

I-20

動的応答特性を考慮した落石防護擁壁の簡易設計手法開発に関する一検討

室蘭工業大学 正員 岸 徳 光
 北海道開発局 正員 佐 藤 昌 志
 北海道開発局 正員 今 野 久 志
 室蘭工業大学 ○学生員 工 藤 実 高

1. はじめに

小規模落石等の防災対策として建設される落石防護擁壁は、昭和 58 年度版落石対策便覧¹⁾に基づいて設計が行われており、通常重力式コンクリート擁壁が用いられている。現在の設計概念は、落石や崩土の持つ運動エネルギーを擁壁本体および支持地盤の変形エネルギーに換えて吸収することにより、落石や崩土を阻止させるものである。具体的には、設置場所の地形、地質のほか、落石に対する条件としては予想される落石の重量、落下高さ、崩土に対しては予想される土量、崩落高さなどを考慮し、落石防護擁壁の安定解析によって躯体形状を決定している。しかしながら、落石衝突による破壊を含め、その妥当性が必ずしも検討されていないことから、一部の研究機関で実験的研究²⁾³⁾が行なわれている。また、落石防護擁壁は衝撃的な外力を受ける立体構造物であることから、設計に当たっては擁壁幅を有する実落石防護擁壁の衝撃特性を考慮した断面力の評価が必要である。このような背景を踏まえ、著者らはこれまで単純な構成則を用いた弾塑性衝撃応答解析によって重錘衝突による落石防護擁壁の衝撃特性に関する数値解析を試みてきた。

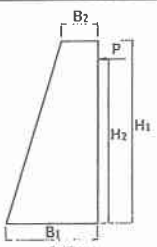
本研究では、これまでの数値解析結果を基に、経済性も考慮して D22 鉄筋を 20 cm ピッチに配筋する RC 製防護擁壁を提案し、従来までの無筋コンクリート製防護擁壁に関する数値解析結果と比較する形で、その耐衝撃性向上効果について検討を行なった。なお、本数値解析では単純な構成則を用いることを前提としているため、塑性化によるエネルギー吸収や質量に比例する減衰効果は考慮しているが、コンクリートの歪速度効果等は無視している。また、本数値解析には非線形衝撃応答解析用汎用プログラム LS-DYNA⁴⁾を用いた。

2. 数値解析仮定

2.1. 解析ケース

落石防護擁壁（以下、擁壁）の断面形状は、既往の研究³⁾を参考に擁壁高さを H_1 として、基部および天端の壁厚をそれぞれ $B_1 = H_1/2$ 、 $B_2 = H_1/5$ とした。表－1 には本研究での解析ケースを一覧にして示して

表－1 解析ケース一覧

形状図	解析ケース	供試体形状寸法 (m)				衝突位置 H_2	解析方法	補強鉄筋
		H_1	B_1	B_2	L			
	C-0.9-L1-E	2.00	1.00	0.40	1.00	$0.9H_1$	弾性解析	無し
	C-0.9-L2-E				2.00	$0.9H_1$	〃	〃
	C-0.9-L1				1.00	$0.9H_1$	弾塑性解析	〃
	C-0.7-L1				1.00	$0.7H_1$	〃	〃
	C-0.5-L1				1.00	$0.5H_1$	〃	〃
	C-0.9-L2				2.00	$0.9H_1$	〃	〃
	RC-0.9-L1				1.00	$0.9H_1$	〃	有り
	RC-0.9-L2				2.00	$0.9H_1$	〃	〃

A Study on Simplified Design Method of Rock Keeping Wall Considering Dynamic Behavior
 by Norimitsu KISHI, Masashi SATOU, Hisashi KONNO and Mitsutaka KUDO

