

【落石発生源対策の計画安全率について】

落石発生源対策の対策において、落石対策技術マニュアル(財団法人 鉄道総合技術研究所,平成 11 年)では、“平常時 2.0, 地震時 1.0” (覆式落石防護網工およびロックアンカーにおける設計例より) としている。これに対し、落石対策便覧では“安全率”という概念で取り扱っていないが、そこに提示された設計式を基にすれば以下のようなになる。

○覆式落石防護網工

所要抑止力 (防護網に作用する荷重 W') は、次式で示されている。

$$W' = (\sin\theta - \mu\cos\theta) W \quad (1)$$

ここに W : 落石重量+防護網重量

θ : 斜面勾配

μ : 地山と落石の摩擦係数・・・経験的に 0.5 程度を用いることが多い

式 (1) を展開すれば、

$$W' = W\sin\theta - W\cos\theta \cdot \mu$$

$$W\cos\theta \cdot \mu + W' = W\sin\theta$$

左辺はすべりに抵抗する力、右辺はすべろうとする力であり、両辺を $W\sin\theta$ で割れば

$$(W\cos\theta \cdot \mu + W') / W\sin\theta = 1 \quad (2)$$

すなわち、防護網工による計画安全率は $F_p=1$ となる。

○ワイヤーロープ掛工

同様に、所要抑止力 (滑落時荷重) は次式で示されている。

$$S = W\sin\alpha$$

ここに、 α : 岩塊底面のすべり面傾斜角

現状安全率 $F_0=1.0$ とすれば、

$$W\cos\alpha \cdot \mu / W\sin\alpha = 1$$

これを式 (2) に当てはめれば、掛工による計画安全率は

$$F_p = (W\cos\alpha \cdot \mu + S) / W\sin\alpha = W\cos\alpha \cdot \mu / W\sin\alpha + W\sin\alpha / W\sin\alpha = 2$$

次表は予防工として扱われる主な工種であるが、問題は計画安全率が異なるにも関わらず経済性比較を行って工種を選定していること、あるいは同じ工種でも計画安全率の取り扱いが異なるといった点にある。これでは当該分野の発展は望めない。“便覧”から“指針”等にステップアップするよう、とりあえず“計画安全率”等について早期に整理すべきである。

工 種	設計の考え方	計画安全率 F_p
覆式 落石防護網工	防護網と地山との間の不安定岩塊を固定、もしくは変位した場合の岩塊を斜面下方へ安全に誘導する。主に道路法面で使用される。	<ul style="list-style-type: none"> • $F_p=1$ (便覧での実質的値) • $F_p=2$ (JR 落石対策技術マニュアル)
ワイヤー ロープ掛工	不安定岩塊をワイヤーロープで固定する。	<ul style="list-style-type: none"> • $F_p=2$ (便覧での実質的値) • $F_p=1.2$ (落石対策工の設計法と計算例,地盤工学会,平成 26 年)
ロープ伏せ工	覆式落石防護網工に準じた設計であるが、数m間隔で設置されたアンカーに囲まれる狭い領域を固定単位とする。	覆式落石防護網工 (便覧) に準ずる
接着工	浮石を対象に、剥離面に接着材を充填することで固定する。	“滑動 $F_p=1.2$, 転倒 $F_p=2.0$ ” (設計例より) 等

【転倒安全率を基にした落石危険度判定の提案】

1. 現場で感ずる“落石の危険性”を、より適正に評価する方法

落石対策便覧では、図のような岩塊の状態から危険度判定（定性的）を行う例を示しているが、曖昧であり個人差を生じやすい。

写真のように、現場で危険性を感ずるのは“滑動”より“転倒”であり、転倒安全率を基に判断することが適当である。

転倒要因としては、主に地震や倒木等による外力であり、

「岩塊の重心位置、岩塊脚部の将来的侵食予想、および地震力（立木の根系等による外力含む）」を与えることで、より定量的な判定とすることができる。特に摩擦係数 μ といった曖昧な因子がないため、相対的危険度をより精度良く判定できる。

