

落石防護擁壁の回転および衝撃力に関する基礎的検討

Basic study on rotation and impact force of rockfall protection retaining wall

山澤文雄*, 今野久志**, 安中新太郎***, 小室雅人****, 岸徳光*****

Fumio Yamasawa, Hisashi Konno, Satoshi Kasai, Masato Komuro, Norimitsu Kishi

* (国研) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

**博 (工), (国研) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

*** (国研) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

****博 (工), 室蘭工業大学教授, 大学院工学研究科もの創造系領域(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

*****工博, 室蘭工業大学特任教授, 大学院工学研究科もの創造系領域(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

キーワード: 落石防護擁壁, 衝撃载荷試験, 回転, 衝撃力

Keywords: rock-fall protection retaining wall, Impact loading test, rotate, Impact force

1. はじめに

急崖斜面に面する道路沿いには、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。擁壁の現行設計は、落石対策便覧¹⁾（以下、便覧）に基づき行われている。便覧では擁壁を剛体と仮定し、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設計することとされている。

一方、設計では擁壁は剛体と仮定されているものの、一般的に重力式の無筋コンクリート構造であることから、落石の衝突によるコンクリートの剥離・剥落の損傷事例が確認されている。しかしながら、無筋コンクリート製擁壁に落石が衝突した際の破壊や損傷を考慮した設計法については、便覧において詳細に記載されていない。

このような背景のもと、著者らの研究グループでは、落石防護擁壁の重錘衝突実験を実施し、その保有耐力と衝撃荷重に対する躯体の安全性を把握するとともに、合理的な設計法を確立することを最終目標に種々の検討を実施している。本論文では、高さ 2m の実規模の擁壁模型を用いた重錘衝突実験を対象に、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既報²⁾を再構成して紹介する。

ここでは安定評価の検討に必要な回転角や衝撃力について、便覧の計算手法¹⁾³⁾を用いて算出した結果と破壊・損傷状況も含めた実験結果との比較を行い、合理的な設計手法の確立に向け基礎的な検討を行った。

1.1 実験方法

既往の実験結果⁴⁾より砂利基盤上とコンクリート基盤上では、擁壁の動的挙動に大差がないことが確認されている。これより、本実験においては擁壁をコンクリート基盤上に設置することとし、さらにコンクリート基盤上に擁壁つま先部に接するストッパー（丸鋼φ29mm）を設けて擁壁の水平方向の移動を拘束した。

図-1 には、実験概要図および使用した重錘の形状寸法を示している。実験にはラフテレーンクレーンを 2 台使用した。1 台目のクレーンで重錘の衝突位置を決め、2 台目のクレーンによりその重錘を所定の高さまで吊上げ、着脱装置の切り離しにより振り子運動を開始し、擁壁に衝撃力を作用させることとした。重錘には円柱状で載荷部が球面状の鋼製重錘（質量：890kg）を使用した。重錘衝突位置は天端からの余裕高を考慮し、擁壁高さ（H）に対して基部から 0.8H（1.6m）とし、延長方向に対しては

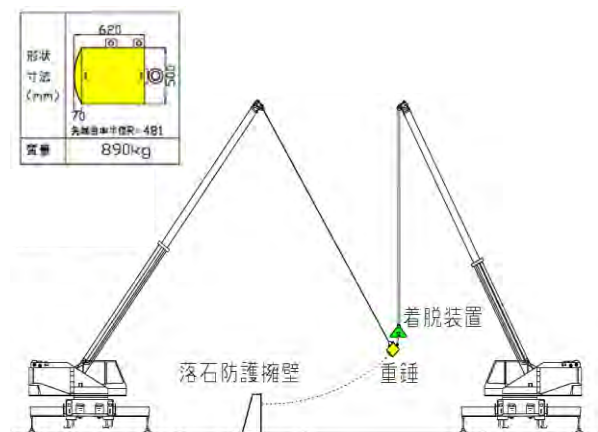


図-1 実験概要図

擁壁中央とした。

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。高速度カメラは有効画素数が $1,024 \times 1,024$ 、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 0.1ms でデジタルデータレコーダにて収録を行った。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。

1.2 擁壁模型および便覧での算定値

図-2 には、実験に用いた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、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 $1:0.3$ の勾配とした。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 倍の $L=8.0\text{m}$ とした。

