

無筋コンクリート製落石防護擁壁の重錘衝突による耐衝撃挙動

Impact resistant behavior of concrete rockfall protection retaining wall under impact loading

山澤文雄*, 今野久志**, 葛西聡***, 小室雅人****, 岸徳光*****

Fumio Yamasawa, Hisashi Konno, Satoshi Kasai, Masato Komuro, Norimitsu Kishi

* (国研) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

**博(工), (国研) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

*** (国研) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

****博(工), 室蘭工業大学准教授, 大学院工学研究科もの創造系系領域(〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

*****工博, 室蘭工業大学特任教授, 大学院工学研究科もの創造系系領域(〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

Key Words: rock-fall protection retaining wall, Impact loading test, Impact resistant behavior

キーワード: 落石防護擁壁, 衝撃载荷試験, 耐衝撃挙動

1. はじめに

山岳部の道路沿いには、小規模落石等に対する道路防災対策として、コンクリート製落石防護擁壁（以下、擁壁）が数多く設置されている。現在、擁壁設計は、落石対策便覧¹⁾（以下、便覧）に基づき、擁壁を弾性地盤に支持された剛体と仮定し、落石の衝突によって擁壁に伝達される運動エネルギーと基礎地盤の弾性応答エネルギーが等価となる水平変位および回転が生じるものとして実施されており、一般的には直接基礎による無筋コンクリート製の重力式擁壁が用いられている。

落石衝突によってコンクリートの剥離・剥落の損傷が発生している事例があるが、落石衝突に対する躯体の設計法については、便覧においては規定されるに至っていない状況であり、構造細目で示された配筋によって安全性が保たれるとしている。

本研究では、実証実験を実施することによって現行の擁壁の保有耐力と衝撃荷重に対する躯体の安全性を把握し、合理的な耐衝撃設計法を確立することを最終目標に、擁壁延長を現行設計で設定している有効抵抗長と同様に擁壁高さの4倍とした場合の無筋コンクリート製擁壁模型に関する重錘衝突実験を実施し、重錘衝突エネルギーを変化させた場合の動的挙動、重錘衝撃力および損傷状況について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、実験に用いた製擁壁模型の形状寸法、高速カメラ測定用のターゲット設置位置を示している。擁壁の形状寸法は、実構造で多用されている断面の

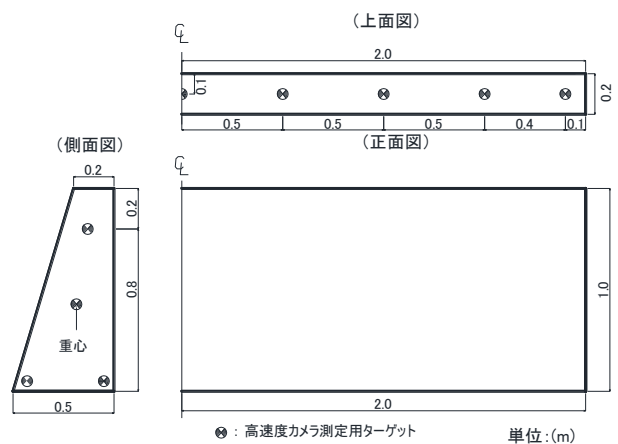


図-1 擁壁模型の形状寸法・ターゲット設置位置



写真-1 実験風景

1/2 程度を想定し、高さ $H = 1.0 \text{ m}$ 、天端および基部の壁厚をそれぞれ $B_1 = 0.2 \text{ m}$ 、 $B_2 = 0.5 \text{ m}$ とし、山側の擁壁背面（以後、衝突面）を鉛直、道路側の擁壁前面（以後、衝突背面）を $1 : 0.3$ の勾配としている。擁壁延長は便覧で規定している有効抵抗長を考慮し、擁壁高さの 4 倍である $L = 4.0 \text{ m}$ とした。

2.2 実験方法

写真-1 には、実験風景を示している。衝撃荷重は、門型フレームに吊り下げられた重錘を所定の高さまで吊上げ、脱着装置を使用した振り子運動によって作用させることとした。重錘衝突位置は、擁壁高さを H として基部から $0.8 H$ (0.8 m) としている。なお、実験に使用した重錘は、直径が 0.4 m 、先端部が半球状で質量が 309 kg の鋼製重錘である。

