

ワイヤーリングを用いた落石発生源対策

(株)日西テクノプラン ○瀬崎 茂
松江高専名誉教授 浜野浩幹

1 はじめに

落石発生源対策は現場が急峻であるなど不安全な環境で作業を強いられる場合が多い。主な対策として表-1 に示す除去工およびワイヤーロープ掛工があるが、除去工では小割や搬出等の作業負担が大きく、作業員の安全性や高齢化などから一層の作業負担軽減策を必要としている。

ワイヤーロープ掛工は一部で使用されているものの、文献等において明確な設計指針は示されていない。しかも落石対策便覧（以下便覧とする）では仮設的評価がなされ¹⁾、森林土木ハンドブックでも「永久構造物として期待できない」としている²⁾。土木資材としてのワイヤーロープは軽量であり、かつ取り扱いも容易であることから落石発生源での利用に適している。したがってこれを用いた恒久的工法の開発は喫緊の課題となっている。

本論文ではこれらを解決するため、ワイヤーリングからなるネットを用いた新たな抑止概念や設計方法（目標安全率）および模型実験から得られた岩用アンカーの適正な構造等について述べる。

表-1 除去工およびワイヤーロープ掛工の特徴¹⁾

工 法	特 徴
除去工	除去可能な小さな浮石や転石があり、その個数も少数であるときは浮石を除去することがある、また浮石を利用してフトンカゴを作成し、転石や浮石これによって抑止させることもある。
ワイヤーロープ掛工	浮石や転石が巨大な場合とか、土地の制約条件等で応急的に斜面上に固定しなければならない時によく用いられる。・・・本設構造物でなく仮設構造物として取り扱うことが望ましい場合が多い。

2 目標安全率

便覧³⁾ではロープ掛工の目標安全率についての記載がなく、その抑止力 P は単に “ $P=W \cdot \sin\theta$ ” としている。これは図-1 において滑ろうする力 $W \cdot \sin\theta$ ($=T$) をすべて負担するものであるが、現状の安全率を $F_0=S/T=1.0$ (S : 抵抗する力) とし、抑止力 P を滑動に対する抵抗力（分子項）として評価すれば、施工後の安全率 F_S は次式のように 2 となる。

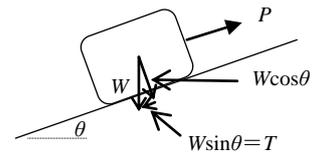


図-1 ロープ掛工における抑止力 P

$$F_S = (S + P) / T = (S + T) / T = 2$$

財団法人鉄道総合技術研究所による落石対策技術マニュアル（以下鉄道マニュアルとする）でもロックアンカー（落石発生源対策）の計算例において、目標安全率を平常時 $F_S=2.0$ 、地震時 $F_S=1.0$ としている⁴⁾。落石対策の場合不可視部分が多くかつ移動速度（災害進展速度）が極めて早いことから、平常時目標安全率を $F_S=2.0$ とすることは妥当と考えられる。

3 安定計算と所要抑止力

便覧では落石の初動について滑動のみの検討を行っているが、現場ではむしろ“転倒（回転しやすさ）”に対して危険性を感じることが多い。したがって安定計算はこの両者について行うべきであり、その所要抑止力は鉄道マニュアルの計算例（ロックアンカー）に基づけば以下のようになる⁵⁾。

3.1 安定計算式

(1) 滑動(斜面に平行する力の釣り合い)

$$(平常時) \quad F_S = W \cos \theta \cdot \mu / W \sin \theta = \mu / \tan \theta$$

ここに、 F_S ：平常時安全率、 W ：石の重量、 θ ：石が地山と接する面の傾斜角、 μ ：石と地山との摩擦係数

$$(地震時) \quad F_{SE} = \frac{(W \cos \theta - k_h \cdot W \sin \theta) \mu}{W \sin \theta + k_h \cdot W \cos \theta} = \frac{(\cos \theta - k_h \cdot \sin \theta) \mu}{\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

ここに、 F_{SE} ：地震時安全率、 k_h ：水平震度

(1)