また実験の各ケースの設定値を決定するために、擁壁模型の諸元に対す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 E_M を算出し、そこから便覧の設計法により逆算して、この E_M に相当する重錘衝突速度および重錘衝突エネルギーを求めた（表-1）。許容回転角 θ_a の設計条件については、便覧において $2 \sim 3^\circ$ 以下と規定されているため、ここでは $\theta_a=3^\circ$ とした。また、地盤の N 値はコンクリート基盤であることから $N=100^{\text{⑤}}$ と仮定した。

1.3 実験ケース

表-2 には、実験ケースの一覧を示している。実験は落下高さを変え単一載荷で実施した。ケース名は重錘の衝突位置を基準とした落下高さ（m）を H に付して示している。表中には実験時の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 、 v から算出した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載している。なお、実験ケース H12.5 は計器の不調により計測値を得ることができず、実験終了後の損傷状況のみ示している。本実験においては実験ケース H7.5 の重錘衝突エネルギーが、前節の設計条件に対する便覧での算定値（表-1）に最も近い値となっている。なお、H7.5 および H10.0 のケースは衝突背面を高速度カメラにより撮影している。

2. 実験結果および考察

2.1 損傷状況

写真-1 には、衝突背面側に設置した高速度カメラにより撮影した H10.0 の実験ケースの経過時間毎の画像を

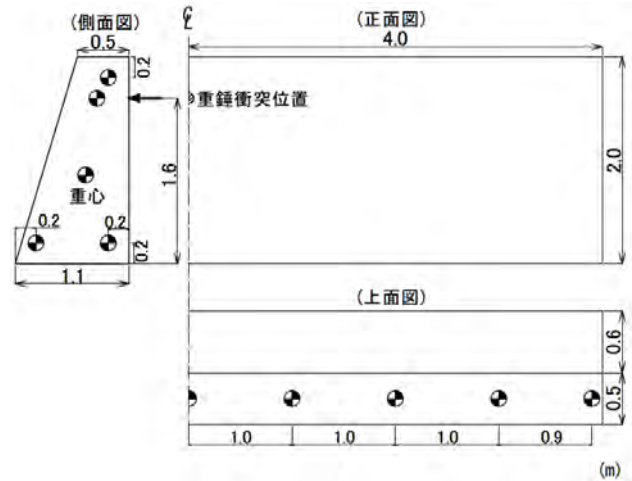


図-2 擁壁模型寸法およびターゲット設置位置図

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

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 4ms 時点であり、重錘衝突位置の真裏に発生している。衝突後 5ms 時点ではそこ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 4ms、5ms 時点の画像にはひび割れを赤色で示している。また、衝突後 10ms 時点では水平方向のひび割れはさらに伸展し、ひび割れ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水平方向に伸展し、衝突後 30ms 経過後には重錘衝突位置の真裏で押抜きせん断破壊の兆候が見られる。300ms 経過後には、擁壁衝突背面のコンクリートの一部が完全に剥落していることが確認される。なお、他のケースにおいても重錘衝突後 4 ~ 5ms 時点で、同様に衝突背面に最初のひび割れが発生していることを確認している。