剛体挙動に着目した実験結果²⁾ から、基礎地盤の擁壁の回転への影響が大きいことが明らかになっていることから、ここでは支持条件が明確なコンクリート基礎盤上で、つま先部にストッパーを設けて水平方向の移動を拘束し実施した。

測定項目は、重錘の底部表面に設置したひずみゲージ式加速度計による重錘衝撃力、高速度カメラによる重錘衝突速度、擁壁の回転角および変位量である。高速度カメラは有効画素数 $1,024 \times 1,024$ 、フレームレートが $1,000 \text{ fps}$ であり、上方および側方に 2 台設置した。重錘衝突実験時の応答波形は、サンプリングタイム 0.1 ms でデジタルデータレコーダにて収録を行っている。また、実験終了毎にひび割れ等の損傷状態も確認している。

2.3 実験ケース

表-1 には、実験ケースの一覧を示している。実験は、コンクリート基礎上に擁壁延長 4.0 m の無筋コンクリート製擁壁を用い、重錘の衝突速度を漸増させた繰返し載荷および単一載荷により行った。なお、繰返し載荷は擁壁に損傷（ひび割れ）が発生するまで行っている。

ケース名は、載荷方法（S：単一載荷，C：繰返し載荷）と目標として設定した重錘衝突エネルギー（kJ）を示している。また、表中には実験時のコンクリートの圧縮強度、高速度カメラ画像により算定した重錘衝突速度、重錘衝突エネルギーおよび実験終了後の損傷状況も併せて記している。なお、重錘衝突エネルギー E は、重錘の衝突速度 v を用いて $E = mv^2/2$ より算定した。

3. 実験結果および考察

3.1 擁壁の動的挙動

図-2 には、実験ケース C1.0、S6.0 の擁壁上面中心点における水平変位分布の時刻歴応答波形を示している。重錘衝突によって最大変位となる時間は、C1.0 の場合には衝突後 89 ms 、S6.0 の場合には 159 ms となっている。

表-1 実験ケース一覧

試験ケース	コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)	重錘質量 m (kg)	載荷方法	重錘衝突速度 v (m/s)	重錘衝突エネルギー E (kJ)	実験後の損傷状況
C0.2	28.2	309	繰返し	1.2	0.2	損傷無し
C0.5				1.8	0.5	損傷無し
C1.0				2.6	1.0	ひび割れ
S2.0	32.8		単一	3.8	2.2	ひび割れ
S4.0				5.1	4.0	ひび割れ
S6.0				6.1	5.7	剥落
S8.0		7.0		7.6	剥落	
S10.0		8.2		10.4	押抜き	