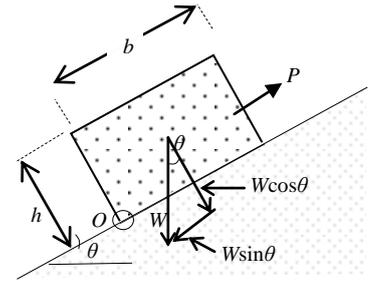


図-2 落石の力の釣り合い

(2) 転倒(O点まわりのモーメントの釣り合い)

$$(地震時) \quad F_{RE} = (W \cos \theta \cdot b/2 - k_h \cdot W \sin \theta \cdot b/2) / (W \sin \theta \cdot h/2 + k_h W \cos \theta \cdot h/2) \\ = b/h \cdot (\cos \theta - k_h \cdot \sin \theta) / (\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta) \quad (3)$$

ここに、 F_{RE} ：地震時転倒安全率、 W ：石の重量、 θ ：石が地山と接する面の傾斜角、 k_h ：地震時の水平震度、 b ：斜面傾斜方向の石の長さ、 h ：石の高さ

(3) 摩擦係数 μ について

式(1)より現状の安全率 $F_S=1.0$ とした場合の摩擦係数は、例えば傾斜 45° 以上の斜面に接する浮石等では“ $\mu > 1.0$ ”となり、一般に考えられている摩擦係数(粘土、砂層、砂利、良好な岩石等と石工で $0.3 \sim 0.7$)⁶⁾と大きく異なるものとなる。これは石が多少土砂に埋まっていることで滑動に対する抵抗が大きくなる等によるものであり、したがってここでは多様な抵抗因子を含む“見掛けの摩擦係数”として取り扱う。

3.2 ワイヤロープによる所要引張り力 P

(1) 滑動に対して

(平常時) ワイヤロープの所要引張り力を P 、目標安全率 $F_{SP}=2.0$ とすれば式(1)より

$$F_{SP} = W \cos \theta \cdot \mu / (W \sin \theta - P) = 2.0 \\ P = W(\sin \theta - \cos \theta \cdot \mu / 2) \quad (4)$$

(地震時) 目標安全率 $F_{SEP}=1.0$ 、水平震度 $k_h=0.15$ ⁷⁾ とすれば所要引張り力は式(2)より

$$F_{SEP} = \frac{(W \cos \theta - k_h \cdot W \sin \theta) \mu}{W \sin \theta + k_h \cdot W \cos \theta - P} = 1.0 \\ P = W(\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta) - W \cdot \mu(\cos \theta - k_h \cdot \sin \theta) \\ = W(\sin \theta - \mu \cdot \cos \theta + k_h \cdot (\cos \theta + \mu \cdot \sin \theta)) \quad (5)$$

(2) 転倒に対して

式(3)より地震時転倒に対する目標安全率 $F_{REP}=1.0$ とすれば所要引張り力 P は

$$F_{REP} = (W \cos \theta \cdot b/2 - k_h \cdot W \sin \theta \cdot b/2) / (W \sin \theta \cdot h/2 + k_h W \cos \theta \cdot h/2 - P \cdot h/2) = 1.0 \\ P = W(\sin \theta \cdot h/2 + k_h \cdot \cos \theta \cdot h/2 - \cos \theta \cdot b/2 + k_h \cdot \sin \theta \cdot b/2) / (h/2) \\ = W(\sin \theta + k_h \cdot \cos \theta - b/h \cdot (\cos \theta - k_h \cdot \sin \theta)) \quad (6)$$

4 ワイヤーネットを用いた小割対策

4.1 小割対策の目的と方法

便覧⁸⁾では落石予防工における除去工関連の目的について“落石予備物資を除去あるいは整理する”としており、旧便覧⁹⁾では以下のように概説している。

「浮石除去工：安定な斜面にある浮石を直接取り除く工法であるが、施工条件の悪い場合が多いので、小転石や小割りした岩石を石積して整理することも必要である」

すなわち本来除去することが最も安全であるが、現場条件に応じて安全な状態で現場残置することも認めている。

4.2 現状における問題点と解決策

写真-1 は小割作業の一例であり、小割りした石が転落しないよう木製の防護柵を設置したり、近くの擁壁裏に搬出するためのシュート（塩ビ管）を設けているが、以下のような問題点がある。

