

論文 基礎地盤が異なる落石防護擁壁の耐衝撃挙動

山澤 文雄*1・今野 久志*2・小室 雅人*3・岸 徳光*4

要旨:本研究では、コンクリート製落石防護擁壁の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、擁壁延長や基礎地盤の影響を考慮した落石防護擁壁の耐衝撃挙動に関する基礎実験を実施し、各種耐衝撃挙動の考察を行った。その結果、1) 基礎地盤物性によって回転角速度および重錘衝撃力に大きな差異がないこと、2) 最大回転角・最大重心浮上量については基礎地盤物性により影響があること、3) 擁壁延長が長くなると完全非弾性衝突に近づく傾向にあること、4) 擁壁質量および重錘質量から転倒に至る重錘衝突速度をある程度推定できること、等が明らかになった。

キーワード: 落石防護擁壁, 重錘衝突実験, 耐衝撃挙動, コンクリート基礎, 砂利基礎

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、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。

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し運動量保存の法則を適用した右城らの研究³⁾がある。本研究グループでは、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の検討を行っている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。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。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、実験に用いた擁壁モデルの形状寸法、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=1.0m、天端および基部の壁厚がそれぞれB1=0.2m、B2=0.5m、擁壁背面（重錘衝突面）は鉛直であり、擁壁前面は1:0.3の勾配となっている。擁壁の延長はL=0.5mとし、それぞれをφ25mm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に鉄筋コンクリート構造とした。また、実験時のコンクリートの圧縮強度は59.3N/mm²であった。

2.2 実験方法

擁壁が剛基礎上に設置されている場合の検証のため

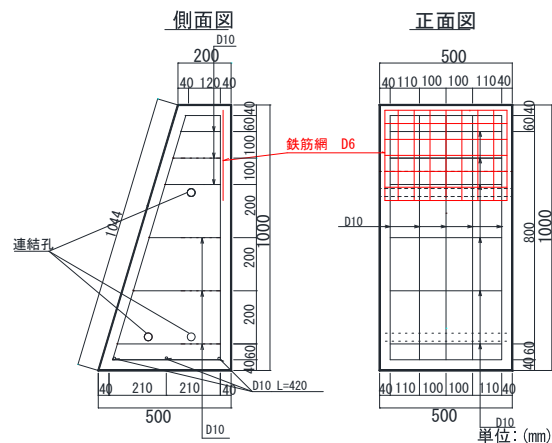


図-1 擁壁モデルの形状寸法・配筋状況

*1 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム 研究員 (正会員)

*2 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム 総括主任研究員 博(工) (正会員)

*3 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 准教授 博(工) (正会員)

*4 (独) 国立高等専門学校機構 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)

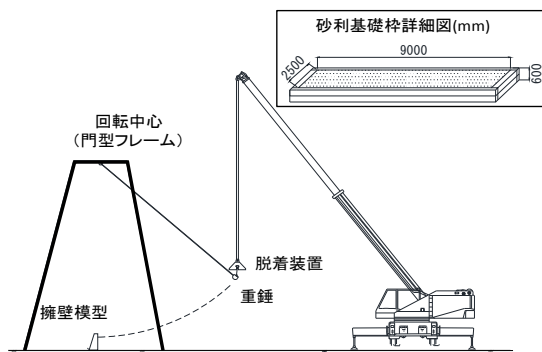


図-2 実験概要図



写真-1 実験状況 (コンクリート基礎)

に実施したコンクリート基礎の実験では、コンクリート基板上にストッパーを設けて擁壁の水平移動を拘束した。また、現場の基礎条件に対する検証には、幅 9.0 m、奥行き 2.5 m、高さ 0.6 m の枠内に砂利を敷均し、タンピングランマーにて締め固めた。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% の粒度分布である小樽市見晴産の砕石 (0~30 mm 級) を使用した。なお、コンクリート基礎同様にストッパーにより擁壁の水平移動を拘束している。

図-2 には実験概要図、写真-1、2 にはそれぞれコンクリート基礎での実験状況、砂利基礎での実験状況を示している。重錘は直径 30.5 cm、長さが 24 cm、衝突部の長さ 12 cm が球状で、質量が 110 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、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る繰り返し載荷とした。