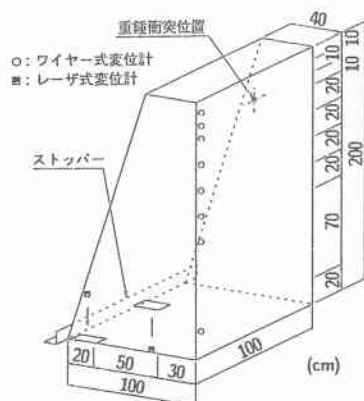


図-1 実験概要図

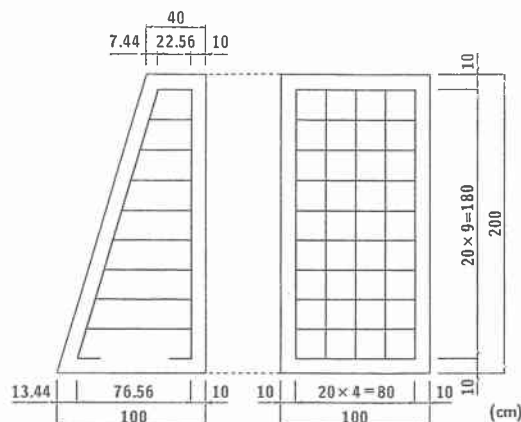


図-2 落石防護擁壁の配筋図

いる。表中の解析ケースは擁壁の構造（無筋コンクリート C、鉄筋コンクリート RC）、基部から測定した衝突位置（擁壁高さに対する比）、擁壁の幅（m）、解析方法（弾性解析 E、弾塑性解析は表示しない）をハイフンで結んで表している。衝突体である重錘は、すべての解析ケースについて直径 50 cm、重量 9.8 kN の鋼製重錘を用いることとした。衝突速度については、各解析ケースともに 1, 2, 3, 5, 7 m/sec とした。なお、実験における測定項目は図-1 に示しているように、歪ゲージ型加速度計による重錘の加速度と、レーザ式およびワイヤー式変位計による擁壁の変位である。

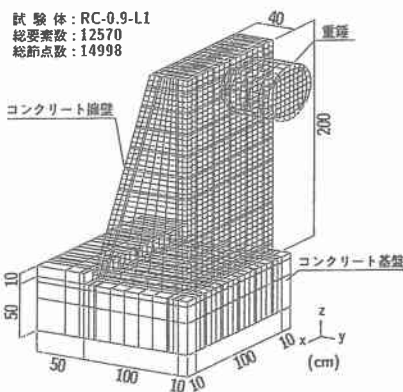


図-3 要素分割図

2.2. 配筋方法

本研究では、簡易な設計手法確立のための一検討として、鉄筋コンクリート擁壁（以下、RC 擁壁）の衝撃特性を検討することとした。しかしながら、擁壁は通常無筋コンクリート構造として設計されていることから、詳細な構造細目はあまり示されていないのが実状である。本研究では、1) 既往の研究³⁾における擁壁のひびわれ分布が上半部に集中していること、2) 擁壁を弾性体モデルと仮定した数値解析の結果、擁壁に発生するモーメントは基部まで大きな値を示していることより、補強鉄筋は擁壁全体に等間隔で配筋するものとした。また、落石対策便覧に示されているように鉄筋はすべて D22 (SD295) を使用し、鉄筋かぶり 10 cm、配筋のピッチ 20 cm として配筋することとした。なお、擁壁中央断面での補強鉄筋比は擁壁幅 $L=1$ m タイプで 0.329 %、 $L=2$ m タイプで 0.296 % である。図-2 には解析ケース RC-0.9-L1 の配筋図を示す。

2.3. 擁壁のモデル化

本研究では、表-1 に示す擁壁の構造、重錘衝突位置、擁壁の幅、解析方法の異なる 8 体の擁壁を対象とし、単一載荷で載荷させた場合について数値解析を行った。図-3 には要素分割の一例として、本数値解析に用いた解析ケース RC-0.9-L1 全体の要素分割図を示している。数値解析で用いた要素は、6 節点あるいは 8 節点の三次元固体要素である。異形鉄筋は断面積が等価な矩形断面に簡略化してモデル化した。擁壁は、厚さ 50 cm のコンクリート基盤上に設置し、高さ 10 cm の段差を設けることで後方への滑動を防止する構造としている。なお、コンクリート擁壁、異形鉄筋は弾塑性体と仮定しているが、コンクリート基盤、重錘

