

重錘衝突による落石防護擁壁の耐衝撃挙動

Impact resistant behavior of rock fall retaining wall under impact loading

土木研究所寒地土木研究所
土木研究所寒地土木研究所
土木研究所寒地土木研究所
室蘭工業大学大学院
釧路工業高等専門学校

○正会員 山澤文雄 (Fumio Yamasawa)
正会員 今野久志 (Hisashi Konno)
正会員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)
正会員 栗橋祐介 (Yusuke Kurihashi)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

我が国の海岸線道路沿いには、小規模落石等に対する道路防災施設として、落石防護擁壁が数多く設置されている。現在、落石防護擁壁の設計は、落石対策便覧¹⁾（以下、便覧と記す）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いる。したがって、直接基礎による無筋コンクリート製の重力式擁壁が一般的に用いられている。

本研究グループでは、重力式擁壁の耐衝撃性を向上させる工法として、二層緩衝構造（表層材：RC版、裏層材：EPSブロック）を開発し実用化している²⁾³⁾⁴⁾。また、斜面法尻の掘削を必要としない新たな工法として、基礎杭を擁壁内まで立ち上げ、フーチングを設けず擁壁の山側勾配を垂直として基礎杭頭部を鉄筋コンクリート構造で結合する杭付落石防護擁壁を開発し、落石衝撃力から壁体の損傷防止や基礎杭の規模を最小限にするために、二層緩衝構造を併用した実規模の衝撃載荷実験を実施して、提案の工法が優れた耐衝撃性能を有することを検証⁵⁾⁶⁾した上で現場への適用を行っている。

一方、便覧における重力式擁壁の設計手法には、以下の様な問題点⁷⁾が指摘されている。

- ① 落石の運動エネルギーを地盤の変形のみで吸収するものと仮定している。このため、地盤が固くて変形しにくい場合には、擁壁の規模を大きくしなければならない。
- ② 落石衝突時における擁壁の有効抵抗長は、擁壁高さの4倍と仮定して設計しているが、この根拠が明確ではない。

本研究では、これらの問題点を明らかにし、現行の落石防護擁壁の保有性能を把握するための実証実験を実施し、合理的な設計法を確立することを最終目標としている。ここでは、落石防護擁壁の耐衝撃挙動を把握するために実施した基礎実験の結果について報告するものである。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

実験に用いた擁壁模型の形状寸法、配筋状況を図-1に示す。擁壁の形状寸法は、高さ $H=1.0\text{m}$ 、天端および基部の壁厚がそれぞれ $B1=0.2\text{m}$ 、 $B2=0.5\text{m}$ 、擁壁背面

（重錘衝突面）は鉛直、擁壁前面は $1:0.3$ の勾配となっている。擁壁の延長は $L=0.5\text{m}$ であり、それぞれを ϕ

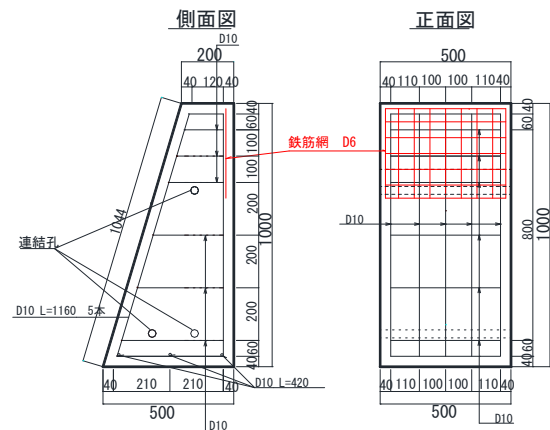


図-1 擁壁模型の形状寸法・配筋状況

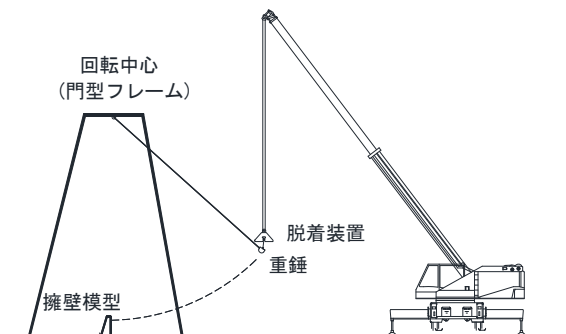


図-2 実験概要図



写真-1 実験風景

25mm の連結ボルト 3 本で連結し延長を変化できる構造とした。回転挙動に着目するため、破壊を生じないよう RC 構造とした。また、実験時のコンクリートの圧縮強度は 59.3N/mm^2 である。

