

(13) 杭付形式RC落石防護擁壁の重錘衝突実験

Weight impact test of RC rock-fall retaining-wall with piled foundations

刈田 圭一*, 川瀬 良司**, 岸 徳光***, 岡田 慎哉****
Keiichi Karita, Ryoji Kawase, Norimitsu Kishi, Sin-ya Okada

*構研エンジニアリング 防災施設部 (〒065-8510 札幌市東区北18条東17丁目1-1)

**博(工) 構研エンジニアリング 取締役 (〒065-8510 札幌市東区北18条東17丁目1-1)

***工博 室蘭工業大学 理事・教授 工学部 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

****修(工) 室蘭工業大学大学院 博士後期課程 建設工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

Key Word : road disaster prevention institution , rock-fall retaining-wall with piled foundations ,
weight impact test , two-layered absorbing system , impact resistant behavior

キーワード：道路防災施設, 杭付落石防護擁壁, 重錘衝突実験, 二層緩衝構造, 耐衝撃挙動

1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線の道路沿いには、落石に対する道路防災施設として、落石防護擁壁が数多く設置されている。現在、落石防護擁壁の設計は落石対策便覧¹⁾に基づき、1) 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時の変形エネルギーが等価となるまで、擁壁が水平変位および回転を生ずるものとし、2) 安定については、上記地盤の変形エネルギーが擁壁底面の許容変位から定ま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以下となること、を照査することにより行われている。従って、一般的に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。また、擁壁は一般に良質な支持層に根入れされていることが条件となっていることから、支持力が十分に期待できない基礎地盤の場合には、支持力が期待できる地盤まで掘削し、良質な材料と置き換える工法等が多く用いられている。しかしながら、擁壁背面のポケット部が狭く落石発生源である斜面との距離が短い場合には、置き換え基礎の施工に伴い、その斜面法尻を掘削しなければならず、斜面崩壊を誘発する危険性が懸念される。

これらのことから、本研究では斜面法尻の掘削を最小限に出来る新たな工法として、図-1に示すように、1) 基礎杭を擁壁内まで立ち上げ、2) フーチングを設けず土留壁勾配を垂直として、3) 基礎杭頭部を鉄筋コンクリート構造で結合する、杭付落石防護擁壁を提案した。

さらに、落石衝撃力の分散・緩衝による壁体の損傷

防止や杭基礎の規模を最小限にすることを目的として、筆者らが開発した二層緩衝構造²⁾を併用する工法について検討を行っている。

本論文では、二層緩衝構造を併用した杭付形式RC落石防護擁壁の耐衝撃挙動を把握することを目的に実施した実規模重錘衝突実験の結果について報告するものである。

2. 実規模重錘衝突実験の概要

2.1 試験体

図-2には、実験に使用した杭付落石防護擁壁の形状寸法を、図-3には擁壁本体および二層緩衝構造用RC版の配筋状況を示している。実験に使用した擁壁の形状寸法は、高さをH=2.0m、壁厚をB=0.8mとし、擁壁延長はL=4.0m、2.0mの2種類とした。尚、各擁壁間には5cm程度の隙間を設けており実験時に

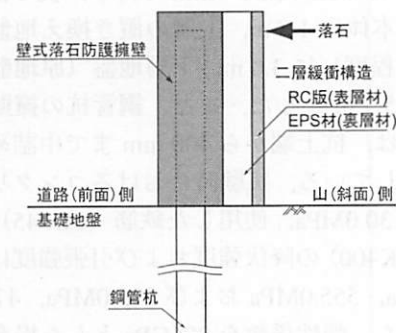


図-1 杭付落石防護擁壁の概略図



写真-1 実験状況

表-1 物性値一覧

実験ケース	形式	重錘質量 (t)	重錘衝突速度 (m/s)	衝突位置	EPS厚 (cm)	RC版厚 (cm)
P1-E30.6	杭付式	5.0	0.167	壁中央	50	15
P1-E62.5			0.3			
P2-E62.5			0.3			
P2-E122.5			0.3			

杭本数が等しいP1, P2の各ケースで比較すると衝突速度の増加とともに波形の継続時間が長くなり、最大応答値も大きくなっていることが分かる。

2.3 実験ケース

実験ケースは、表-1に示す様に杭本数と重錘衝突エネルギーをパラメータとした全4ケースである。表中の実験ケース名は、杭本数(P1:杭1本, P2:杭2本)と重錘衝突エネルギー(kJ)をハイフンで結んで表している。なお、各実験ケースにおいて、二層緩衝構造を構成する各部材(EPS材, RC版)は常に未使用材を用いることとした。しかしながら、擁壁本体はいずれの実験においても損傷が確認されないことより、同一の試験体を用いて実験を実施している。

