

地質特性を反映した複数の対策工種を組み合わせた落石対策工の設計

協和設計(株) 西岡孝尚
渡邊浩幸
○大林由明

論文要旨

伊豆縦貫自動車道整備のための工事用道路を設計するにあたり、落石による被災の危険性が高い区間に対し、落石調査を実施し、安定性や落石分布状況を考慮した落石対策工の設計を行った。対象の急崖斜面には、塊状で硬質な凝灰岩と亀裂質な安山岩が露出し、これらを発生源とする落石が道路を直撃するおそれがあった。落石供給源である露岩は次の特徴を有している。①凝灰岩は亀裂間隔が広く開口による緩みから径1~5m程度の浮石が発生し、広範かつ巨大な落石エネルギーを有する落石の発生源である。②安山岩は数cm間隔で亀裂が発達し、これを供給源とする落石のエネルギーは小さいが、斜面上に多くの岩片を供給している。これら地質的特徴に起因する落石は、その形状や分布状況、エネルギーが多岐に亘るため、一律に対策することは合理的でなく、それぞれの性状に応じた対策工の選定が課題であった。そこで、これら多様な落石について、その形状(浮石・転石)、分布状況(単体・群體)、落石エネルギー(100kJ以上・未満)の3要素に着目し、これを指標として対象の落石を4つのグループに分類し、グループ毎に対策工(予防工+防護工)を計画して、効果的かつ適合性の高い対策工の設計をなし得た。

キーワード：落石調査、落石対策工、落石エネルギー

まえがき

伊豆縦貫自動車道は、延長約60kmの一般国道の自動車専用道路で、高速交通体系から取り残された地域への高速サービスを提供するとともに、伊豆地域の交通混雑の緩和や地域の秩序ある開発、発展に大きく寄与し、広域交通および地域間交通の需要に対応する道路である。本計画は、この伊豆縦貫自動車道の先行整備区間での工事用道路整備にあたり、露岩が連続する急崖斜面下にある町道を拡幅するものである。この町道は、地元より拡幅の要望があり、工事用道路としての利用だけでなく、将来的に町道として移管する計画である。

本稿は、このような背景のもと、落石の危険性が高い区間(約100m)における落石調査および対策工設計の事例概要を述べるものである。計画地の大きな特徴は、塊状で硬質な凝灰岩と亀裂質な安山岩が露岩していることである。これらの露岩から生じる落石は、その形状や分布状況、エネルギーが多岐に亘るため、一律に対策は合理的でなく、それぞれの落石性状に応じた対策工を選定する必要があり、落石の3要素(形状・分布状況・落石エネルギー)に着目することで効果的かつ適合性の高い対策工を設計した。以下にその概要を報告する。

1. 概要

1-1. 計画地について

伊豆縦貫自動車道整備のため、先行整備区間において工事用道路予備設計を実施した。工事用道路はルートに平行している町道を拡幅整備し、町道として利用できるように計画した。今回、工事用道路整備区間のうち、斜面上に露岩が連続的に分布し、落石による被災の危険性が高い区間(約100m)に対し、落石調査を実施し、落石対策工を設計した。

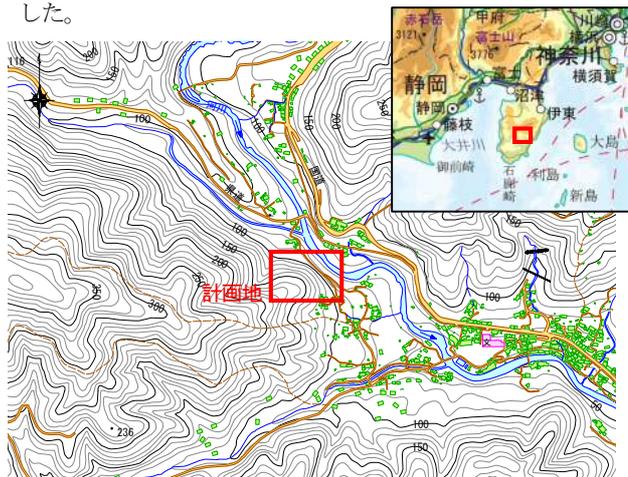


図-1 位置図

1-2. 地形地質

計画地周辺は、標高500~1000mの山々が連なる急峻な山地地形を呈し、山間を流下する3つの河川によって囲まれた台地状の平坦地には集落が形成されている。対象の斜面は東向き急峻な斜面で、東方へ流下する河川の右岸側