①小割作業中に大きな岩塊が剥離するなど、不規則な割れに対する対策が施されていない。

②小割した石のシュート位置までの運搬および搬出場所での整地作業など、人力による作業負担が大きい。

これらを解決するには以下の方法がある。

①小割りする石をあらかじめネットで被覆し、その中で

小割作業を行うことで不規則な割れに対する安全性を確保しておく。

②ネット内の石は滑動や転倒に対して安全となるように小割整形し、そのまま残置する。十分な安定度が確保できない場合はアンカー等でネットを補強する。

写真-2 は施工例であり、具体的作業手順は図-3 のように示される。



写真-1 小割作業状況



写真-2 ネットによる転石(φ3m)小割状況。緩斜面に乗り上げるような状態となったことから、この状態で滑動に対する安定度も確保できている。

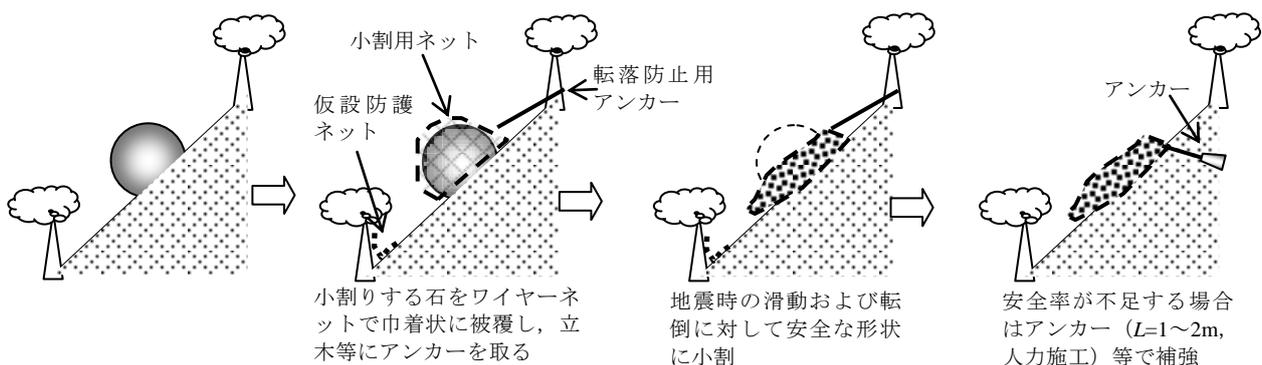


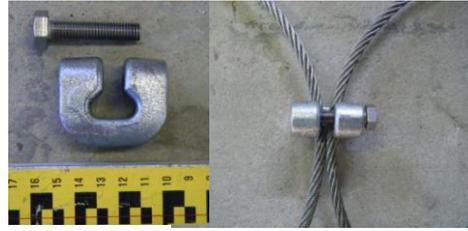
図-3 小割ネットを用いた作業手順

4.3 使用部材

施工 20 年程度を経過した土木用鋼製部材の腐食が顕在化し、既往の落石対策用ワイヤーロープについても“地山に接するなどの条件の悪い箇所では 20 年程度しか持たない”といった研究結果が報告されている¹⁰⁾。したがって本工法では写真-3 のようなステンレスやダクタイル製を使用し、アンカーもグラウンドアンカー並の二重防錆とするなど耐食性を一層高めるようにしている。



ステンレス製ワイヤーリング (3連の場合)



連結金具 (ダクタイル製)



アンカーピン (ダクタイル製)



深層アンカー ($l=1\sim 2\text{m}$, 削孔径 65mm, 二重防錆, 人力施工)

写真-3 使用部材

4.4 小割による安定化の目安

転倒に対する安全率は図-4 および表-2 のように示され、石の高さ h と斜面傾斜方向の石の長さ b の比が " $h/b < 1/2$ " となるようにすれば、傾斜地 50° の急傾斜地でも地震時の安全率が確保できる。