図-3 に全ケースにおける実験終了後の損傷状態を示

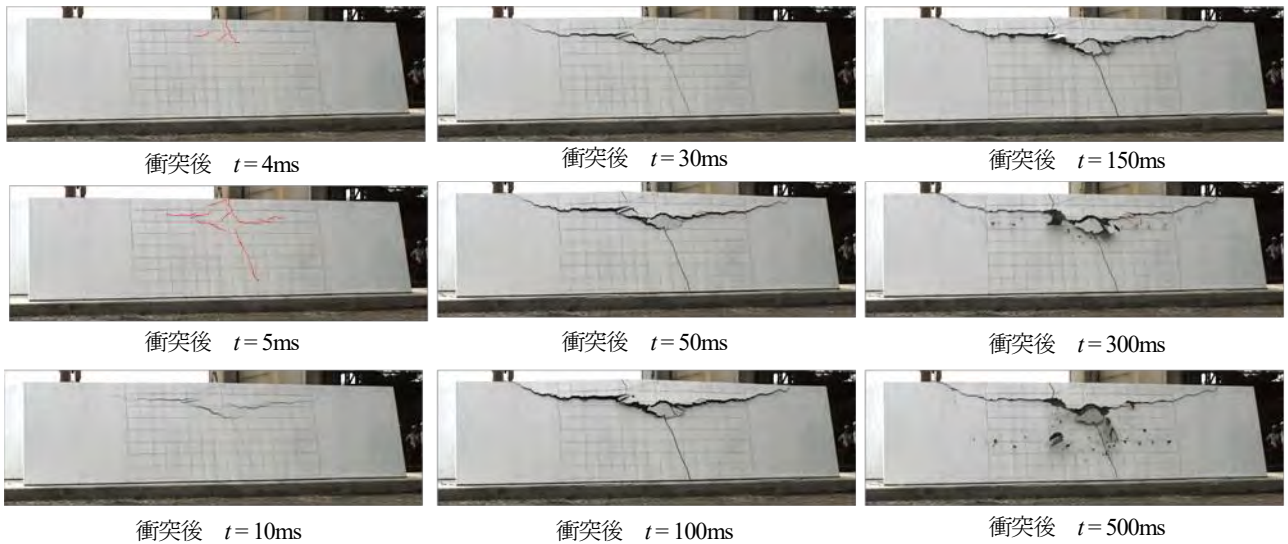


写真-1 背面高速度カメラ画像 (ケース H10.0)

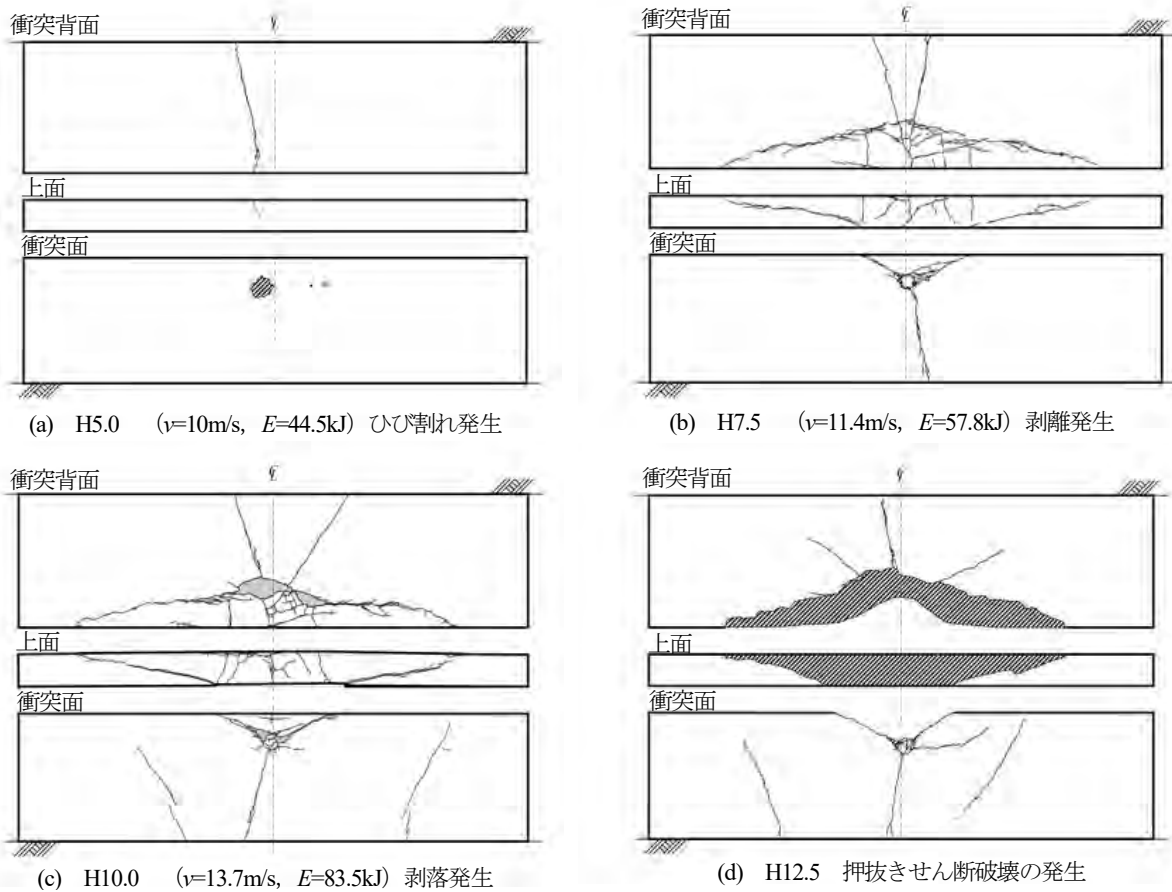


図-3 実験終了後の損傷状態

す。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、最終的には押抜きせん

断破壊に至っている。また、衝突位置から擁壁厚さ（衝突背面）方向に俯角 $25^{\circ} \sim 32^{\circ}$ の位置が衝突背面部ひび割れの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が進展している。

