

無筋コンクリート製落石防護擁壁の衝突実験

Impact loading test of plain concrete rockfall retaining wall

(国研) 土木研究所寒地土木研究所
 (国研) 土木研究所寒地土木研究所
 (国研) 土木研究所寒地土木研究所
 (国研) 土木研究所寒地土木研究所
 室蘭工業大学大学院
 室蘭工業大学大学院

○正員 山澤文雄 (Fumio Yamasawa)
 正員 今野久志 (Hisashi Konno)
 正員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)
 正員 寺澤貴裕 (Takahiro Terasawa)
 正員 小室雅人 (Masato Komuro)
 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

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による検討を行ってきた⁴⁾。

落石の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、落石の衝突に対する躯体の設計法については、便覧において示されておらず、構造細目で規定された配筋を用いることで、安全性が保たれるものとしている。本研究では、実証実験を実施することによって現行の落石防護擁壁の保有性能と衝撃荷重に対する躯体の安全性を把握し、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、現行設計で仮定している有効抵抗長（擁壁高さの4倍）に着目して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、その動的挙動および損傷状況について検討を行うものとする。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、実験に用いた無筋コンクリート製擁壁模型の形状寸法および高速度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1/2程度を想定し、高さ $H = 1.0$ m、天端および基部の壁厚がそれぞれ $B1 = 0.2$ m、 $B2 = 0.5$ m、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 $L = 4.0$ mとした。試験時のコンクリートの圧縮強度は平均

で 30.4 N/mm^2 であった。

2.2 実験方法

図-2には実験の概要図、写真-1には実験状況を示している。衝撃荷重は、門型フレームに吊り下げられた質量 309 kg の鋼製重錘を所定の高さまで吊上げ、脱着装置を介して振り子運動によって作用させることとした。

剛体挙動に着目した実験結果⁵⁾から、基礎地盤の影響が大きくな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盤上で、つま先にストッパーを設け、水平方向の移動を拘束して実施した。

測定項目は、重錘の頂部表面に設置したひずみゲージ

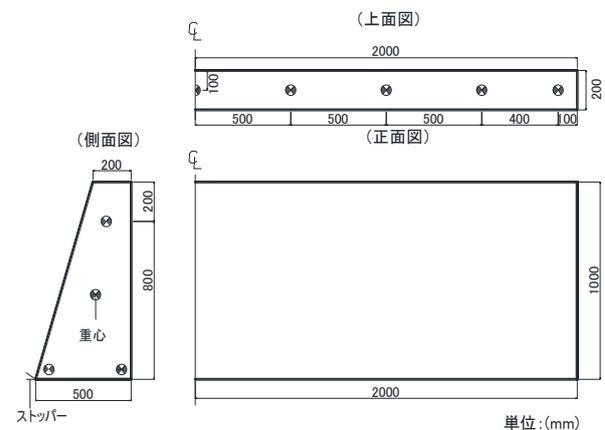


図-1 擁壁模型の形状寸法およびターゲット位置

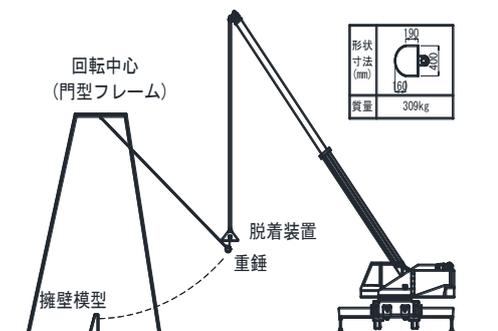


図-2 実験概要図



写真-1 実験状況

表-1 実験ケース

| 実験ケース | 重錘質量 m (kg) | 重錘速度 v (m/s) | 重錘衝突エネルギー E (kJ) | 実験後の損傷状況 |
|-------|---------------|----------------|--------------------|----------|
| S0.2 | 309 | 1.2 | 0.2 | 損傷無 |
| S2.0 | | 3.8 | 2.2 | ひび割れ |
| S4.0 | | 5.1 | 4.0 | ひび割れ |
| S6.0 | | 6.1 | 5.8 | 剥離 |
| S8.0 | | 7.0 | 7.6 | 剥離 |
| S10.0 | | 8.2 | 10.3 | 押抜き |

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である。高速度カメラの有効画素数は $1,024 \times 1,024$ 、フレームレートは 1,000 fps であり、上方および側方に 2 台設置した。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、コンクリート基礎を用いた擁壁延長 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、単一載荷により行っている。ケース名は、載荷方法 (S: 単一) に目標とした重錘衝突エネルギー (kJ) を付して示している。重錘衝突位置は、擁壁高さを H として基部から $0.8H$ (0.8 m) としている。また、表中には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 を用いて算定した。