にあたり、斜面脚部には町道が整備されている。

地質は、新第三紀中新世～鮮新世の湯ヶ島層群・白浜層群の火山岩類を基盤岩とし、安山岩質溶岩、自破碎状溶岩、火山礫凝灰岩、凝灰質砂岩からなり、岩相が漸移的に変化し、安山岩溶岩の露出する斜面は急崖をなす岩盤斜面を形成している。

計画地は、凝灰岩や安山岩が露出する崖地形を呈し、スギやヒノキの植林が分布する。現況の町道は標高 90m～120m 付近を通過し、直下には幅 10m 程度の河川が南方に流下している。

2. 落石調査結果

斜面上の浮石や転石の分布状況や安定状態、落石経路、斜面の不安定化機構等を明らかにし、対策の要否の判断、対策工の選定と設計施工のための基礎資料を得るべく落石調査を実施した。図-2に現地踏査結果図を示す。

2-1. 現地状況

落下の危険性のある主要な浮石や転石は 39 箇所認められ、露岩の風化や侵食の発達により抜け落ちた転石が斜面全域に点在していた。

確認された浮石・転石は、将来的に台風や地震などの自然現象が誘因で落石となるおそれがあるため、落石対策工を講じる必要があった。また、斜面上に点在する転石は落石の危険性は低いものの、供用後の長期的な安全を考慮した場合、これらに対しても落石対策工を実施する必要があった。

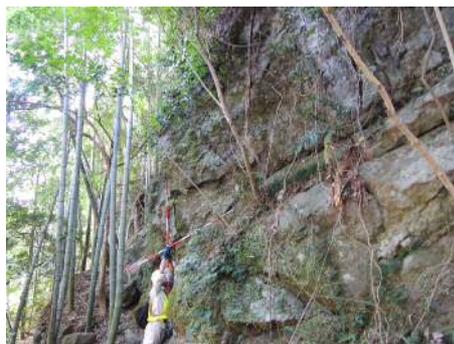


写真-1 露岩の一部
(亀裂が全体的に発達し所々で浮石化)



写真-2 斜面上の転石
(斜面上で静止)



写真-3 露岩下部の転石群
(露岩から抜け落ちたと推定)

