論文 無筋コンクリート製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、有効抵抗長を擁壁高の4倍とした場合の落石防護擁壁に対する重鍾衝突実験を実施した。その結果、1) 擁壁挙動は、ひび割れの影響が少ない場合には擁壁全体が剛体運動をするが、重鍾衝突速度を漸増していくと衝突点を中心とした局部的な変形が生ずる、2) 最大回転角および最大重鍾衝撃力は、重鍾衝突エネルギーの増加に対して増加する。最大回転角は等価エネルギーでは重鍾質量が大きく影響する、3) 落石対策便覧による可能吸収エネルギーを満足する落石衝突エネルギー(設計値)では、最大回転角は小さく、ひび割れも発生しなかった、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, 有効抵抗長

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、落石防護擁壁(以下、単に擁壁)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。

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。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による検討を行っている 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 50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.

本研究グループでは、既存の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、耐衝撃保有性能を把握するための各種実証実験を実施している。

本研究は、上述の問題点2) に関連して、現行設計で

仮定している擁壁の有効抵抗長(擁壁高さの4倍)とした場合の無筋コンクリート製擁壁模型の重錘衝突実験を 実施し,重錘衝突時の擁壁の動的挙動,重錘衝撃力およ び損傷状況について検討したものである。

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、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。なお、試験体は6体製作しており、実験時のコン

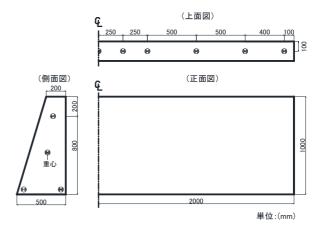


図-1 擁壁模型の形状寸法・ターゲット設置位置

^{*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 くらし環境系領域 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)

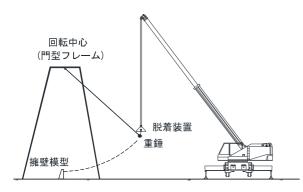


図-2 実験概要図



写真-1 実験状況

クリートの圧縮強度は平均で 28.2 N/mm² であった。

2.2 実験方法

図-2には実験概要図を、写真-1には実験状況を示している。また、図-3には実験に使用した重錘の形状寸法および質量を示す。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返し載荷とした。

基礎地盤は、剛体挙動に着目した実験結果⁶⁾より、基礎地盤の影響はあまり大きくないことを確認出来たことから、本実験は支持条件が明確なコンクリート基盤上で、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、擁壁の天端変位、擁壁の回転角および重心浮上量(図ー4)である。高速度カメラは上面および側面からの2台使用し、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。重錘衝撃荷重載荷実験時の重錘衝撃力の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収録を行っている。また、実験終了毎にひび割れ状態も確認している。

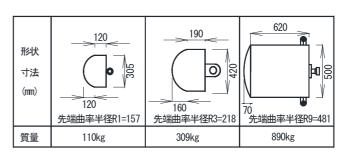


図-3 重錘形状寸法・質量

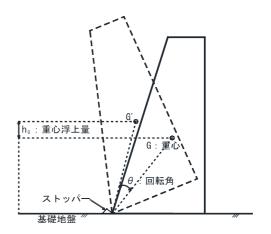


図-4 回転角・重心浮上量

表-1 実験ケース一覧

試験体 名	実験ケース 名	重錘質量	目標エネル ギーE (kJ)	重錘衝突速 度v(m/s)	実験終了後 の損傷状況			
711	F1-E0.2	m(kg)	0.2	1.8	少良两水儿			
F1	F1-E0.5	110	0.5	2.9				
	F1-E1.0		1.0	4.2				
	F1-E1.5		1.5	5.1	ひび割れ発生			
	F1-E2.0		2.0	5.9	ひび割れ進展			
	F1-E2.5		2.5	6.7	押抜き			
S1	S1-E2.0		2.0	5.9	ひび割れ発生			
	S1-E3.0		3.0	7.1	押抜き			
F3	F3-E0.2	309	0.2	1.2				
	F3-E0.5		0.5	1.8				
	F3-E1.0		1.0	2.6	ひび割れ発生			
	F3-E1.5		1.5	3.2	ひび割れ進展			
	F3-E2.0		2.0	3.7	ひび割れ進展			
S3	S3-E2.0		2.0	3.8	ひび割れ発生			
33	S3-E3.0		3.0	4.4	押抜き			
F9	F9-E0.2	890	0.2	0.6				
	F9-E0.5		0.5	1.1				
	F9-E1.0		1.0	1.6	ひび割れ発生			
	F9-E1.5		1.5	1.9	ひび割れ進展			
	F9-E2.0		2.0	2.3	ひび割れ進展			
	F9-E2.5		2.5	2.6	ひび割れ進展			
S9	S9-E2.0		2.0	2.2	ひび割れ発生			
	S9-E3.0		3.0	2.8	ひび割れ進展			
	S9-E4.0		4.0	3.2	押抜き			