3. 実験結果および考察

3.1 応答波形

図-4には、各実験ケースに対する重錘衝撃力波形、擁壁の荷点変位波形、杭の最大引張りひずみ発生位置あるいはその近傍におけるひずみ波形を示している。図中、各波形は重錘衝突時点を0msとして整理している。なお、ひずみ波形図にはひずみ計測位置の地盤面からの深さを示している。

重錘衝撃力波形は、いずれも電源ノイズと思われる高周波成分が示されているが、ノイズ処理により波形性状が変化することから、ここでは原波形の状態を考察を行うこととする。

重錘衝撃力波形は、重錘衝突初期に最大応答値を示し、衝突初期から5~10ms間は高周波成分が卓越している。その後は継続時間が90~100ms程度で緩やかに減衰する波形性状を示している。衝突初期の高周波成分から成る波形は、重錘が二層緩衝構造の表層RC版に衝突した際に発生したものであり、その後の緩やかな減衰波形はRC版の損傷によるエネルギー吸収とともにEPS材の塑性変形に伴う緩衝効果によって発生したものと推察される。

擁壁の荷点変位波形および杭のひずみ波形は、P1, P2いずれも単純な正弦半波状の波形性状を示し、

3.2 最大重錘衝撃力

図-5には、本実験における最大重錘衝撃力と二層緩衝構造を設置した既往の重力式擁壁(高さ2m,長さ8m)の実験結果³⁾を、ラーメの定数を $\lambda = 3,000 \text{ kN/m}^2$ および $6,000 \text{ kN/m}^2$ とした場合の振動便覧式⁴⁾による算定結果とともに示している。なお、重錘衝突エネルギーは、 $E_w = M_w V^2 / 2$ より求めている。ここに、 M_w は重錘質量(kg)、 V は重錘の衝突速度(m/s)である。

図より、重力式擁壁の場合には衝突エネルギーが $E_w = 50 \text{ kJ}$ 程度までは、 $\lambda = 6,000 \text{ kN/m}^2$ とする振動便覧式による算定値と同程度の値を示しているものの、それ以降の衝突エネルギーに対しては重錘衝撃力が徐々に減少する傾向を示している。一方、杭付擁壁の場合には $\lambda = 3,000 \text{ kN/m}^2$ とする振動便覧式による算定値と同程度の値を示している。これは、杭付擁壁の場合には二層緩衝構造のRC版の損傷によるエネルギー吸収とEPS材の塑性変形に伴う緩衝効果に加えて、杭の変形によるエネルギー吸収効果により、衝突エネルギーの小さい段階から重錘衝撃力が減少する傾向にあるものと考えられる。

3.3 変位分布およびひずみ分布

図-6(a), (b)には、P2-E62.5に関するRC擁壁部の変位分布および杭のひずみ分布を示している。なお、図には荷直後より $t = 600 \text{ ms}$ までの応答値分布を100ms毎に示すとともに、最大応答発生時の分布図を併せて示している。

RC擁壁部の変位分布に着目すると、変位は荷直後から地盤面より深部位置を中心として擁壁が転倒するような状態で荷点部の変位が増大し、 $t = 154 \text{ ms}$ で最大変位応答を示している。その後、元の位置に復元するように変位が減少し、 $t = 400 \text{ ms}$ 程度で変位がほぼ零となり、さらに荷側若干バウンドした後、ほぼ元の形状に戻っている。