に関しては、既往の研究結果よりひびわれや著しい塑性変形が確認されなかったことより簡略化して弾性体と仮定した。境界条件は、コンクリート基盤では基部と側面を完全固定とし、重錘では進行方向に対する回転、鉛直および水平変位を拘束している。擁壁とコンクリート基盤、重錘と擁壁の要素間には浮き上がりやリバウンドを評価するために、面と面の接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。また、異形鉄筋と擁壁のコンクリートは完全付着と仮定し、破壊による鉄筋の滑りは考慮しないものとした。要素の積分点は解析所要時間を短縮するため1点積分を基本としているが、異形鉄筋要素に関しては断面方向に1要素でモデル化しているため、解析精度を考慮して8点積分を用いている。本数値解析では、コンクリート擁壁面の衝突部に重錘要素を配置し、その重錘要素に衝突時の速度を与えることにより衝撃力を作用させている。解析モデルの総要素数、総節点数は各解析ケースによって若干異なるが、図-3に示す解析ケース RC-0.9-L1 の鉄筋コンクリートモデルでそれぞれ 12570、14998である。

2.4. 物性モデル

本数値解析ではコンクリートおよび異形鉄筋に対する弾塑性体モデルとして 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。コンクリート要素には引張による破壊を考慮したモデルを用いている。このモデルは負圧力（応力として評価する場合には引張応力）がカットオフ値に達すると引張応力が伝達しないように定義されている。本研究では降伏応力として圧縮強度 f_c をとり、降伏歪を 0.15% と仮定した。

また、引張側の破壊応力は降伏応力の 1/10 と仮定している。なお、降伏の判定は von Mises の降伏条件に従うこととしている。一方、異形鉄筋要素には降伏後の硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルを用い、降伏後は等硬化を仮定し、バウシinger効果は考慮しないものとした。降伏の判定はコンクリート要素と同様に von Mises の降伏条件に従うこととしている。図-4には本数値解析に用いたコンクリートおよび異形鉄筋の応力-歪関係を示している。表-2には本数値解析に用いたコンクリート（擁壁、コンクリート基盤）および重錘の力学的特性を、表-3には異形鉄筋の力学的特性を示す。

2.5. 減衰定数 h の決定

本数値解析では、コンクリート要素、鉄筋要素とも弾塑性状態になり、その塑性歪エネルギー成分が大きな減衰作用を示す。しかしながら、質点の振動に伴う質量に比例した粘性減衰効果も含まれているものと考え

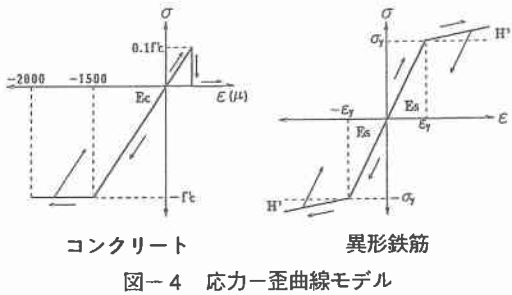


表-2 コンクリートおよび鋼の力学的特性

試験体名	弾性係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	ポアソン比	単位重量 (gf/cm ³)
コンクリート	20.58	20.58	0.18	2.35
鋼（重錘）	205.80	—	0.30	7.85

表-3 異形鉄筋の力学的特性

鉄筋径	材質	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	降伏強度 (MPa)
D22	SD295	205.80	0.30	294.00

