

論文 実規模落石防護擁壁の耐衝撃挙動の基礎的検討

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、擁壁延長を高さの4倍とする実規模落石防護擁壁を用いた重錘衝突実験における擁壁の回転角や衝撃力に着目し、実験結果と各設計手法を用いて算出した結果を比較し、設計手法の妥当性に関する検討を行った。その結果、1) 擁壁は、コンクリート剥落等の著しい損傷が発生しない範囲では、便覧で仮定されている剛体的な挙動を示す、2) 実験結果の最大回転角は、便覧および剛体力学に基づいて算出する方法において、反発係数を $e=0$ と仮定し算出する結果とほぼ対応する、3) 実験結果の最大衝撃力は、ラーメの定数を $\lambda=1.4 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ とする振動便覧式を用いて概ね安全側で評価可能である、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、損傷状況

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、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。しかしながら、落石の衝突によってコンクリートの剥離・剥落の損傷事例が確認されている。また、落石防護擁壁のような無筋コンクリート製の構造物に落石が衝突する場合の躯体の設計法については、便覧においては詳細に規定されるに至っていない状況である。

本研究では、実証実験を実施することによって現行擁壁の保有耐力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に、実規模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。また、安定評価の検討に必要な回転角や衝撃力について、既存の計算手法^{1) 2)}を用いて算出した結果と実験結果との比較を行い、合理的な設計手法の確立に関する基礎的な検討も行った。

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くな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、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、実験風景を示している。実験にはラフテレーンクレーンを2台使用し、1台目でワイヤロープに接続した鋼製重錘を吊り上げ衝突位置を決め、2台目によりそ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擁壁に載荷荷重を作用させることとした。重錘には、円柱状で載荷部が球状の鋼製重錘（**図-1**参照）を使用した。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、重錘に設置したひずみゲージ式加速度計による重錘加速度、高速度カメラによる重錘衝突速度、擁壁の変位、擁壁の回転角および重心浮上量である。高



写真-1 実験風景

*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 大学院工学研究科もの創造系領域 教授 博(工) (正会員)

*4 室蘭工業大学 大学院工学研究科もの創造系領域 特任教授 工博 (正会員)

速度カメラは有効画素数が 1,024×1,024 ，フレームレートが 1,000 fps であり，上方および側方に 2 台設置した。重錘衝突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，実験終了毎にひび割れ等の損傷状態も確認している。

2.2 擁壁模型および便覧での算定値

図-1 には，実験に用いた擁壁模型と重錘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を想定して，擁壁模型の高さ $H=2\text{ m}$ ，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 $L=8\text{ m}$ とした。

表-1 には，擁壁模型および重錘の諸元に対し，便覧の設計法により算定した許容回転角から求まる擁壁基礎地盤の可能吸収エネルギー E_M と E_M を満足する重錘衝突速度および重錘衝突エネルギーを示している。なお，設計条件としては，便覧において許容回転角 θ_a は $2\sim 3^\circ$ 以下にすることが規定されているため，許容回転角を $\theta_a=3^\circ$ ，地盤の N 値はコンクリート基盤のため $N=100$ と仮定した。

2.3 実験ケース

表-2 には，実験ケースの一覧を示している。本研究では 4 体の擁壁模型を用い，重錘落下高さを 4 種類に変化させた単一载荷実験を実施した。ケース名は，重錘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。表中には実験時におけるコンクリートの圧縮強度，高速度カメラ画像により算定した重錘衝突速度 v ，重錘衝突エネルギー E および実験終了後の損傷状況を記している。なお，実験ケース H12.5 の場合には計器の不調により計測不能であったため，実験終了後の損傷状況のみとしている。重錘衝突エネルギー E は，重錘の衝突速度 v を用いて算定した。

本実験では，H7.5 の場合が重錘衝突エネルギーにおいて設計条件における便覧での算定値 (表-1) に近い値となっている。

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

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。図より，H5.0 および H7.5 の場合には，150 ms 程度までは類似した変位分布を示しており，重錘衝突によって変位量としては小さいが，剛体的な運動をしていることが分かる。しかしながら，

