

二層緩衝構造を設置した杭付落石防護擁壁の設計計画

Practical applicability of RC wall with Two - Layered Absorbing System including pile foundation under Rock falling.

(株) 構研エンジニアリング	○正員	刈田 圭一 (Keiichi Karita)
(独) 寒地土木研究所	正員	岡田 慎哉 (Shinya Okada)
国土交通省北海道開発局	非会員	中道 圭 (Kei Nakamichi)
国土交通省北海道開発局	非会員	下村 周史 (Hiroshi Shimomura)
室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

我が国の海岸線道路沿いには、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、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許容されるものとして実施されている。従って、直接基礎による無筋コンクリート製の重力式擁壁が一般的に用いられている。また、擁壁は一般に良質な支持層に根入れすることを条件とされていることから、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採用されている。しかしながら、擁壁背面と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、斜面崩壊の危険が懸念される。

このようなことから、本検討では、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**に示すように基礎杭を地上まで立ち上げ、フーチングを設けず土留壁勾配を垂直として基礎杭頭部を鉄筋コンクリート構造で巻き立てる杭付落石防護擁壁を提案し、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規模の最小化を目的として、寒地土木研究所と室蘭工業大学らが共同開発した二層緩衝構造²⁾も併用する工法について検討を行ったものである。ここで、二層緩衝構造とは表層材がRC版、裏層材が発泡スチロール（以下、EPS）材から構成され、2種類の異なる力学特性を有する材料を組み合わせて積層化した緩衝構造である。

本稿では、一般国道278号函館市大岩地区における杭付落石防護擁壁の工法選定経緯について述べるとともに、杭付落石防護擁壁の設計手法や性能評価について検討を行った。

2. 設計の経緯

当該箇所は近年小規模な落石や表層崩壊が発生し、今後も同様な災害の発生が懸念された。これより、当該箇所における利用者の安全確保を目的とした現道防護工の設置が必要と判断された。

図-2には、設計箇所の地質断面図を示している。設計箇所は、海岸線に面した自然斜面で斜面の高さは概ね標高70m程度、斜面角度は斜面下部の崖錘斜面で35°、斜面上部では45°となる。自然斜面には、遷

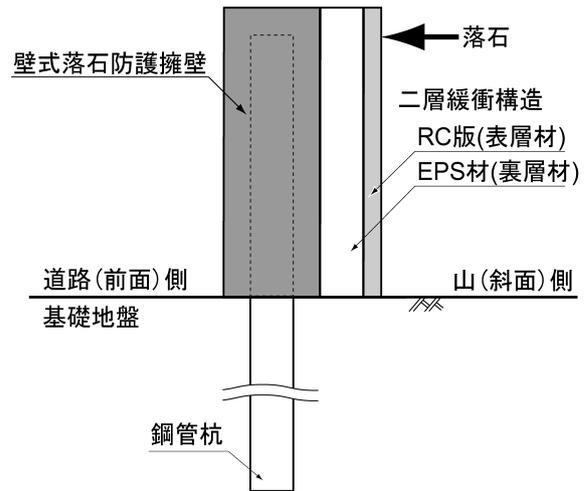


図-1 杭付落石防護擁壁の概略図

急線を頭部としたすり鉢状の崩壊地形が形成され、斜面下部には礫や火山灰から構成される崖錘堆積物が堆積し、擁壁計画位置と自然斜面との距離が短い状況となっている。落石防護擁壁計画位置の支持層深度は、旧沢地形のため基盤岩が道路施工基面高から4mの深さに位置し、その基盤岩が堆積物および海浜砂が覆っている状況である。堆積物および海浜砂はN値1~3と非常に緩い砂質系の地盤であり、急勾配での自立が困難な土層であるため、切土する場合は緩い切土勾配を採用するとともに斜面崩壊に留意する必要がある。

計画当初は重力式落石防護擁壁を検討していたが、支持層が地表面より4m以深に確認されたため、置き換え基礎が必要となった。しかし、置き換えの床堀に伴い斜面法尻を大きく掘削するため、斜面崩壊を誘発する危険性が懸念され、施工時の安全を確保するためには仮設工が必要と判断された。一方、現道側に対する床堀に関しても、施工時の現道交通の確保を考慮すると仮設工が必要と判断され、仮設工に多大な費用と時間が必要と考えられた。