※試験体に対し、繰返し載荷としている。

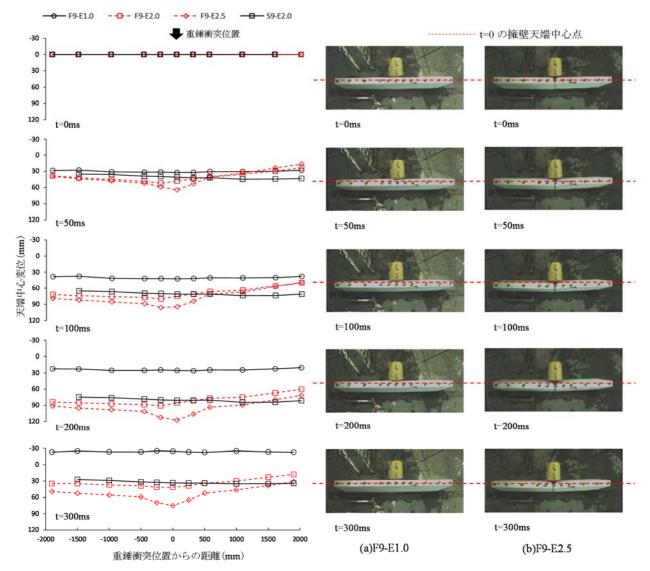


図-5 擁壁天端中心変位の経時変化

2.3 実験ケース

実験は等価エネルギーにおける動的挙動を検討する ため, 重錘質量等を変化させている。また, 同一質量の 重錘に対して試験体2体の実験を実施している。1体目 は目標重錘衝突エネルギー E=0.2 kJ から、2 体目は目 標重錘衝突エネルギー E=2.0kJ から繰返し衝撃載荷を 実施した。表-1には実験ケースの一覧を示している。 試験体名は,第一項目に試験体(F:1体目,S:2体目) と重錘質量 (1:110kg, 3:309kg, 9:890kg), 実験ケー スの第二項目にはEの後ろ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(0.8m) 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 速度および実験終了後の損傷状況も併せて記している。 損傷状況は実験時, 試験体に初めてひび割れが発生した 場合には「ひび割れ発生」、既に発生したひび割れの進展 および新たなひび割れが発生した場合には「ひび割れ進

写真ー2 高速度カメラ画像

展」、押抜きが発生した場合には「押抜き」とした。

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-5には、擁壁天端中心点における水平変位分布の経時変化の一例を、写真-2には、同時刻における F9-E1.0 および F9-E2.5 の上面より撮影した高速度カメラ映像を示している。図中、黒色の点は実験時にひび割れが発生していないケース(F9-E1.0、S9-E2.0)、赤色の点はひび割れ発生後に実験したケース(F9-E2.0、F9-E2.5)を示している。また、S9-E2.0 の左端部の点は光の影響があり高速度カメラ画像により変形を算定できなかったため欠損としている。

図-5,写真-2より重錘衝突によって擁壁全体が剛体運動をしていることがわかる。その動的挙動は、重錘衝突後つま先部分を中心として回転し、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、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。また、擁壁天端変位は重錘衝突エネルギーが大きいほど大きくなっている。ひび割れが発生し重錘衝突エネルギーが大きくなると擁壁全体の回転運動に加えて重錘衝突位置を中心とした局部的な変形が示されていることがわかる。

図ー6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。重錘衝突エネルギーEは、重錘の衝突速度vを用いて $E=mv^2/2$ の式によって求めている。図中に実験時、試験体に初めてひび割れが発生したケースには「ひび割れ発生」の文字を、押抜きを生じたケースには「押抜き」の文字を付した。なお、ひび割れ発生以降の実験においては、押抜きが発生するまでひび割れが進展および新たなひび割れが発生している。

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している。また,最大回転角の増加率は重錘質量が重い 890kg のケースが大きい。ひび割れ発生後も押抜きに至るまでは,最大回転角は重錘衝突エネルギーが大きくなるにつれて増加しているが,擁壁の損傷が大きくなるにつれてその増加率は小さくなる傾向にある。衝突後の擁壁速度 V は便覧では完全弾性衝突と仮定して, $V=2mv/(m+\alpha'M)$ の式で表される。ここで m_0 : 落石の質量,v: 落石の速度,M: 擁壁質量, α' : 有効質量比となっており,落石の質量が回転角にも影響していることが推察される。

