

落石防護擁壁の耐衝撃挙動に関する重錘衝撃実験

Impact loading tests of rockfall protection retaining wall

山澤文雄[†], 今野久志^{*}, 西弘明^{**}, 小室雅人^{***}, 岸徳光^{****}

Fumio Yamasawa, Hisashi Konno, Hiroaki Nishi, 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)

^{**}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)

^{***}博(工), 室蘭工業大学准教授, 大学院工学研究科くらし環境系領域(〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

^{****}工博, (独) 国立高専機構釧路工業高等専門学校, 校長 (〒084-0916 釧路市大楽毛西2-32-1)

In this study, in order to investigate impact resistant capacity of existing rockfall protection retaining wall, weight impact loading tests of the small-scale models were conducted taking foundation material, length of the wall, mass of the impacting weight as variables. The results obtained from this study were as follows: 1) angular velocity at the wall reaching the maximum rotation angle was a constant irrespective of kind of the foundation material and magnitude of length of the retaining wall; and 2) the coefficient of restitution e of the impacting weight tends to be zero due to increasing length of the retaining wall.

Key Words: rockfall protection retaining wall, Impact loading test, concrete foundation, gravel foundation

キーワード: 落石防護擁壁, 衝撃載荷試験, コンクリート基礎, 砂利基礎

1. はじめに

我が国の海岸線や山岳部の道路沿いには、小規模落石等に対する道路防災施設として、コンクリート製落石防護擁壁（以下、単に落石防護擁壁あるいは擁壁）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）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。

落石防護擁壁に関する研究事例は限られており、便覧の設計法の元となる松尾らの研究²⁾や、擁壁が剛体運動するものと仮定し運動量保存の法則を適用した右城らの研究³⁾がある。著者らのグループでは、コンクリート基礎に設置された無筋コンクリートおよび鉄筋コンクリート製擁壁の転倒安定に着目し、実規模衝撃実験や3次元弾塑性衝撃応答解析を実施している⁴⁾。

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⁵⁾が指摘されている。

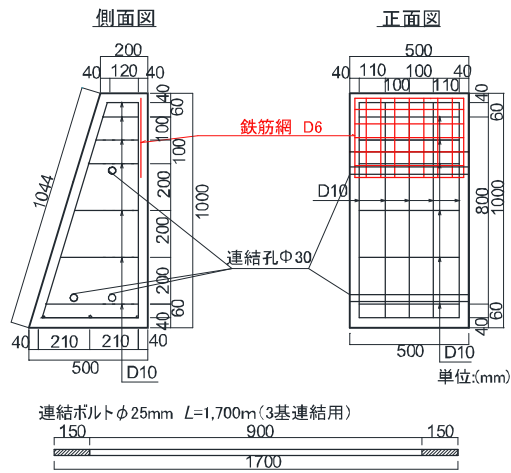
- ① 落石の運動エネルギーを地盤の変形のみで吸収するものと仮定している。このため、地盤が固くて変形しにくい場合には、擁壁の規模を大きくしなければならない。
- ② 落石衝突時における擁壁の有効抵抗長は、擁壁高さの4倍と仮定し設計しているが、この根拠が明確ではない。

本研究グループでは、既存の落石防護擁壁に関する耐衝撃保有性能を把握するための実証実験を実施し、合理的な耐衝撃設計法を確立することを最終目標としている。

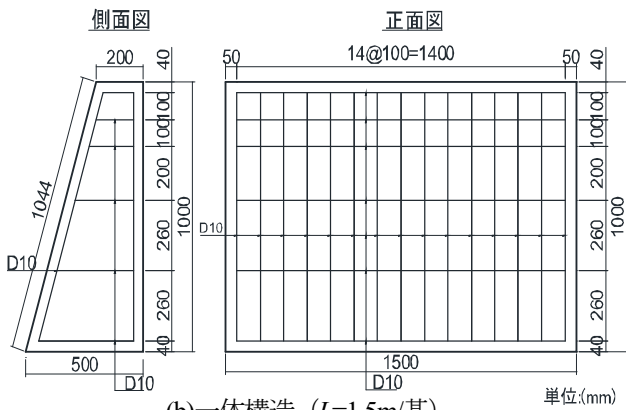
そのため、本研究では上述の問題点①に関連して、現行設計で仮定している落石防護擁壁の剛体挙動に着目し、落石防護擁壁の耐衝撃挙動を把握することを目的として、基礎地盤、擁壁延長および重錘質量を変化させた場合の重錘衝撃実験を実施して、重錘衝突時の動的挙動や衝撃力および反発係数について検討を行った。

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: yamasawa-f22aa@ceri.go.jp



(a) 連結構造 (L=0.5m/基)



(b) 一体構造 (L=1.5m/基)

図-1 擁壁模型の形状寸法・配筋状況

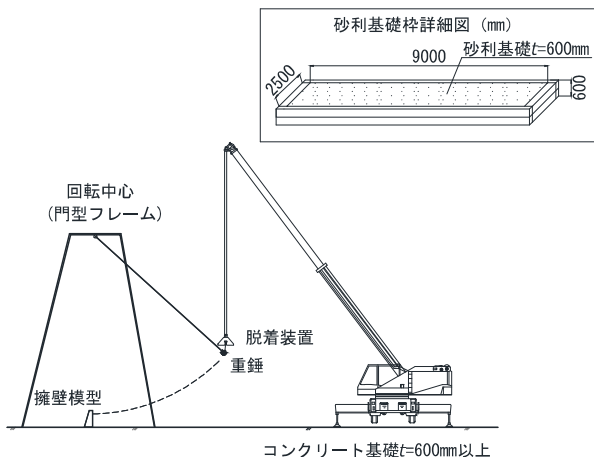


図-2 実験概要図

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1 には、実験に用いた擁壁模型の形状寸法、配筋状況を示している。擁壁の形状寸法は、実構造で多用されている断面の1/2程度を想定し、高さ $H=1.0$ m、天端