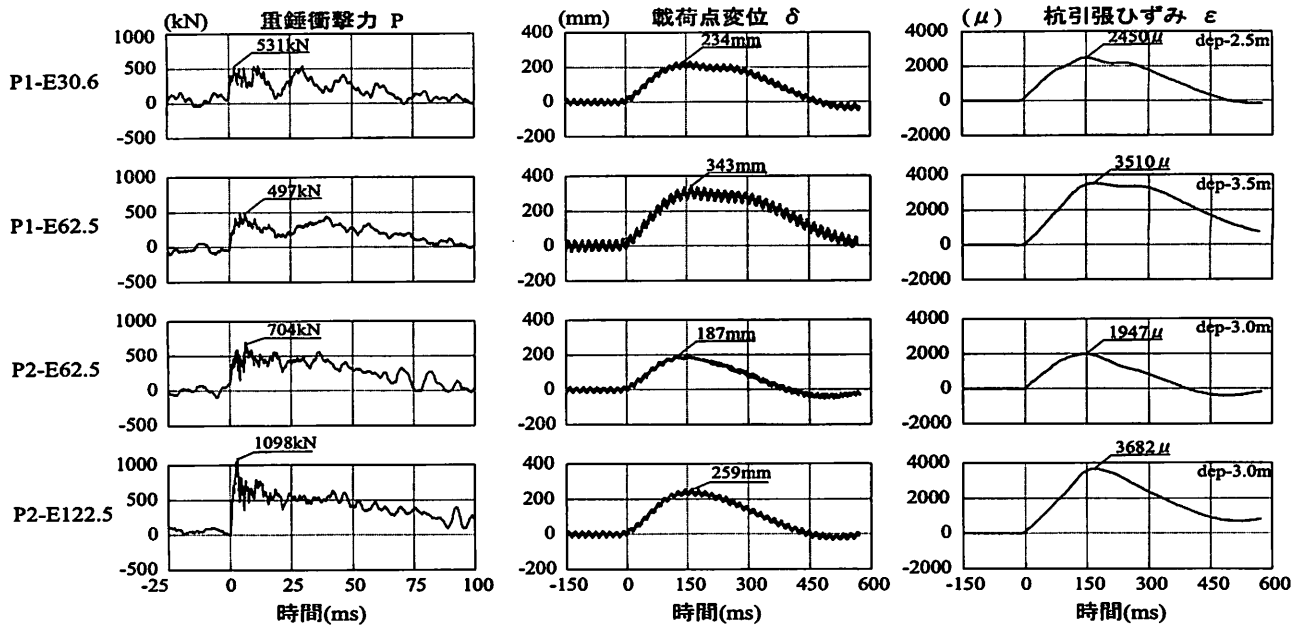


図-4 重錘衝撃力，載荷点変位，杭ひずみの応答波形図

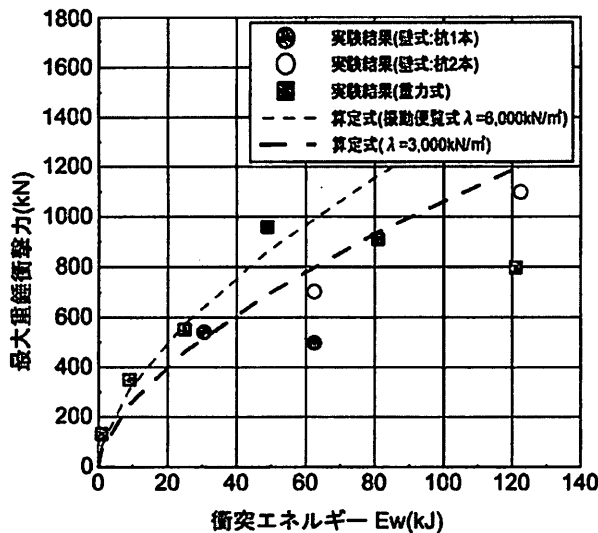


図-5 最大重錘衝撃力と衝突エネルギーの関係

杭のひずみ分布に着目すると、ひずみは原地盤と置き換え土との境界部である深度3m程度の位置を中心として載荷直後から圧縮・引張ともほぼ同程度の値で対称に増加し、最大変位発生時と同時刻で最大応答値に達している。その後、変位分布と同様に時間の経過とともに元の状態に復元した後、リバウンドによりひずみ値が正負反転している。また、杭の下端2mと擁壁内部の1.8mについては杭が固定状態にあるためかひずみは殆ど発生していない。