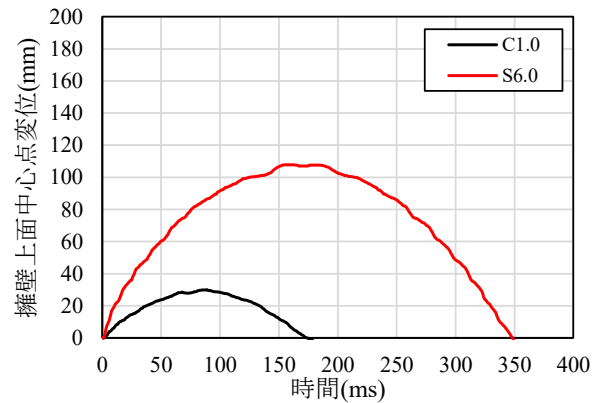


図-2 擁壁上面中心点の時刻歴応答波形

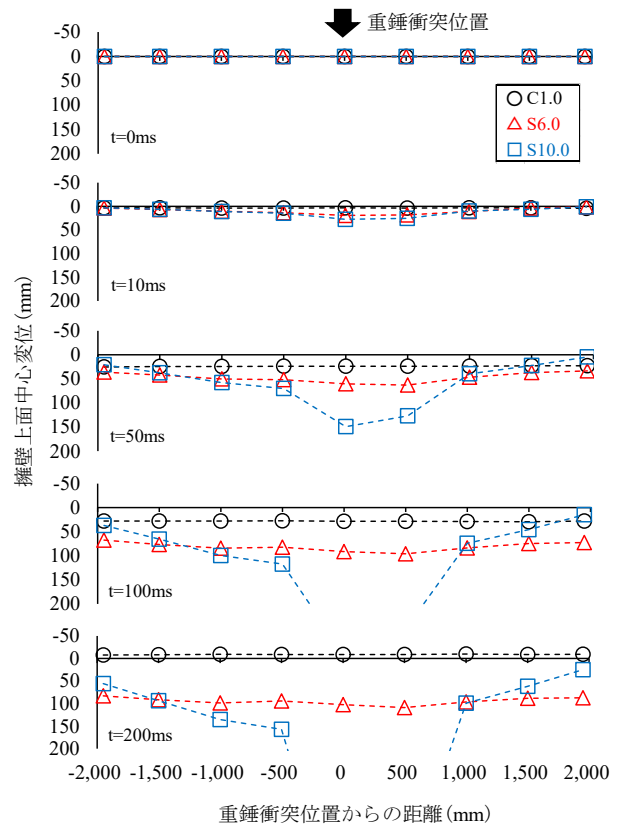


図-3 擁壁上面中心変位の経時変化

また、変位は、重錘衝突エネルギーの増加に対応して大きくなっていることが分かる。

図-3には、実験ケースC1.0、S6.0、S10.0の擁壁上面厚さ方向中心点における水平変位分布の経時変化を示している。C1.0およびS6.0の場合には、擁壁上面の各ターゲット変位は各時刻に関して同程度の値を示しており、重錘衝突によって擁壁全体として剛体的な運動をしていることが分かる。しかしながら、S10.0の場合には明確な押抜きせん断破壊が発生したため、重錘衝突位置を中心とした局所的な変形を示している。これより、擁壁に明確な押抜きせん断破壊が発生しなければ、擁壁延長を高さの4倍とする場合においては、便覧で仮定されている剛体的な挙動を示すことが明らかになった。

図-4には、擁壁重心での最大回転角と重錘衝突エネルギーの関係を示している。なお、図中には、便覧式により算定した回転角および、実験終了後の損傷状況（剥落・押抜き）を記載している。便覧式での計算条件は地盤のN値を $N=100$ 、反発係数を $e=1$ とした。

図より、擁壁の最大回転角は重錘衝突エネルギーが大きくなるほど増加するが、S10.0のように押抜きせん断破壊が発生する場合には最大回転角は小さくなっていることが分かる。また、便覧式での算定値と実験値を比較すると、重錘衝突エネルギーが大きくなるほど便覧式の算定値は実験値より回転角が大きくなる傾向にある。これは、衝突する落石の形状・硬さや擁壁の表面状態によっても反発係数は変化すると考えられるが、便覧式においては、反発係数を完全弾性衝突($e=1$)と仮定して計算するために実際よりも回転角が大きくなっているものと考えられる。

3.2 重錘衝撃力

図-5には、実験ケースでの重錘衝撃力波形の一例を示している。なお、重錘衝撃力は重錘加速度に重錘質量を乗じて評価している。図より、応答波形の継続時間は2~4ms程度であり、重錘衝突エネルギーが大きくなるほど重錘衝撃力は大きくなり、応答波形の継続時間も長くなる傾向にあることが分かる。

図-6には、重錘衝突エネルギーと最大重錘衝撃力の関係を示している。なお、図中には式(1a)の運動方程式を適用して算定した衝撃力も示している。

$$P = mv(e+1) / \Delta t \quad (1a)$$

ここに、 P : 衝撃力 (kN)、 m : 落石質量 (t)、 v : 落石衝突速度 (m/s)、 e : 反発係数、 Δt : 衝突による接触時間 (s) である。ここでは、実験での平均接触時間 $\Delta t = 0.003$ s、反発係数 $e = 1$ を用いた。

図より、最大重錘衝撃力は重錘衝突エネルギーの増加に対応して増加する傾向にあることが分かる。また、式(1a)の運動方程式を適用する方法を用いることにより概ね最大衝撃力を推定することが可能である。