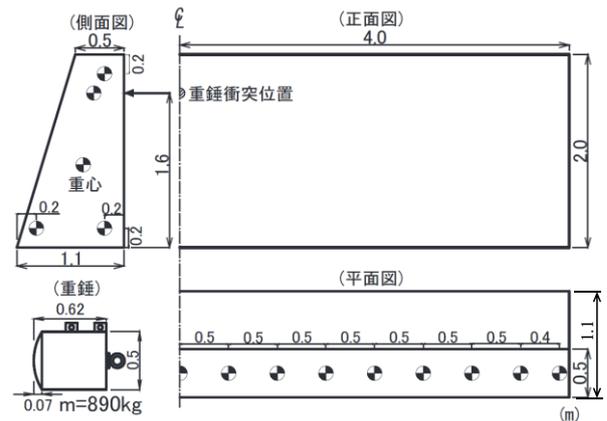


図-1 擁壁模型および重錘の形状寸法

表-1 設計値に相当する重錘衝突エネルギー

入力条件				可能吸収エネルギー E_M (kJ)	E_M を満足する値	
重錘質量 m (kg)	衝突位置 h (m)	許容回転角 θ_a ($^\circ$)	N 値		重錘衝突速度 v (m/s)	重錘衝突エネルギー E (kJ)
890	1.6	3.0	100	10.33	10.9	52.9

表-2 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	28.7		10.0	13.7	83.5	剥落
H12.5	34.2		12.5	-	-	押抜き

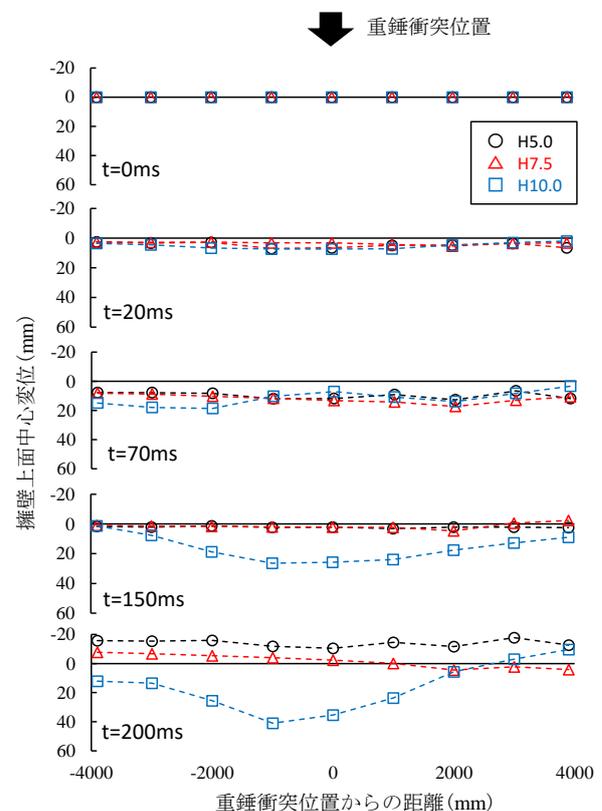
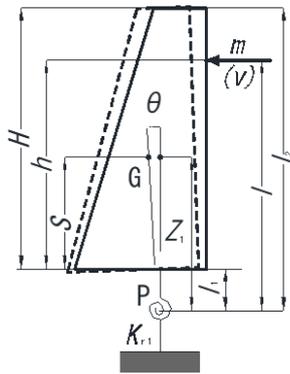
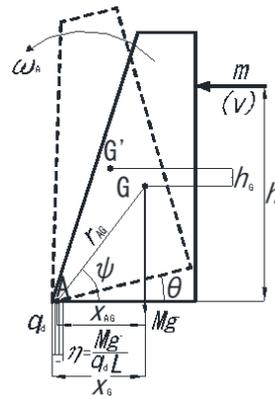


図-2 擁壁上面中心変位の経時変化



H : 擁壁の高さ
 S : 擁壁底面から重心までの距離
 G : 擁壁重心
 θ : 擁壁の弾性応答時の回転角
 m : 落石の質量
 V : 落石の速度
 l : 衝突点と回転中心(P)との距離
 l_1 : 擁壁底面と回転中心(P)との距離
 l_2 : 擁壁天端と回転中心(P)との距離
 h : 擁壁底面と衝突点(A)との距離
 Z_1 : 回転中心(P)と擁壁重心(G)との距離
 K_{r1} : 換算回転バネ係数