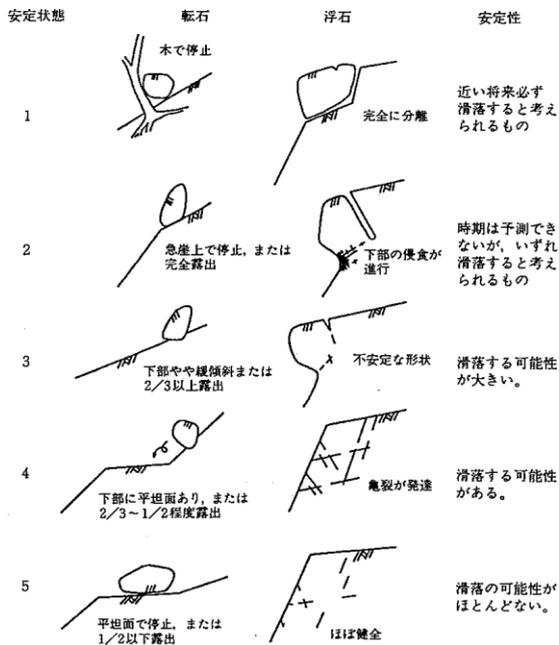


図2-9 現地観察による安定度評価の一例



図2 20m 上部露岩から剥離し、転落した岩塊
岩塊が“滑り運動のみ”とすれば、さほど危険性を感じない

図1 落石対策便覧による判定例

2. 必要な測定項目と計算式

①計算（内業）を簡単にするため、岩塊を“平行6面体”にモデル化して測定

※これにともなう曖昧さは、計画安全率を高め設定することで補う

②測定項目：幅 a 、奥行 b 、高さ h 、転倒に関する腕長 c 、岩塊のすべり面傾斜 θ

岩塊縦断方向の傾き β （重心位置算出）

③転倒計算：地震力を与えて転倒するか否かを判定、もしくはその度合いによって危険度ランク（優先順位）を決定。

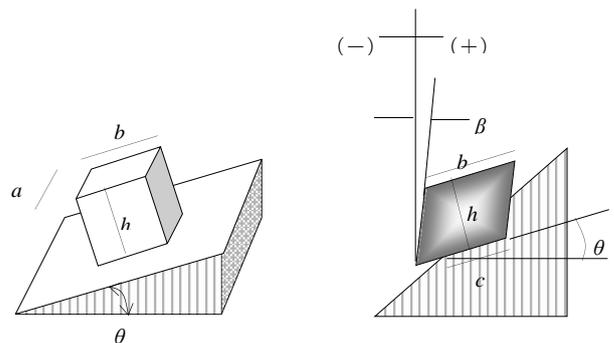


図3 岩塊測定項目

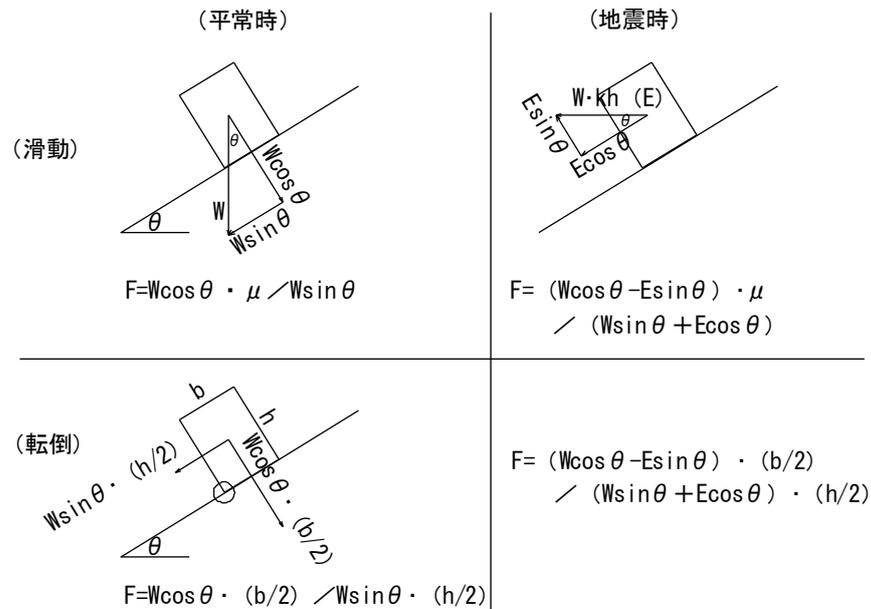


図4 力関係と安定解析式

3. 目視評価手法（図1）との比較

現場実例を基に紹介する。

3.1 基礎データ

表1は岩塊諸元であり、現地測定した値を基に滑動および転倒安全率を求めたものである。

- データ 44 個
- 平均径 2.5m (336kN/個)
- 平均すべり面傾斜角 28°
- 滑動安全率は、現状 1.0 として摩擦係数 μ を逆算し、この値を基に地震時安全率を求めた。ただし、摩擦係数は $\mu \geq 0.5$ とする。

3.2 危険度ランクの比較

表2は、図1を用いた目視判定による危険度ランクと安定計算による転倒安全率およびリスク度を比較したものである。

- 地震時転倒安全率：図4に示す式を使用。水平震度係数は $kh=0.2$ 。
- リスク度 R ：落石の規模に応じた被害度を次式で考慮したもの

$$R = \log (E/F)$$

ここに、 E ：落石運動エネルギー、 F ：地震時転倒安全率

その結果、

- 目視判定では“ランク 2~3”となっているが、転倒安全率との相関性はない。
 - ※転倒安全率が正しいとすれば、目視評価が“かなり曖昧なもの”となる。
- 目視判定では 44 個すべて対策が必要（危険度ランク 2~3）となっているが、転倒安全率からは
 - ・緊急性の高いもの ($F \leq 1.0$) 8 個
 - ・対策を必要とするもの ($F \leq 2.0^*$ とした場合) 12 個、計 20 個 となる。

※計算結果の曖昧さを考慮すれば、この程度の幅を持つことが適当と思われるほか、個別に考慮すべき事例も想定される。

3.3 リスク度 R による優先順位

表 3 は表 2 で対策が必要と判断された岩塊について、被害規模（落石運動エネルギー）を考慮し優先度を求めたものである。これによれば、小岩塊の場合安全率は低くても優先順位は低下し(No.35,191)、巨岩の場合はその逆となる傾向にある。