滑動に関しては式 (1) に示すように、小割後もすべり面傾斜角 θ は同様である場合が多く、したがって安全率も変わらない。そのため小割り状態のものを立木の根元等に残置するか、式 (5) にしたがってアンカーで固定する必要がある。

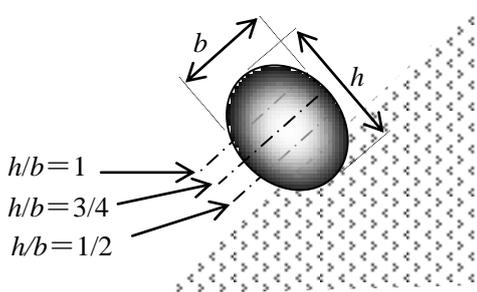


図-4 小割による計画はつり高さ

表-2 はつり高さ地震時転倒安全率

θ ($^\circ$)	h/b		
	1	3/4	1/2
30	1.26	1.67	2.51
35	1.05	1.40	2.11
40	0.88	1.18	1.77
45	0.74	0.99	1.48
50	0.61	0.82	1.22

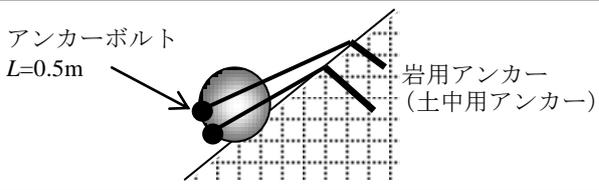
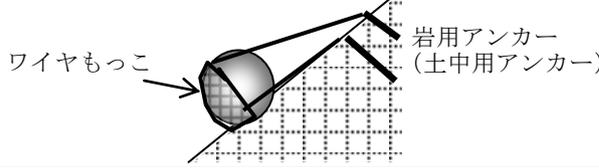
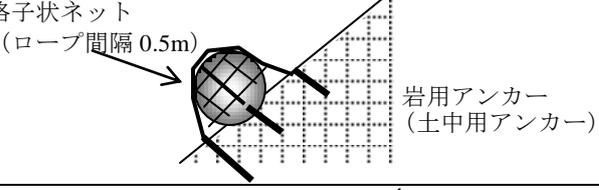
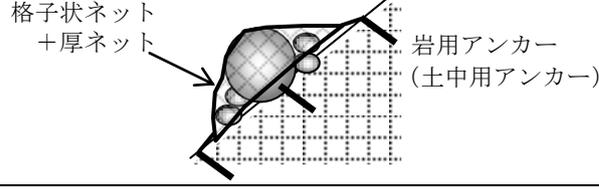
5 ワイヤーロープ掛工の永久構造物化

5.1 永久構造物とするための条件

前述したように森林土木ハンドブックではワイヤーロープ掛工は「永久構造物として期待できない」としているがその根拠は示されていない。一方、表-3 は鉄道マニュアル¹¹⁾によるワイヤーロープ掛工の種類と評価を示すものである。これによれば“もっこ等の既製品を利用するものは仮設物として取り扱うことが望ましく、現地状況に合わせてワイヤー径等の構造を変えられるものは比較的長い期間の設置にも耐えられる”としている。さらに重要項目として“メインロープの支持部であるアンカーボルトは、せん断力でロープの張力に抵抗することを基本とし、地山や基岩にしっかり定着させるものとする”としている。すなわち土砂用アンカーの使用を前提とした工法であり、このことが永久構造物としての信頼性を得られない大きな要因と考えられる。

したがって、ワイヤーロープ掛工を永久構造物とする条件は“設計計算に基づく構造物とすること、岩用アンカーのみの仕様とすること、部材の防食性を一層高めること”となる。