(a) コンクリート基礎



(b) 砂利基礎

写真-1 実験状況

および基部の壁厚をそれぞれ $B1 = 0.2$ m, $B2 = 0.5$ m とし、擁壁背面(重錘衝突面)を鉛直、擁壁前面を1:0.3の勾配としている。擁壁の構造は、①単体の擁壁の幅を $L=0.5$ mとし、 $\phi 25$ mmの連結ボルト3本を用いて連結し延長を変化させることができる構造とした場合(図-1(a))、および②延長1.5mの一体構造(図-1(b))とした場合の2種類とした。本実験では擁壁の剛体挙動に着目するため、試験体にできるだけ破壊を生じないように高強度の鉄筋コンクリート構造とした。実験時のコンクリートの圧縮強度は連結構造では 59.3 N/mm²、一体構造では 54.9 N/mm²であった。また、擁壁の質量は、連結構造では平均425kg(0.5m/基)、一体構造では平均1,270kg(1.5m/基)であった。

2.2 実験方法

基礎地盤は、現場の基礎条件の下限値(N 値10程度)を想定した砂利基礎と支持条件が明確なコンクリート基礎の2種類とした。砂利基礎は、幅9.0m、奥行き2.5m、高さ0.6mの枠内に砂利を敷均し、タンピングランマーを用いて締め固めた。砂利は、13.2 mm, 2.36 mm, 0.6 mmのふるい通過率がそれぞれ60.8%, 26.7%, 14.3%

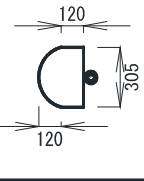
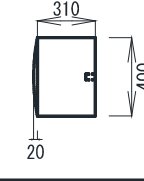
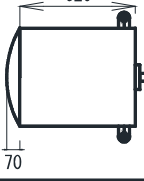
形状 寸法 (mm)			
質量	110kg	340kg	890kg

図-3 重錘形状寸法・質量

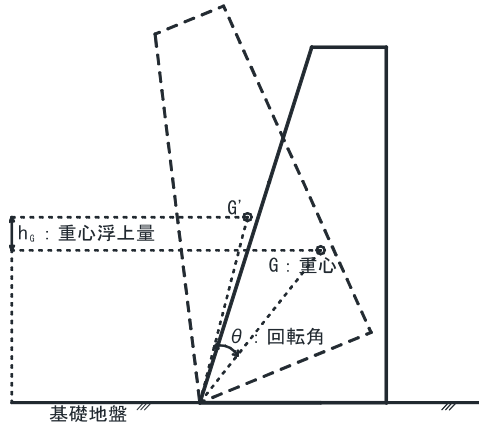


図-4 重心浮上量および回転角

の粒度分布である小樽市見晴産の碎石 (0~30 mm 級) を使用した。また、一般的に擁壁は良質な支持層に根入れされており水平移動が少ないと考えられることから、回転挙動のみに着目するために、ストッパーを設けて擁壁の水平移動を拘束することとした。

図-2には実験概要図、写真-1(a)(b)にはそれぞれコンクリート基礎および砂利基礎での実験状況を、また図-3には実験に使用した重錘形状寸法および質量を示している。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。

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、高速度カメラによる重錘衝突速度、擁壁の重心浮上量および回転角(図-4)である。高速度カメラによる撮影は有効画素数 1,024×1,024、フレームレートが 1,000 fps としている。重錘衝撃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一括収録を行っている。また、実験終了後にひび割れ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。実験ケースは、重錘質量 110kg を用い、基礎をコンクリートまたは砂利とした場合に対して、擁壁延長を $L=0.5\text{m}$ (模型 1 基)、 $L=1.0\text{m}$ (2 基連結)、 $L=1.5\text{m}$ (3 基連結) と変化させた場合と、コンクリート基礎を用いて擁壁延長を 1.5 m の一体構造とし重錘質量を変化させた場合であ

表-1 実験ケース一覧

ケース名	基礎	擁壁形状寸法(m)				衝突位置	重錘質量 $m(\text{kg})$	載荷方法	構造形式	重錘衝突速度 $v(\text{m/s})$							
		高さ (H)	上幅 (B1)	下幅 (B2)	延長 (L)												
C0.5-C1	コンクリート	1.0	0.2	0.5	0.8H	0.8H	110	繰返し	連結	1.3,1.9,2.6,3.1,3.7,4.3,4.6*							
C1.0-C1										1.7,2.8,3.7,5.1,6.4							
C1.5-C1										1.9,2.8,4.0,5.5,7.2,8.5,9.8							
C1.5-U1									一体	2.1,2.9,4.2,5.0,5.7,7.2,8.3,10.1,10.2							
C1.5-U3										1.0,1.7,2.3,2.9,3.5,4.1,4.6							
C1.5-U9										1.2,1.7,2.1,2.4,2.8*							
G0.5-C1									砂利	1.0	0.5	0.8H	0.8H	110	繰返し	連結	1.8,2.6,3.9,4.4,4.9*
G1.0-C1																	2.1,2.9,3.8,5.2,6.7,7.9
G1.5-C1																	1.9,2.9,3.8,5.2,7.0,8.4,9.5

