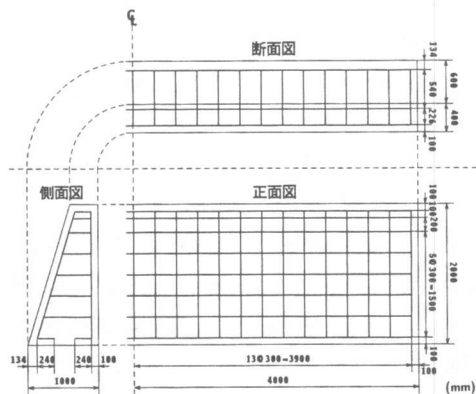


図-1 配筋図

弾性体と仮定している。また、全ての要素は浮き上がりヤリバウンドを評価するために重力を考慮し、かつそれらの要素間には面と面の接触・剝離を伴う滑りを考慮した接触面³⁾を定義している。解析モデルは、構造物の対称性を考慮して 1/2 モデルとし、コンクリート基礎に段差を設けて水平移動を拘束した。図-2には要素分割の一例として、試験体 RC-L8-S2-V6 の要素分割図を示している。なお、全数値解析時間は 100 ms である。

3.1 物性モデル

本数値解析ではコンクリートおよび鋼材に適用

するモデルは、LS-DYNA にあらかじめ組み込まれている物性モデルを用いることとした。図-3には本数値解析に用いた各材料の応力-歪関係を示している。図-3(a)にはコンクリート要素に用いた応力-歪関係を示している。このモデルは要素の負圧力がカットオフ値に達した段階でいずれの方向へも引張応力が伝達しないように定義されている。また、圧縮側に対しては材料試験に基づき 0.2 % 歪時の応力を降伏応力とし、0.15 % 歪に達した状態で降伏するものと仮定し、バイリニヤ型にモデル化している。降伏応力には圧縮強度 f'_c を、引張側のカットオフ値には降伏応力の 1/10 を仮定している。図-3(b)には異形鉄筋要素に用いた応力-歪関係を示している。ここでは、材料構成則として硬化係数 H を考慮した等方弾塑性体モデルを採用した。本研究では、既存の研究成果⁵⁾に基づき硬化係数を $H' = E_s/100$ (E_s : 弾性係数) と仮定している。

コンクリートおよび異形鉄筋に関する降伏の判定は、von Mises の降伏条件に従うこととした。表-2には、解析に用いた各材料の力学的特性を示している。鉄筋の降伏強度は材料試験結果に基づき $\sigma_y = 373$ MPa と設定した。なお、本研究では単純な構成則を用いて解析を実施することとし、材料の歪速度効果は無視している。また、防護擁壁の系の振動に伴う粘性減衰定数は $h = 0.05$ と仮定した。

4. 実験結果と解析結果に関する考察

ここでは、各項目に関して実験結果と解析結果を比較して示しているが、最初に構造形式や擁壁幅の違いによる実験結果の比較を行い、次に解析結果の妥当性について考察を行うこととする。

4.1 重錘衝撃力波形

図-4には、幅 $L = 8$ m の場合における C 製と RC 製の擁壁に関する重錘衝撃力波形の実験結果と解析結果を比較して示している。なお、実験結果の重錘衝撃力波形は、重錘加速度波形に重錘質量を乗じて評価している。また、実験結果の波形はノイズを除去するために数値的に 0.5 ms

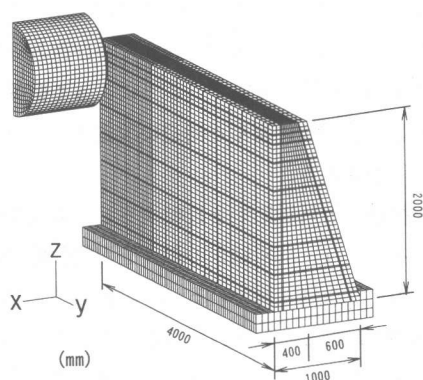
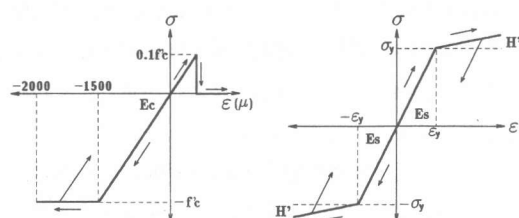


図-2 要素分割図 (RC-L8-S2-V6)