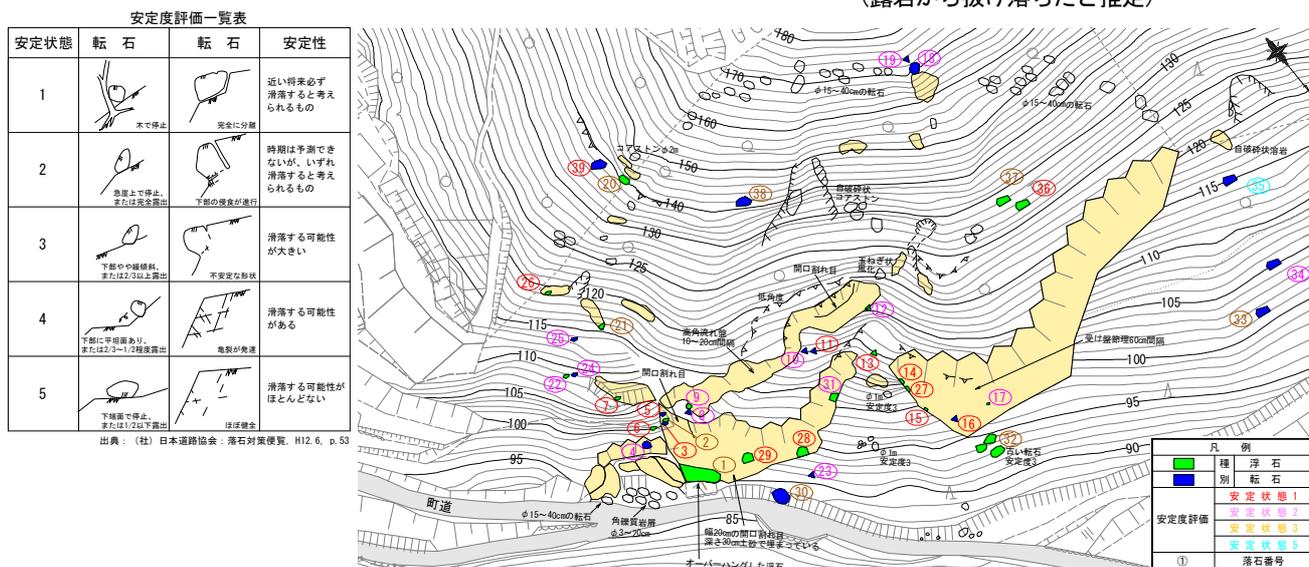


図-2 現地踏査結果図

2-2. 落石エネルギーの算出

落石エネルギーの算出は以下の式¹⁾を用いた。

得られた落石エネルギーの一覧表を表-1に示す。

$$E = (1 + \beta) (1 - (\mu / \tan \theta)) m \cdot g \cdot H$$

ここで $(1 + \beta) (1 - (\mu / \tan \theta)) \leq 1.0$

E : 落石の全運動エネルギー

β : 回転エネルギー係数 (0.1としてよい)

μ : 等価摩擦係数 (⑤より $\mu=0.35$ と設定する)

θ : 斜面勾配

m : 落石の質量

g : 重力加速度

H : 落石の落下高さ

表-1 落石エネルギー一覧表

番号	分類	落石形状			落下高 (m)	平均斜面 勾配 (度)	落石 エネルギー 到達点 (kJ)
		高さ (m)	幅 (m)	奥行 (m)			
1	浮石	8.5	3.5	3.0	8.5	54.8	9,802
2	浮石	5.0	1.5	3.0	15.0	47.0	6,499
3	転石	0.8	0.6	0.2	15.0	53.7	31
4	転石	1.0	1.0	0.8	11.0	45.0	164
5	転石	0.8	0.7	0.6	17.0	46.7	110
6	浮石	1.5	2.0	0.7	14.0	47.1	568
7	浮石	3.0	3.0	1.5	22.0	49.2	5,927
8	転石	0.6	0.5	0.4	14.0	43.0	30
9	浮石	0.7	1.0	0.4	16.0	46.8	86
10	転石	1.4	2.0	1.4	25.0	47.4	1,900
11	転石	0.7	0.7	0.4	25.0	46.2	93
12	浮石	1.0	1.5	0.4	31.0	43.2	334
13	浮石	0.7	0.8	0.8	25.0	43.9	204
14	浮石	1.3	1.3	0.6	20.0	42.3	357
15	浮石	0.4	0.9	1.0	15.0	38.3	86
16	転石	0.6	0.4	0.5	16.0	45.0	36
17	浮石	1.0	0.6	1.0	16.0	45.0	178
18	転石	2.2	1.0	1.5	40.0	43.7	2,393
19	転石	1.0	1.2	1.7	40.0	42.9	1,455
20	浮石	1.4	1.8	2.0	40.0	41.6	3,495
21	浮石	1.1	1.2	1.0	29.0	44.0	698
22	浮石	1.2	3.8	2.0	23.0	43.8	3,808
23	転石	0.9	1.0	0.5	11.0	57.5	110
24	転石	1.2	1.0	0.4	24.0	43.8	209
25	転石	1.8	0.8	0.4	28.0	43.0	288
26	浮石	0.6	1.4	1.2	32.0	43.3	579
27	浮石	1.5	1.0	1.4	20.0	42.3	739
28	浮石	1.0	1.8	0.6	10.0	45.0	201
29	浮石	0.6	1.8	1.4	8.0	48.8	240
30	転石	1.2	1.4	0.8	4.0	53.1	113
31	浮石	0.6	0.8	1.2	17.0	43.4	176
32	浮石	0.6	0.6	1.0	11.0	34.5	56
33	転石	1.4	1.0	0.4	18.0	52.1	210
34	転石	0.3	0.6	0.5	11.0	32.9	13
35	転石	0.4	1.2	1.6	22.0	34.5	237
36	浮石	0.5	0.4	0.3	40.0	44.3	44
37	浮石	1.0	0.8	0.6	40.0	44.4	353
38	転石	2.2	2.0	1.0	40.0	46.8	3,378
39	転石	0.8	0.4	0.6	23.0	38.4	71