表 1 岩塊諸元

No	石の寸法と傾斜角						同左、転倒計算関連			滑動安全率		転倒安全率	
	幅 a (m)	奥行 b (m)	高さ h (m)	等価 径 (m)	重量 W (kN)	すべり 面角 θ (°)	底長 c (m)	前面 角 β_V (°)	底面 角 β_H (°)	平常時 F_S	地震時 F_{SE}	平常時 F_S	地震時 F_{SE}
9	1.6	1.8	1.2	1.9	90.0	35.0	1.8	0.0	35.0	1.00	0.67	3.14	2.10
25	1.5	1.5	1.4	1.8	81.9	25.0	1.5	-25.0	25.0	1.07	0.68	2.30	1.46
29	3.5	3.5	2.2	3.7	700.7	15.0	3.5	-15.0	15.0	1.87	1.01	5.94	3.22
35	1.8	1.3	1.3	1.8	79.0	25.0	1.0	-25.0	25.0	1.07	0.68	1.15	0.73
38	1.3	1.8	1.8	2.0	109.5	15.0	0.7	25.0	15.0	1.87	1.01	2.30	1.25
41	2.3	2.2	2.0	2.7	263.1	18.0	2.2	-18.0	18.0	1.54	0.89	3.39	1.96
47	2.5	2.0	0.6	1.8	78.0	45.0	2.0	-15.0	45.0	1.00	0.67	3.91	2.61
58	1.8	1.4	1.0	1.7	65.5	35.0	1.4	-35.0	35.0	1.00	0.67	2.00	1.34
64	3.2	2.0	0.9	2.2	149.8	55.0	2.0	-55.0	55.0	1.00	0.63	1.56	0.98
65	1.7	1.0	1.6	1.7	70.7	25.0	1.0	-10.0	25.0	1.07	0.68	1.91	1.22
67	4.0	3.0	2.0	3.6	624.0	25.0	3.0	-20.0	25.0	1.07	0.68	3.40	2.16
68	1.8	3.0	0.5	1.7	70.2	30.0	3.0	0.0	30.0	1.00	0.66	11.39	7.48
69	2.0	2.5	1.2	2.3	156.0	30.0	2.5	-20.0	30.0	1.00	0.66	3.91	2.57
82	2.1	0.8	2.2	1.9	96.2	25.0	0.8	15.0	25.0	1.07	0.68	2.58	1.64
102	2.4	2.4	0.5	1.8	74.9	50.0	1.0	0.0	50.0	1.00	0.65	0.33	0.21
117	5.0	1.0	3.8	3.3	494.0	30.0	1.0	15.0	30.0	1.00	0.66	2.19	1.44
160	1.0	0.6	0.4	0.8	6.2	35.0	0.6	-35.0	35.0	1.00	0.67	2.14	1.43
33	3.0	3.0	1.7	3.1	397.8	25.0	3.0	0.0	25.0	1.07	0.68	4.78	3.04
34	3.0	3.0	1.7	3.1	397.8	25.0	3.0	-25.0	25.0	1.07	0.68	3.78	2.40
55	2.6	3.5	1.5	3.0	354.9	25.0	3.5	0.0	25.0	1.07	0.68	6.00	3.81
56	3.0	3.0	0.6	2.2	140.4	25.0	3.0	-25.0	25.0	1.07	0.68	10.72	6.80