以上の経緯により、当該箇所での施工時の安全確保や施工性の向上、工期の短縮、コスト縮減等を目的に、掘削を最小限と出来る工法として、基礎杭を擁壁内まで立ち上げ、フーチングを設けず土留壁勾配を垂直として基礎杭頭部を鉄筋コンクリート構造で巻き立てる『杭付落石防護擁壁』を提案した。

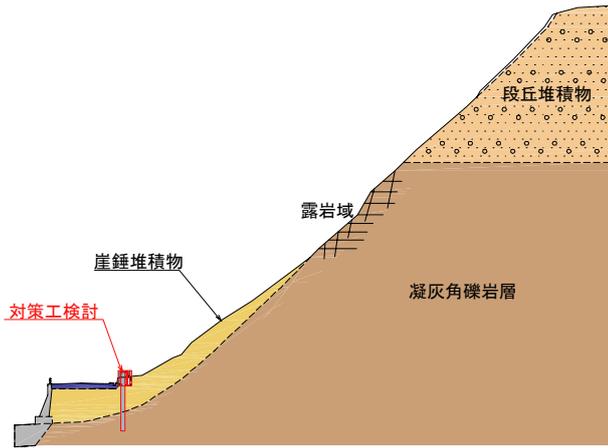


図-2 検討箇所の地質断面図

3. 落石防護擁壁工形式選定

3.1. 形式比較検討

当区間の想定災害要因は、落石および崖錘部のすべり崩落である。落石および崖錘部のすべり崩落に伴う崩土の規模を現地調査より設定し、落石対策便覧により落石衝撃力および崩土衝撃力を算定すると、前者は二層緩衝構造設置を条件として 1,200 kN ($\lambda = 6,000 \text{ kN/m}^2$)、後者は 110 kN/m と想定される。これらの設計外力に対して落石防護擁壁工の形式について検討を行った。

表-1 には、落石防護擁壁工の形式選定比較表を示す。一般的には、重力式の無筋コンクリート擁壁が採用されるケースが殆どであるが、本設計箇所においては以下の理由により杭付落石防護擁壁を選定した。

- (1) 斜面尻を大きく掘削しない(床堀が最小) ことから施工時の安全確保が可能。また、仮設工も不要。
- (2) 道路側に関しても、仮設工が不要。
- (3) 落石衝撃力や崩土衝撃力を考慮すると、重力式形式より杭基礎形式の方が大きな水平抵抗力を期待できるため、躯体規模が小さくなり経済的。

3.2. 杭付落石防護擁壁工法概要

図-4 に、杭付落石防護擁壁の工法概略断面図を示す。本工法は、地表面より約 2.3 m 突出させた鋼管杭に鉄筋コンクリート製の壁体を巻き立て、災害要因である落石衝撃力および崩土衝撃力に対し、杭の水平地盤反力と剛性のみで抵抗する落石防護擁壁である。杭は鋼管径 $\phi 600 \text{ mm}$ 、板厚 $t = 12 \text{ mm}$ を採用し、杭の全長は 11.0 m と設定した。杭の根入れ深さは、擁壁本体に 2.8 m、地盤に 8.2 m とし、地盤への根入れ深さは一般的な自立構造の杭の根入れ長である $3/\beta$ (杭の水平抵抗に關与する深さの 3 倍の根入れ) を確保した。杭の施工方法は、施工精度および岩盤部への根入れを考慮し、プレボーリング立て込み形式とした。壁体の形状寸法は壁高を必要落石防護高さおよび凍結深確保の必要根入れ (0.7 m) から $H = 3 \text{ m}$ とし、壁厚は杭径と壁面鉄筋の必要被り厚より 1.0 m とした。

本設計では、落石衝撃力の分散・緩衝による壁体の損傷防止と本体および杭基礎規模の最小化を目的として、杭付落石防護擁壁に対する二層緩衝構造の併用を検討し

表-1 落石防護擁壁工の形式選定比較表

工法	壁式擁壁工	重力式擁壁工
施工時概略横断面図		
コメント	<ul style="list-style-type: none"> ・躯体規模が小さい ・床堀掘削が不要のため斜面掘削は生じない ・施工時の仮設土留壁不要 ・NTTケーブルの移設不要 ・交通規制は一時的 ・工費 62,000円/m (1.00) 	<ul style="list-style-type: none"> ・躯体規模が大きくなる ・置き換え基礎および床堀による斜面掘削が必要 ・斜面側、道路側の両方に仮設土留工が必要 ・NTTケーブルの移設が必要 ・施工期間中は交通規制必要 ・工費 1,250,000円/m (1.50)
評価	◎	△