表-3 ワイヤロープ掛工の種類と評価¹¹⁾

種類	取り扱い	略図
<p>【ロープ掛工】</p> <p>ワイヤロープ単体を数本用いて固定。アンカーは岩用 ($l=1m$) および土中用 ($l=1.5m$)。</p>	<p>仮設物として取り扱うことが望ましい</p>	<p>アンカーボルト $L=0.5m$</p> 
<p>【ワイヤもっこ】</p> <p>ワイヤ製もっこを用いて固定</p>		<p>ワイヤもっこ</p> 
<p>【ロープネット工】</p> <p>(ワイヤネット式[※])</p> <p>格子状に編んだワイヤロープで固定。岩の大きさ等によりロープ径を変える事ができる。アンカーは岩用 ($l=1m$) および土中用。</p>	<p>比較的長い期間の設置にも十分耐えられる構造となっている。</p>	<p>格子状ネット (ロープ間隔 0.5m)</p> 
<p>【ワイヤネット工】</p> <p>覆式落石防護網と類似した構造を持つ。比較的小さな転石がある場合等に適する。</p>		<p>格子状ネット +厚ネット</p> 

※) 落石対策便覧による呼称

5.2 設計の考え方

現場で落石の恐れのある石は単独あるいは複数で分布する。単独の場合は従来のロープ掛工の考え方でよいが、複数の場合はワイヤネットで一体化することの効果を検討する。

すなわち、写真-4 は不安定なコンクリート球 ($\phi 1m$, 重量 $1.2t/個$) を一体化するようにワイヤネットで被覆し、これを鋼板上で傾けた状態のものである。この時、各コンクリート球の転倒に対する安定度は大幅に向上しており、したがってこれらは滑動条件に支配され一体化して滑落することになる。

実験では土嚢アンカーなしの場合、約 20° 傾けた段階で滑落したが、土嚢アンカー ($45kg$) を設けることで傾斜 30° まで安定を保持しており、その効果は“傾斜 10° 分”となる。

同様に写真-5 はコンクリート球 4 個を積み上げ、一体化するように被覆した状態で 45° 傾けたものであるが、最上部のものは他の 3 個に支えられ安定を保っている。

このように、複数の石は個々の石の安定度をもとに、一体化した場合の全体の安全率を求め、目標安全率に対する不足分に対してのみ対策を行うことがより合理的といえる。

5.3 設計計算例¹²⁾

例えば図-5 のような転石群の場合、安定度の高い埋没状態



写真-4 滑動実験 (後方に $45kg$ の土嚢アンカーを取付けている)



写真-5 転倒実験

の石を含めて一体化するように自在性の高いネットで密着状態に被覆（固定）すれば、転石群全体の安全率は表-4 のようになる。これは最も不安定な状態の石（No.0）の現状安全率を $F_0=1.0$ とし、前述した式（1）を用いてこの時の摩擦係数 μ （ $=\tan 40^\circ = 0.8391$ ）を求め、これを基に全体の安全率を求めたものである。その結果、平常時安全率 $F_S=5.595$ ，地震時滑動安全率 $F_{SE}=2.734$ ，地震時転倒安全率 $F_{RE}=2.031$ となり、被覆のみで目標安全率（平常時 $F \geq 2.0$ ，地震時 $F \geq 1.0$ ）を達成することができる。仮に安全率が不足する場合は、その分深層アンカー等で補強すればよい。