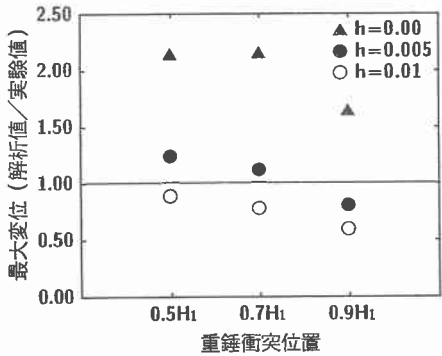


図-5 擁壁基部の鉛直方向変位の比較

えられることより、ここではその効果を最低次の弾性固有振動周期に対する粘性減衰定数（以下、単に減衰定数 h と呼ぶ）を用いて評価することとし、実験結果と比較する形でその減衰定数を決定した。対象とした解析ケースは C-0.9-L1, C-0.7-L1, C-0.5-L1 の3ケースでそれぞれ減衰定数を変化させて数値解析を行った。図-5には擁壁基部の鉛直方向変位（浮き上がり）に関する数値解析結果と実験結果の比較図を示している。図中の縦軸に関する 1.00 の線は数値解析結果と実験結果が一致していることを意味している。図より、重錘衝突位置が $0.5H_1$ の場合では減衰定数 $h=0.01$ の値がよく対応している。しかしながら、他の解析ケースでは減衰定数 $h=0.005$ の場合が実験結果と最もよく対応しており、以降の本数値解析では減衰定数 $h=0.005$ を採用することとする。なお、異形鉄筋の硬化係数 H' は既往の研究⁵⁾より全て $H'=E_s/100$ とした。

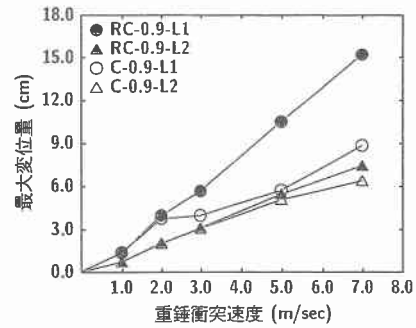
3. 数値解析結果

3.1. 変位と重錘衝突速度の関係

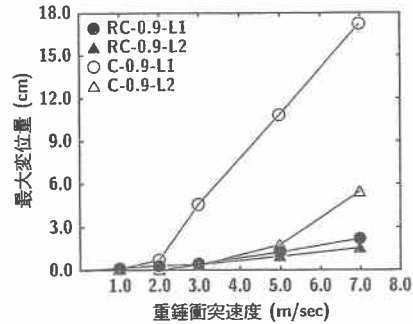
図-6は解析ケース RC-0.9-L1, RC-0.9-L2, C-0.9-L1, C-0.9-L2 における変位と重錘衝突速度の関係を示している。(a) 図は擁壁の基部（衝突面側）における鉛直方向変位（浮き上がり）を、(b) 図は擁壁の重錘衝突位置における擁壁の塑性化に伴う変位量を示している。なお、変位量は最大応答値を用いている。(a) 図より、L1 タイプの鉛直方向変位は 2 m/sec 載荷時まで無筋コンクリート擁壁、RC 擁壁ともに同様の値を示している。しかしながら、その後の変位量は、RC 擁壁ではほぼ線形に増加しているのに対し、無筋コンクリート擁壁では増加量が低減し、衝突速度の増加とともに RC 擁壁との差が大きくなっている。また、L2 タイプに関しては衝突速度の増加とともに若干の差が見られるがほぼ同様の値を示しており、配筋による影響はさほどないものと考えられる。(b) 図に関しては、C-0.9-L1 で 3 m/sec 載荷以降変位が増大していることより、擁壁は 3 m/sec 以降で大きな損傷を受けるものと推察される。また、C-0.9-L2 では 5 m/sec 載荷以降で同様な傾向が確認できる。しかしながら、RC タイプの両解析ケースでは、7 m/sec 載荷まで顕著な変位の増加傾向を示していない。これより、補強鉄筋を配筋することにより擁壁の耐力が向上し、無筋コンクリート擁壁と比較し、L1 タイプで 3.5 倍（エネルギー的には 12.25 倍）以上、L2 タイプで 2 倍（エネルギー的には 4 倍）以上の耐衝撃安全性を有することがわかる。また、擁壁幅 L に着目すると無筋コンクリート擁壁と RC 擁壁の最大塑性変位量の差は L1 タイプの方が大きいことより、補強鉄筋の配筋による効果は L1 タイプの方が大きい。

3.2. 重錘衝撃力と重錘衝突速度の関係

図-7はコンクリート擁壁の弾性、弾塑性解析および RC 擁壁の弾塑性解析における重錘衝撃力と重錘衝突速度の関係を示している。(a) 図は L1 タイプ、(b) 図は L2 タイプの解析ケースについて比較している。重錘衝撃力は各衝突速度における最大値を用いている。実験結果の重錘衝撃力は重錘加速度に重錘質量を乗じた値である。(a) 図より、RC-0.9-L1 の重錘衝撃力は、C-0.9-L1-E と比較して重錘衝突速度が 1, 2 m/sec の場合には同程度の値を示しているが、重錘衝突速度の増加に対応してその差が大きくなっている。また、



