

実物大落石防護擁壁の衝突実験

Impact loading test of full scale 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
 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 葛西 聡 (Satoshi Kasai)
 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、擁壁）が数多く設置されている。現在、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。これまで、小規模の擁壁模型を用いて挙動を検討²⁾してきたが、今回は実物大の擁壁模型を用いた重錘衝突実験を実施し、その動的挙動、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 実験方法

擁壁は一般的に良質な支持層に根入れされていることや剛体挙動に着目した実験結果³⁾から、基礎地盤の影響が大きいことが明らかになったことから、ここでは支持条件が明確なコンクリート基盤上で、擁壁の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た。

写真-1には実験状況を示している。衝撃荷重は、ラフテレーンクレーンにより吊り下げられた鋼製重錘を別のラフテレーンクレーンを用いて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。載荷は単一載荷で行っており、重錘は円柱状で載荷部が球状の鋼製重錘（直径 0.5m、質量 890kg）を使用した。また、重錘衝突位置は擁壁高さを H として基部から $0.8H$ (1.6m)、延長方向は擁壁中央としている。

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加速度、上面高速度カメラによる擁壁の天端変位、側面高速度カメラによる重錘衝突速度、擁壁の回転角および重心浮上量である。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、上面方向および側面方向に 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、一部の実験では擁壁の衝突背面にも高速度カメラを配置しその損傷状況を観察した。なお、実験終了毎にはひび割れ等の損傷状態も確認している。

2.2 擁壁模型概要

図-1には、実験に用いた擁壁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



写真-1 実験状況

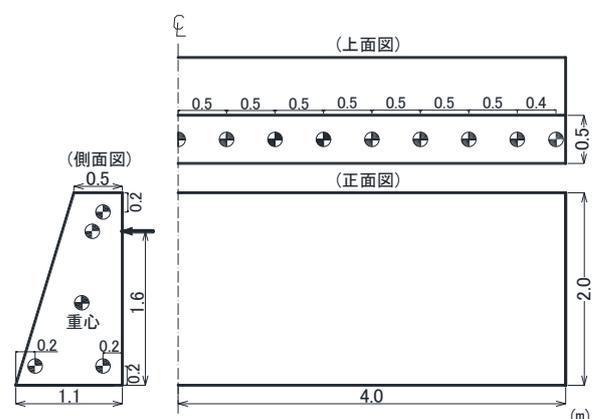


図-1 擁壁の形状寸法・ターゲット設置位置

壁の形状寸法は、実構造で多用されている断面を想定し、高さ $H = 2.0 \text{ m}$ 、天端および基部の壁厚がそれぞれ $B_1 = 0.5 \text{ m}$ 、 $B_2 = 1.1 \text{ m}$ 、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 $L = 8.0 \text{ m}$ とした。

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。実験は重錘落下高さを変化させて実施した。ケース名は、載荷時の衝突位置に対しての落下高さ (m) を H に付して示している。表中には実験時の擁壁のコンクリート圧縮試験結果、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、実験ケース H12.5 については測定・収録ができなかったため、実験終了後の損傷状況のみとしている。また、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 重錘衝突時における擁壁の動的挙動

図-2 には、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。H5.0 および H7.5 の場合には、擁壁上面に設置したターゲットの変位は各時刻に対して同程度の値を示しており、重錘衝突によって変位量は小さいが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、H10.0 の場合には、明確な押抜きせん断破壊には至ってはいないが、剥落が発生する損傷状態であったため、重錘衝突位置を中心とした局所的な変形を示している。なお、重錘衝突後の重錘衝突位置である中央部の最大水平変位と最大水平変位に至った時間は、H5.0 の場合には衝突後 65ms 後に約 12mm、H7.5 の場合には 71ms 後に約 14mm、H10.0 の場合には衝突後 188ms 後に約 36mm であった。