*: 転倒時速度

る。載荷方法は、重錘の衝突速度を漸増させる繰返し載荷法を適用した。ケース名は、第一項目に基礎の種類 (C: コンクリート, G: 砂利)、第二項目に擁壁延長 ($0.5:L=0.5\text{m}$, $1.0:L=1.0\text{m}$, $1.5:L=1.5\text{m}$)、第三項目には構造形式 (C: 連結, U: 一体) と後続に重錘質量 (1: 110kg, 3: 340kg, 9: 890kg) を示し、それぞれをハイフンで繋いで表している。重錘衝突位置は、 H を擁壁高さとして基部から $0.8H$ (0.8 m) としている。

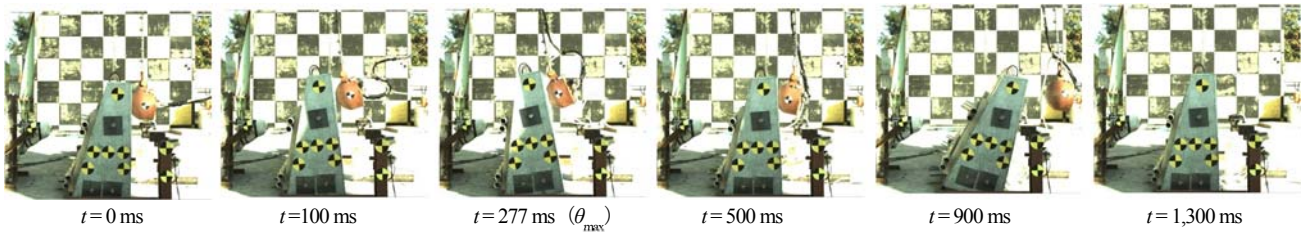
砂利基礎の場合には、実験を開始する前に簡易動的コーン貫入試験 (地盤工学会基準 JGS1433) にて換算 N 値を確認しており、G0.5-C1 の場合には平均 N 値が 11, G1.0-C1 と G1.5-C1 の場合には平均 N 値がそれぞれ 13, 17 であった。砂利基礎の場合には、繰返し載荷による基礎への影響を考慮し、幅 9 m の砂利基礎の範囲内で擁壁設置位置を変えて実験を行った。なお、実験は目標とする重錘衝突速度となるように吊り上げ高さをあらかじめ設定して実施したが、重錘の離れ方等に一部不具合があり、高速度カメラにより測定した実測衝突速度で整理している。

3. 実験結果および考察

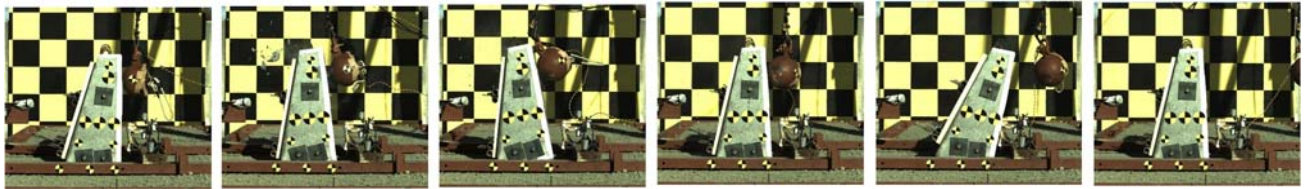
3.1 重錘衝突時における擁壁の動的挙動

写真-2には、代表的なケースにおける擁壁の衝撃耐荷挙動を時系列的に示している。

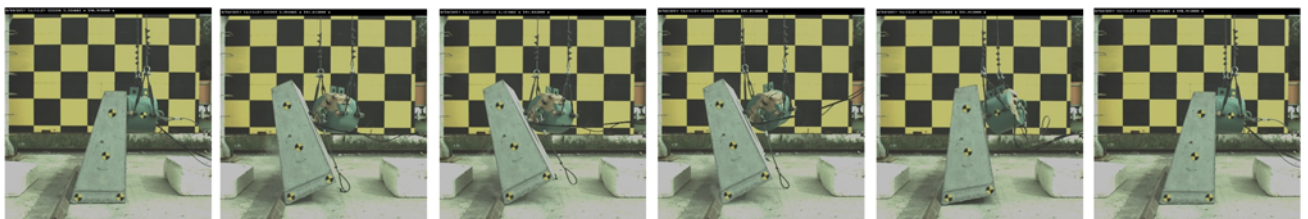
擁壁の動的挙動は、重錘衝突時に擁壁はつま先部分を中心として回転をして、かかと部分が浮き上がる。その



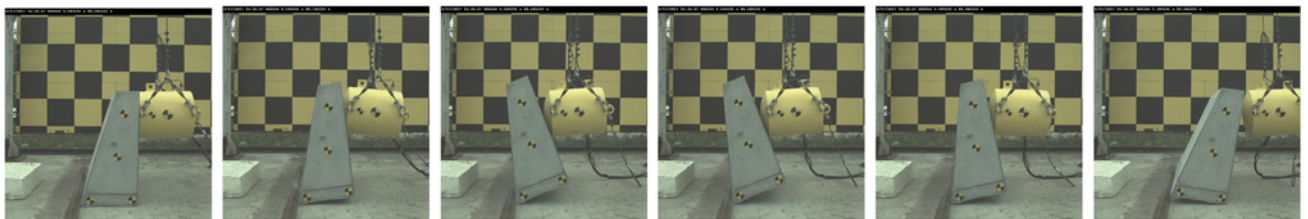
(a) C1.5-C1 ($v=9.8$ m/s, $\theta_{\max}=12.5^\circ$)