安定状態1 安定状態4 ※100kJ以上は赤字表記
安定状態2 安定状態5

2-3. 落石エネルギーの評価

計画地の落石は、落石径や落石エネルギーにバラツキがあったため、落石エネルギー、落石径、個数の要素ごとに分布図を作成した。以下に作成した分布図を示す。

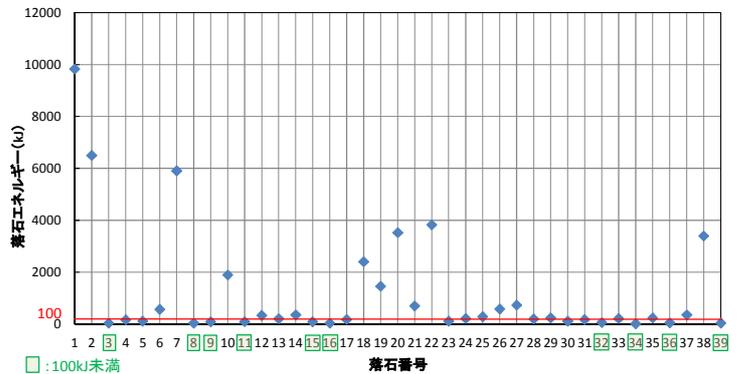


図-3 落石エネルギー分布図

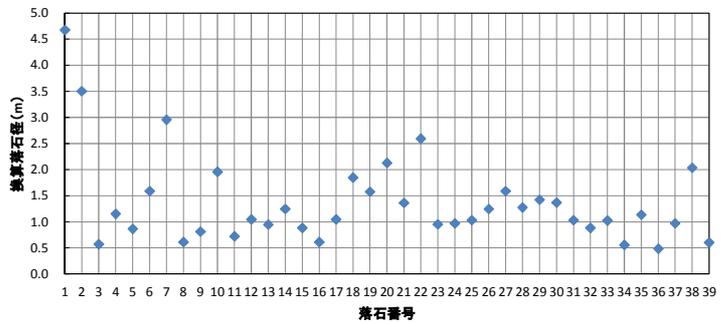


図-4 換算落石径分布図

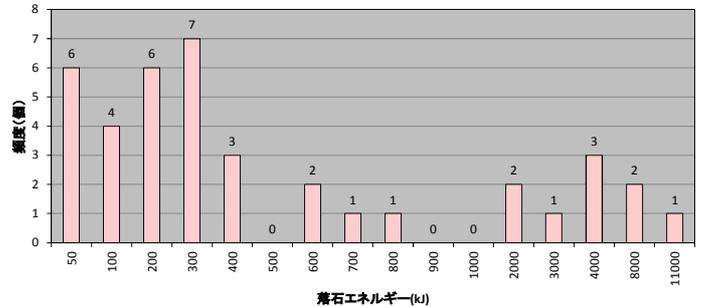
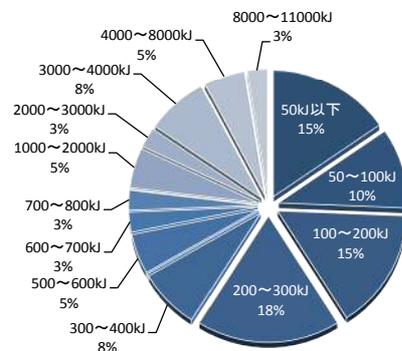


図-5 落石エネルギー別個数



落石E (kJ)	50kJ以下	~100kJ	~200kJ	~300kJ	~400kJ	~500kJ	~600kJ	~700kJ	~800kJ	~900kJ	~1000kJ
累積数	6	10	16	23	26	26	28	29	30	30	30
割合(%)	15%	26%	41%	59%	67%	67%	72%	74%	77%	77%	77%
落石E (kJ)	~2000kJ	~3000kJ	~4000kJ	~8000kJ	~11000kJ						
累積数	32	33	36	38	39						
割合(%)	82%	85%	92%	97%	100%						