実物大の擁壁において剥落等の著しい損傷が発生しなければ、便覧で規定している有効長さを擁壁高さの4倍とする場合においては、剛体的な挙動を示すことが明らかになった。

図-3 には、擁壁側面部での最大回転角と重錘衝突速度の関係を示している。なお、図中には便覧式により算定^{1) 4)}した回転角および、ケース名を記載している。便覧式の算出条件としては、反発係数を完全弾性衝突 ($e = 1$) とし、コンクリート地盤の N 値を $N = 100$ と仮定して算出する場合と、反発係数を非完全弾性衝突 ($e = 0$) とし算出した場合についても記載している。

重錘衝突後の擁壁の最大回転角は重錘衝突速度が増すほど増加すると考えられるが、H10.0 のケースの場合には最大回転角は H7.5 のケースよりも小さくなっている。これは、H10.0 のケースでは図-2 に示すように重錘衝突位置を中心としたひび割れの発生と共に上層部が剥離剥落の傾向を示し、多くのエネルギーがこれに消費されたためと推察される。

実験値と便覧式を用いた算定値を比較すると、反発係数 $e = 1$ の場合には、実験値は便覧式の算定値よりも大

表-1 実験ケース一覧

実験ケース名	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	重錘質量 m (kg)	落下高 (m)	衝突速度 v (m/s)	重錘衝突エネルギー E (kJ)	損傷状況
H5.0	34.2	890	5.0	10.0	44.5	ひび割れ
H7.5	28.7		7.5	11.4	57.8	剥離
H10.0			10.0	13.7	83.5	剥離
H12.5	34.2		12.5	-	-	押抜き

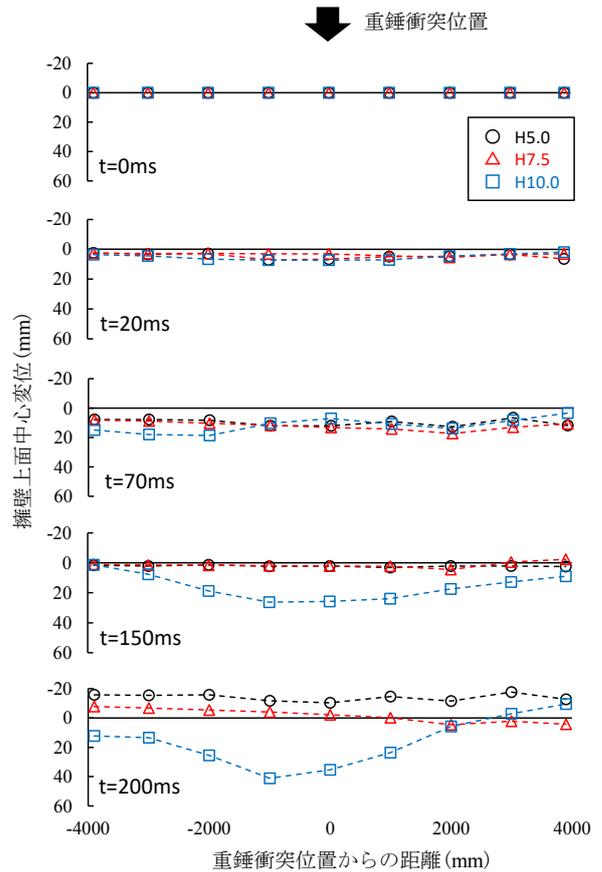


図-2 擁壁上面中心変位の経時変化

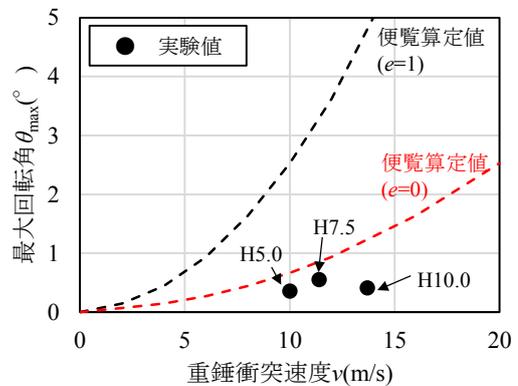


図-3 最大回転角と重錘衝突速度の関係

幅に小さいことが分かる。これより、便覧式では、反発係数を完全弾性衝突 ($e=1$) と仮定して計算することとしているが、実際には完全弾性衝突には至らないものと推察される。なお、今回の実物大の擁壁実験においては、反発係数 $e=0$ を用いた算定値が実験値と近い値となった。