2. 2 実験方法

落石防護擁壁は、一般的に良質な支持層に根入れされていることから、本実験では擁壁の回転挙動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 30.5cm、高さが 24cm、底部の高さ 12cm 部が球状で、質量が 110kg 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、脱着装置による振り子運動によって作用させることとした。また、載荷方法としては落下高さを徐々に増加させ繰り返し載荷を行っている。

測定項目は、重錘の頂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、非接触型レーザ変位計による擁壁の変位波形、高速度カメラによる重錘速度、擁壁の変位・回転角度である。高速度カメラによる撮影は有効画素数 $1,024 \times 1,024$ 、フレームレート 1,000 コマ (枚) / 秒 (1 ms (1/1,000 秒)) としている。衝撃実験時の各種応答波形については、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一括収録を行っている。また、実験終了後にひび割れ状態を確認している。実験の概要図を図-2に、実験風景を写真-1に示す。

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。実験ケースは擁壁延長 $L=0.5\text{m}$ (模型 1 基)、 $L=1.0\text{m}$ (2 基連結)、 $L=1.5\text{m}$ (3 基連結)とした場合の 3 ケースであり、重錘の

衝突速度を変え実験を行っている。重錘衝突位置は、H を擁壁高さとして基部から $0.8H(0.8\text{m})$ とした。

実験は目標速度となるように吊り上げ高さをあらかじめ設定して実施していたが、重錘の離れ方など一部不具合があり、高速度カメラより測定した重錘の衝突速度で整理している。

3. 実験結果および考察

3. 1 擁壁の挙動

写真-2に擁壁延長毎の重錘衝突時挙動を時系列に示す。 $L=0.5\text{m}$ は転倒直前のケースである $v=4.3\text{m/s}$ を、 $L=1.0\text{m}$ 、 1.5m は重錘衝突速度が最大であるケース $v=6.4\text{m/s}$ 、 $v=9.8\text{m/s}$ を最大回転角となる時間を含めて時系列に示している。

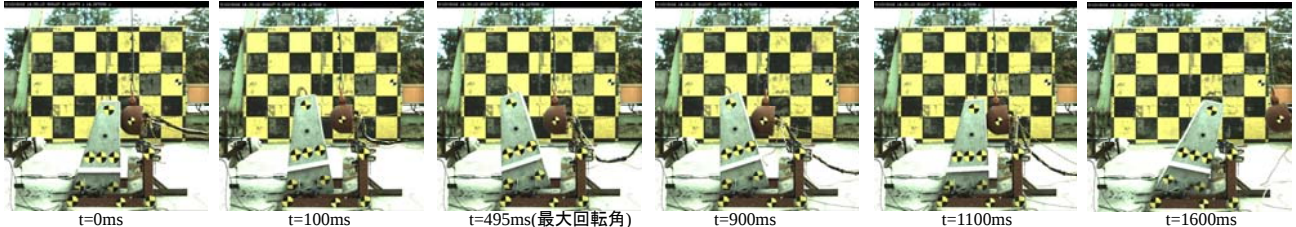
擁壁の挙動としては、重錘が擁壁に衝突することにより、擁壁はつま先部分を中心とした回転となり、かかと部分が浮き上がる。また、ある角度まで回転すると、擁壁は後方へ逆回転し、元の姿勢に戻る。その後、擁壁はかかと部分を中心にさらに後方へと逆回転を続ける。ある角度まで逆回転すると、擁壁は順回転に戻り元の姿勢に戻っていく。