本実験に用いた擁壁模型においては表-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

設計値に相当する重錘衝突エネルギーは $E = 52.9 \text{ kJ}$ となった。この値におおよそ対応する H7.5 の場合には、重錘の衝突により擁壁衝突背面に小さな剥離が発生する。小さな剥離は道路側に大きな影響を及ぼす損傷ではないものの、擁壁サイズが大きくなると、衝突による剛体回転に費やされるエネルギーに比し損傷・破壊に費やされるエネルギーが大きくなるものと推察されることから、今後はさらに擁壁の損傷条件を考慮した検討が必要となるものと判断される。なお、本実験においては設計値の約 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 倍の重錘衝突エネルギーで押抜きに至っている。

2.2 重錘衝突時における擁壁の動的挙動

図-4 には、擁壁上面各点の厚さ方向の水平変位分布について時間を追って示している。図より、実験ケース H5.0 および H7.5 の場合には、150ms 程度まではほぼ同じ変位分布を示しており、重錘衝突によって剛体的な運動をしていることが分かる。しかしながら、実験ケース H10.0 の場合には、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。これは、明確な押抜きせん断破壊には至ってはいないものの、ひび割れが貫通しコンクリートの剥落が発生する程度の損傷状態であったためと推察される。

本実験結果から、擁壁高さ 2m、延長 8m (便覧の有効長さ：擁壁高さの 4 倍) の条件下では、落石の衝突による剥落等の著しい損傷が発生しなければ、擁壁は剛体的な挙動を示すことが確認できた。

次に実験値の最大回転角と便覧を用いて算出した計算値とを比較した。便覧を用いて算出する方法¹⁾³⁾については、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が等しいもの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。

図-5 には、重錘衝突速度と擁壁側面部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定した回転角も破線で示している。その算出条件としては、コンクリート地盤の N 値を $N = 100$ 、反発係数 $e = 1$ (完全弾性衝突) と仮定して算出した場合、および $e = 0$ (完全非弾性衝突) と仮定して算出した場合について図示している。

図中の便覧により算出した回転角の破線の様に、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くなっている。これは、図-4 に示すように衝突によって重錘衝突位置を中心としたひび割れの発生や剥離したコンクリートブロックの移動等に多くのエネルギーが消費されたことによるものと推察される。また、最大回転角の実験値は便覧を用いて反発係数 $e = 0$ と仮定し算出した場合に近い値を