3.2 重錘衝撃力

落石による衝撃力を算定方法としては振動便覧式による方法³⁾および運動量保存則を適用する方法⁴⁾がある。今回は、運量保存則を適用する方法にて算定した。

すなわち、任意の時刻 t における運動方程式は、一般に反発係数を e とすれば、式(1)のように示される。

$$mv(1+e) = \int p(t) dt \quad (1)$$

ここで、重錘衝突時における実験結果の衝撃力波形は、図-4のように示されることから、簡略化して最大衝撃力を P_a 、荷重継続時間を Δt として三角形波に近似できるものとするれば、式(1)の右边は、 $\int p(t) dt = P_a \Delta t / 2$ として表される。これを式(1)に代入すれば、最大衝撃力 P_a は式(2)のように求められる。

$$P_a = 2mv(1+e) / \Delta t \quad (2)$$

ここに、 P_a : 最大衝撃力 (kN)、 m : 落石質量 (ton)、 v : 落石衝突速度 (m/s)、 e : 反発係数、 Δt : 衝撃荷重継続時間 (s) である。

図-5には、実験結果の重錘衝突速度と最大衝撃力の関係を示している。なお、図中には式(2)の運動量保存則を適用して算定した結果も示している。なお、算出条件としては、図-4を参考に、実験の接触時間 $\Delta t = 0.003$ s、反発係数としては $e=1$ および $e=0$ について示している。

最大重錘衝撃力は重錘衝突速度の増加に対応して増加する傾向にあることが分かる。実験結果と式(2)の結果を比較すると、実験結果は反発係数を $e=0$ とする場合と大略対応していることが分かる。

3.3 損傷状況

写真-2には、衝突背面に設置した高速度カメラから撮影した H10.0 のケースの経過時間毎の画像を示している。衝突背面において最初に画像で確認できるひび割れは衝突後 4 ms であり、重錘衝突位置の背面に発生している。衝突後 5 ms には重錘衝突の背面からひび割れが水平方向および垂直方向に進展している。なお、ひび割

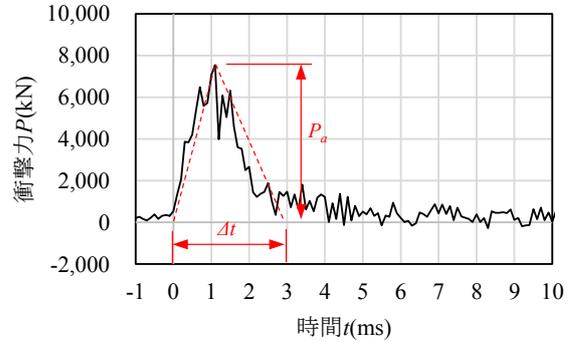


図-4 重錘衝撃力波形 (H7.5)