(b) G1.5-C1 ($v=9.5$ m/s, $\theta_{\max}=11.7^\circ$)



(c) C1.5-U3 ($v=4.6$ m/s, $\theta_{\max}=28.2^\circ$)



(d) C1.5-U9 ($v=2.4$ m/s, $\theta_{\max}=22.2^\circ$)

写真-2 重錘衝突時の挙動

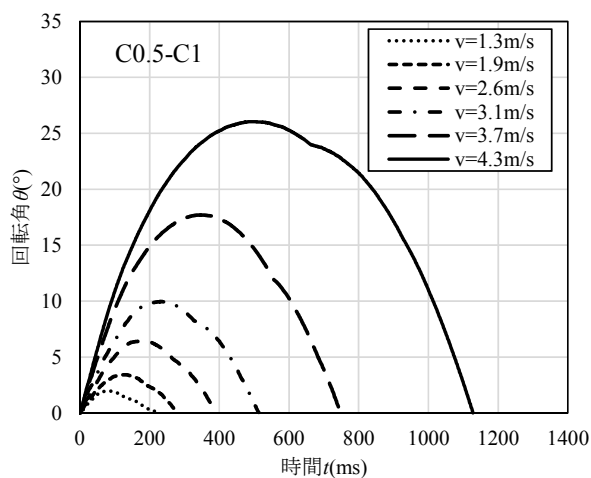


図-5 擁壁重心の回転角と時間の関係

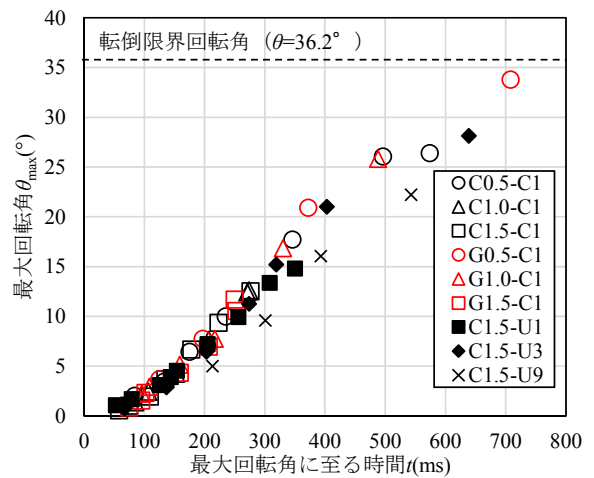


図-6 最大回転角とその到達時間の関係

後、最大回転角で一旦静止した後逆回転し、元の姿勢に復元する。その後、擁壁はかかと部分を中心に反転を続ける。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復元する。

図-5には、C0.5-C1のケースに対する重錘が衝突した後の時間と擁壁重心の回転角の関係を示している。重錘速度の増加により、最大回転角が大きくなり、かつ最大回転角に到達する時間も長くなっている。また、図-6には、各ケースにおける擁壁重心の最大回転角と最大回転角に到達する時間の関係を示している。黒色がコンクリート基礎、赤色が砂利基礎の結果である。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、重錘質量が等しくかつ擁壁断面が同一の場合には、基礎や擁壁の延長に関わらず最大回転角に到達する角速度がほぼ一定であることや、重錘の質量が大きくなると若干最大回転角に到達する角速度は遅くなる傾向にあることが分かる。

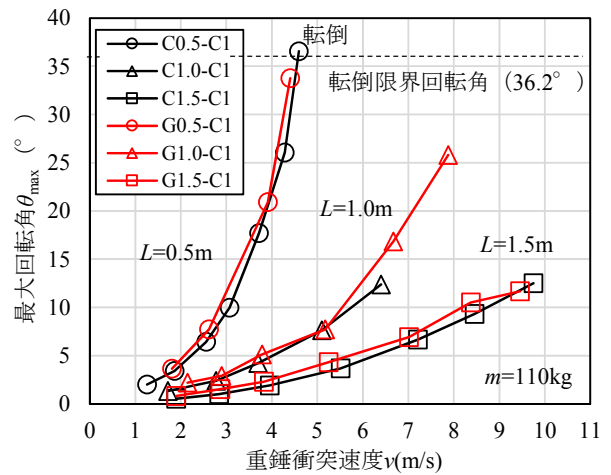
図-7(a)には擁壁延長および基礎を変化させた場合、(b)には重錘の質量を変化した場合の重錘衝突速度と擁壁の最大回転角の関係を示している。いずれのケースも重錘衝突速度が大きくなるにつれて最大回転角は増加していることが分かる。

図-7(a)のC0.5-C1の場合には重錘衝突速度 $v=4.6$ m/s時に転倒、G0.5-C1の場合には $v=4.4$ m/s時点では転倒には至っていないが、 $v=4.8$ m/s時点で転倒に至っている。重錘質量が等しい場合には、擁壁延長が短くなると同一の衝突速度下で最大回転角が大きくなり、擁壁延長が短いほど最大回転角は急激に増加している。コンクリート基礎と砂利基礎のケースを比較すると、重錘衝突速度が等しい場合には、最大回転角は砂利基礎の方がコンクリート基礎よりも若干大きくなる傾向にあるが、ほぼ同様な挙動を示している。