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

図-3 には、実験ケース (S2.0、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。重錘衝突によって最大変位となる時間は、S2.0 の場合には衝突後 107 ms 後、S6.0 の場合には 159 ms 後となっている。S2.0 と S6.0 の場合を比較すると、変位は重錘衝突エネルギーの大きさに対応して大きくな

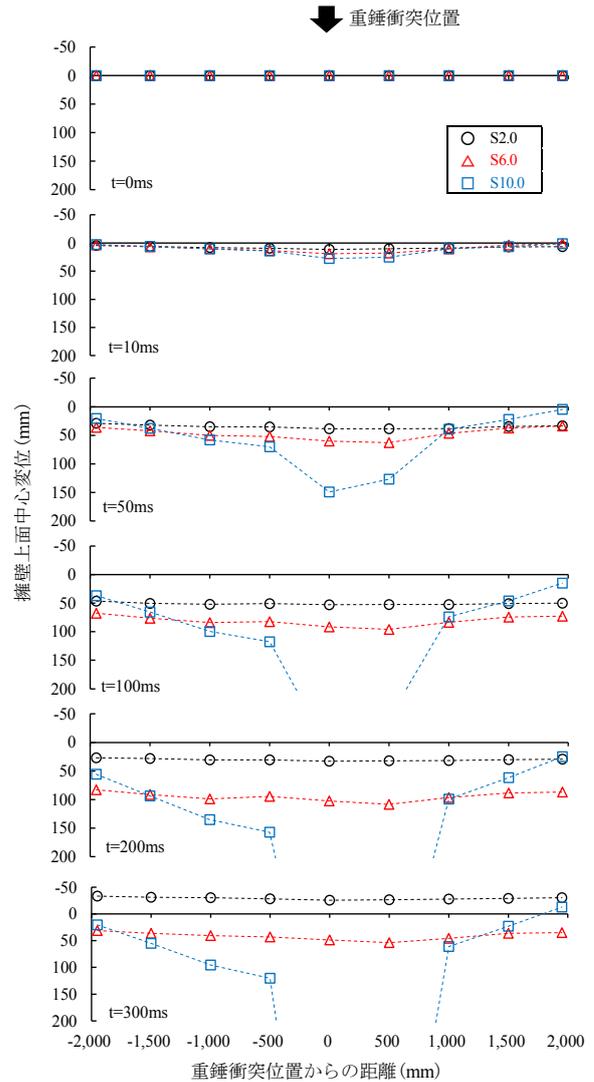


図-3 擁壁上面中心変位の経時変化

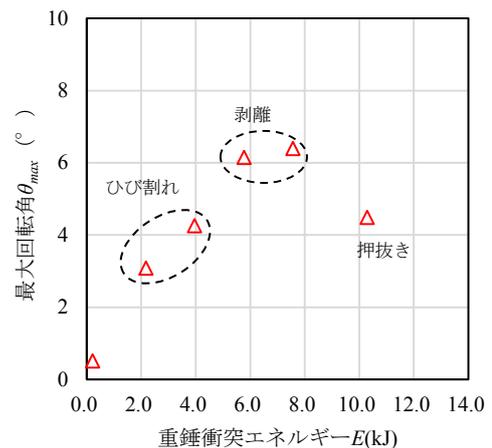


図-4 最大回転角と重錘衝突エネルギーの関係

っており、重錘衝突によって擁壁全体として剛体運動をしていることが分かる。しかしながら、明確な押抜きせん断破壊が発生 (S10.0) すると、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とが分かる。

擁壁延長を高さの4倍とする場合には、擁壁に明確な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っている。

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、図中には実験終了後の損傷状況を記載している。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、明確な押抜きせん断破壊が発生することによって最大回転角は小さくなっていることが分かる。本実験では、ひび割れ及び剥離発生となる最大回転角はそれぞれ約3°、6°となった。なお、便覧では許容回転角は2~3°以下を目安としている。

3.2 損傷状況

写真-2には、S2.0、S6.0、S10.0の上方の高速カメラから撮影した画像を示している。また、図-5には、実験ケース（S2.0、S6.0、S10.0）の実験終了時の損傷状況および上方の高速カメラから確認出来たひび割れの発生状況を示している。なお、実験後の擁壁の損傷状態としては、S2.0ではひび割れ発生、S6.0では剥離発生（後述のように、この場合も基本的には押し抜きせん断破壊の兆候を示しているが、完全な剥離・剥落の状態には至っていない状況である）、S10.0では明確な押し抜きせん断破壊が発生している。