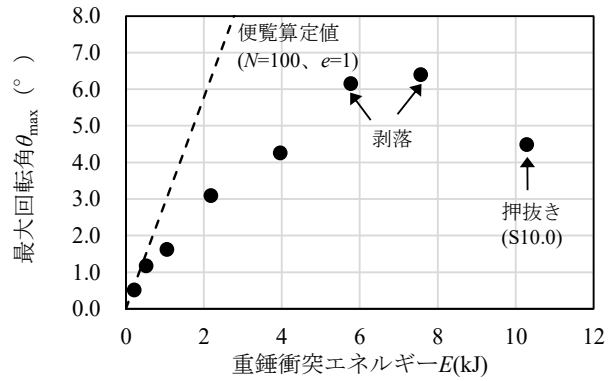


図-4 擁壁上面中心変位の経時変化

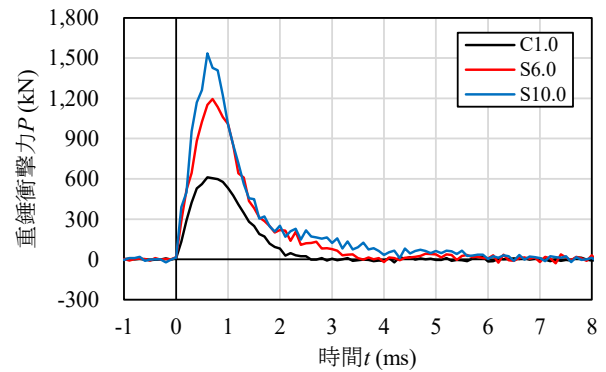


図-5 重錘衝撃力波形

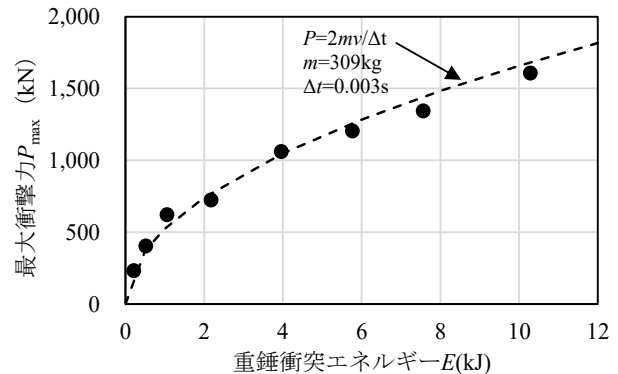


図-6 重錘衝突エネルギーと最大衝撃力の関係

3.3 損傷状況

図-7には、実験終了後の損傷状態の一例を示している。衝突面では重錘衝突エネルギーが大きくなると重錘衝突部を中心として60°~72°の角度で擁壁上面方向へV字状の斜めひび割れおよび下端方向には縦ひび割れが発生していることが分かる。衝突背面の損傷状態に関しては、重錘衝突エネルギーが小さい場合には曲げによる鉛直方向のひび割れが顕在化しており、重錘エネルギーの増加と共にV字状のひび割れが卓越し、最終的には押抜きに至っている。また、衝突面の衝突位置から擁壁厚さ方向に仰角35°~40°の位置が衝突背面のV字状の頂点となる傾向にあった。