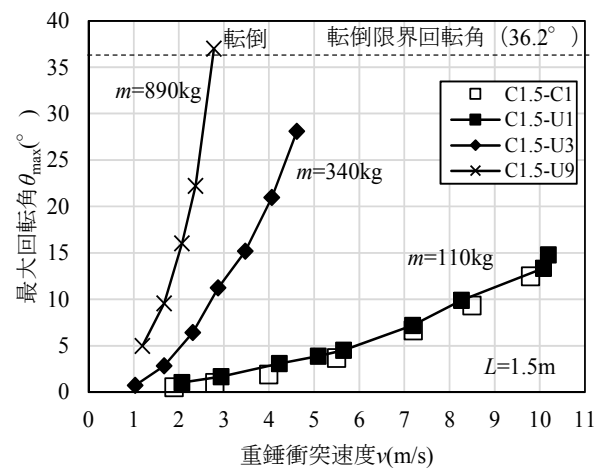
図-7(b)において、C1.5-C1とC1.5-U1の挙動が類似していることから、連結構造の回転挙動は一体化した構造の場合と同様に扱うことができる。また、重錘質量が大きくなると同じ重錘衝突速度でも最大回転角が大きくなる。

基礎地盤の変形の有無による擁壁の動的挙動への影響を確認するために、浮上量を算出した。図-8には、擁壁延長および基礎を変化させた場合の重錘衝突速度と擁壁重心での最大重心浮上量の関係を示している。いずれのケースも重錘衝突速度が大きくなるにつれて最大重心浮上量は増加することが分かる。最大重心浮上量は、コンクリート基礎と砂利基礎ではほぼ同程度である。

砂利地盤の場合において、実験終了後の擁壁のつま先部やかかと部に擁壁の回転に伴う掘れが若干確認できたが、本実験の基礎条件では回転挙動に関しては大きな影響のないことが明らかになった。



(a) 擁壁延長および基礎を変化させた場合



(b) 重錘質量を変化させた場合

図-7 最大回転角と重錘衝突速度の関係

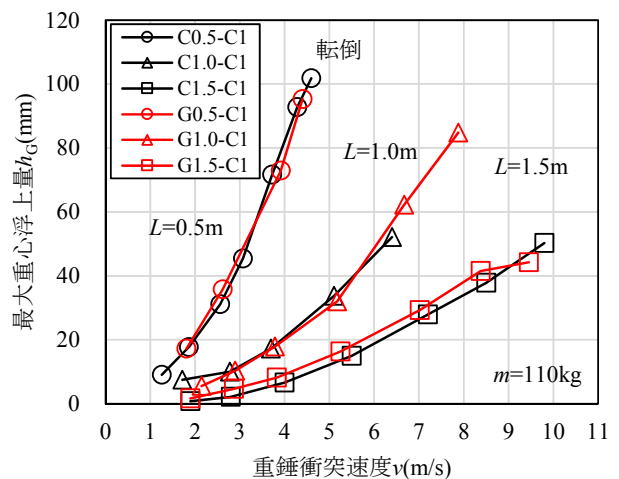


図-8 最大重心浮上量と重錘衝突速度の関係

3.2 重錘衝撃力

図-9には、C1.5-C1における重錘衝撃力波形を示している。重錘衝撃力は、重錘加速度に重錘質量を乗じて評価した。いずれのケースにおいても、重錘衝撃力の波動継続時間は基礎の種類に関係なく1 ms程度であるこ

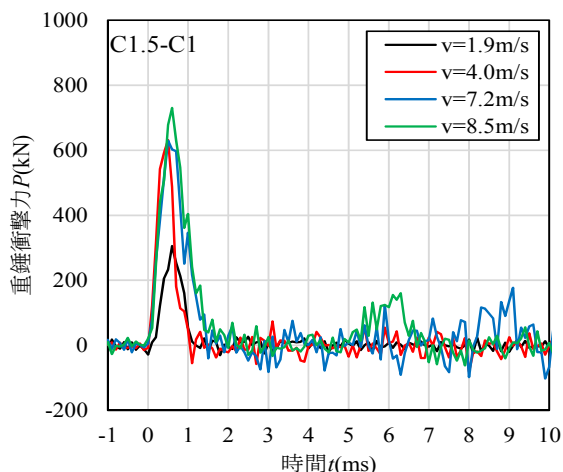


図-9 重錘衝撃力波形 (C1.5-C1 の場合)