(a) 落石対策便覧での擁壁モデル



G : 擁壁重心
 θ : 擁壁の回転角
 m : 落石の質量
 M : 擁壁の質量
 V : 落石の速度
 ω_A : 衝突後の擁壁の角速度
 h : 擁壁底面と衝突点との距離
 h_G : 擁壁重心の浮上量
 ψ : G と回転中心Aを結んだ線が水平となす角度
 r_{AG} : A点からGまでの距離
 X_{AG} : 回転中心までの水平距離
 η : 地盤反力の分布幅
 q_d : 地盤の極限支持力
 L : 擁壁の延長

(b) 剛体力学に基づいた場合の擁壁モデル

図-3 落石防護擁壁のモデル

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ものの、コンクリートの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性状を示している。なお、擁壁の最大水平変位と最大水平変位発生時における衝突時からの経過時間は、H5.0, H7.5, H10.0 の場合で、それぞれ 60 ms 経過後に約 12 mm, 71 ms 経過後に約 14 mm, 188 ms 後に約 36 mm であった。

本実験結果から、擁壁高さが $H = 2\text{m}$ の実規模擁壁において、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も、剥落等の著しい損傷が発生しなければ、剛体的な挙動を示すことが明らかになった。

回転角の評価方法としては、便覧を用いて算出する方法¹⁾²⁾および右城らによって提案されている剛体力学に基づいて算出する方法²⁾がある。図-3には、便覧および剛体力学に基づいた場合の擁壁のモデルを示している。便覧を用いて算出する方法の場合には、地盤が弾塑性応答したときの地盤バネの変形エネルギーと擁壁が弾性応答したときの変形エネルギーを等しいと見なしたニューマークのエネルギー一定則を適用し最大回転角を求めている。また、剛体力学に基づいて算出する場合、擁壁が剛体運動するものとして、1)擁壁・地盤を剛体と見なす、2)擁壁の運動はすべりか回転かのいずれかとする、3)回転の場合は擁壁の重心上昇により回転運動エネルギーが位置エネルギーに変換されるものとする、とした仮定の下で運動量保存則を適用した設計法となっている。

図-4には、重錘衝突速度と擁壁側面部での最大回転角の関係を示している。なお、図中には、便覧により算出した回転角および剛体力学に基づいて算出した回転角も記載している。便覧の算出条件としては、反発係数 $e = 1$ (完全弾性衝突) とし、コンクリート地盤の N 値を $N = 100$ と仮定して算出した場合と、反発係数 $e = 0$ (完全非弾性衝突) とし算出した場合について記載している。

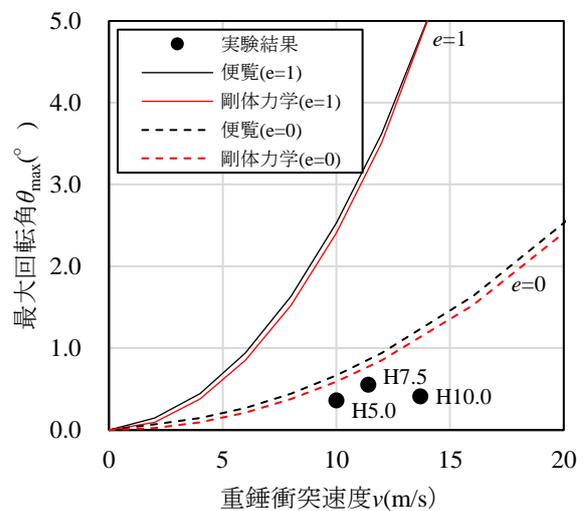


図-4 重錘衝突速度と最大回転角の関係

また、剛体力学に基づいて計算した場合の算出条件としても、便覧の算定条件と同様に反発係数を $e = 1$ および $e = 0$ とした場合について記載している。