今回の実験における擁壁形状および重錘質量に対し て, 便覧による擁壁基礎地盤の塑性変形を考慮した可能 吸収エネルギーを満足する落石衝突エネルギーを求めた。 基礎地盤は剛体挙動に着目した実験結果6)より、基礎地 盤の影響はあまり大きくないことを確認出来たため、安 全側の評価になるように可能吸収エネルギーが大きくな る N値を 10 とした場合に対して計算を行った。表 -2には、重錘衝突エネルギーの設計値と実験値の一覧を示 す。各重錘質量での可能吸収エネルギーを満足する重錘 衝突エネルギーは、m=110 kg の場合はE=1.25 kJ、m=309 kg の場合はE=0.59 kJ, m=890 kg の場合はE=0.36kJ となった。その重錘衝突エネルギーでの実験での最大 回転角は1°未満となっており、便覧で設定している許容 回転角 θa の 2~3°より小さい。また、実験では、最初に ひび割れ発生したのは F1 の場合は E = 1.4 kJ, F3 およ びF9 の場合は E=1.1 kJ であり、押抜きはF1 ではE=2.4 kJ, S3 $\forall k = 3.0 \, \text{kJ}$, S9 $\forall k = 4.7 \, \text{kJ} \, \text{vision}$. 押抜きを発生させる重錘衝突エネルギーは、便覧で求め た可能吸収エネルギーを満足する落石衝突エネルギーの 約2倍から13倍となり、重錘質量が大きいほど安全側 となった。

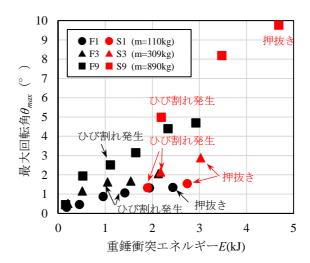


図-6 最大回転角と重錘衝突エネルギーの関係

表-2 重錘衝突エネルギーの設計値・実験値一覧

重錘質量 m (kg)	可能吸収エ ネルギーを 満足する <i>E</i> (kJ) 【設計値】	ひび割れ発 生時の E(kJ) 【実験値】		押抜き発生 時のE(kJ) 【実験値】	実験値/設計値
110	1.25	1.4	1.1 (F1)	2.4 (F1)	1.9
309	0.59	1.1	1.6 (F3)	3.0 (S3)	5.1
890	0.36	1.1	2.5 (F9)	4.7 (S9)	13.1

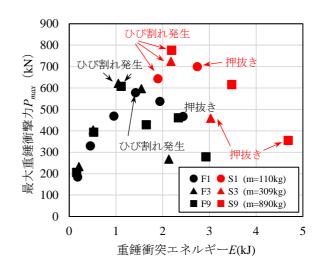


図-7 最大重錘衝撃力と重錘衝突エネルギー の関係

3.2 重錘衝擊力

図-7には、最大重錘衝撃力と重錘衝突エネルギーの 関係を示している。擁壁にひび割れが発生するまで、い ずれのケースも重錘衝突エネルギーの増加に対して、最 大重錘衝撃力は増加している。また、重錘衝突エネルギ ーに対する最大重錘衝撃力の増加率は、F1・S1シリーズ に比較して F3・S3 と F9・S9 シリーズの方が大きくなる 傾向が示されている。ひび割れの進展後のケースでは、

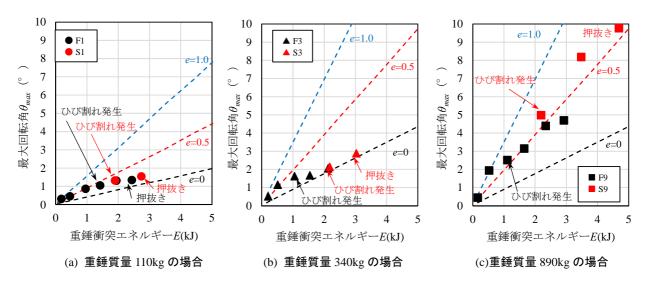


図-8 最大回転角と重錘衝突エネルギーの関係(便覧計算値との比較)