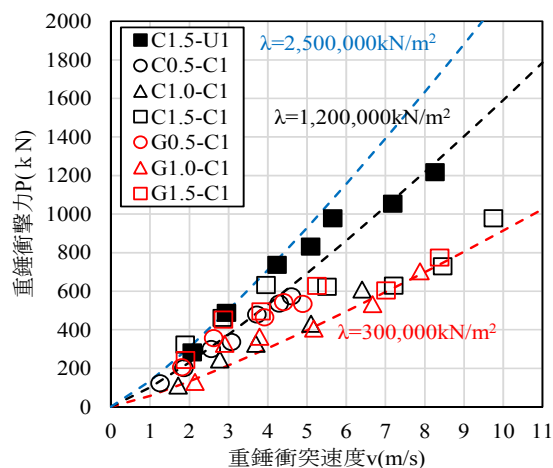
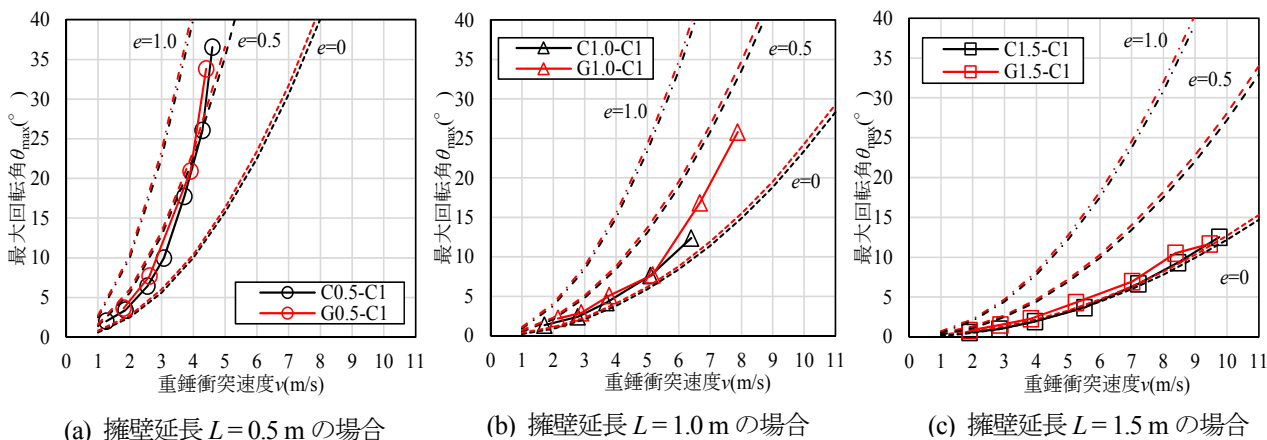


図-10 重錘衝撃力と重錘衝突速度の関係

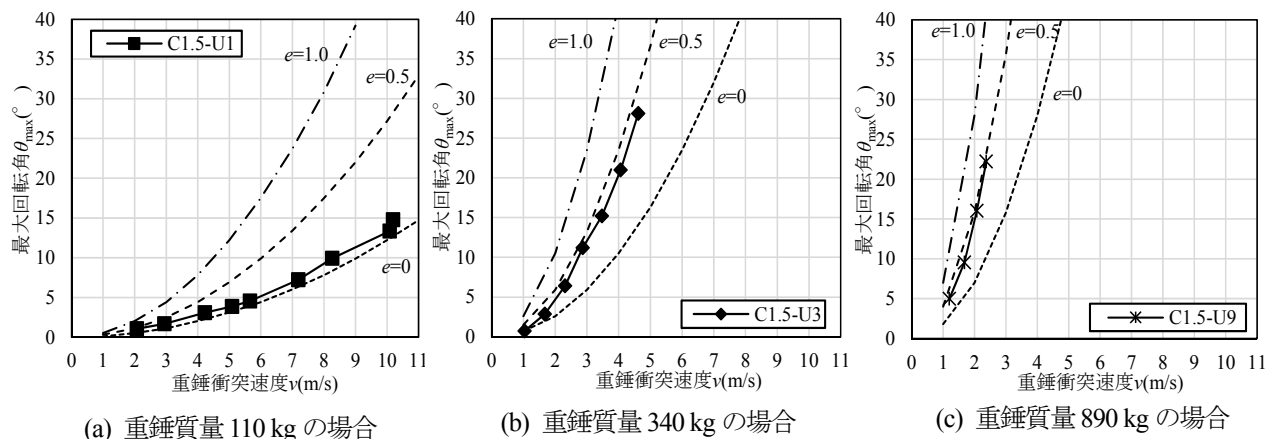


(a) 擁壁延長 $L=0.5$ m の場合

(b) 擁壁延長 $L=1.0$ m の場合

(c) 擁壁延長 $L=1.5$ m の場合

図-11 回転角と重錘衝突速度の関係 (擁壁延長および基礎を変化)



(a) 重錘質量 110 kg の場合

(b) 重錘質量 340 kg の場合

(c) 重錘質量 890 kg の場合

図-12 回転角と重錘衝突速度の関係 (重錘質量を変化)

とが分かる。

図-10には、質量 110 kg の重錘を使用した場合における最大重錘衝撃力と重錘衝突速度の関係を示している。また、図には式(1)の振動便覧式で求めた衝撃力も示している。

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

ここに、 P : 落下衝撃力(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。

図より、最大重錘衝撃力は基礎の違いによる差は見られず、重錘衝突速度の増加に対して各ケースとも最大重錘衝撃力は増加しているが、衝突速度が大きくなると増加率は減少する傾向にあることが分かる。これは、本実験が繰返し载荷であるため、衝突部の損傷が影響しているものと考えられる。また、一体構造よりも連結構造の場合に重錘衝撃力の増加率が小さくなっているのは、中