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、レーザ式非接触型変位計による擁壁の変位波形、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-3) 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 1,000 コマ (枚) / 秒としている。衝撃荷重載荷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も確認



写真-2 実験状況 (砂利基礎)

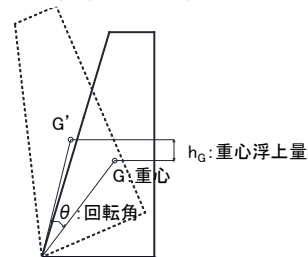


図-3 重心浮上量および回転角

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	載荷方法	重錘衝突速度(m/s)
		高さ(H)	上幅(B1)	下幅(B2)	延長(L)			
C50	コンクリート	1.0	0.2	0.5	0.5	0.8H	繰り返し	1.3,1.9,2.6,3.1 3.7,4.3,4.6
C100					1.0			1.7,2.8,3.7,5.1 6.4
C150					1.5			1.9,2.8,4.0,5.5 7.2,8.5,9.8
G50	砂利	1.0	0.2	0.5	0.5	0.8H	繰り返し	1.8,2.6,3.9,4.4 4.9
G100					1.0			2.1,2.9,3.8,5.2 6.7,7.9
G150					1.5			1.9,2.9,3.8,5.2 7.0,8.4,9.5

※C50 : v=4.6m/s 時転倒, G50 : v=4.9m/s 時転倒

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、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 m (模型 1 基), L=1.0 m (2 基連結), L=1.5 m (3 基連結) と変化させた全 6 ケースであり、重錘の衝突速度を変えて実験を行っている。ケース名は、第一項目に基礎の種類を表す記号 (C: コンクリート, G: 砂利)、第二項目には擁壁延長 (50 : L=0.5 m, 100 : L=1.0 m, 150 : L=1.5 m) を示している。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。

砂利基礎では、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、G50 の場合には平均 N 値が 11, G100, G150 の場合には平均 N 値がそれぞれ 13, 17 であった。砂利基礎実験では繰り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。