図-3に各ケースにおける擁壁重心の最大回転角と最

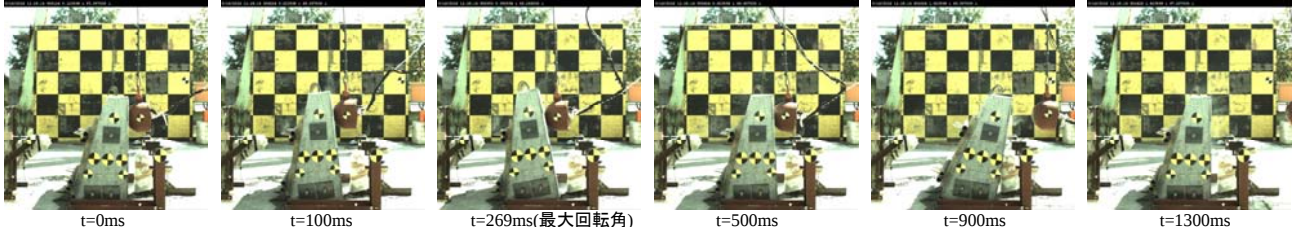
表-1 実験ケース一覧

No	擁壁形状寸法(m)				衝突位置	載荷方法	重錘衝突速度 (m/s)
	高さ(H)	上幅(B1)	下幅(B2)	延長(L)			
1	1.0	0.2	0.5	0.5	0.8H	繰り返し	1.6, 1.9, 2.6, 3.1, 3.7, 4.3, 4.6
2				1.0			1.7, 2.4, 3.7, 5.1, 6.4
3				1.5			1.9, 2.8, 4.0, 5.5, 7.2, 8.5, 9.8