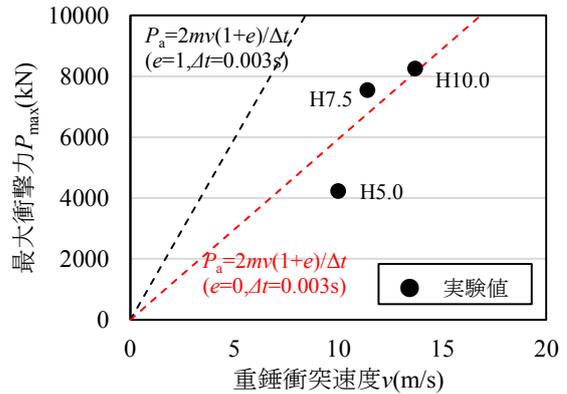


図-5 重錘衝突速度と最大衝撃力の関係

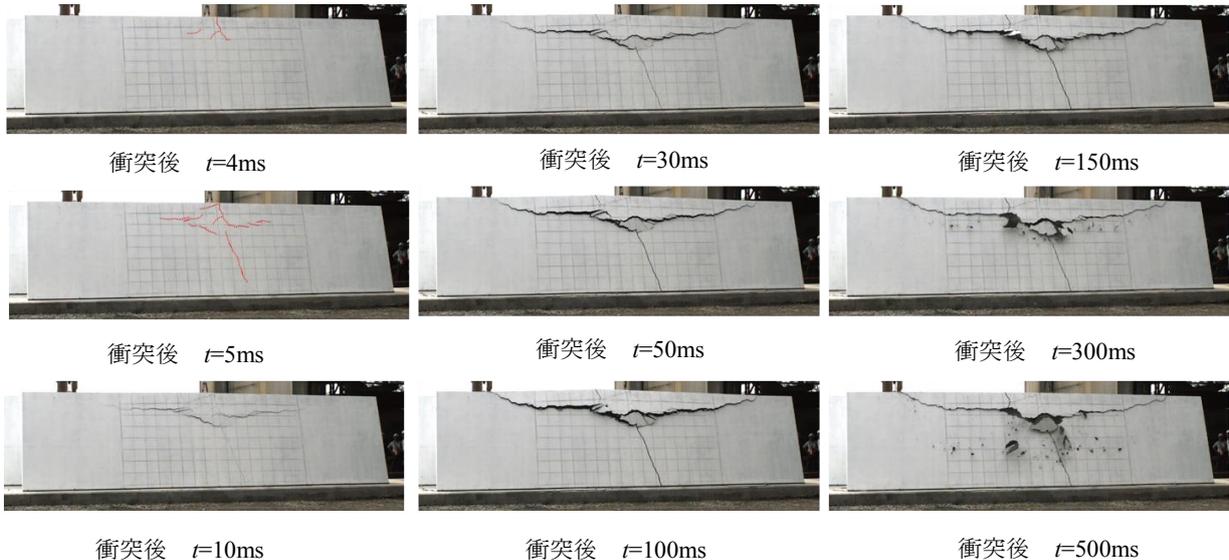


写真-2 背面高速度カメラ画像 (H10.0)