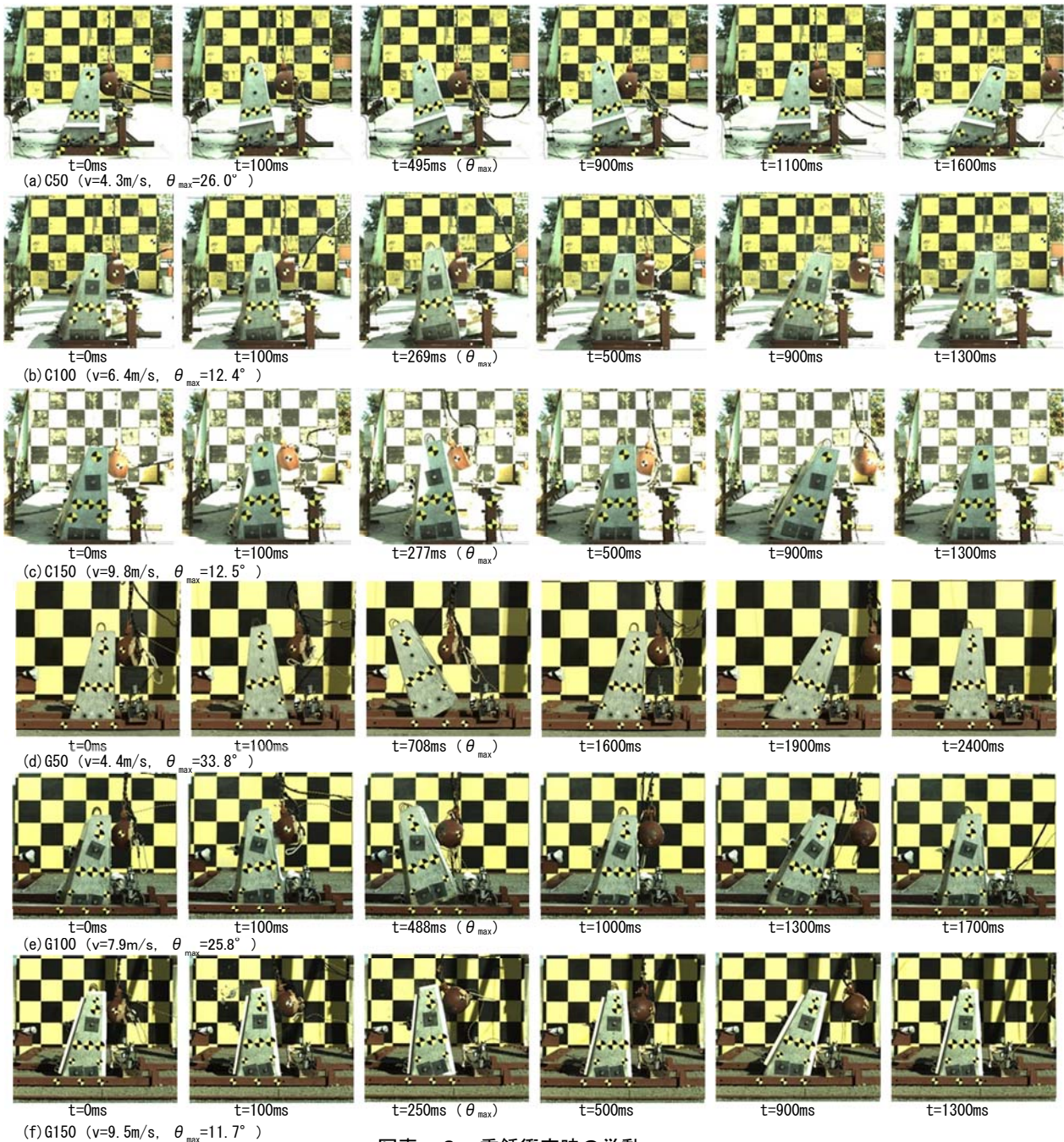


写真-3 重錘衝突時の挙動

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ていたが、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-3には、各ケースに対する擁壁の重錘衝突時挙動を時系列に示している。C50、G50に関しては転倒直前の重錘衝突速度における実験結果を、C100、C150、G100、G150に関しては重錘衝突速度が最大である実験結果を最大回転角となる時間を含めて時系列に示している。

重錘衝突時における擁壁の動的挙動としては、重錘が

擁壁に衝突することによって、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。その後、最大回転角で一旦静止した後、後方へ逆回転し、元の姿勢に戻る。その後、回転速度が最大になることにより、擁壁はかかと部分を中心に逆回転を続ける。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行く。

図-4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となっている。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