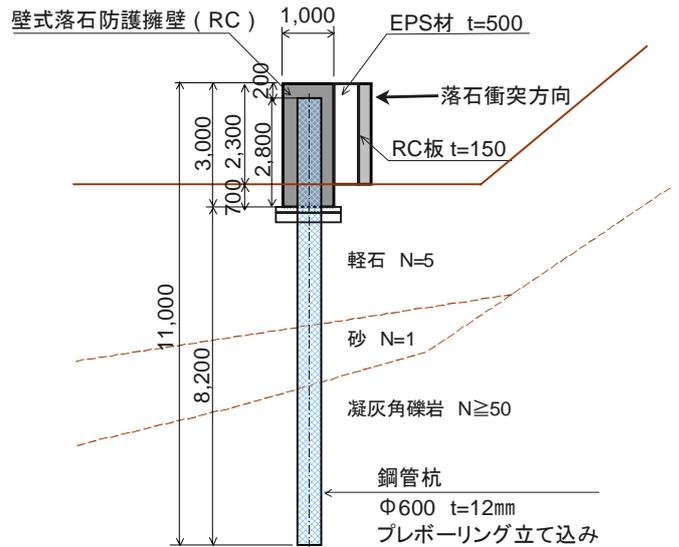


図-4 工法概略断面図

た。二層緩衝構造とは、主に表層 RC 版で落石等による衝撃力を分散させ、裏層 EPS 材で衝撃エネルギーを吸収することで、擁壁本体への伝達衝撃応力を軽減する緩衝構造である。

二層緩衝構造の有無により擁壁本体に作用する衝撃力を求めると、緩衝構造が無い場合には、過去の研究成果を基にラーメ定数を $\lambda = 12,000 \text{ kN/m}^2$ とする振動便覧式より $P = 3,000 \text{ kN}$ となる。一方、二層緩衝構造を設置した場合には、重錘衝撃力および伝達衝撃力はそれぞれ $P_a = 1,200 \text{ kN}$ 、 $P_t = 400 \text{ kN}$ となる。これらの外力を基にした二層緩衝構造の設置の有無による本工法断面の比較図を図-5 に示す。この結果から、二層緩衝構造を併用することにより、杭の板厚および本数の減少が可能となり、工事費の縮減に繋がることが明らかとなった。

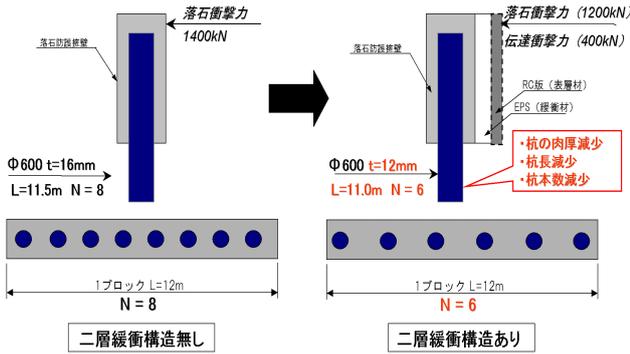


図-5 二層緩衝構造の有無による本工法断面の比較図

4. 杭付落石防護擁壁の設計手法

図-6に杭付落石防護擁壁の設計フローを示す。

杭付落石防護擁壁の設計は、躯体に作用する落石衝撃力（伝達衝撃力）を求め、静的荷重として杭基礎を含む壁体に作用させ、2次元静的解析により行った。

二層緩衝構造を併用した杭付落石防護擁壁では、落石衝撃力は二層緩衝構造を介して擁壁本体に伝達される。この伝達衝撃力は裏層 EPS 材に作用する衝撃エネルギーに相当する。二層緩衝構造の裏層 EPS 材から擁壁本体に伝達される衝撃力の算定式に関しては、寒地土木研究所と室蘭工業大学らがコンクリート基礎上で滑動を制御した重力式擁壁の重錘衝突実験により、RC ロックシェッドで用いられる三層緩衝構造に関する最大伝達衝撃力算定式³⁾の誘導法の考え方に基づいた検討を行っており、定式化された伝達衝撃力算定式⁴⁾で評価可能である事が明らかとなっている。