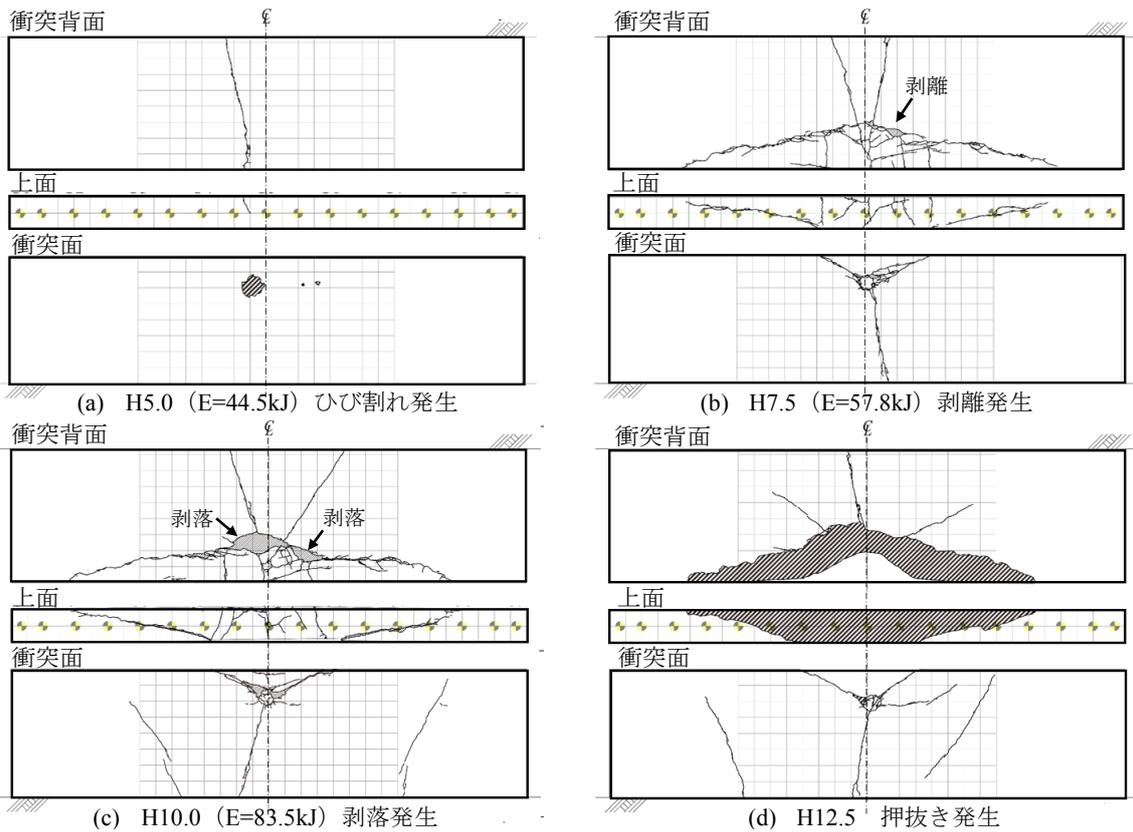


図-6 実験終了後の損傷状態

れ幅が小さい 4 ms、5 ms の画像にはひび割れに沿って赤色で分かりやすく示している。また、衝突後 10 ms 後には水平方向にさらに伸展しており、ひび割れの幅も拡大しているのが確認できる。その後もひび割れは横方向に伸展しており、衝突後 30 ms 後には重錘衝突背面位置で押抜きせん断破壊の兆候を示している。300ms 経過後には、完全に剥落しているのが確認できた。他のケースにおいても重錘衝突後 4~5 ms に衝突背面には最初のひび割れが発生している。

図-6 には、実験終了後の損傷状態を示している。重錘衝突面の損傷状態は、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 $50^{\circ} \sim 67^{\circ}$ 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。衝突背面の損傷状態は、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 $25^{\circ} \sim 32^{\circ}$ の位置が衝突背面部の V 字状の頂点となり、その頂点を中心として $70^{\circ} \sim 75^{\circ}$ の角度で擁壁の上面方向へ V 字状の斜めひび割れとなっている。

4. まとめ

本研究では、実物大の擁壁模型を用いた重錘衝突実験を実施し、その動的挙動、衝撃力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) 実物大の擁壁において剥落等の著しい損傷が発生しなければ、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となる。
- 2) 擁壁の最大回転角は剥落等の著しい損傷が発生しなければ重錘速度が速くなるほど増加する傾向を示す。また、実験値は非弾性衝突 ($e = 0$) を仮定する場合とほぼ対応する。
- 3) 最大衝撃力は重錘衝突速度の増加に対して増加する傾向にあり、運動方程式を適用し非弾性衝突を仮定することによって大略評価可能である。

参考文献

- 1) (公社) 日本道路協会：落石対策便覧、pp.195-211、2017.12.
- 2) 山澤文雄、今野久志、小室雅人、岸徳光：無筋コンクリート製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.40、No2、pp.703-708、2018.7.
- 3) 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
- 4) (公社) 地盤工学会、落石対策工の設計法と計算例、pp217-220、pp305-307