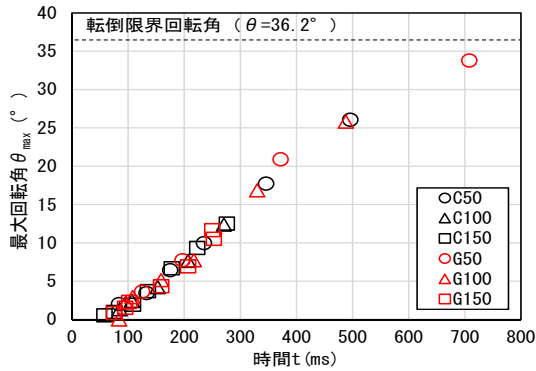


図-4 最大回転角とその到達時間の関係

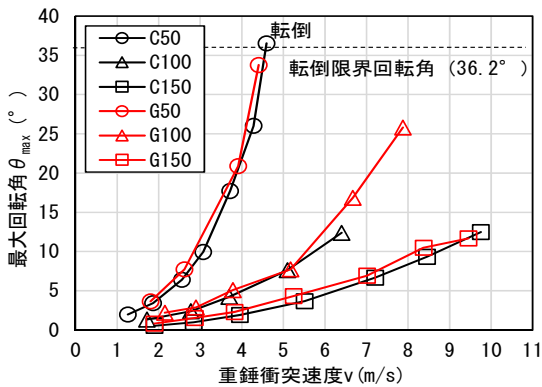


図-5 最大回転角と重錘衝突速度の関係

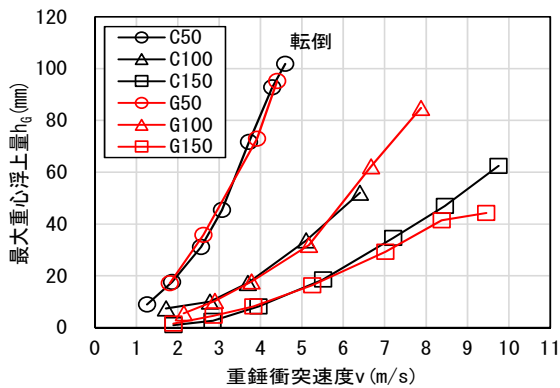


図-6 最大重心浮上量と重錘衝突速度の関係

する時間も長くなる。また、同一擁壁断面であれば基礎や擁壁の延長に関わらず回転角速度がほぼ一定であることがわかる。

図-5には、重錘衝突速度と擁壁の最大回転角との関係を示している。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。C50の場合には重錘衝突速度 $v = 4.6$ m/s 時に転倒、G50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。また、コンクリート基礎での最大回転角 10° に到達する速度で比較すると、 $L=0.5$ m では $v \approx 3$ m/s、 $L=1.0$ m では $v \approx 6$ m/s (2倍)、 $L=1.5$ m では $v \approx 9$ m/s (3倍) となっている。コンクリート基礎と砂利基礎のケースを比較すると、同じ重錘衝突速度では最大回転角が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。これは、擁壁の回転に

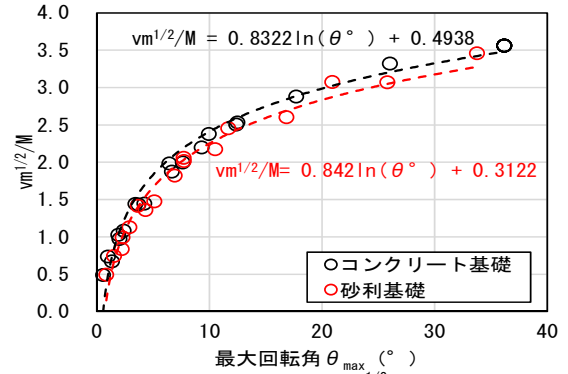


図-7 最大回転角と $vm^{1/2}/M$ の関係

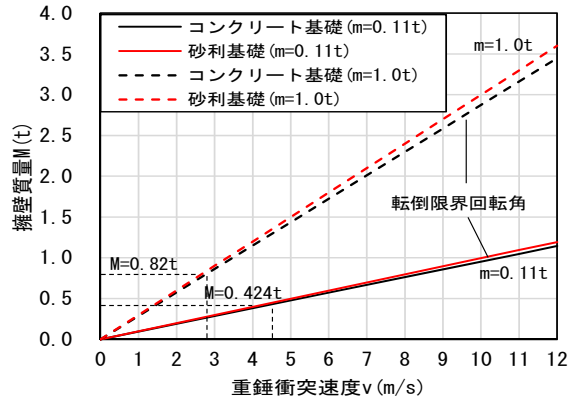


図-8 擁壁質量と重錘衝突速度の関係

伴い擁壁のつま先部の砂利基礎が変形したことによるものと推察される。

図-6には、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している。最大重心浮上量は、衝突速度が遅い場合にはコンクリート基礎と砂利基礎では同程度であるが、砂利基礎の場合には衝突速度が速くかつ擁壁延長が長くなるほど、最大重心浮上量はコンクリート基礎より小さくなる傾向にあることが分かる。G150の場合には、その傾向が顕著である。これは、擁壁の回転に伴い擁壁のつま先部の砂利基礎の変形が大きくなったものと推察される。

次に図-5に関して最大回転角と重錘衝突速度の関係を擁壁延長に関わらず同一線上に表すことができないかについて検討した。

図-7には、各ケースでの最大回転角と $vm^{1/2}/M$ の関係を示している。これは、擁壁質量と重錘質量を様々な条件で検討した結果、最もよく同一線上に表せたものである。ここで、 v : 重錘衝突速度 (m/s)、 m : 重錘質量 (ton)、 M : 擁壁質量 (ton) である。基礎毎に近似曲線である式(1)、式(2)を求めた。