61	3.6	4.6	1.7	3.8	731.9	25.0	4.6	-25.0	25.0	1.07	0.68	5.80	3.68
62	1.8	3.5	1.0	2.3	163.8	25.0	3.5	-25.0	25.0	1.07	0.68	7.51	4.76
73	2.0	1.6	2.2	2.4	183.0	30.0	1.6	0.0	30.0	1.00	0.66	2.26	1.48
130	2.0	0.9	2.6	2.1	121.7	30.0	0.9	5.0	30.0	1.00	0.66	1.81	1.19
177	1.2	0.8	0.6	1.0	15.1	35.0	0.8	-35.0	35.0	1.00	0.67	1.90	1.27
178	1.2	1.2	0.5	1.1	18.7	35.0	1.2	-35.0	35.0	1.00	0.67	3.43	2.29
179	1.2	0.4	0.7	0.9	8.8	35.0	0.4	-35.0	35.0	1.00	0.67	0.82	0.55
180	2.2	1.8	0.7	1.7	72.0	35.0	1.2	-35.0	35.0	1.00	0.67	1.22	0.82
140	2.5	1.5	0.9	1.9	87.9	25.0	1.5	-25.0	25.0	1.07	0.68	3.57	2.27
141	3.5	2.0	1.1	2.5	200.2	25.0	2.0	-25.0	25.0	1.07	0.68	3.90	2.47
147	3.2	3.0	1.8	3.2	449.3	25.0	2.0	-20.0	25.0	1.07	0.68	1.38	0.88
162	2.6	2.1	2.2	2.8	312.3	25.0	1.1	-5.0	25.0	1.07	0.68	0.88	0.56
164	2.6	3.0	2.0	3.1	405.6	25.0	2.0	0.0	25.0	1.07	0.68	2.07	1.32
173	5.5	4.5	3.5	5.5	2252.4	25.0	4.5	-25.0	25.0	1.07	0.68	2.76	1.75
184	2.8	2.5	2.0	3.0	364.0	30.0	1.5	0.0	30.0	1.00	0.66	1.43	0.94
190	2.6	2.2	1.9	2.8	282.6	40.0	2.2	-40.0	40.0	1.00	0.67	1.38	0.93
191	1.4	1.5	1.3	1.7	71.0	40.0	1.5	-40.0	40.0	1.00	0.67	1.38	0.92
194	6.0	1.6	2.2	3.4	549.1	25.0	1.6	15.0	25.0	1.07	0.68	3.36	2.13
195	6.0	3.0	4.0	5.2	1872.0	25.0	3.0	15.0	25.0	1.07	0.68	3.41	2.16
196	2.4	1.5	3.0	2.7	280.8	25.0	1.5	15.0	25.0	1.07	0.68	2.87	1.82
200	5.0	6.0	2.5	5.2	1950.0	25.0	6.0	-25.0	25.0	1.07	0.68	5.15	3.27
204	1.0	1.2	0.8	1.2	25.0	15.0	1.2	0.0	15.0	1.87	1.01	6.60	3.58
72	3.0	1.6	1.6	2.5	199.7	15.0	1.6	25.0	15.0	1.87	1.01	6.86	3.72
			平均	2.5	336.0	28.0							