3.4 最大変位および最大ひずみ

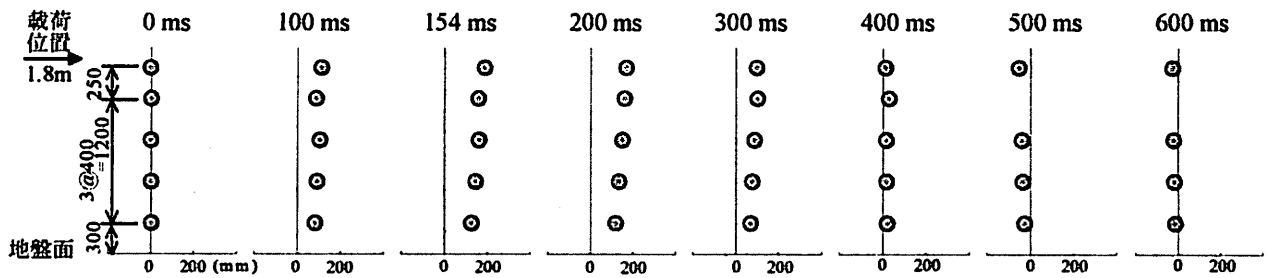
図-7(a)には、擁壁載荷位置および地盤面位置にお

ける最大変位量を、図-7(b)には杭に発生する軸方向ひずみの最大値を実験ケース毎に示している。

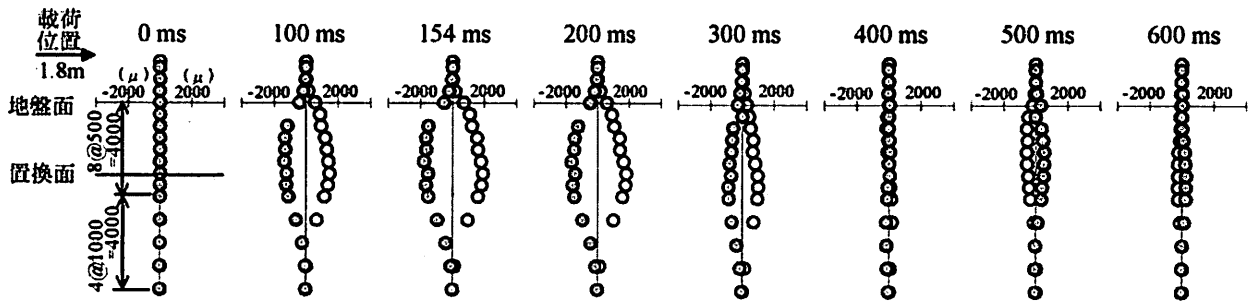
(a) 図より、杭本数が等しく重錘衝突エネルギーが異なるP1, P2の各2ケースを比較すると、いずれも重錘衝突エネルギーが約2倍に増加しているのに対して、載荷位置の変位量はそれぞれ47%, 38%の増加に留まっている。次に、重錘衝突エネルギーが等しく杭本数の異なるP1-E62.5とP2-E62.5の比較では、杭本数を2倍にすることによって載荷位置の変位量が55%低減されている。また、載荷位置の変位量は杭本数や重錘衝突エネルギーによって異なるものの、地盤面の変位量については4ケースともほぼ同程度の値を示している。これは、この位置が杭の変形モードにおける節に近い位置にあるためと推察される。(b) 図は杭の軸方向ひずみの最大値に関する比較図であるが、重錘衝突エネルギーの増加によって軸方向ひずみが増加する、あるいは杭本数が増加することによって軸方向ひずみが減少する等、最大変位量と同様の傾向を示していることが分かる。また、最大ひずみ値より杭の状態を考察すると、いずれのケースにおいても鋼管杭のひずみ値は降伏ひずみ以上の値を示しており鋼管の一部が塑性化しているものと考えられる。しかしながら、地盤面位置における実験後の残留変位量は最大でも15mm程度と非常に小さいことから、杭付落石防護擁壁は落石エネルギーの吸収性能に優れた工法であることが明らかとなった。

4. 簡易計算手法の適用性検討

本工法を広く現場に普及させるためには、簡易な計



(a) RC擁壁部の変位分布



(b) 杭の軸方向ひずみ分布

※ひずみは衝突面ひずみを○、衝突背面ひずみを●とする。

図-6 変位およびひずみ分布図

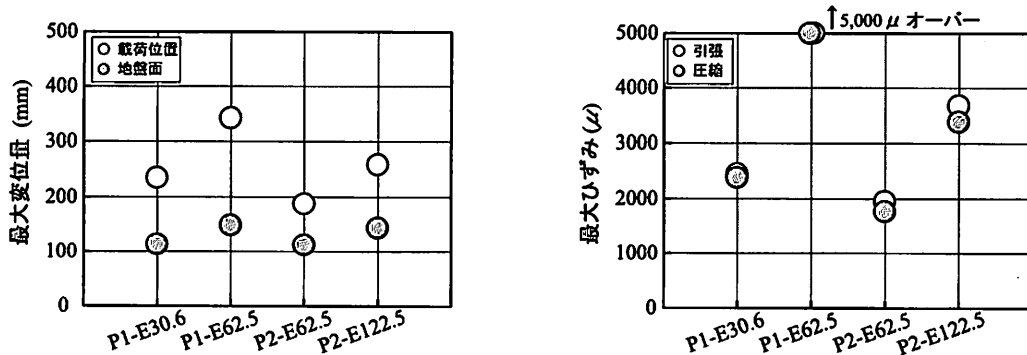


図-7 最大変位量および最大ひずみ

算手法によって設計を可能にしなければならない。このことから、簡易計算手法として、地盤のN値から算定した地震時変形係数を地盤のパネ値とし、2次元骨組解析により杭の変位および応力を算出する方法について、実験結果と比較することによりその適用性について検討を行う。ここで、杭への作用荷重は、二層緩衝構造の裏層EPS材から擁壁に伝達される衝撃力を静荷重として用いるものとする。最大伝達衝撃力は、過去の研究結果より三層緩衝構造に関する最大伝達衝撃力算定式の誘導法の考え方に基づいた伝達衝撃力算定式で評価可能である事が明らかとなっている³⁾。

