

高さ 3m の落石防護擁壁に対する衝撃荷重載荷実験

土木研究所寒地土木研究所 正会員 ○山澤文雄
土木研究所寒地土木研究所 正会員 今野久志
室蘭工業大学大学院 名誉会員 岸徳光

土木研究所寒地土木研究所 正会員 安中新太郎
室蘭工業大学大学院 正会員 小室雅人

1. はじめに

現行の落石防護擁壁（以下、擁壁）の設計は、落石対策便覧¹⁾（以下、便覧）に基づいて行われている。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、このような損傷による影響を考慮した躯体の設計法は、便覧に記載されていない。本研究は実規模実験により擁壁の保有性能を把握し、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、高さ 3 m の実規模擁壁に対する重錘衝突実験を実施し、衝突速度を変化させた場合の重錘衝撃力、擁壁の動的挙動および損傷状況について検討を行った。

2. 試験概要および実験ケース

写真-1には実験状況を示している。実験にはラフテレーンクレーンを 2 台使用し、擁壁に対し振り子運動によって重錘を衝突載荷させている。重錘は質量 890 kg、直径 0.5 m の円柱状で、載荷部が球面状の鋼製重錘を使用した。重錘衝突位置は天端からの余裕高を考慮し、天端から 0.5 m 低い箇所とし、延長方向に対しては擁壁中央とした。

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衝撃力、高速度カメラ画像により算定した擁壁の天端変位、重錘衝突速度および擁壁の回転角である。擁壁の形状寸法は、実構造にも適用されている断面（高さ $H=3.0$ m）であり、天端および基部の壁厚がそれぞれ $B_1=0.5$ m、 $B_2=1.4$ m、背面（重錘衝突面）は鉛直、前面（衝突背面）は 1:0.3 の勾配とした。擁壁延長は $L=8.0$ m である。

便覧では、落石と擁壁の衝突を完全弾性衝突と仮定し、最大回転角の許容値として許容回転角 θ_a は 2~3°以下を目安としている。表-1には擁壁の許容回転角に対応する重錘衝突エネルギーを示している。ここで、重錘衝突速度および重錘衝突エネルギーは、擁壁の許容回転角と擁壁の諸元に対応する可能吸収エネルギー E_M を求め、便覧の設計法を用いて逆算して評価した。地盤の N 値は、コンクリート基盤であることより $N=100$ ²⁾と仮定した。

表-2には、表-1の設計値に相当する重錘衝突エネルギーを基に設定した実験ケースを示している。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 に付して表している。表には、高速度カメラ画像により算定した実重錘衝突速度 v 、 v から算定した重錘による衝突エネルギー E 、実験時のコンクリートの圧縮強度および実験終了後の損傷状況を示している。

3. 試験結果

図-1には各ケースの損傷を重ね合わせた比較図を示している。衝突面には重錘衝突部を中心として約 70°の角度で擁壁上面方向へ V 字状



写真-1 実験状況

表-1 設計値に相当する衝突エネルギー

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 (°)	N値		重錘衝突速度 v (m/s)	重錘衝突エネルギー E (kJ)
890	2.5	2.0	100	15.8	16	115
		3.0		23.9	20	174

表-2 実験ケース一覧

ケース名	落下高 (m)	重錘質量 (kg)	重錘衝突速度 (m/s)	重錘衝突エネルギー (kJ)	コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)	損傷状況
H10.0	10.0	890	13.7	83	34.5	ひび割れ
H12.5	12.5		15.2	103		ひび割れ (一部剥落)
H15.0	15.0		18.1	146		押抜き

キーワード 重錘衝撃実験、落石防護擁壁、実規模模型、動的挙動、重錘衝撃力

連絡先 〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34 土木研究所寒地土木研究所寒地構造チーム TEL 011-841-1698

の斜めひび割れおよび縦ひび割れが発生している。また、衝突位置から擁壁厚さ（背面）方向には俯角 37° で衝突背面部に V 字状の頂点があり、その頂点を中心に約 70° の角度で上方に V 字状の斜めひび割れが発生している。今回の実験において、ケース H10.0 ($E=83\text{kJ}$), H12.5 ($E=103\text{kJ}$) の場合には、いずれも重錘衝突位置を通る鉛直方向の曲げひび割れと押抜きせん断破壊の兆候を示す斜めひび割れが発生している。また、ケース H15.0 ($E=146\text{kJ}$) の場合には、押抜きせん断破壊によってコンクリート塊が完全に分離している。この時の重錘衝突エネルギーは表-1 に示す許容回転角 $2^\circ\sim 3^\circ$ の間の値となっている。