落石衝撃力の算定から定式化された伝達衝撃力算定式による伝達衝撃力算定および杭基礎設計までの大まかな流れを以下に記述する。

二層緩衝構造の表層 RC 版に作用する落石衝撃力（最大重錘衝撃力）は、振動便覧式⁵⁾より式(1)のように示され、ラーメの定数 λ については、上記コンクリート基礎上で実施した重力式擁壁に関する実験結果より、 $\lambda = 6,000 \text{ kN/m}^2$ として安全側で評価可能であることが明らかとなっている。

$$Pa = 2.108 \lambda^{2.5} H^{3/5} W^{2/3} \quad (1)$$

ここに、Pa：落石衝撃力 (kN)
 λ ：ラーメの定数 (kN/m²)
 H：落石の落下高さ (m)
 W：落石の重量 (kN)

次に、RC 版が得る衝撃エネルギー E_w (kJ) は、最大重錘衝撃力を Pa (kN)、表層 RC 版厚を h_c (m) として式(2)で与えられる。

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

伝達衝撃力 Pt (kN) は、裏層 EPS 材厚を h_e (m)、EPS 材のひずみを ε として式(3)のように決定される。

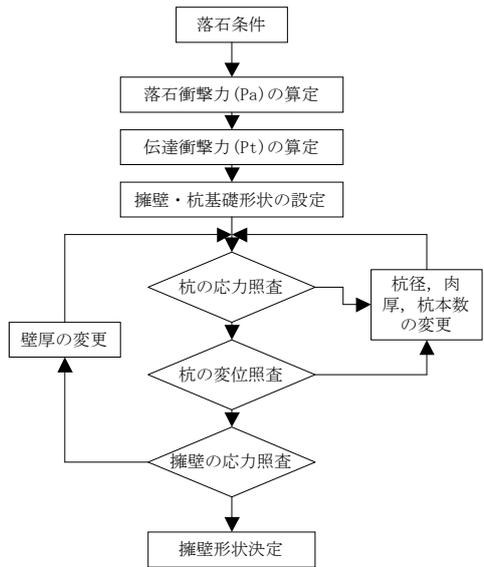


図-6 設計フロー

$$P_t = \begin{cases} \sqrt{8800 \frac{E_w}{h_e}} & (\text{kN}) & 0 < \varepsilon \leq 0.05 \\ 200 \sqrt{\left(0.9 + \frac{E_w}{55h_e}\right)} & (\text{kN}) & 0.05 < \varepsilon < 0.55 \end{cases} \quad (3)$$

杭基礎の設計は、上記で算出した伝達衝撃力 Pt を擁壁躯体に作用させ、Chang の式により杭の応力および変位を算出して、許容応力度法により設計を行っている。

5. 杭付落石防護擁壁の性能照査

杭付落石防護擁壁と二層緩衝構造を併用した本工法の設計については、前述のように伝達衝撃力を静的荷重に置き換え、Change の式により杭応力を求め、許容応力度法により行っている。ここでは、杭付落石防護擁壁に関する本設計手法の妥当性確認を目的に、実 RC 製覆工等に対する衝撃載荷実験結果との比較検討によりその妥当性が検証されている 3次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、設計で用いた 2次元静的解析結果との比較を行った。表-2には、杭付落石防護擁壁に関する 3次元弾塑性衝撃応答解析の解析ケース一覧を示している。重錘衝突位置、荷重載荷方向を変化させた全 3 ケースについて検討を行っている。本数値解析に用いた構造解析プログラムは非線形衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA (ver.970)である。図-7には本数値解析に用いた解析モデルの要素分割状況を示している。

3次元弾塑性衝撃応答解析による数値解析結果と前述の設計手法により求めた 2次元静的解析結果を表-4に示す。

3次元弾塑性衝撃応答解析の CASE1 ~ CASE3 の重錘衝撃力 Pa を比較すると、重錘を擁壁中央に水平載荷した CASE1 が最も大きく、CASE2 は擁壁端部に載荷していることから杭の変位が大きくなるため、また CASE3 は壁体に斜めに衝突させている影響により CASE1 よりも小さな値となっている。一方、伝達衝撃力 Pt はいずれのケースも重錘衝撃力の 1/2 以下の値

表-2 解析ケース一覧

ケース名	重錘衝突位置	荷重方向	EPS材	RC版
CASE1	壁中央	水平	50cm	15cm
CASE2	壁端部杭位置	水平		
CASE3	壁中央	斜面角(40°)		