図より、実験結果の擁壁の最大回転角は重錘衝突速度が速いほど増加するものと考えられるが、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い結果となっている。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ことによるものと推察される。

便覧および剛体力学に基づいて算出する方法では、今回の実験での諸元に対し類似した分布性状を示している。いずれの算出方法においても反発係数 $e = 1$ の場合には、各算定値は実験結果に比して過大に評価することが分かる。これより、便覧では反発係数 $e = 1$ (完全弾性衝突) 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、実験値は反発係数 $e = 0$ を仮定した場合の算定

値よりも若干小さい値を示している。これは、設計においては擁壁を剛体と仮定し損傷しないとしているのに対し、実験においては擁壁の損傷等によってエネルギーが消費されたことによるものと推察される。これより、H10.0のような著しい損傷がなければ、最大回転角は、各算定式において反発係数 $e=0$ (完全非弾性衝突) と仮定する場合とほぼ対応することが明らかになった。

3.2 重錘衝撃力

落石による衝撃力の評価方法としては、振動便覧式による方法¹⁾および運動量保存則を適用する方法²⁾がある。振動便覧式による方法では、落石を球体、被衝突面を平面と仮定し、Hertzの接触理論を適用し、落石比重を2.6と仮定して、次式により最大衝撃力を求めている。

$$P_{\max} = 2.108 (mg)^{2/3} \lambda^{2/5} H^{3/5} \quad (1)$$

ここに、 P_{\max} : 落石の衝撃力 (kN), m : 落石の質量 (ton), g : 重力加速度 (m/s^2), λ : ラーメの定数 (kN/m^2), H : 落下高さ (m) 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および式(1)の振動便覧式のラーメの定数 λ を変化させた場合の算出結果を示している。図より、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。実験値は、式(1)を適用するとラーメの定数が $0.4 \times 10^6 \sim 1.4 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ の範囲にあり、ラーメの定数を $1.4 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ とすることにより実験での最大衝撃力を概ね安全側で評価可能であることが分かる。

運動量保存則を適用する方法の場合には、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(2)のように示される。

$$mv(1+e) = \int p(t) dt \quad (2)$$

ここで、重錘衝突時における実験結果の衝撃力波形は、図-6のように示されることから、簡略化して最大衝撃力を P 、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、式(2)の右辺は $\int p(t) dt = P\Delta t/2$ として表される。これを式(2)に代入すれば、最大衝撃力 P は式(3)のように求められる。

$$P = 2mv(1+e) / \Delta t \quad (3)$$

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

図-7には、実験結果の重錘衝突速度と最大衝撃力の関係および式(2)の運動量保存則を適用して算定した結果を示している。なお、算出条件としては、図-6を参考に、荷重継続時間 $\Delta t = 0.003 \text{ s}$ 、反発係数としては $e = 1$ (完全弾性衝突) および $e = 0$ (完全非弾性衝突) について示している。H7.5の実験結果と式(3)の結果を比較すると、実験結果は反発係数を $e = 0$ とする場合に概ね対応していることが分かる。

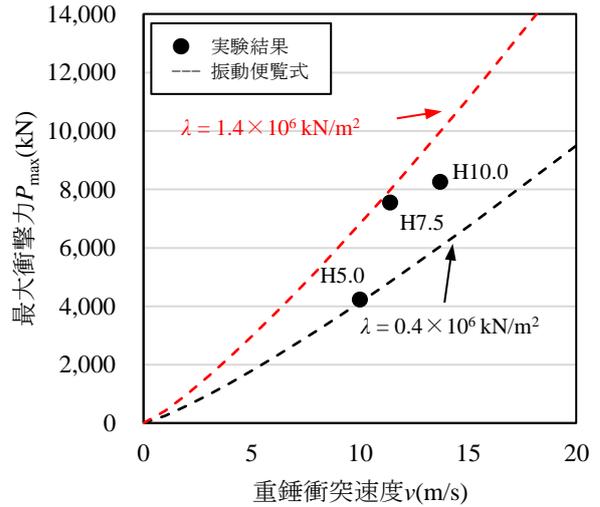


図-5 重錘衝突速度と最大衝撃力の関係 (振動便覧式)