$L=0.5\text{m}$ $V=4.3\text{m/s}$ 最大回転角 26.0°



$L=1.0\text{m}$ $V=6.4\text{m/s}$ 最大回転角 12.4°



$L=1.5\text{m}$ $V=9.8\text{m/s}$ 最大回転角 12.5°

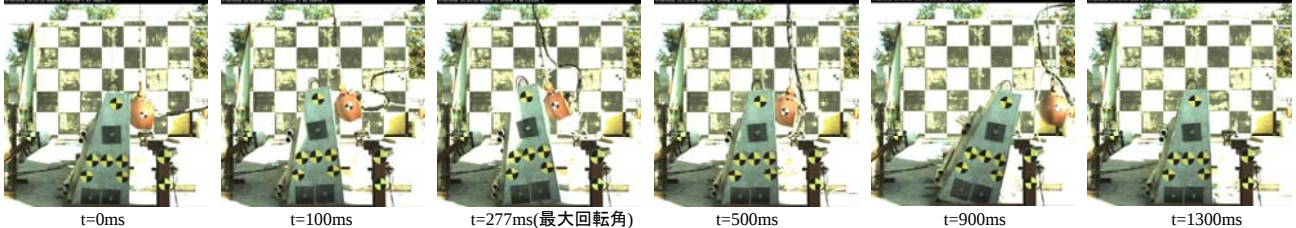


写真-2 重錘衝突時の挙動

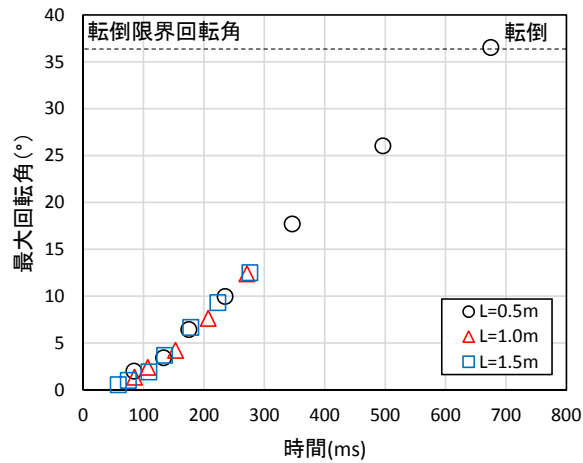


図-3 最大回転角と時間の関係

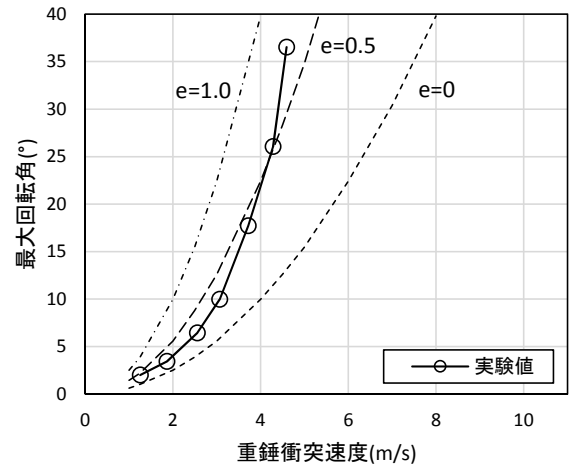


図-6 最大回転角と便覧式の比較 (L=0.5m)

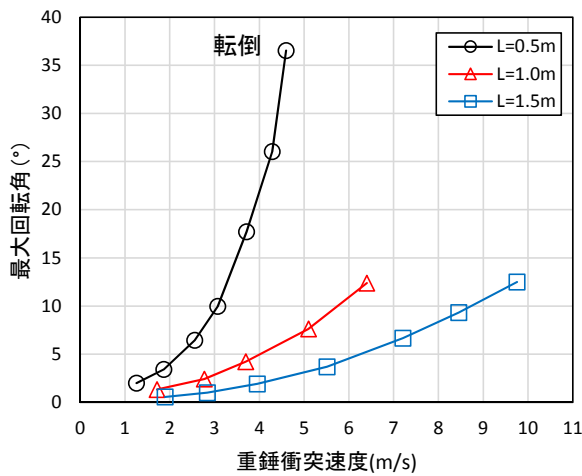


図-4 最大回転角と速度の関係

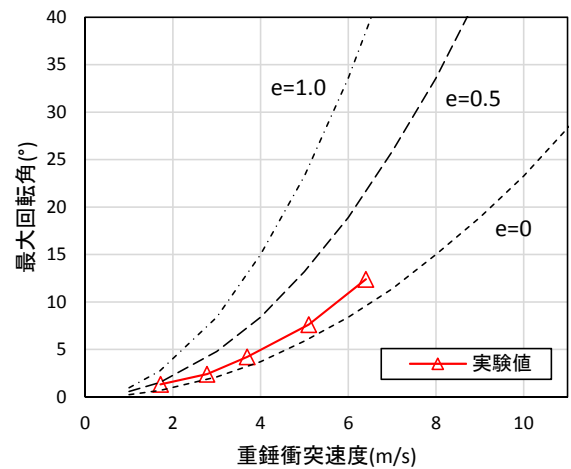


図-7 最大回転角と便覧式の比較 (L=1.0m)