図-2 には、衝突エネルギーと擁壁側面部の最大回転角の関係を示している。図中、便覧により算定した最大回転角を破線で示している。算定に当たっては、基盤の N 値を $N=100$ 、反発係数を $e=1$ （完全弾性衝突）、 $e=0$ （完全非弾性衝突）と仮定した場合を設定した。最大回転角に関する実験結果の中で H10.0 と H12.5 の場合には、便覧の反発係数 $e=0$ を仮定する場合の結果に比較的近いことが分かる。これより、H15.0 の場合のような押抜きせん断破壊が生じなければ、最大回転角は反発係数を $e=0$ と仮定することにより安全側に評価可能である。

本実験結果において、擁壁が設計条件相当の重錘衝突エネルギーによって損傷することが確認された。躯体の合理的な設計法を検討するにあたり、入力作用としての衝撃力評価が重要である。ここでは、振動便覧式³⁾に基づいて算定した最大衝撃力と実験結果を比較することにより、算定法の妥当性を検証した。振動便覧式に基づいた手法では、落石を球体、被衝突面を平面と仮定し、さらに Hertz の接触理論を適用し落石の比重を 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-3 には、重錘衝突速度と最大衝撃力に関する実験結果及び、式(1)の振動便覧式においてラーメの定数 λ を $\lambda=1.4\times 10^6\text{ kN/m}^2$ と仮定する場合の算出結果を破線で示している。図より、実験値は式(1)におけるラーメの定数を $\lambda=1.4\times 10^6\text{ kN/m}^2$ とすることにより安全側で最大衝撃力を評価可能であることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、高さ 3 m の実規模擁壁を用いた重錘衝突実験を実施し、損傷状況の把握および動的挙動や衝撃力に関する評価を試みた。その結果、擁壁は設計条件相当の重錘衝突エネルギーにより押抜きせん断破壊が発生する可能性があること。実験結果と便覧に基づいた算定値との比較においては、実験の最大回転角は便覧の評価式において完全非弾性衝突 ($e=0$) と仮定することにより安全側に評価可能であること。また、最大衝撃力はラーメの定数 $\lambda=1.4\times 10^6\text{ kN/m}^2$ とする振動便覧式により安全側で評価可能であることが明らかになった。

参考文献

- 1) (公社) 日本道路協会：落石対策便覧，2017.12。
- 2) (社) 地盤工学会四国支部：落石対策 Q&A，2009.12
- 3) (社) 土木学会：土木技術者のための振動便覧，1985。

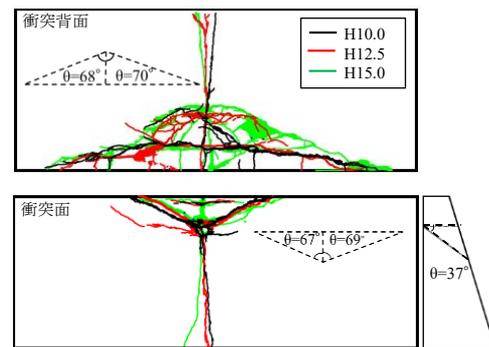


図-1 損傷比較図

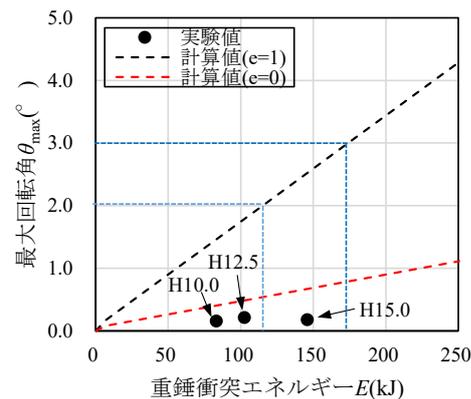


図-2 衝突速度と最大回転角の関係

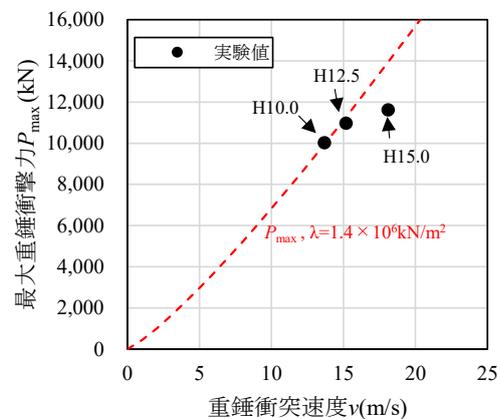


図-3 衝突速度と最大衝撃力の関係