(a) コンクリート要素 (b) 異形鉄筋要素

図-3 各材料の応力-歪モデル

表-2 数値解析に用いた力学的特性

材料名	弾性係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	ポアソン比	密度 (g/cm ³)
コンクリート (C 製)	12.5	18.7	0.17	2.35
コンクリート (RC 製)	17.6	26.4		
鋼材	206	—	0.30	7.85

の矩形移動平均処理を施している。従って、解析結果も実験結果との整合性を取るために同様の処理を施すこととした。

まず、2種類の構造型式に関する実験結果を比較すると、波形分布形状は両者で類似しており、構造型式の違いによる差異は示されていない。最大重錘衝撃力値を調べると RC 製の場合の衝突エネルギーが C 製の場合に比較して 2.25 倍大きいものに対して、両者 2 MN 前後と類似しており、RC 製は C 製に比較してエネルギー的に 2.25 倍前後耐衝撃性に優れていることが分かる。

また、重錘衝撃力波形の継続時間を調べると、

衝突エネルギーの大きい RC 製の場合が C 製に比較して 5 ms 程度伸びており、ひび割れが発生するものの鉄筋を配筋することによって衝撃力が緩和され、靱性に富んだ構造に改善されていることが示唆される。

実験結果と解析結果を比較すると、構造型式に拘わらず、1) 解析結果の最大値が実験結果より若干大きく評価されている。2) 実験結果が直角三角形に類似した分布性状を示しているのに対して、解析結果はほぼ正弦半波状となっている。3) 解析結果の最大重錘衝撃力は実験結果より数 ms 遅れて発生している。4) しかしながら、解析結果の波動継続時間は実験結果とほぼ対応しており、擁壁の全体系としての挙動は実験結果とよく対応しているものと推察される。

4.2 最大重錘衝撃力と衝突エネルギーの関係

図-5 には、最大重錘衝撃力と衝突エネルギーの関係を実験結果と解析結果を比較して示している。重錘衝突エネルギー E は重錘の重量 M 、衝突速度 V を用いて $E = MV^2/2$ より算定している。

最初に構造型式、擁壁幅をパラメータに取った場合の実験結果について比較を行う。本実験結果が繰り返し载荷時に終局に至った最終衝突時の入力エネルギーに対するものであることを前提に考察すると、擁壁幅に関わらず RC 製の場合の衝突エネルギーが C 製の 2 ~ 2.25 倍となっており、RC 製とすることにより、エネルギー的に 2 倍以上の衝撃耐力の向上を期待できることがわかる。また、擁壁幅を $L = 2$ m から 8 m とすることにより、C 製の場合は 28 %、RC 製の場合には 44 % 衝突エネルギーが増加しており、いずれの場合も横方向の広がりによる二次元効果が発揮されている。特に RC 製の場合には、擁壁を $L = 2$ m から 4 倍の 8 m とすることにより 40 % 以上衝突エネルギーの増加を期待できることがわかる。

次に、解析結果と実験結果を比較する。擁壁幅が $L = 8$ m の場合には $L = 2$ m の場合より二次元効果が期待できるため、両者で異なった破壊メカニズム（後述）を示すものと考えられる。しかしながら、C-L2 の場合を除き、いずれの場合も

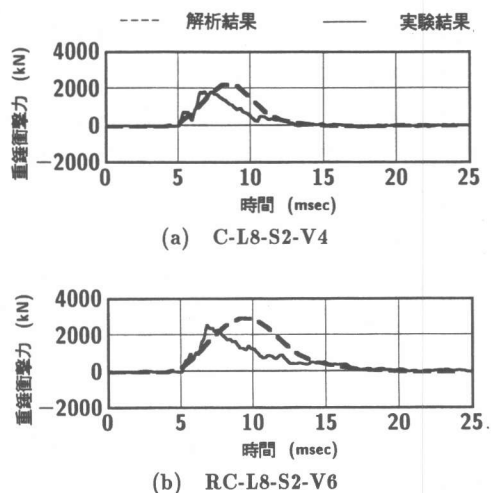


図-4 重錘衝撃力波形

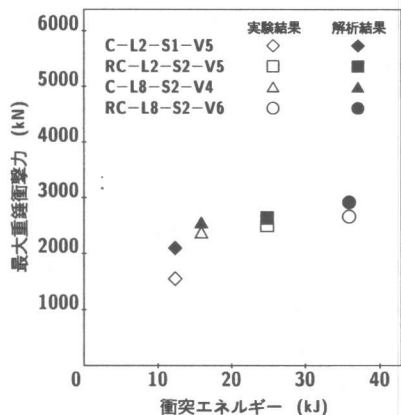


図-5 最大重錘衝撃力と衝突エネルギー

解析結果が実験結果より若干大きい程度で、解析結果は実験結果とよく対応していることが分かる。

4.3 最大変位と衝突エネルギーの関係

図-6 には、背面における実験結果と解析結果の最大変位を、重錘衝突エネルギーを横軸に取って整理している。なお、実験結果は、重錘衝突点の線上天端近傍部（天端から 300 mm 下方）に設置したレーザ式変位計から得られた値を用いており、解析結果も実験結果と同位置における応答値を用いて評価している。また、各擁壁は水平移動を拘束していることより、測定結果および解析結果には擁壁の回転成分が含まれている。