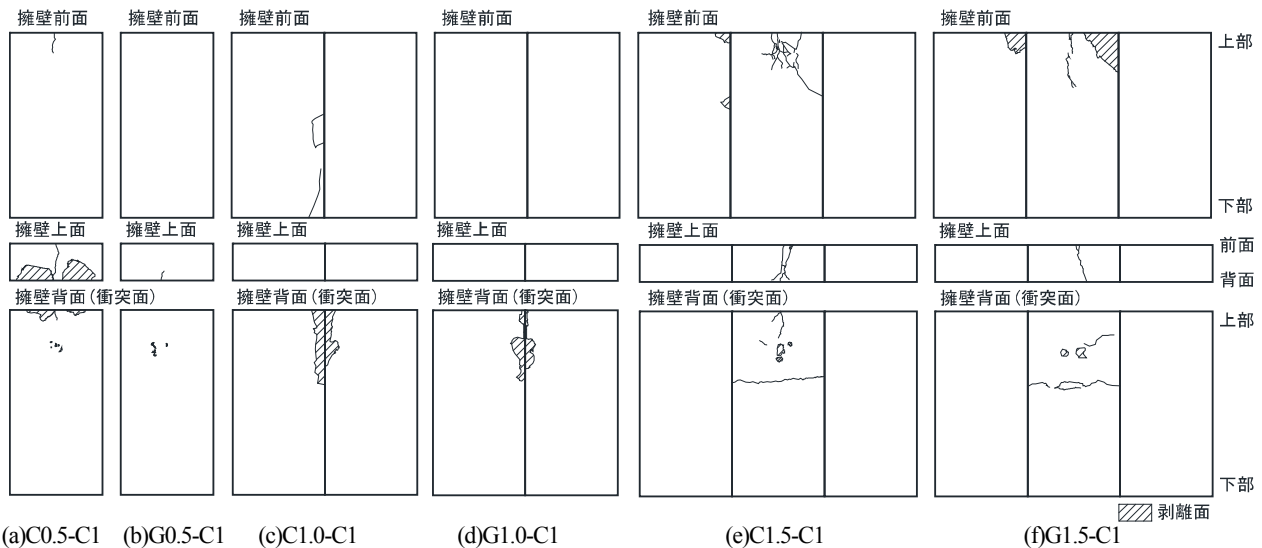


図-13 実験終了時の損傷状況（連結構造）

中央部の衝突ブロックで5mm程度のずれが生じたことから、連結箇所では若干衝撃エネルギーが吸収されたものと推察される。C1.0-C1とG1.0-C1の場合における最大重錘衝撃力は、C0.5-C1とG0.5-C1の場合よりも小さい。これは、擁壁延長 $L=1.0\text{m}$ の場合には、重錘衝突位置が面取りを施している結合部分になっていることが影響しているものと推察される。

3.3 反発係数

便覧における擁壁の設計では、落石と擁壁の衝突を安全側に考え、完全弾性衝突（反発係数 $e=1$ ）と仮定している。ここでは、便覧における設計の考え方（計算例⁶⁾）を参考に、反発係数 $e=1$ （完全弾性衝突）、 0.5 、 0.0 （完全非弾性衝突）と変化した場合における擁壁の回転角を算定し、実験結果と比較を行うこととした。

図-11には、擁壁延長および基礎を変化させた場合における重錘衝突速度と最大回転角との関係を示している。また、図-12には、重錘質量を変化させた場合の重錘衝突速度と最大回転角との関係を示している。

図より、以下の事項が明らかになった。すなわち、① 擁壁延長の短いC0.5-C1、G0.5-C1の場合には、回転角は反発係数 $e=0.5$ とした場合の計算値に近似する。② 擁壁延長を長くすると、反発係数 $e=0$ とした場合の計算値に漸近する傾向を示す。③ 擁壁延長が同じで重錘質量が小さい場合には、回転角は反発係数 $e=0$ とした場合の計算値に近似する。

また、高速度カメラ映像から得られた重錘速度と擁壁の速度を用いて反発係数を評価算定した。衝突後の擁壁の速度には重錘衝突直後の最大瞬間速度を用い、重錘のそれはその時点の速度とした。実験から算出した反発係数はバラツキはあるが、 $e<0.5$ となっており、重錘衝突速度が速くなると反発係数が小さくなる傾向にあった。

3.4 損傷状況について

図-13には、連結構造での実験終了時の損傷状況を示している。C1.5-C1の場合には、 $v=2.8\text{m/s}$ の実験時に擁壁上面にひび割れが発生した。その後、ひび割れは繰返し载荷の影響によって徐々に進展した。重錘衝突面には、 $v=8.5\text{m/s}$ の実験時に、衝突位置より約18cm下方に水平ひび割れが発生している。また、擁壁前面については、 $v=4.0\text{m/s}$ の実験時に擁壁上面からのひび割れが進展し、 $v=9.8\text{m/s}$ には約35cm下方まで達する状況となっている。G1.5-C1の場合には、 $v=8.3\text{m/s}$ 実験時に重錘衝突面に衝突位置より約20cm下方に水平ひび割れが発生している。

連結構造では、損傷は擁壁前面・擁壁背面（衝突）共に重錘が衝突するブロックのみに集中している。また、コンクリート基礎と砂利基礎を設置した場合における擁壁の損傷状況を比較すると、载荷回数等の違いはあるが、砂利基礎の場合がコンクリート基礎の場合よりも若干軽微になる傾向にあることが分かる。このことより、砂利基礎の場合には衝突時の衝撃力をより吸収する傾向にあることが推察される。

図-14には、一体構造での実験終了時の損傷状況を示している。C1.5-U9の場合には、 $v=2.8\text{m/s}$ 実験時に転倒に至っている。いずれのケースもひび割れは重錘衝突位置である中央付近で発生している。C1.5-U9の場合には、ひび割れは $v=1.2\text{m/s}$ 実験時に擁壁背面のみに鉛直方向に発生している。また、C1.5-U1の場合には $v=4.2\text{m/s}$ 実験時に、C1.5-U3の場合には $v=4.1\text{m/s}$ 実験時に、鉛直方向に貫通するひび割れが発生している。そのひび割れは繰返し载荷に伴い上下方向に広がっている。