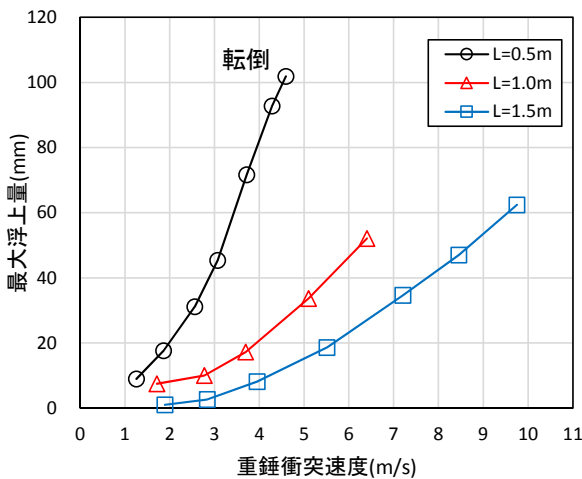


図-5 最大回転角と浮上量の関係

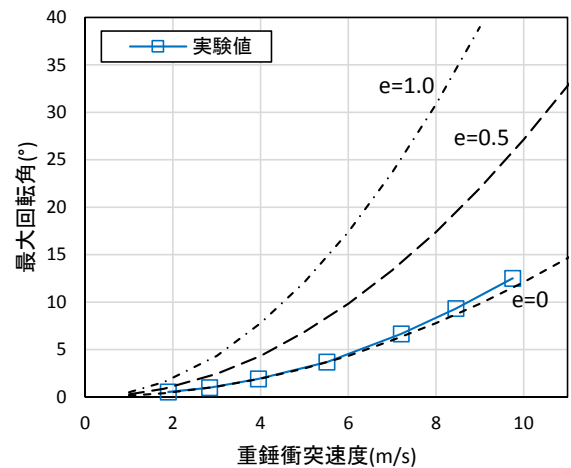


図-8 最大回転角と便覧式の比較 (L=1.5m)

大回転角に到達する時間の関係を示す。なお、図中には静的安定計算より求めた転倒限界回転角(36.2°)を示している。

擁壁の最大回転角が大きくなると最大回転角に到達する時間も長くなる。また、同一擁壁断面であれば擁壁の延長に関わらず回転角速度が一定であることがわかる。

図-4に重錘衝突速度と擁壁の最大回転角との関係、図-5に重錘衝突速度と擁壁重心での最大浮上量の関係

を示す。いずれの場合も重錘衝突速度が大きくなると最大回転角、最大浮上量は増加している。擁壁延長 L=0.5m では、衝突速度が 4.6m/s のときに転倒している。また、最大回転角 10° に到達する速度で比較すると、L=0.5m では $v \div 3\text{m/s}$ 、L=1.0m では $v \div 6\text{m/s}$ (2 倍)、L=1.5m では $v \div 9\text{m/s}$ (3 倍)となっている。

3. 2 落石対策便覧式との比較

便覧では、落石衝突時の反発係数 e は 1 (完全弾性衝

突)と仮定することとなっている。便覧での式に反発係数 e を変えた場合の最大回転角について、今回の実験ケースと比較した。図-6、7、8に延長毎の最大回転角と反発係数 e を変えた場合の便覧式の関係を示す。

$L=0.5\text{m}$ の場合、実験の結果は便覧式では反発係数 e を 0.5 とした場合に近い結果となった。延長が $L=1.0\text{m}$ 、 $L=1.5\text{m}$ と大きくなるのに従い反発係数 e は 0 に近づく傾向にある。

3.3 重錘衝撃力と重錘衝突速度の関係

図-9に最大重錘衝撃力と重錘衝突速度の関係を示す。実験結果の最大重錘衝撃力 P は、重錘加速度に重錘質量を乗じて評価している。また、図には式(1)の振動便覧式で求めた衝撃力も示した。

$$P=2.108 \cdot (m \cdot g)^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot h^{3/5} \quad (1)$$

ここに、 P ：落石衝撃力(kN)、 m ：重錘質量(ton)、 g ：重力加速度(m/s^2)、 λ ：ラーメの定数(kN/m^2)、 h ：重錘落下高さ(m)である。ここで、 $h=v^2/2g$ とする。

重錘衝突速度の増加に対して、最大重錘衝撃力は増加しているが、 $L=1.5\text{m}$ では衝突速度が大きくなると増加率は減少する傾向にある。実験は繰り返し载荷なので損傷の影響があると考えられる。また、 $L=1.0\text{m}$ が $L=0.5\text{m}$ よりも最大重錘衝撃力が小さいのは、 $L=1.0\text{m}$ の場合、重錘衝突位置が面取りしている擁壁の結合部分となっていることが影響していると考えられる。