(a) 擁壁基部における鉛直方向変位



(b) 重錘衝突位置における塑性変位

図-6 変位と重錘衝突速度の関係

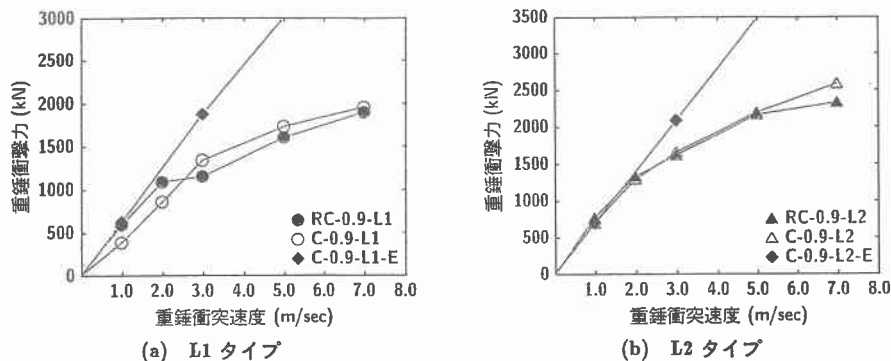


図-7 重錘衝撃力と重錘衝突速度の関係

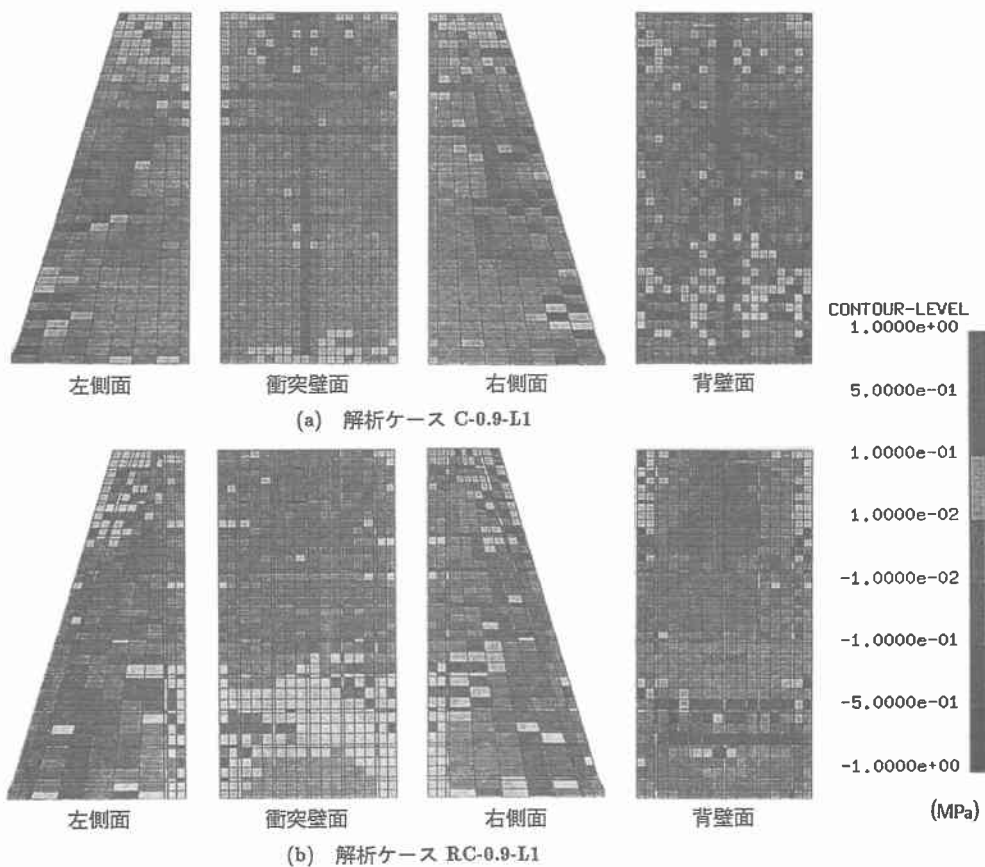


図-8 最大主応力分布の等色応力図

C-0.9-L1 と比較すると、RC-0.9-L1 は 1, 2 m/sec 載荷時では大きな衝撃力値を示しているものの載荷速度の増加とともに C-0.9-L1 の衝撃力値に漸近する傾向を示している。(b) 図の L2 タイプに関しては、RC-0.9-L2 と C-0.9-L2 の重錘衝撃力は各衝突速度で同程度の値を示している。また、C-0.9-L2-E との関係は L1 タイプと類似の性状を示している。以上のことから、本数値解析の解析仮定では擁壁の浮き上がり、塑性変形等の影響により、重錘衝撃力と重錘衝突速度の関係に与える配筋の影響は小さいものと推察される。

3.3. 等色応力図によるひびわれの評価

図-8には、数値解析結果の最大主応力分布の等色応力図を示している。(a)図は解析ケース C-0.9-L1、(b)図は解析ケース RC-0.9-L1であり、左から順に左側面、衝突壁面、右側面、背壁面の等色応力図を示している。本数値解析は弾塑性応答解析を行っているため、引張応力がカットオフ値に達すると要素が破壊され、応力を伝えなくなり零応力となる。これより本論文ではしかるべき大きな応力が発生する領域で零応力を示している場合には、その要素にひびわれが発生しているものと判断した。なお、最大主応力分布図の応力が零の要素は緑色で示されている。両解析ケースを比較すると、両側面については基部より130 cm程度の位置に曲げせん断型のひびわれが発生しており、さほど補強の効果は見られない。しかしながら、衝突壁面ではRC-0.9-L1の重錘衝突部近傍でのひびわれが明らかに減少しており、擁壁の基部まで鉛直に発生しているひびわれも抑制されている。また、背壁面についてもせん断破壊による斜め方向のひびわれが発生せず、水平方向応力による曲げひびわれも狭い範囲に抑制されている。先に述べた変形と合わせて考察すると、C-0.9-L1の場合には破壊に至っているのに対し、RC-0.9-L1では未だ破壊に至っていないことが明らかである。