連結構造のC1.5-C1と一体構造のC1.5-U1の場合における損傷程度を比較すると、一体構造の方が大きいことが分かる。これは、繰返し载荷回数の影響および連結構造の場合には連結箇所での衝撃吸収が影響しているもの

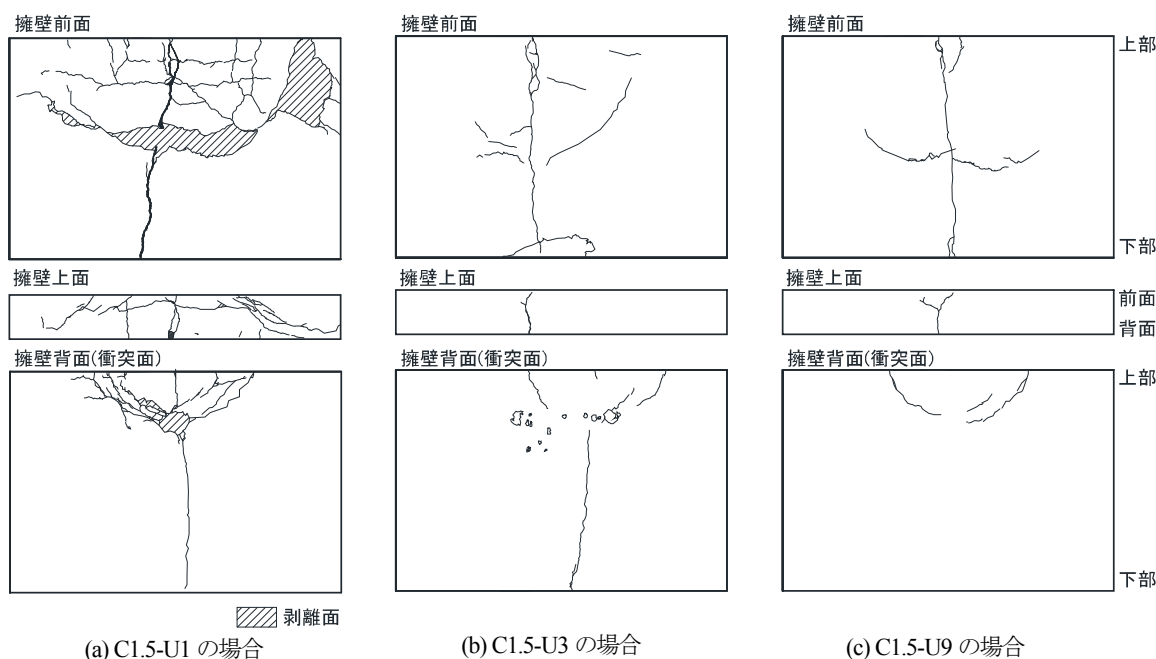


図-14 実験終了時の損傷状況（一体構造）

と推察される。

本実験では、供試体の最大延長は高さに対して1.5倍までとした。擁壁を鉄筋等で補強していたのにもかかわらず、損傷が大きいことが確認できる。便覧では落石衝突時における擁壁の有効抵抗長は擁壁高さの4倍とし、剛体運動を仮定して設計することとしている。本実験結果より、有効抵抗長以上の延長をもつ一般的な無筋コンクリート構造の落石防護擁壁の場合には、転倒に至る前に衝突部の押抜き等によって落石防護機能を損なう損傷に至ることも懸念される。

4. まとめ

本研究では現行設計で仮定している落石防護擁壁の剛体挙動に着目し、落石防護擁壁の耐衝撃挙動を把握することを目的に、1/2程度の縮小模型を用いた重錘衝突実験を実施した。本実験の範囲内において、以下の事項が明らかになった。

- 1) 重錘質量が等しくかつ擁壁断面が同一の場合には、基礎材料、擁壁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。また、擁壁延長が等しい場合には、重錘質量が大きくなると回転角速度は若干遅くなる傾向にある。
- 2) 擁壁の回転挙動に関しては、基礎条件（砂利基礎とコンクリート基礎）の影響は小さい。また、重錘衝撃力も基礎条件に依存しないことが明らかになった。
- 3) 重錘質量が大きい場合や擁壁延長が短い場合には、重錘衝突速度に対して擁壁の回転角および浮上量が急

激に増加する。

- 4) 擁壁の回転角は、便覧における設計の考え方に基づいて算定した計算値との比較より、擁壁延長が長い場合や重錘質量が小さい場合には、反発係数を $e=0$ （完全非弾性衝突）とした計算値に近い。

今後は、有効抵抗長（擁壁高さの4倍）や落石防護擁壁の破壊に至る挙動等について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，2000.6
- 2) 松尾修，佐々木哲也，堤達也，米田義弘，近藤浩市：落石防護擁壁の合理的設計法の提案，土木研究所資料，第3819号，2001.3
- 3) 右城猛，津野道彦，水田勝也，尾崎勝彦：落石防護擁壁の設計法に関する研究，土木技術55巻9号，2000.9
- 4) 川瀬良司，岸徳光，今野久志，池田憲二：C製およびRC製落石防護擁壁の耐衝撃設計法に関する一検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No2，pp.1129-1134，2003.7
- 5) 公益社団法人地盤工学会：落石対策工の設計法と計算例，pp.213-220，2014.12
- 6) 社団法人地盤工学会四国支部：落石対策Q&A，2009.12

(2017年9月25日受付)

(2018年2月1日受理)