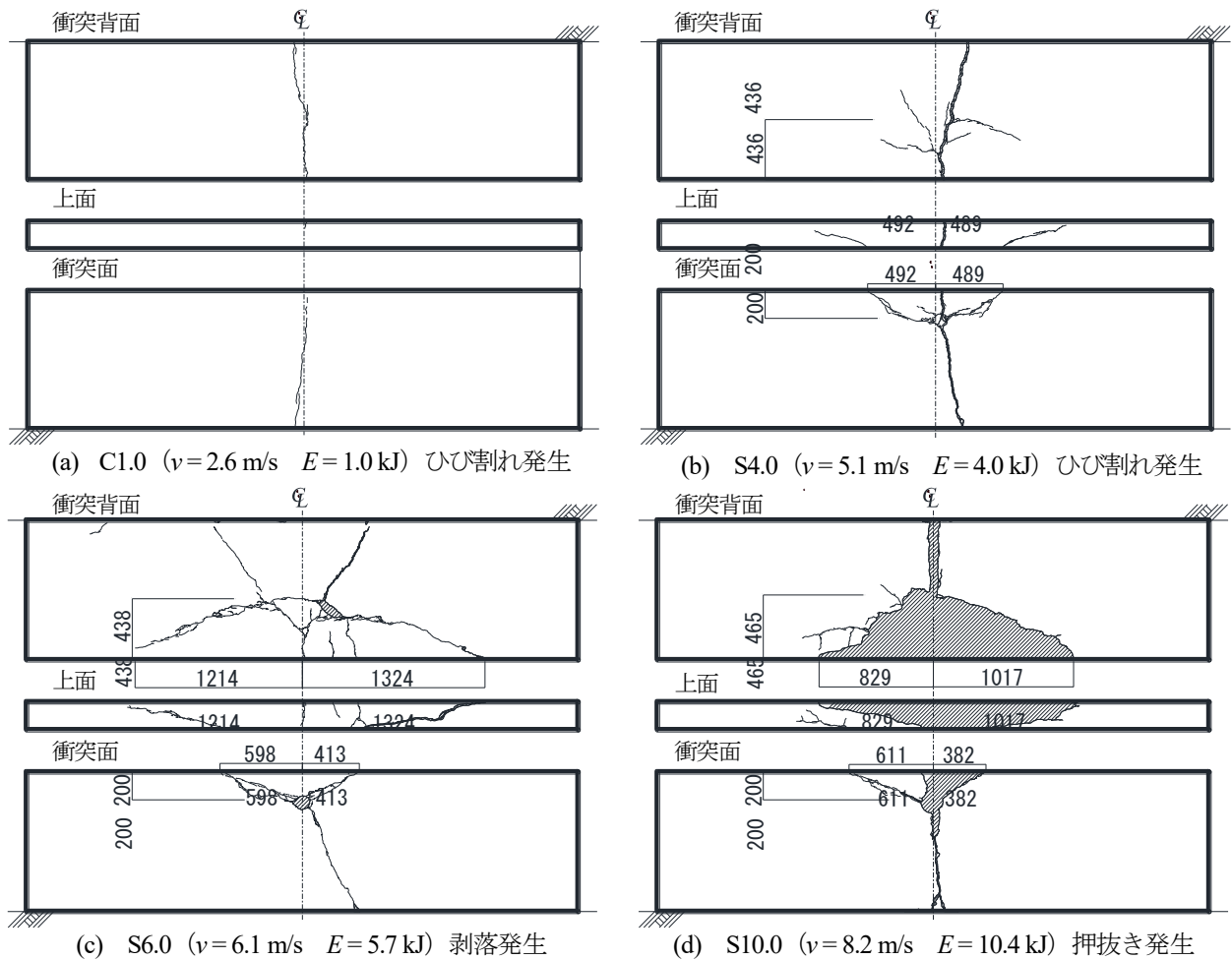


図-7 実験終了後の損傷状態

擁壁のせん断耐力を検査するため、損傷図より平均のせん断破壊面を推定し表面積を算出した。S10.0 の場合には表面積が約 0.62 m^2 となり、最大衝撃力約 $1,600 \text{ kN}$ からせん断応力度 τ を概算すると 2.6 MPa と試算される。また、S6.0 の場合には表面積が約 0.81 m^2 、最大衝撃力 $1,200 \text{ kN}$ となり、せん断応力度 τ は 1.5 MPa と試算される。このことから、本研究で用いた擁壁模型の場合には、押抜きせん断破壊に至るせん断応力度は、 $1.5 \sim 2.6 \text{ MPa}$ 程度の範囲にあるものと推察される。

4. まとめ

本研究では、擁壁延長を現行設計で仮定している有効抵抗長と同様に擁壁高さの4倍とした場合の無筋コンクリート製擁壁模型に関する重錘衝突実験を実施し、動的挙動、重錘衝撃力および損傷状況等について検討を行った。本実験の範囲内で明らかになった事項を整理すると、以下の通りである。

(1) 擁壁延長を高さの4倍とした場合、押抜きせん断破

壊が発生しなければ便覧で仮定されている剛体的な運動となる。

- (2) 擁壁の最大回転角は押抜きせん断破壊が発生しなければ重錘衝突エネルギーが大きくなるほど増加する。便覧式を用いて算出した回転角は実験値よりも大きくなる傾向にある。
- (3) 衝撃力は重錘衝突エネルギーの増加に対応して増加する傾向にあり、運動方程式を適用させる方法により評価が可能である。

今後、合理的な耐衝撃設計法の確立に向けて、重錘や擁壁の大きさを変化させた場合についても検討する予定である。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：落石対策便覧，2017.12.
- 2) 山澤文雄，今野久志，小室雅人，岸徳光：基礎地盤が異なる落石防護擁壁の耐衝撃挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol. 39，No. 2，pp. 649-654，2017.7