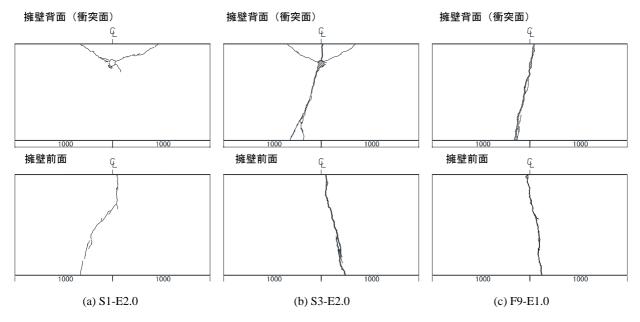


図-9 ひび割れ発生時の損傷状況

最大重錘衝撃力は減少しており、これはひび割れ等の損 傷の影響が大きいものと推察される。

3.3 反発係数

便覧における落石防護擁壁の設計では、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 7)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)と変化させ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-8には、重錘質量を変化させた場合の重錘衝突エネルギーと最大回転角との関係を示している。

図より、 $F1 \cdot S1$ と $F3 \cdot S3$ の場合には、重錘衝突エネルギーが小さい場合には、回転角は反発係数 e=0.5 と

した場合の計算値に近似し、重錘衝突エネルギーが大きく試験体にひび割れが発生した以降では反発係数 e=0とした場合の計算値に近づいていく。 $F9\cdot S9$ の場合には、重錘衝突エネルギーが小さい場合には、回転角は反発係数 e=1.0とした場合の計算値に近似し、重錘衝突エネルギーが大きくなると反発係数 e=0.5とした場合の計算値に近似する。

また、ひび割れ発生前の実験の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、重錘はその時点の平均速度とした。側面から撮影した高速度カメラでは重錘衝突直後の重錘ターゲットを補足できなかったため、上部から撮影した高速度

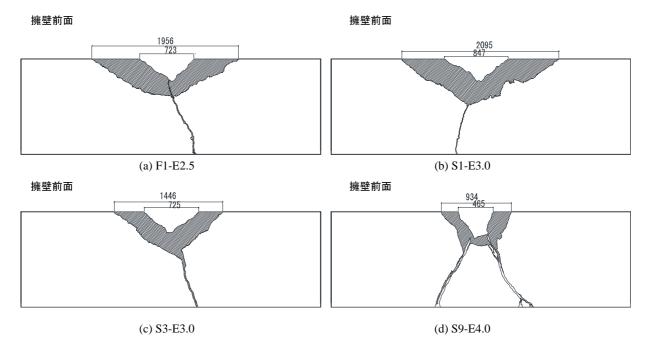


図-10 押抜き発生時の損傷状況

カメラ映像から算定した。実験から算出した反発係数は バラツキはあるが、 $F1\cdot S2$ では e=0.2 程度、 $F3\cdot S3$ で は e=0.6 程度、 $F9\cdot S9$ では e>0.8 程度となった。

3.4 損傷状況について

図-9には、各重錘質量で実施した実験ケースのひび割れ発生時の損傷状況の一例を示している。いずれのケースも擁壁前面には鉛直方向にひび割れが発生している。擁壁背面(衝突面)では、重錘質量が大きいと鉛直方向にひび割れが発生し、重錘質量が小さい場合には載荷点から上端斜め方向にひび割れが発生している。いずれもひび割れは発生しているが押し抜きには至ってはいない。

図-10には、押抜き破壊が発生したケースの実験終了後の損傷状況を示している。ひび割れ発生後の繰返し載荷によりひび割れや剥落が大きくなり押抜きに至っている。重錘質量が小さく重錘衝突速度が大きいほど押抜きの損傷幅は大きくなっている傾向にある。損傷形状には重錘質量、重錘衝突速度および重錘の形状についても影響するものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、有効抵抗長を擁壁高さの4倍とした場合の無筋コンクリート製擁壁模型の重錘衝突実験より、重 錘衝突時の動的挙動、重錘衝撃力および損傷状況について、本実験の範囲内において以下のことが明らかになった。

1) 擁壁挙動は、ひび割れの影響が少ない場合には、便 覧で仮定している擁壁全体が剛体運動する。しかし、 重錘衝突速度を漸増していくと衝突点を中心とし た局部的な変形が生ずる。

- 2) 最大回転角および重錘衝撃力は、重錘衝突エネルギーの増加に対して増加する。最大回転角は等価エネルギーでは重錘質量が大きいほど大きい。また、衝撃力には擁壁の損傷状態が大きく影響する。
- 3) 便覧による算定可能吸収エネルギーを満足する落 石衝突エネルギー(設計値)では、最大回転角は小 さく、ひび割れも発生しなかった。

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,pp213,2014.12
- 6) 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
- 7) 社団法人地盤工学会四国支部: 落石対策 Q&A, 2009.12