図-6 落石エネルギー別割合

3. 対策工設計

3-1. 課題の整理

落石調査の結果、計画地には多数の落石が分布し、落石の形状や分布状況および落石エネルギーは多岐に亘るため、一律な落石対策工を施すことは合理的ではなく、それぞれの性状に応じた対策工を選定する必要がある。

3-2. 一次選定

対策工の組み合わせは以下の3案が挙げられる。

- 1案 予防工単独
- 2案 防護工単独
- 3案 予防工+防護工【採用案：○】

1案はすべての浮石・転石に対して、予防工を施す原位置対策で、危険性を除去する点では有効だが、斜面全域が対策対象となるため、施工日数が長期化する。さらに、将来的に落石となり得る未知の浮石・転石には対処できないため、この案は不適格である。

2案は待ち受け式の防護工ですべての浮石・転石を受け止めるものであり、長期的な安全が確保できるとともに、施工性も1案と比較すると短縮できる。しかし、計画地には100kJを超える落石エネルギーを持つ浮石・転石が多く、高コストな防護工が要求されることとなり、経済性が損なわれるため、この案も不適格である。

3案は予防工と防護工を併用するもので、落石エネルギーに応じて、予防工を施すものと防護工で受け止めるものに分け、最も経済的で施工性に優れた工法を採用するものである。この案の場合、防護工を施工することで予防工の施工箇所を減らすことができ、施工日数の短縮が見込められる。さらに、落石エネルギーの大きな浮石・転石には予防工を施すことで、高コストな高エネルギー耐用の防護工を施工する必要がなくなるため、本案を採用案とした。

3-3. 二次選定

現地踏査の結果、主要な浮石・転石の落石エネルギーは100kJを超えるものが全体の約74%を占めるため、一般的な工法では落石エネルギーに耐えることができない。しかし、100kJを超えるような高エネルギー耐用の防護工の使用は経済性を損なうため、100kJを超える浮石・転石は予防工で対応し、100kJ未満のものは防護工で対応することを基本原則とした。

さらに、落石調査によって確認された落石の形状や分布状況および落石エネルギーは多岐に亘るため、これらの多様な落石について、その形状(浮石・転石)、分布状況(単体・群体)、落石エネルギー(100kJ以上・未満)の3要素に着目し、これらを指標として対象の落石を4つのグループに分類し、グループ毎に対策工(予防工+防護工)を計画することとした。表-2にその分類表を示す。

表-2 落石の規模・タイプ毎の対策工の適用性

		落石対策工			
		防護工	予防工		
			小割除去	ロープ掛工	ロープ伏工
形状	浮石	○		○	○
	転石	○	◎	○	○
分布状況	単体	○	○	◎	
	群体	○			◎
落石エネルギー	大(100kJ以上)		◎	○	○
	小(100kJ未満)	◎			