表2 目視評価と転倒安全率に基づく危険度ランクの比較

No	重量 W kN	エネルギー E kJ	目視判定 ランク 1~5	地震時 転倒安全率 F	リスク度 log(E/F)		すべり面 傾斜角θ	
					R	平均	°	平均
102	74.9	1,533	2	0.21	3.85	3.43	50.0	36.3
162	312.3	2,428	2	0.56	3.64		25.0	
35	79.0	1,363	3	0.73	3.27		25.0	
147	449.3	4,436	2	0.88	3.70		25.0	
191	71.0	410	2	0.92	2.65		40.0	
190	282.6	2,126	2	0.93	3.36		40.0	
184	364.0	2,220	2	0.94	3.37		30.0	
64	149.8	3,630	3	0.98	3.57		55.0	
130	121.7	1,413	2	1.19	3.07		30.0	
65	70.7	1,700	2	1.22	3.14		25.0	
38	109.5	1,558	2	1.25	3.10	15.0		
164	405.6	2,417	2	1.32	3.26	25.0		
58	65.5	1,259	3	1.34	2.97	35.0		
117	494.0	5,126	2	1.44	3.55	30.0		
25	81.9	931	3	1.46	2.80	25.0		
73	183.0	1,047	2	1.48	2.85	30.0		
82	96.2	1,104	2	1.64	2.83	25.0		
173	2,252.4	11,540	2	1.75	3.82	25.0		
196	280.8	3,436	3	1.82	3.28	25.0		
41	263.1	3,817	2	1.96	3.29	3.16	18.0	25.7
9	90.0	785	3	2.10	2.57	35.0		
194	549.1	6,335	3	2.13	3.47	25.0		
67	624.0	16,129	2	2.16	3.87	25.0		
195	1,872.0	17,718	2	2.16	3.91	25.0		
140	87.9	929	3	2.27	2.61	25.0		
34	397.8	5,838	2	2.40	3.39	25.0		
141	200.2	2,427	3	2.47	2.99	25.0		
69	156.0	4,053	3	2.57	3.20	30.0		
47	78.0	1,164	2	2.61	2.65	45.0		
33	397.8	5,568	3	3.04	3.26	25.0		
29	700.7	9,279	3	3.22	3.46	15.0		
200	1,950.0	6,631	2	3.27	3.31	25.0		
204	25.0	153	3	3.58	1.63	15.0		
61	731.9	17,488	2	3.68	3.68	25.0		
72	199.7	1,442	3	3.72	2.59	15.0		
55	354.9	6,247	2	3.81	3.21	25.0		
62	163.8	3,979	2	4.76	2.92	25.0		
56	140.4	2,511	2	6.80	2.57	25.0		
68	70.2	1,843	3	7.48	2.39	2.91	30.0	25.0

表3 リスク度Rによる優先順位

No	重量 W kN	落石運動 エネルギー E kJ	危険度判定		
			目視判定 ランク 1~5	地震時 転倒安全率 F	リスク度 log(E/F) R
102	74.9	1,533	2	0.21	3.85
173	2,252.4	11,540	2	1.75	3.82
147	449.3	4,436	2	0.88	3.70
162	312.3	2,428	2	0.56	3.64
64	149.8	3,630	3	0.98	3.57
117	494.0	5,126	2	1.44	3.55
184	364.0	2,220	2	0.94	3.37
190	282.6	2,126	2	0.93	3.36
41	263.1	3,817	2	1.96	3.29
196	280.8	3,436	3	1.82	3.28
35	79.0	1,363	3	0.73	3.27
164	405.6	2,417	2	1.32	3.26
65	70.7	1,700	2	1.22	3.14
38	109.5	1,558	2	1.25	3.10
130	121.7	1,413	2	1.19	3.07
58	65.5	1,259	3	1.34	2.97
73	183.0	1,047	2	1.48	2.85
82	96.2	1,104	2	1.64	2.83
25	81.9	931	3	1.46	2.80
191	71.0	410	2	0.92	2.65