$$\text{コンクリート基礎} : vm^{1/2}/M = 0.8322 \ln(\theta^\circ) + 0.4938 \quad (1)$$

$$\text{砂利基礎} : vm^{1/2}/M = 0.842 \ln(\theta^\circ) + 0.3122 \quad (2)$$

図-8に式(1)、(2)により求めた重錘衝突速度と擁壁質量の関係を示す。直線は各基礎における重錘質量 $m =$

0.11ton および $m = 1.0 \text{ ton}$ の場合の転倒限界回転角 (36.2°) を示している。

コンクリート基礎では、今回実験時の擁壁質量は 1 基平均 424 kg であり、重錘衝突速度 $v = 4.3 \sim 4.6 \text{ m/s}$ で転倒に至っている。図より転倒に至る重錘速度が $v = 4.45 \text{ m/s}$ となる。また、過年度の実験⁹⁾では、今回の擁壁と同一断面、擁壁延長 $L = 1.0 \text{ m}$ で実験したケースがあり、重錘質量 $m = 1.0 \text{ ton}$ 、重錘衝突速度 $v = 3.0 \text{ m/s}$ の実験時に擁壁は転倒している。この実験での擁壁のコンクリート密度を $\rho = 2.35 \text{ g/cm}^3$ とすると、擁壁質量 $M = 0.82 \text{ ton}$ あり、図より転倒限界の重錘衝突速度は $v = 2.85 \text{ m/s}$ となる。実験での転倒する直前のケースは重錘衝突速度 $v = 2.0 \text{ m/s}$ であり、実際に転倒に至る重錘衝突速度は $v = 2.0 \sim 3.0 \text{ m/s}$ の間であると考えられる。このことから、同様な断面であれば、擁壁質量と重錘質量により転倒に至る速度をある程度推定できることが分かる。

3.2 落石対策便覧との比較

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と仮定することとなっている。ここでは、衝突直後の擁壁速度に関する反発係数 e を 1 (完全弾性衝突)、0.5、0 (完全非弾性衝突) と変化させた場合における擁壁の回転角に関する計算値と各ケースにおける実験結果について比較検討を行った。

図-9、10、11には、擁壁延長毎の重錘衝突速度と最大回転角との関係を示している。なお、回転角は便覧式による計算例⁷⁾を参考に算出した。

C50、G50 の場合には、実験結果の回転角は反発係数 e を 0.5 とした場合の計算値に近い結果となった。擁壁延長が長くなるのに従い反発係数 e は 0 に近づく傾向にある。

図-12には、各ケースの最大重錘衝撃力と重錘衝突速度の関係を示している。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た。また、図には式(3)の振動便覧式で求めた衝撃力も示している。

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

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。

図より、重錘衝撃力 P 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、C150、G150 の場合に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ことが分かる。これは、実験は繰り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、C100、G100 の場合には C50、G50 の場合よりも最大重錘衝撃力が小さくなっている。これは、C100、G100 の場合には、重錘衝突位置が面取りしている擁壁の結合部分となつて

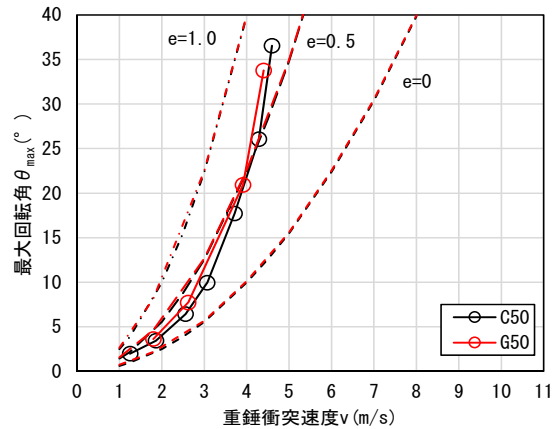


図-9 回転角と重錘衝突速度の関係(L=0.5m)

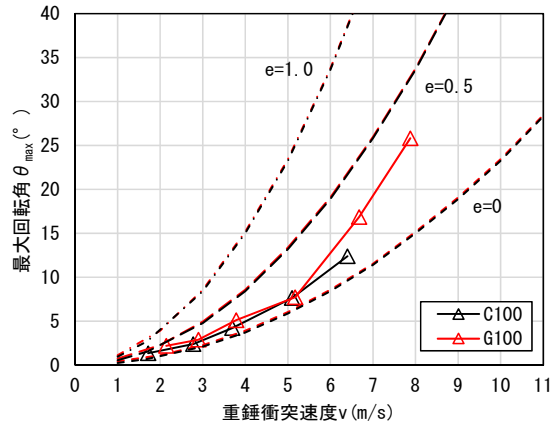


図-10 回転角と重錘衝突速度の関係(L=1.0m)