◎: 決定要因, ○: 適用性がある

上記分類表を参考にして、予防工および防護工の選定を次のとおり行った。

① 予防工の選定

予防工は、一般的に落石予備物質の除去や現位置固定、風化防止などを目的に実施されるものである。工法の選定にあたっては、図-7に示すフローに従い選定した。

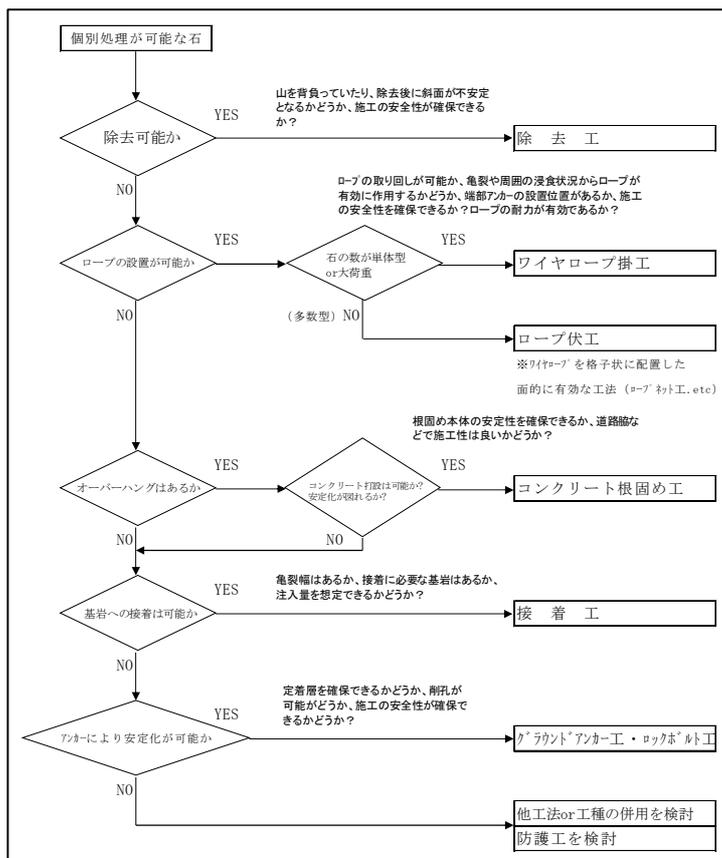


図-7 予防工選定フロー¹⁾・2)