上面より撮影した高速カメラの画像を確認すると、S2.0の場合には、ひび割れは衝突初期から3ms後に重

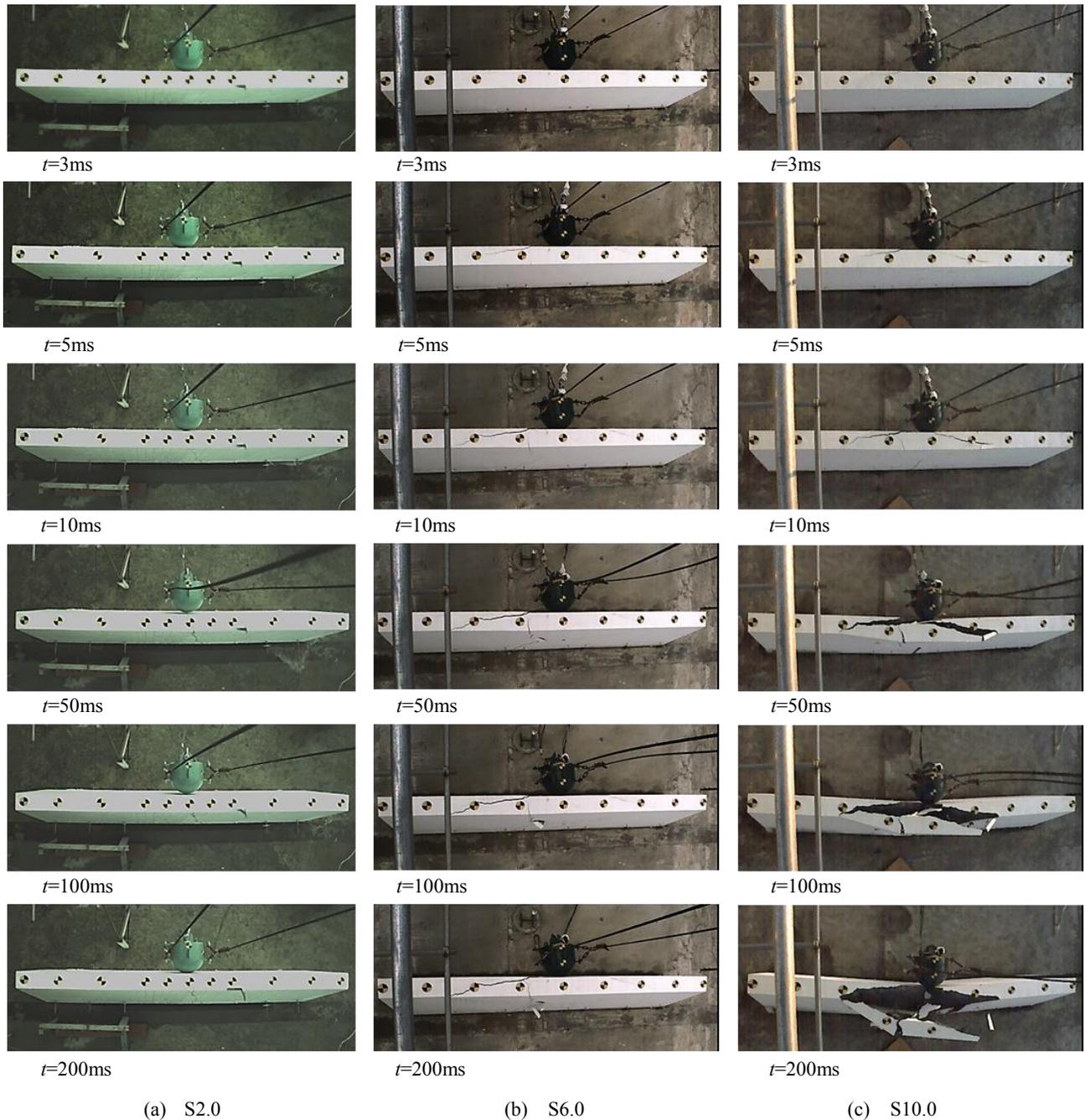


写真-2 高速カメラ画像（上方）

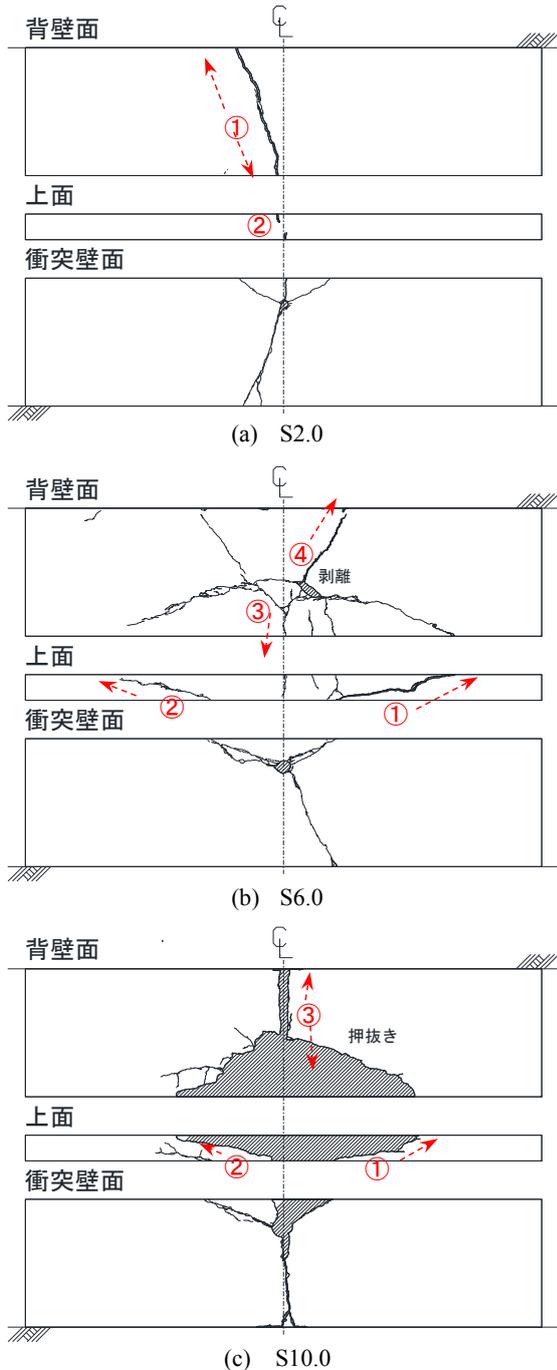


図-5 損傷状況およびひび割れ発生状況

錘衝突位置背面に発生し、その後背面下端及び上面に進展している。S6.0 の場合には、ひび割れは 3 ms 経過後に載荷点から左右上下の厚さ方向に進展する斜めひび割れが発生し、最初に衝突中心点から約 40 cm 離れた天端右側面にひび割れが出現している。その後 4 ms 経過後には同様に衝突中心点から左側に約 60 cm 離れた天端左側面にもひび割れが出現した。5 ms 後には背壁面に斜めひび割れ先端部が出現する状況が確認できた。前述のように、押し抜きせん断破壊の兆候を示しているが、コンクリート塊が剥落するような明確な破壊には至っていない状況であり、ここでは剥離として定義している。その剥離は、重錘衝突から約 50 ms 後に発生している。S10.0 の場合には、S6.0 の場合と同様に衝突点から左右

上下の厚さ方向に斜めひび割れが進展し、3 ms 経過後に右側に約 40 cm、左側に約 20cm 離れた擁壁上面に、また背壁面中央部付近にもひび割れが進展し出現している。なお、押し抜きせん断に至る擁壁の剥離・剥落は重錘衝突から約 50 ms 後に発生している。ひび割れは、いずれの場合も重錘衝突後 3~4 ms に発生し進展している。