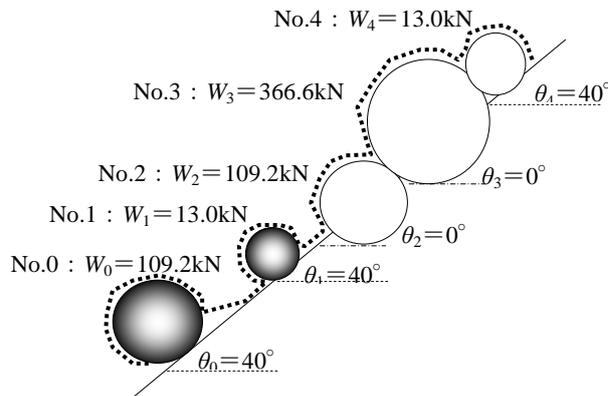


図-5 設計計算例（複数対象の場合）



写真-6 施工例

表-4 安定計算表

No	石の直径と地山傾斜角				安定解析諸元				安全率と所要引張力						最大引張力P (kN)	備考
	幅 a (m)	奥行 b (m)	高さ h (m)	角度 θ (°)	体積 V (m³)	重量 W (kN)	T (kN)	S (kN)	平常時		地震時滑動		地震時転倒			
									F_S	P_1 (kN)	F_{SE}	P_2 (kN)	F_{RE}	P_3 (kN)		
0	2.0	2.0	2.0	40	4.2	109.2	70.19	83.65	1.000	35.1	0.742	21.4	0.884	9.6	35.1	最も不安定な石
1	1.0	1.0	1.0	40	0.5	13.0	8.36	9.96	1.000	4.2	0.742	2.5	0.884	1.1	4.2	
2	2.0	2.0	2.0	0	4.2	109.2	0.00	109.20		0.0	5.594	0.0	6.667	0	0.0	
3	3.0	3.0	3.0	0	14.1	366.6	0.00	366.60		0.0	5.594	0.0	6.667	0	0.0	
4	1.0	1.0	1.0	40	0.5	13.0	8.36	9.96	1.000	4.2	0.742	2.5	0.884	1.1	4.2	
Σ					23.5	611	86.90	579.40	5.595	0.0	2.734	0.0	2.031	0.0	0.0	全体の安全率

図-6 は石の分布形態に応じた安定計算の方法を示すものである。石の数が少ない場合はそれぞれの安定度を求めることができるが、群状のものは調査および設計が非効率となる。そのため最も不安定（抑止力が最大）となる断面を設定し、これを基に全体に当てはめていく方法が適当である。なお、同じ群状の中でも明らかに石の分布径等が異なる場合は、それぞれ別途に検討断面を設定することが工事費削減につながる。

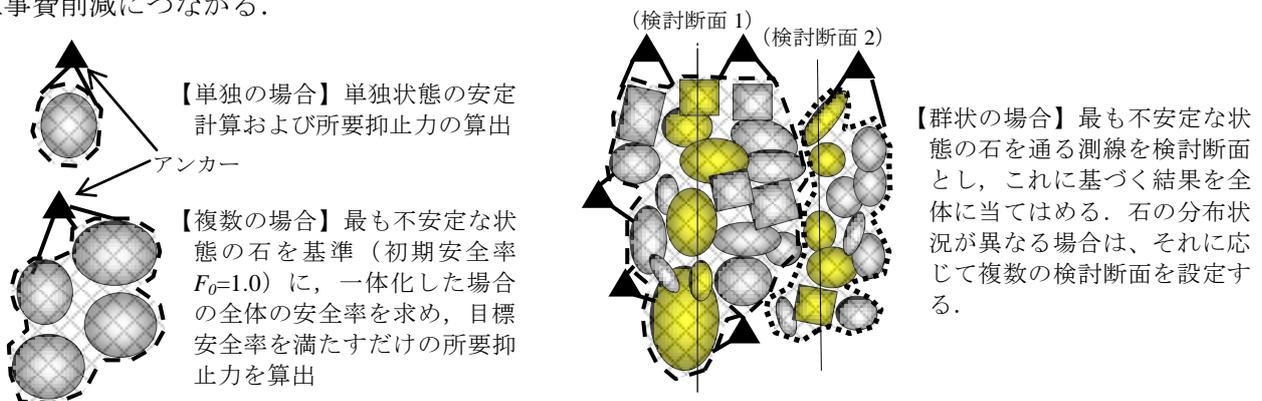


図-6 安定計算および抑止力の算出方法

5.4 岩用アンカーの所要埋設深さ

写真-7 は節理の発達した斜面での岩用アンカーの剥離状況を示すものである。これは引張力が地表部から深層部に伝わることによるものであり、これを避けるには図-7 のようなくさび方式とする必要がある。

この方法によればくさび機能により地表の引張力が直接岩体内部の孔壁方向に伝わるため、上記のような剥離進行を抑制することができる。ただし一定の埋設深さが必要と考えられ、実験によりこれを確認する。