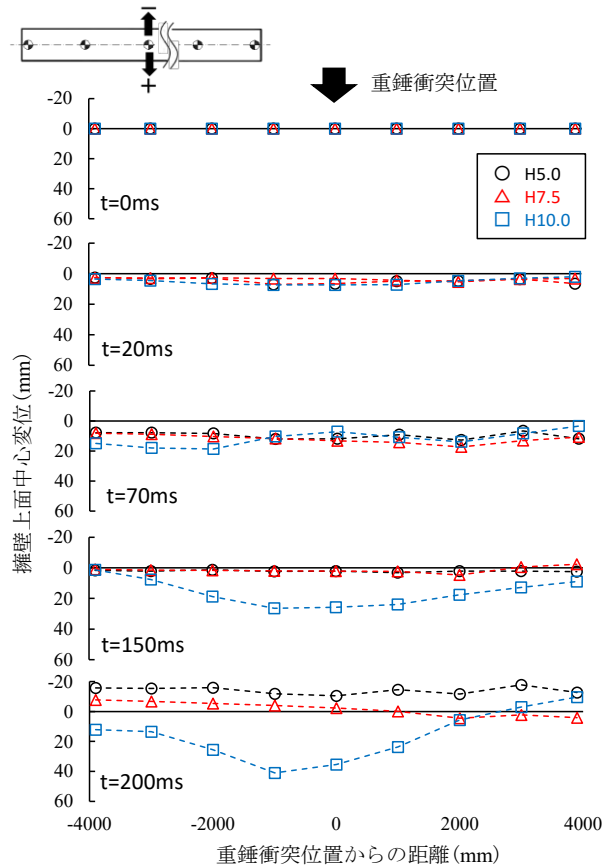


図-4 擁壁上面中心変位の経時変化

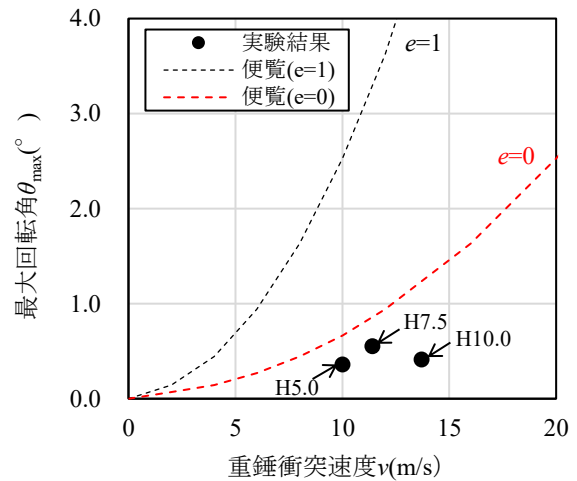
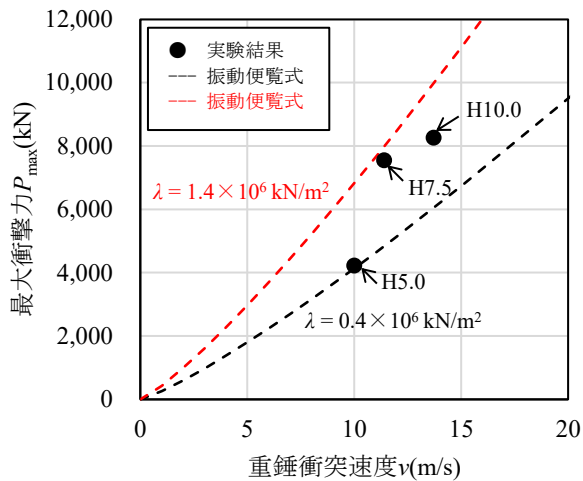


図-5 重錘衝突速度と最大回転角の関係

示している。このことから H10.0 のような著しい損傷が生じなければ、最大回転角は反発係数 $e = 0$ (完全非弾性衝突) と仮定する場合と近い値になることが分かる。

2.3 重錘衝撃力

本実験では、設計衝突エネルギー相当の落石によって擁壁が損傷することが確認されたことから、躯体の設計法をより適切に構築するためには、入力作用として衝撃



図一6 重錘衝突速度と最大衝撃力の関係

力の評価が重要となる。ここでは、落石による衝撃力の評価方法として、振動便覧式による方法⁶⁾を用いて検討を行った。同方法では、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。

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

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。

図一6には、重錘衝突速度と最大衝撃力の実験値および、式(1a)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破線で示している。図より、最大重錘衝撃力は重錘衝突速度の増加に応じて増加する傾向にあることが分かる。実験値は式(1a)を適用するとラーメの定数が $0.4 \times 10^6 \sim 1.4 \times 10^6 kN/m^2$ の範囲にあり、ラーメの定数を $1.4 \times 10^6 kN/m^2$ とすることにより最大衝撃力を概ね安全側で評価可能であることが分かった。

3. おわりに

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、損傷条件、動的挙動、衝撃力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便覧の計算手法を用いて算定した結果と実験結果を比較し、合理的な設計手法の確立に向け基礎的な検討を行った。

その結果、擁壁は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し、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ことが分かった。さらに、損傷が大きくなると衝突位置を中心とした局所的な変状を示すとともに剛体回転量は低下することが分かった。

また、実験と便覧の計算手法を比較することにより、実験の回転角は評価式において完全非弾性衝突($e=0$)とした場合と近い値となることが分かった。さらに、本実験の範囲においては、最大衝撃力はラーメの定数 $\lambda = 1.4 \times 10^6 kN/m^2$ とする振動便覧式を用いることにより概ね安全側に評価可能であることが分かった。

参考文献

- 1) (公社) 日本道路協会：落石対策便覧, 2017.12.
- 2) 山澤文雄, 今野久志, 小室雅人, 岸徳光：実規模落石防護擁壁の耐衝撃挙動の基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp. 607-612, 2020.7
- 3) (公社) 地盤工学会, 落石対策工の設計法と計算例, pp. 215-232, 2014.12.
- 4) 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
- 5) (社) 地盤工学会四国支部：落石対策 Q&A, p.181, 2009.12
- 6) (社) 土木学会：土木技術者のための振動便覧, 1985.