まず、実験結果の最大変位分布について考察を行うと、構造型式に関わらず、最大変位は擁壁幅

が $L = 2\text{ m}$ の場合が $L = 8\text{ m}$ の場合より大きく、その程度は C 製で $L = 2\text{ m}$ の場合に 100 mm 前後であるのに対して、 $L = 8\text{ m}$ の場合には 10 mm 以下となり、前者の $1/10$ に制御されている。これは、 $L = 8\text{ m}$ の場合には擁壁の自重が幅方向に広がりを持って分布しているのに対して、衝撃荷重が集中荷重的かつ荷重継続時間も短いことより、衝撃荷重載荷時には応力波動伝播差によって擁壁の載荷点から離れた領域は固定に類似した状態に陥っているためと推察される。従って、衝突エネルギーは全て載荷点近傍部の損傷によって消費されることとなる。

$L = 2\text{ m}$ における RC 製と C 製の結果を比較すると、RC 製の場合には入力エネルギーが C 製の 2 倍であるのに対して、約 3.5 倍以上の変位量を示しており、RC 製の場合には C 製に比べて擁壁の劣化に伴うエネルギー吸収が小さく、衝突エネルギーの多くが回転エネルギーとして消費されていることをうかがわせる。

変位量の大きい擁壁幅 $L = 2\text{ m}$ の場合における解析結果と実験結果を比較すると、構造型式に関わらず、解析結果は実験結果に対して過小評価の傾向にあることがわかる。しかしながら、その差も RC 製の場合で 15% 程度であり、本数値解析結果はほぼ妥当なもの判断される。

4.4 ひび割れ分布図

コンクリート要素の構成則より、比較的大きな引張応力が発生する領域において、最大応答時の第 1 主応力が零応力を示している場合には、そのコンクリート要素にひび割れが発生していることとなる。ここでは、このような構成則の特性を利用して、数値解析結果のひび割れ分布予測と実験結果を比較することにより、本評価法の妥当性について検討を行うこととする。

図-7には、本研究に用いた各擁壁模型に関して、最大応答変位発生時近傍における擁壁壁面の第 1 主応力分布を実験終了後の壁面に発生したひび割れ分布 (図中、黒色実線) と重ねて示している。数値解析結果の等色 (白黒表示) 分布図は対称軸に対して左右に展開して示している。なお、

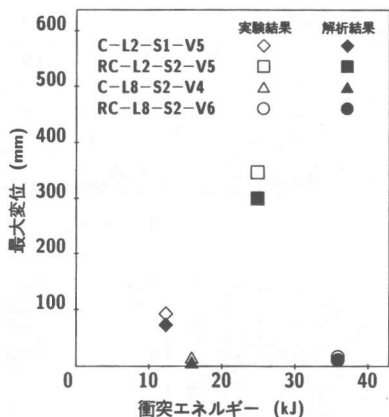


図-6 最大変位と衝突エネルギー

ここでは零応力を強調し、ひび割れの発生領域が明瞭に示されるように明暗から成る応力レベルを設定している。

まず、実験結果のひび割れ分布を見ると、擁壁幅 $L = 2\text{ m}$ の場合において、C 製の載荷面におけるひび割れ分布は重錘衝突部近傍に集中しているのに対して、RC 製の場合には幅方向、高さ方向に広く曲げひび割れが分離して発生しており、異形鉄筋による応力分散効果を確認できる。背面側を見ると、C 製の場合には端部に達する水平ひび割れが発生し、天端近傍のコンクリート塊がブロックごと剝離する傾向を示している。一方、RC 製の場合には載荷点部において水平方向の曲げひび割れが発生しているが、局所的であり端部まで進展していない。また、鉛直方向の曲げにより中心部に直下に走るひび割れが発生している。