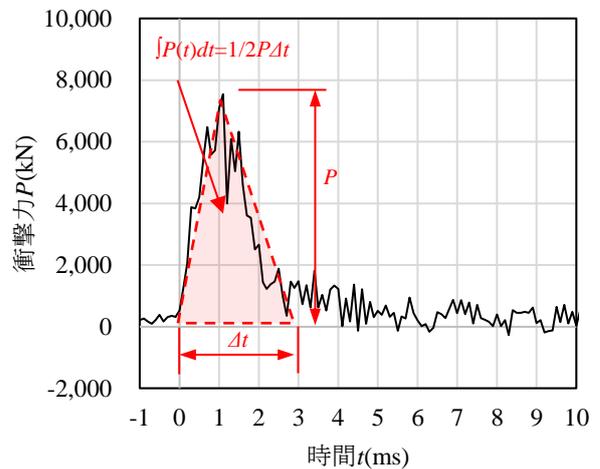


図-6 重錘衝撃力波形 (H7.5)

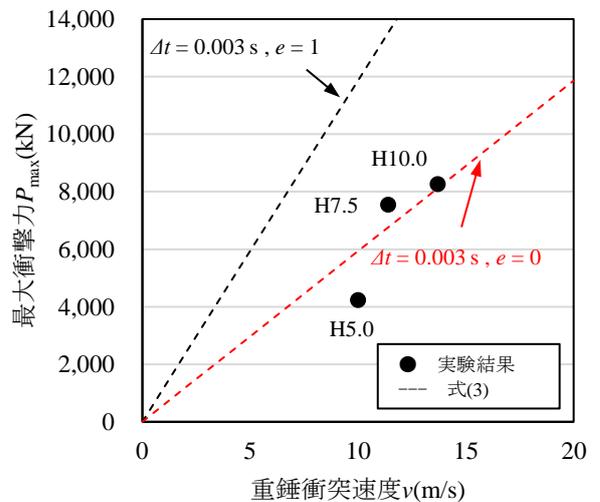


図-7 重錘衝突速度と最大衝撃力の関係 (運動方程式を適用する方法)

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 時点であり、重錘衝突位置の背面に発生し

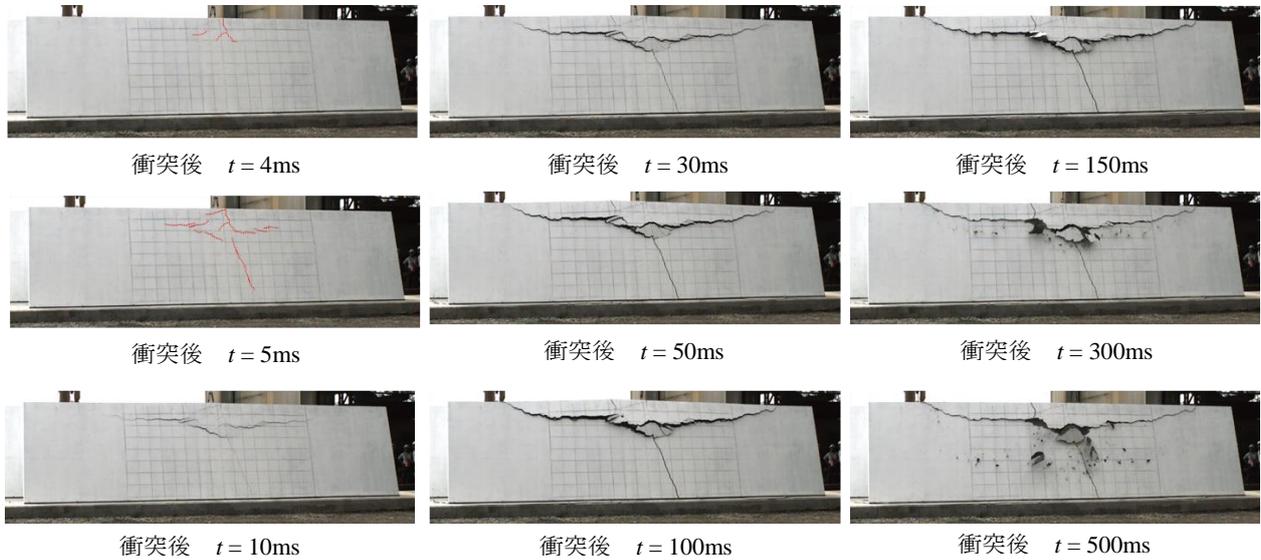


写真-2 背面高速度カメラ画像 (H10.0)