4. まとめ

本研究では、落石防護擁壁の合理的な耐衝撃設計手法を確立することを目的として、D22程度の異形鉄筋を20 cmピッチに配筋するRC製防護擁壁を提案し、従来までの無筋コンクリート擁壁に関する数値解析結果と比較する形でその妥当性を検討した。本研究で得られた結論を要約すると、

- (1) 重錘衝突速度が比較的遅く、擁壁の損傷の程度が小さい場合には配筋による効果は見られないが、衝突速度が速く、擁壁に大きな損傷が生じる場合には効率よく塑性変位を抑制する。
- (2) 重錘衝突の塑性変形量に基づいて耐衝撃性を評価すると、提案した配筋手法により、1 m幅のタイプで入力エネルギー的に12倍以上、2 m幅で4倍以上耐衝撃性が期待できる。
- (3) 本数値解析の解析仮定では擁壁の浮き上がりや塑性変形等の影響により、擁壁に加わる重錘衝撃力に与える配筋の効果は小さいものと考えられる。
- (4) 等色応力図によるひびわれの評価より、重錘衝突速度が7 m/sec以下の場合には補強鉄筋の配筋により効率よく損傷を低減可能である。
- (5) 重錘衝突速度が7 m/sec以下の場合における擁壁幅 $L=2$ mの配筋の効果は $L=1$ mと比較して小さいものの、ひびわれの抑制効果は期待できる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：「落石対策便覧」，日本道路協会，1983.7.
- 2) 松尾 修，堤 達也，近藤浩市：落石防護擁壁の安定計算法に関する実験的検討，土木技術資料 38-6，1996.
- 3) 佐藤昌志，中井健司，岸 徳光，川瀬良司：重錘衝突を受ける落石防護擁壁の動的挙動，第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp. 79-84，1998.6.
- 4) John O. Hallquist：LS-DYNA User's Manual，Livermore Software Technology Corporation，1997.9.
- 5) 岸 徳光，三上 浩，安藤智啓，小林竜太：重錘落下衝撃を受けるRC梁の弾塑性応答解析，土木学会北海道支部論文報告集，1999.2.