表-4 解析結果一覧

ケース名	衝突角度	重錘衝突位置	衝撃力		杭		壁体	
			重錘 Pa (kN)	伝達 Pt (kN)	変位 δ_{max} (mm)	応力 σ_{max} (MPa)	鉄筋 σ_s (MPa)	圧縮 σ_c (MPa)
CASE1	水平	壁中央	1955	477	3	30	26	2
CASE2	水平	壁端部	1800	435	5	48	11	1
CASE3	40°	壁中央	1272	535	3	35	27	1
静的解析	水平	壁中央	1150	370	6	80	273	5

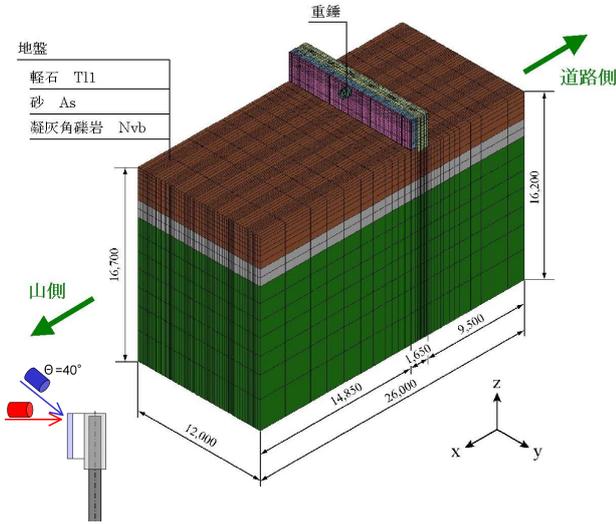


図-6 要素分割状況

を示し、3次元弾塑性衝撃解析においても二層緩衝構造設置による緩衝効果が示されている。

次に、3次元弾塑性衝撃応答解析による数値解析結果と設計値である2次元静的解析結果を比較すると、いずれのケースに対しても設計値の重錘衝撃力 Pa および伝達衝撃力 Pt が小さく示されている。

一方、杭の地表面位置における最大水平変位量および杭に発生する軸方向応力の最大値に関しては、3次元衝撃応答解析結果と設計値を比較すると、いずれも設計値の方が小さくなる傾向であることが分かる。同様に、壁体の応力に関しても設計値より解析結果が小さくなる傾向であることが分かる。

以上より、2次元静的解析による設計値は、3次元弾塑性衝撃応答解析結果より、重錘衝撃力および伝達衝撃力は小さいが、杭および壁体の設計値は3次元衝撃応答解析より大きな値となり、安全側の評価を与えることが確認できた。また、杭付落石防護擁壁に二層緩衝構造を採用した際の衝撃力緩衝効果に関しても重力式擁壁の場合と同様に緩衝効果を期待できることが明らかになった。

6. まとめ

本検討では、斜面法尻の掘削を最小限に出来る新たな落石防護擁壁として、基礎杭を地上まで立ち上げ、フーチングを設けず土留壁勾配を垂直として基礎杭頭部を鉄筋コンクリート構造で巻き立てる杭付落石防護擁壁を提案し、さらに落石衝撃力の分散・緩衝による壁体の損傷

防止や杭基礎規模の最小化を目的として、二層緩衝構造も併用する工法について検討を行ったものである。検討の結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 杭付落石防護擁壁は、斜面下部での擁壁施工時の安全確保および仮設工不要による施工性・経済性の向上により、支持層が深い箇所や、斜面法尻掘削に伴い斜面崩壊が懸念される箇所には、有効な工法と考えられる。
- 2) 杭付落石防護擁壁は、重力式擁壁に比べて躯体規模が小さくなる事から、斜面法尻とのクリアランスが小さい箇所や、用地制約がある場所においても有効な工法である。
- 3) 杭付落石防護擁壁に二層緩衝構造を併用することで杭基礎への落石伝達衝撃力が軽減され、杭の規模が小さくなり、コスト縮減が可能となる。
- 4) 静的解析結果（設計値）は動的解析で得られた値より衝撃力以外の何れの値も大きな値となり、静的解析でも十分安全側の設計が可能と考える。

今後は、本工法に対する重錘落下衝撃実験の実施による耐衝撃挙動の把握ならびに解析手法の検証を行うとともに、合理的な設計法確立のための検討が必要であるものと考えられる。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 2) 岸 徳光，川瀬良司，今野久志，岡田慎哉：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) 佐藤昌志，岸 徳光，松岡健一：三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.42A，pp.1337-1346，1996.3
- 4) 岸 徳光，川瀬良司，今野久志，岡田慎哉：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
- 5) 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
- 6) John O.Hallquist：LS-DYNA User's Manual，LivermoreSoftwareTechnology Corporation，2000.6.