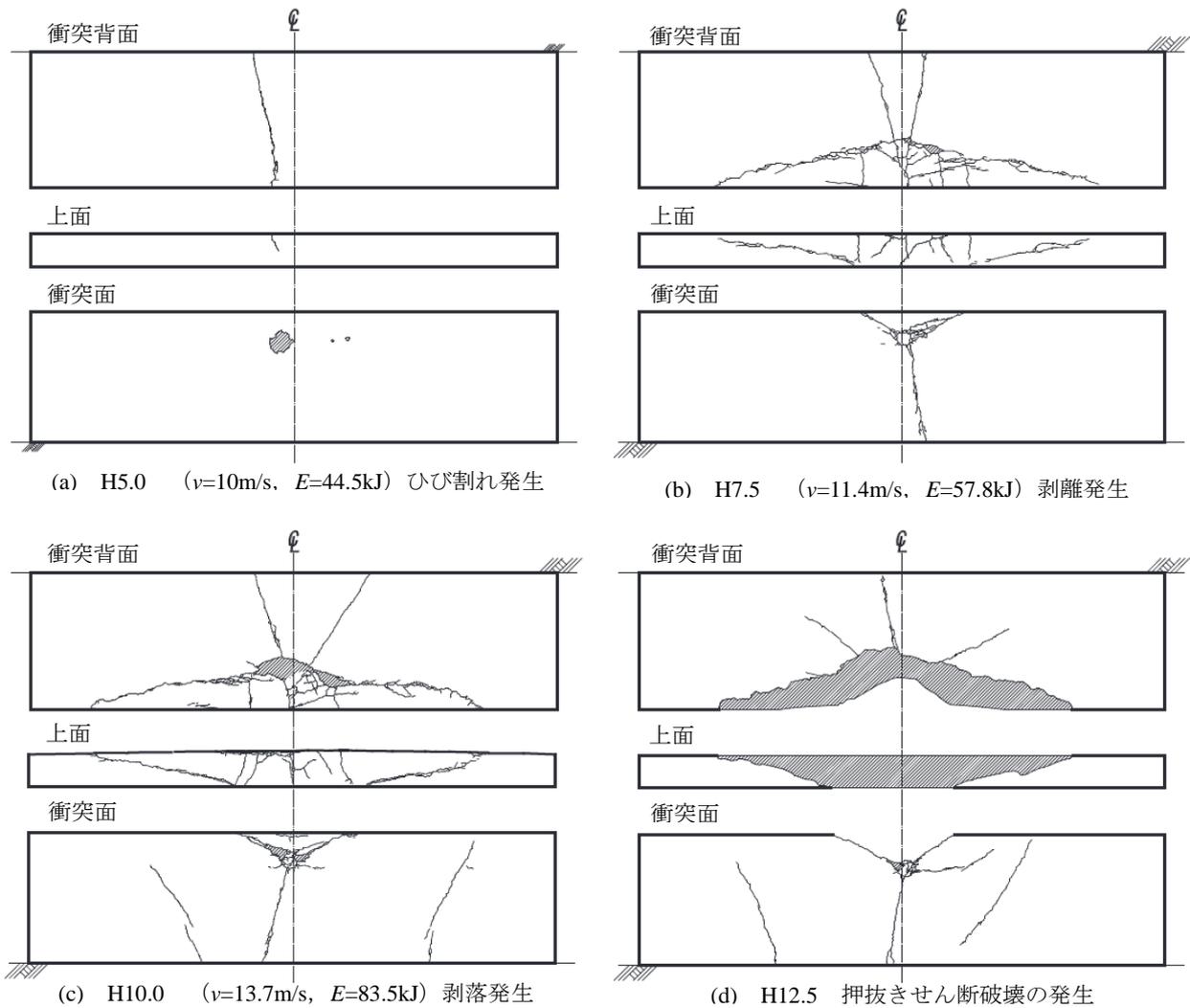


図-8 実験終了後の損傷状態

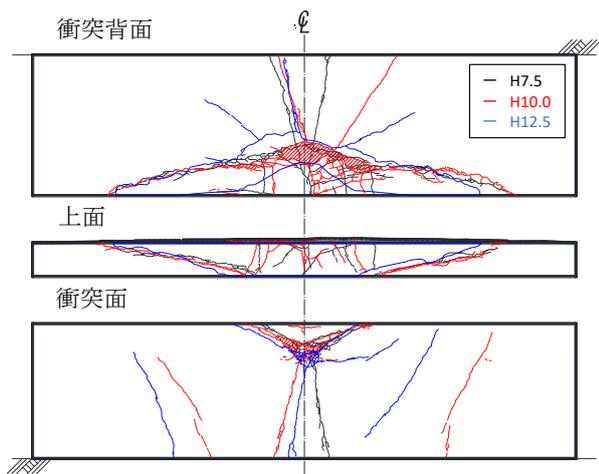


図-9 損傷比較図

ている。衝突後 5 ms 時点では重錘衝突の背面から水平方向および垂直方向にひび割れが進展している。なお、ひび割れ幅が小さい 4 ms、5 ms 時点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 10ms 時点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ことが確認できる。その後もひび割れは横方向に伸展しており、衝突後 30 ms 経過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。300 ms 経過後には、完全に剥落しているのが確認された。他のケースにおいても重錘衝突後 4~5 ms 時点で衝突背面には最初のひび割れが発生していることを確認している。

図-8 には実験終了後の損傷状態を、図-9 には損傷を重ねた比較図 (H7.5, H10.0, H12.5) を示している。両図より、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°~67°の角度で上方へ V 字状の斜めひび割れおよび下方には縦ひび割れが発生していることが分かる。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、衝突位置から擁壁厚さ方向に仰角 25°~32°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°~75°の角度で擁壁の上面方向へ V 字状の斜めひび割れが進展している。