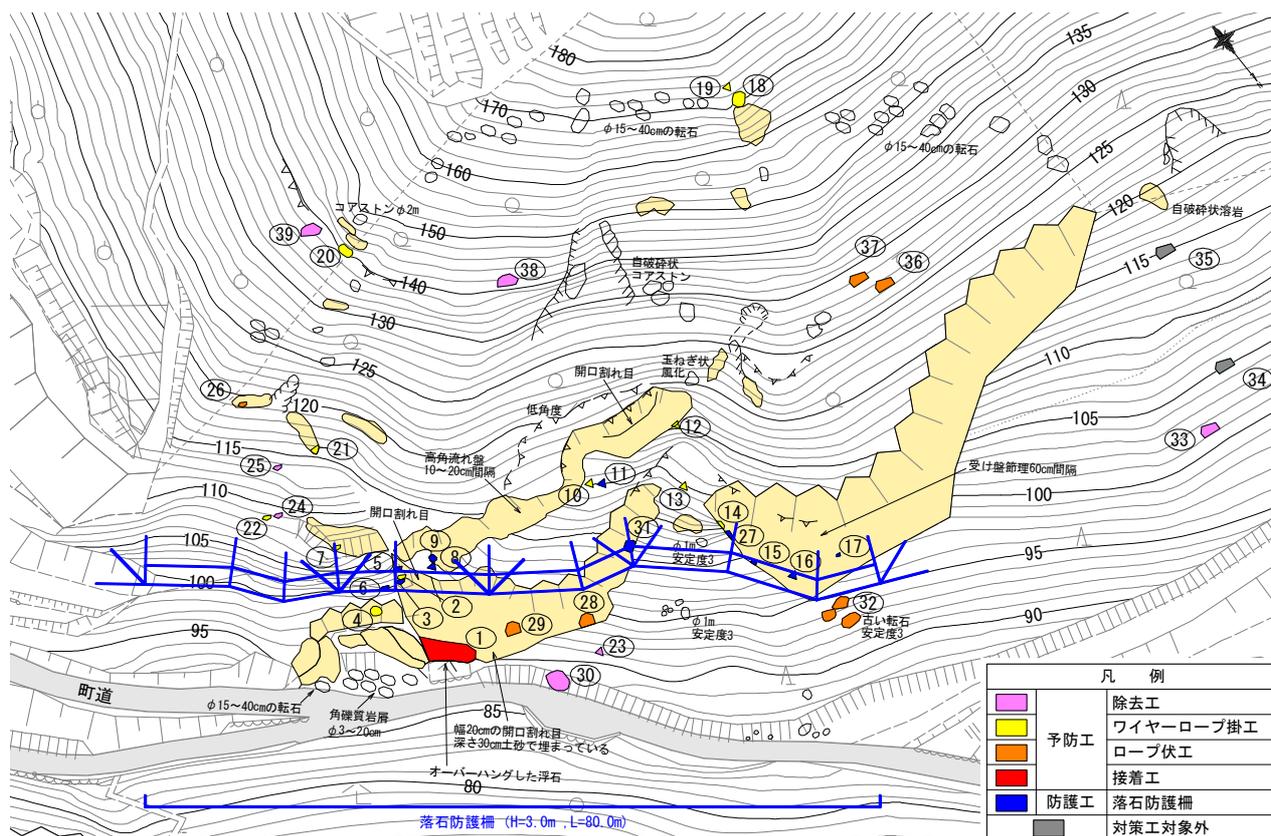


図-9 落石対策工平面図

表-3 採用対策工一覧表

落石番号	落石形状			落石エネルギー (kJ)	採用対策工
	高さ (m)	幅 (m)	奥行 (m)		
1	8.5	3.5	3.0	9827.6	岩接着
2	5.0	1.5	3.0	6502.1	ワイヤーロープ掛
3	0.8	0.6	0.2	30.7	落石防護柵
4	1.0	1.0	0.8	163.6	ワイヤーロープ掛
5	0.8	0.7	0.6	110.0	落石防護柵
6	1.5	2.0	0.7	566.4	落石防護柵
7	3.0	3.0	1.5	5909.8	ワイヤーロープ掛
8	0.6	0.5	0.4	30.0	落石防護柵
9	0.7	1.0	0.4	86.3	落石防護柵
10	1.4	2.0	1.4	1888.0	ワイヤーロープ掛
11	0.7	0.7	0.4	92.8	落石防護柵
12	1.0	1.5	0.4	332.3	ワイヤーロープ掛
13	0.7	0.8	0.8	204.2	ワイヤーロープ掛
14	1.3	1.3	0.6	354.6	ワイヤーロープ掛
15	0.4	0.9	1.0	85.3	落石防護柵
16	0.6	0.4	0.5	35.7	落石防護柵
17	1.0	0.6	1.0	178.5	落石防護柵
18	2.2	1.0	1.5	2406.9	ワイヤーロープ掛
19	1.0	1.2	1.7	1457.8	ワイヤーロープ掛
20	1.4	1.8	2.0	3524.5	ワイヤーロープ掛
21	1.1	1.2	1.0	698.0	ワイヤーロープ掛
22	1.2	3.8	2.0	3824.8	ワイヤーロープ掛
23	0.9	1.0	0.5	110.6	小割除去
24	1.2	1.0	0.4	210.1	小割除去
25	1.8	0.8	0.4	288.1	小割除去
26	0.6	1.4	1.2	576.3	ロープ伏
27	1.5	1.0	1.4	734.3	落石防護柵
28	1.0	1.8	0.6	200.8	ロープ伏
29	0.6	1.8	1.4	240.7	ロープ伏
30	1.2	1.4	0.8	113.2	小割除去
31	0.6	0.8	1.2	174.9	落石防護柵
32	0.6	0.6	1.0	56.6	ロープ伏
33	1.4	1.0	0.4	209.5	小割除去
34	0.3	0.6	0.5	13.1	対象外
35	0.4	1.2	1.6	241.7	対象外
36	0.5	0.4	0.3	43.8	ロープ伏
37	1.0	0.8	0.6	350.1	ロープ伏
38	2.2	2.0	1.0	3390.7	小割除去
39	0.8	0.4	0.6	41.8	小割除去

あとがき

本事例で特徴的なことは、急斜面上に塊状で硬質な凝灰岩と亀裂質な安山岩が露岩しており、これらの露岩から生じる落石は形態や分布状況が多様で、落石エネルギーも広範に亘る。それに対し、形状(浮石・転石)、分布状況(単体・群體)、落石エネルギー(100kJ以上・未満)の3要素に着目し、地質特性を反映して、落石対象のグループ化およびグループ毎の対策工を立案した。

このように、現場の地形地質条件を詳細に検討することで、落石の特性に応じた合理的、かつ適切な対策工の設計をなし得た。

本事例は、別の現場においても汎用性のあるひとつのモデルとなり得よう。また、現場条件から導かれる落石対策工の答えは、やはり現場にあるということを改めて学ぶことができた事例として、ここに紹介した。

参考文献

- 1) 落石対策便覧, (社)日本道路協会, H12.6.30. 422p.
- 2) 落石対策工の設計法と計算例, (公社)地盤工学会, H26.12.25. 317p.