一方、 $L = 8\text{ m}$ の場合において、C 製の場合には、背面側で $L = 2\text{ m}$ の場合と同様の水平に分布するひび割れと中心部で直下に貫通するひび割れが発生しており、擁壁の幅が広い場合においても一次元的な性状が顕在化していることが確認できる。それに対して RC 製の場合には、版効果が発揮されて、衝突面で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、また背面側では、載荷点より上の部分が局部的に剝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 (擁壁高さと同しい) の領域に

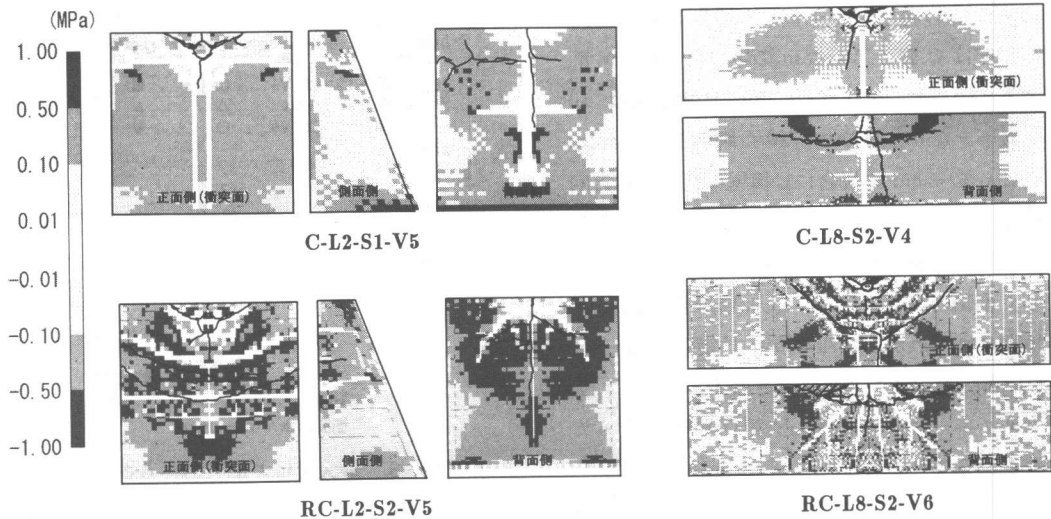


図-7 実験終了後のひび割れ状況

発生しており、前述のとおり、RC 製とすることによる版効果と載荷点から離れた領域が固定に類似した状態に陥っていることが類推できる。

解析結果のひび割れ分布予測と実験結果のひび割れ分布を比較すると、構造型式や擁壁幅に関わらず、解析結果は実験結果のひび割れ分布とほぼ対応していることがわかる。これより、本評価法の考え方により、この種の構造物のひび割れ分布性状を適切に予測可能であるものと推察される。

5. まとめ

本研究では RC 製落石防護擁壁の耐衝撃性を把握することを目的に、擁壁断面に対して 0.2% の鉄筋量を用いる場合の高さ 2 m の実規模 RC 製落石防護擁壁模型を製作し、無筋コンクリート製 (C 製) と比較する形で重錘衝突実験および数値解析を試み、比較検討を行った。本研究で得られた結果を要約すると、以下のように示される。

- 1) RC 製は、C 製に比べて重錘衝突エネルギーに対して 2 倍以上の耐衝撃性の向上が期待できる。
- 2) 擁壁幅を高さの 4 倍とし、実施工と同様 8 m 幅とする場合には、終局時の衝突エネルギーが増加するのに対し、最大変位量は 1/10 以下に減少する。また RC 製の場合には、ひび割れは

載荷点を中心として半径が擁壁高さ程度の領域に分布している。

- 3) C 製の場合は、版効果が十分期待できず、擁壁幅が $L = 8$ m の場合には、載荷点を中心とする縦横に分布するひび割れが発生する。
- 4) 本研究で適用した簡易な材料構成則を考慮して弾塑性衝撃応答解析を実施することにより、RC 製落石防護擁壁の耐衝撃性評価が十分可能であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000
- 2) 岸 徳光，佐藤昌志，今野久志，松岡健一：落石防護擁壁模型の重錘衝突実験と数値解析的検討，構造工学論文集，pp. 1677-1688，1999
- 3) John O. Hallquist：LS-DYNA User's Manual，Version 950，Livermore Software Technology Corporation，2000. 6.
- 4) 全日本建設技術協会：土木構造物標準設計第2巻擁壁類，建設省監修，1987
- 5) 岸 徳光，三上 浩，松岡健一，安藤智啓：静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性衝撃応答解析，土木学会論文集，No619/I-47，pp. 215-233，1999.4.