本実験では、表-1 に示すように、許容回転角を $\theta_a = 3^\circ$ 、 $N = 100$ と仮定して算出した場合に、可能吸収エネルギーを満足する重錘衝突エネルギーは $E = 52.9 \text{ kJ}$ となった。設計相当の重錘衝撃エネルギーである H7.5 の場合には、重錘の衝突に伴い擁壁衝突背面に小さな剥離が発生する。これは道路側に大きな影響を及ぼす損傷ではないが、便覧では剛体と仮定して設計していることもあり、今後は損傷を考慮した検討も必要であるものと判断される。

なお、本実験では、設計値の約 1.6 倍の重錘衝突エネルギーで擁壁背面側にコンクリートの剥落が発生、約 2 倍の目標重錘衝突エネルギーで押抜きに至っている。

4. まとめ

本研究では、擁壁延長を高さの 4 倍とする実規模擁壁模型を用いた重錘衝突実験を実施し、その動的挙動、衝撃力および損傷条件についての検討を行った。また、安定評価の検討に必要な回転角や衝撃力について既存の計算手法を用いて算定した結果と実験結果を比較し、設計手法に関しても基礎的な検討を行った。本実験の範囲内で明らかになった事項を整理すると、以下の通りである。

- (1) 擁壁延長を高さの 4 倍とする実物大擁壁模型において、コンクリート剥落等の著しい損傷が発生しなければ、便覧で仮定されている剛体的な挙動を示す。
- (2) 擁壁の最大回転角は、コンクリート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、実験結果の回転角は評価式において完全非弾性衝突 ($e = 0$) を仮定する場合とほぼ対応する。
- (3) 実験結果の最大衝撃力は、ラーメの定数 $\lambda = 1.4 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ とする振動便覧式を用いて概ね安全側で評価可能である。

参考文献

- 1) (公社) 日本道路協会：落石対策便覧, 2017.12.
- 2) (公社) 地盤工学会, 落石対策工の設計法と計算例, pp215-232, pp305-307, 2014.12.
- 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