3.4 損傷状況

写真-3に $L=1.5\text{m}$ のケースの実験終了時の写真を示す。(a)は擁壁背面(重錘衝突面)、(b)は擁壁前面および上面を撮影したものである。擁壁上面のひび割れは $v=2.8\text{m/s}$ の実験時に発生し、载荷毎に徐々に進展している。重錘衝突面には衝突位置より約 18cm 下方に曲げせん断型の水平ひび割れが $v=8.5\text{m/s}$ の実験時より発生している。また、擁壁前面については擁壁上面からのひび割れが $v=4.0\text{m/s}$ の実験時に伸展し、 $v=9.8\text{m/s}$ には約 35cm 下方まで達した状況となっている。

実験では、擁壁延長は高さの 1.5 倍であったが、擁壁模型を鉄筋等で補強していたのにもかかわらず、損傷が大きい状況を確認できる。便覧における落石衝突時における擁壁の有効抵抗長は、擁壁高さの 4 倍と仮定して設計するため、一般的な従来の無筋コンクリート落石防護擁壁では、転倒する前にコンクリートが破壊するものと考えられる。

4. まとめ

本研究では落石防護擁壁の合理的な設計法を確立することを目的として、基礎実験を実施した。ここでは、落石防護擁壁の耐衝撃挙動について、以下のことが明らかになった。

- 1) 擁壁断面が同じであれば擁壁の延長に関わらず最大回転角に到達する回転角速度はほぼ一定である。
- 2) コンクリート基礎上での実験では、擁壁延長が長くなると、反発係数 e は 0 (完全非弾性衝突) に近づく傾向にある。
- 3) 従来の無筋コンクリートの落石防護擁壁では、転倒する前にコンクリートが破壊に至ると考えられる。

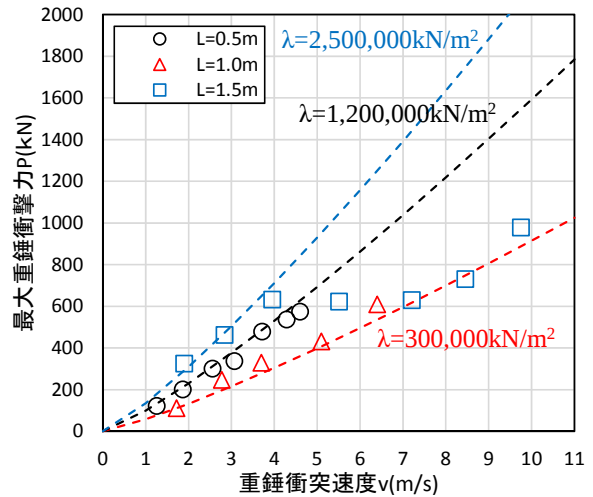


図-9 重錘衝撃力と重錘衝突速度の関係



(a) 擁壁背面(重錘衝突面) (b) 擁壁前面および上面

写真-3 実験終了時の擁壁状況 ($L=1.5\text{m}$)

今後は、有効抵抗長と落石防護擁壁の破壊に至る挙動について確認する予定である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧，2000.6.
- 2) 岸徳光，川瀬良司，今野久志，岡田慎哉：二層緩衝構造を用いた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，土木学会，Vol. 48A, pp.1567-1578, 2002.3
- 3) 岸徳光，川瀬良司，今野久志，岡田慎哉：落石防護擁壁用途二層緩衝構造の伝達衝撃力算定式の定式化，構造工学論文集，土木学会，Vol. 49A, pp.1289-1298, 2003.3
- 4) 川瀬良司，岸徳光，今野久志：二層緩衝構造を設置した落石防護擁壁の転倒安定性評価法に関する一検討，構造工学論文集，土木学会，Vol. 50A, pp.1327-1336, 2004.3
- 5) 川瀬良司，岸徳光，今野久志，鈴木健太郎：二層緩衝構造と杭基礎を併用した壁式落石防護擁壁の開発に関する数値解析的検討，構造工学論文集，Vol.52A, pp.1285-1294, 2006.3
- 6) 今野久志，岸徳光，川瀬良司，石川博之：杭付形式RC落石防護擁壁の耐衝撃性能に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.3, pp.751-756, 2007.7
- 7) 公益社団法人 地盤工学会：落石対策工の設計法と計算例, pp213, 2014.12