実験終了後の損傷状態は、衝突壁面ではいずれのケースも重錘衝突箇所を中心として 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。背壁面の損傷状態は、実験終了後にひび割れのみケースでは、縦方向のひび割れが顕著となっている。剥離および明確な押し抜きせん断破壊が発生したケースでは、ひび割れは衝突壁面と同様に背壁面にも擁壁上面方向に V 字状および擁壁下端方向へと進展しており、重錘衝突エネルギーが大きくなると擁壁幅方向のひび割れ幅は小さくなり、縦方向にはひび割れ幅は大きくなる傾向であった。

4. まとめ

本研究では、有効抵抗長（擁壁高さの 4 倍）に着目し実施した無筋コンクリート製擁壁模型の重錘衝突実験結果、重錘衝突時の動的挙動および損傷状況について、以下の事項が明らかになった。

- 1) 擁壁延長を高さの 4 倍とした場合には、押し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運動となる。
- 2) 擁壁の最大回転角は押し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。今回のケースでは明確な押し抜きせん断破壊には至らない剥離発生時点での最大回転角は約 6°であった。
- 3) 衝突壁面の損傷は、いずれも重錘衝突箇所を中心とした V 字状のひび割れおよび下端方向の縦ひび割れとなった。
- 4) 剥離および押し抜きせん断破壊の場合において、背壁面の損傷は、重錘衝突エネルギーの増加に対応して擁壁幅方向へのひび割れ幅は減少する傾向であり、縦方向のひび割れの幅は増加する傾向にある。

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、No.2、pp.1129-1134、2003.7
- 5) 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