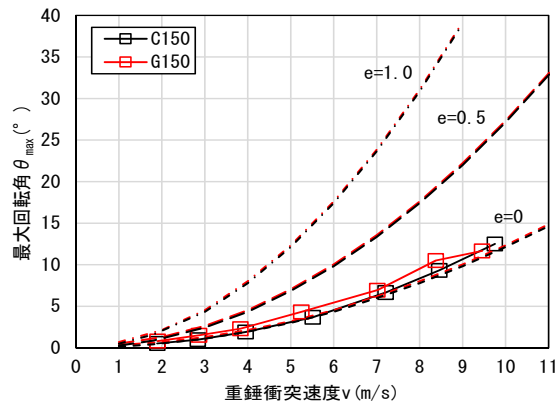


図-11 回転角と重錘衝突速度の関係(L=1.5m)

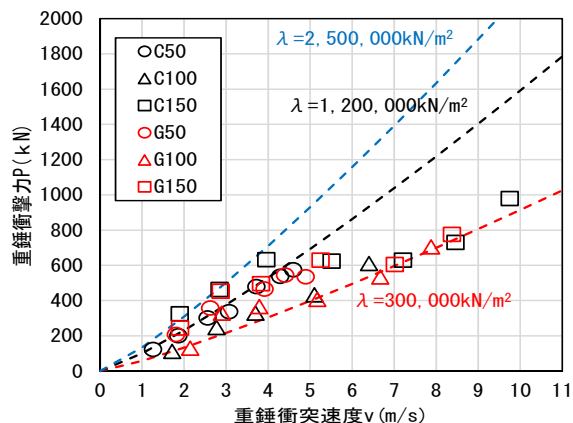


図-12 重錘衝撃力と重錘衝突速度の関係



図-1-3 実験終了時の損傷状況

いることが影響しているものと推察される。

3.3 損傷状況について

図-1-3には、各ケースの実験終了時の損傷状況を示している。C150の場合には、擁壁上面のひび割れが $v = 2.8 \text{ m/s}$ の実験時に発生し、その後、繰り返し载荷の影響により、徐々に進展した。重錘衝突面には、衝突位置より約18 cm下方に曲げせん断型の水平ひび割れが $v = 8.5 \text{ m/s}$ の実験時に発生している。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35 cm下方まで達した状況となっている。

G150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20 cm下方に曲げせん断型の水平ひび割れが発生している。

コンクリート基礎と砂利基礎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ではあるが損傷が軽微になる傾向にあることが分かる。これは、砂利基礎の場合には衝突後の衝撃力を若干ではあるが吸収していることを示唆している。

実験における最大擁壁延長は、高さに対して1.5倍ま

であつたが、擁壁を鉄筋等で補強していたのにもかかわらず、損傷が大きい状況が確認できる。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倍と仮定して設計することとしている。しかしながら、本実験結果より、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する前にコンクリートが破壊に至ることが示唆される。

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、落石防護模型を用いた重錘衝突実験を実施した。本研究結果、以下の事項が明らかになった。

- 1) 擁壁断面が同じであれば基礎、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。
- 2) 擁壁基礎のN値が小さくなると回転角は大きくなり、重心浮上量は小さくなる傾向にある。また、重錘衝撃力は基礎材料に依存しない。
- 3) 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。
- 4) 擁壁質量および重錘質量を用いることにより、擁壁が転倒に至る重錘衝突速度をある程度推定できる。

今後は、有効抵抗長と落石防護擁壁の破壊に至る動的挙動等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) 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 卷 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, No.2, 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, pp213, 2014.12
- 6) 川瀬良司，今野久志，岸徳光，松岡健一：落石防護擁壁の重錘衝突実験と数値シミュレーション，第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，PP227-232, 2000.6
- 7) 愛媛大学防災情報研究センター 社団法人地盤工学会 四国支部：落石対策 Q&A, 2009.12