なお語句の定義として“埋設比=アンカー体の埋設深さ/アンカー孔径”、“剥離比=定着地盤面からの剥離深さ/アンカー孔径”とする。

(1) 実験仕様

引張材は写真-8 のようであり、先端部に引張力を直接定着材に伝える拘束具（くさび形の金具、長さ 20mm、最大径 13mm、テーパ角 4°）を取り付け、全区間ビニールテープでシースしている。アンカー孔径 13mm、アンカー体拘束具埋設深さ 22, 30, 37, 49, 57mm とし、定着材はセメントミルク ($q_u=1\text{MPa}$, 試料サイズ $110\times 110\times 110\text{mm}$) とした。

(2) 実験結果

図-8 より定着部拘束具の埋設深を深くしても定着材（セメントミルク）の剥離深さはほぼ一定している。これをアンカー孔径との比で示せば図-9 のようになり、埋設比が 2 倍程度以上では剥離比も孔径の 2 倍程度で一定している。したがってアンカー体の剥離を防ぐにはアンカー孔径の 2 倍以上の埋設深さを確保すればよい。アンカーピンの所要埋設深さは“アンカー孔径 $3.6\text{cm}\times 2$ 倍 = 7.2cm ”となり、図-10 では安全側を考慮して 12cm としている。ちなみに引張型（図-11）等では定着深さに応じて剥離深さも大きくなり、定着地盤の剥離を抑制することはできない。



写真-7 岩用アンカーの剥離状況

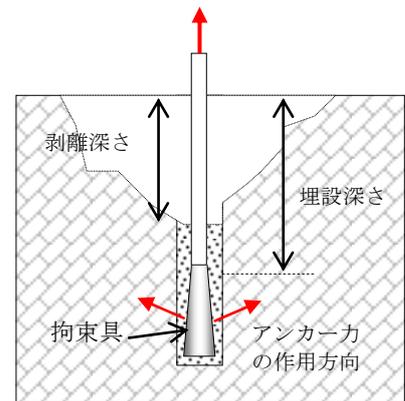


図-7 くさび型アンカーと定着地盤での力の作用方向



写真-8 実験用引張材(左から引張型、圧縮型、くさび型)