先ず式(1)より、最大重錘衝撃力を P_a (図-5より、 $\lambda = 3,000 \text{ kN/m}^2$ とする振動便覧式により算定)、表層

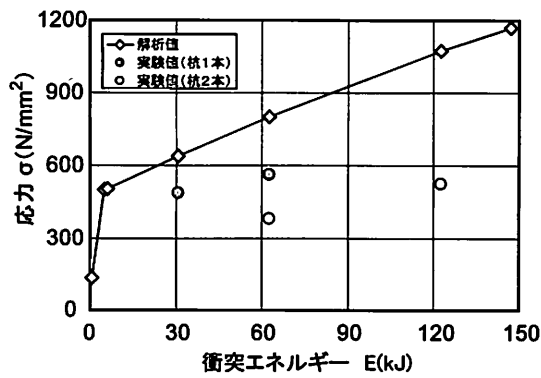
RC版厚を h_c としてRC版が得る衝撃エネルギー E_w を求める。

$$E_w = \frac{2 \times 9.8 \times 0.012^2}{49\pi^2 h_c} P_a^2 \quad (1)$$

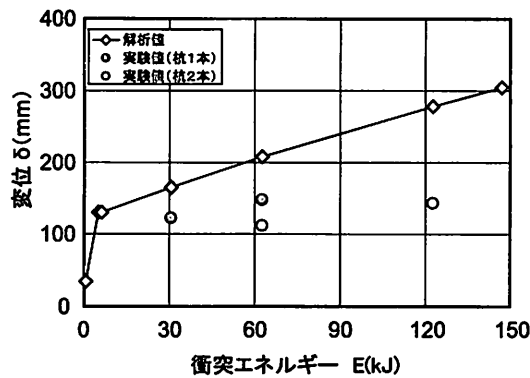
次に、伝達衝撃力 P_t は、裏層EPS材厚を h_e 、EPS材のひずみを ϵ として式(2)のように決定される。

計算式-(2)

$$P_t = \begin{cases} \sqrt{8800 \frac{E_w}{h_e}} \text{ (kN)} & 0 < \epsilon \leq 0.05 \\ 220 \sqrt{\left(0.9 + \frac{E_w}{55h_e}\right)} \text{ (kN)} & 0.05 < \epsilon < 0.55 \end{cases} \quad (2)$$



(a)軸方向最大応力



(b)载荷点変位

図-8 杭応力の解析値と実験値の比較

図-8には、上記により算定した伝達衝撃力を作用荷重とし、杭1本を対象とした2次元骨組解析により求めた杭の軸方向最大応力および载荷点変位の解析値と実験値を比較して示している。(a)図より、杭2本の実験値では解析値の60%程度の値を示し、かなり安全側の評価を与えることが分かった。(b)図に示す杭の载荷点変位についても同様の結果を示している。

5. まとめ

本研究では、新工法として二層緩衝構造を併用した杭付落石防護擁壁構造を提案し、耐衝撃挙動を把握するために、実規模試験体を用いた重錘衝突実験を実施した。本実験結果より得られた事項を整理すると、以下のように示される。

- (1) 二層緩衝構造を設置した杭付落石防護擁壁に作用する重錘衝撃力は、ラーメの定数を $\lambda = 3,000 \text{ kN/m}^2$ とする振動便覧式による算定値と同程度の値を示す。
- (2) 伝達衝撃力を静荷重として置き換え2次元骨組解析により算出した杭の応力および変位は、実験結果に対して安全側の評価を与える。
- (3) 二層緩衝構造を設置した杭付落石防護擁壁は、杭の一部が塑性化するような落石エネルギーに対しても残留変位量は小さく、落石エネルギーの吸収性能に優れた工法であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧，H12.6
- 2) 岸 徳光，川瀬良司ら：二層緩衝構造を用いた落石防護擁壁の重錘衝突実験と数値解析的検討，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1567-1578，2002.3
- 3) 岸 徳光，川瀬良司ら：落石防護擁壁用途二層緩衝構造の伝達衝撃力算定式の定式化，構造工学論文集，Vol.49A，pp.1289-1298，2003.3
- 4) 土木学会：土木技術者のための振動便覧，第2版，(昭和60年)，pp.514-520

(2008年11月7日受付)