写真-9 定着状況

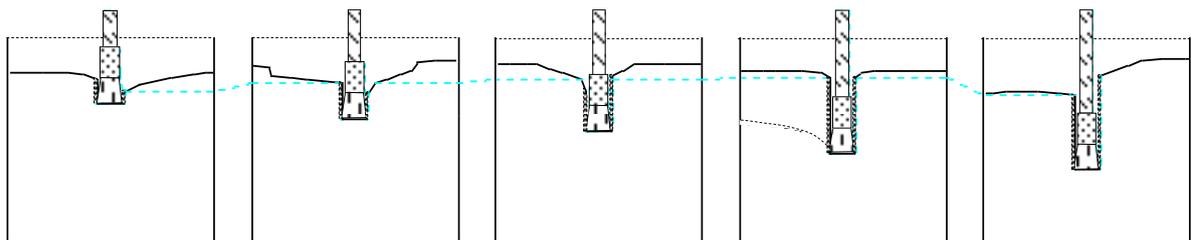


図-8 くさび型アンカー体の埋設深さと剥離状況

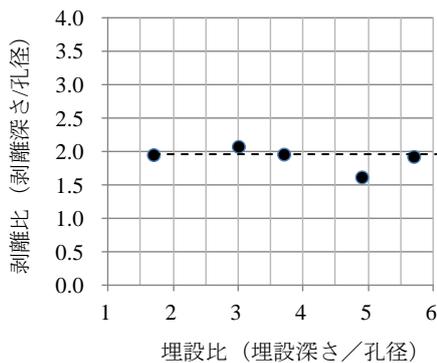


図-9 くさび型アンカー体の埋設比と剥離比

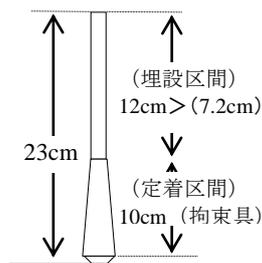


図-10 アンカーピンの構造

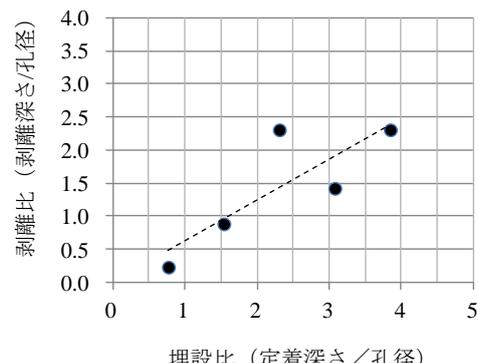


図-12 引張型アンカー体の埋設比と剥離比

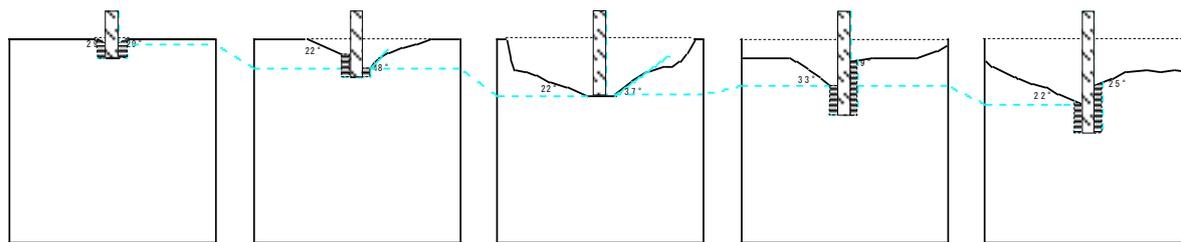


図-11 引張型アンカー体の定着深さと剥離深さ

6 まとめ

ワイヤーリングを用いた恒久的落石発生源対策の検討結果を以下に示す。

- ワイヤーロープ掛工の目標安全率は、移動速度が早いことなどから $F_S=2.0$ が妥当と考えられる。
- 石の安定計算は地震時の滑動および転倒について行ない、これに基づく対策を設計すべきである。
- 石の小割はワイヤーネットで被覆した状態でおこない、そのまま残置するかアンカーで補強する方法が人力作業の負担が少なく安全である。
- 不安定な石が複数の場合はそれぞれの安定度を基にネットで被覆後の全体の安全率を求め、目標安全率に不足する分に対してアンカー等で補強する方法が合理的である。
- アンカーは岩用を使用すべきであり、定着地盤の剥離を防ぐにはくさび式のものが適当である。

便覧にはワイヤーロープ掛工の目標安全率等が示されていないが、“技術”を進展させるには一応の基準設定が必要である。落石発生源対策は崩壊等の取り扱いと大差ないものと考えられ、早急に指針等の整備が望まれる。さらに石の安定度評価においても主に目視による判定がなされているが、個人差によるばらつきをなくすには安定計算による方法が適当であり、この方面での整理も望まれる。

【参考文献】

- 1) (社) 日本道路協会, 落石対策便覧, pp.103~104, 2000.
- 2) 森林土木ハンドブック, p.553, 1997.
- 3) (社) 日本道路協会, 落石対策便覧, p.355, 2000.
- 4) (財) 鉄道総合技術研究所, 落石対策技術マニュアル, 付属資料, p.66, 1999.
- 5) (財) 鉄道総合技術研究所, 落石対策技術マニュアル, 付属資料, pp.66~67, 1999.
- 6) 森林土木ハンドブック, p.860, 1997
- 7) (財) 鉄道総合技術研究所, 落石対策技術マニュアル, p.57, 1999.
- 8) (社) 日本道路協会, 落石対策便覧, p.75, 2000.
- 9) (社) 日本道路協会, 落石対策便覧, p.92, 1989.
- 10) 藤田雅也他, ロープネット工に関する維持管理手法の提案, 地盤工学ジャーナル, 2009.
- 11) (財) 鉄道総合技術研究所, 落石対策技術マニュアル, pp.75~77, 1999.
- 12) くさび型アンカー工法研究会, ワイヤーネット被覆工法・クラッシュネット工法, 落石発生源対策設計・施工マニュアル, p.26, 2011.