

落石防護柵のエネルギー吸収メカニズムに関する一考察

(株) 第一コンサルタンツ 正会員 ○岩瀬誠司 (株) 第一コンサルタンツ 正会員 右城猛

1. はじめに

2020年9月に高知県で発生した落石事故を受け現地調査を行った。本稿では、現地調査結果に基づき落石防護柵のエネルギー吸収のメカニズムについて考察を行った。

2. 被災状況

本稿で取り上げる落石災害は、高知県の一般国道の斜面で発生した。台風10号の影響を受け、推定質量120tの転石が表層崩壊を伴い斜面の土砂を削りながら斜面を滑落し、山留擁壁上に設置された落石防護柵に衝突した。落石による防護柵の変状は図1の通りである。落石は中間支柱13付近を直撃し、落石防護柵の塑性変形および基礎の回転により落石エネルギーを吸収し落石を捕捉した。防護柵の損傷から落石防護柵の吸収エネルギーの推定を行った。

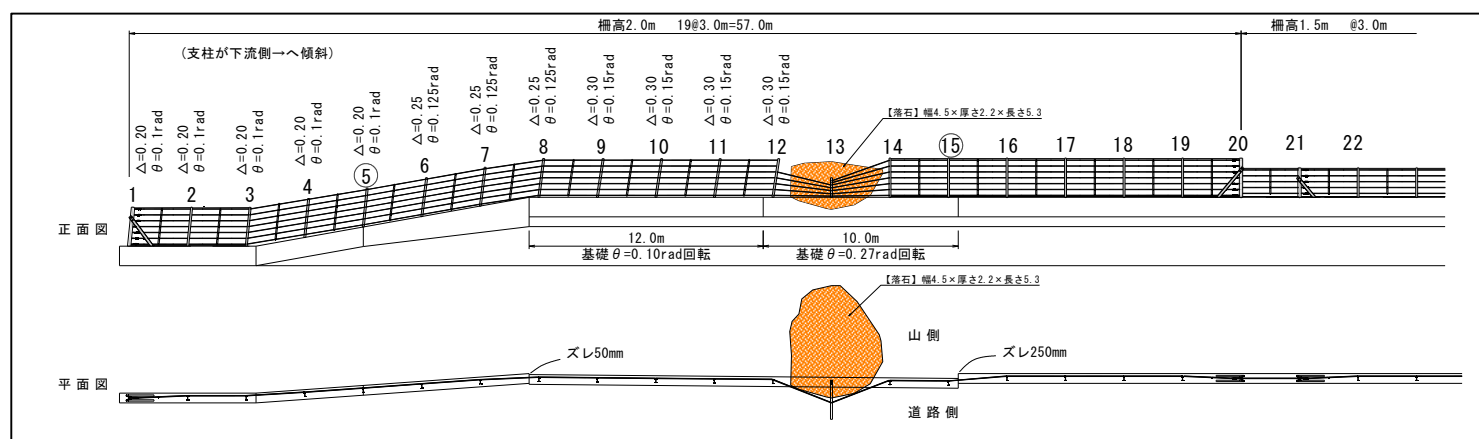


図1 落石による落石防護柵の損傷

3. 落石防護柵の吸収エネルギー

3.1 支柱の吸収エネルギー

落石の衝突でワイヤロープに張力が発生し、P1 端末支柱が下流側(面外方向)に引っ張られ下流側へ 0.1rad 傾斜。端末支柱の根元は曲げ座屈、山側のステーが圧縮座屈、谷側のステーを端末支柱に固定していたボルト2本が破断していた。柵端金具の引付棒やワイヤチャックには異常なし。P5 支柱は、平面的に折れ曲がった位置に建てられており、落石衝撃力で発生したワイヤロープ張力で、下流側(面外方向)へ 0.1rad、山側(面内方向)へ 0.2rad 傾斜していた。支柱の根元は曲げ座屈していた。

H 鋼の規格は、端末支柱 H-200×200×8×12(SS400)、中間支柱 H-200×100×5.5×8(SS400)である。

支柱変形による吸収エネルギー(E)は次式で求める。 $E = M_y \times \theta$ (M_y : 支柱の降伏モーメント θ : 支柱の回転角) 変形している支柱 P1~P12, P15 吸収エネルギー(E)を計算すると 46kJ となる。

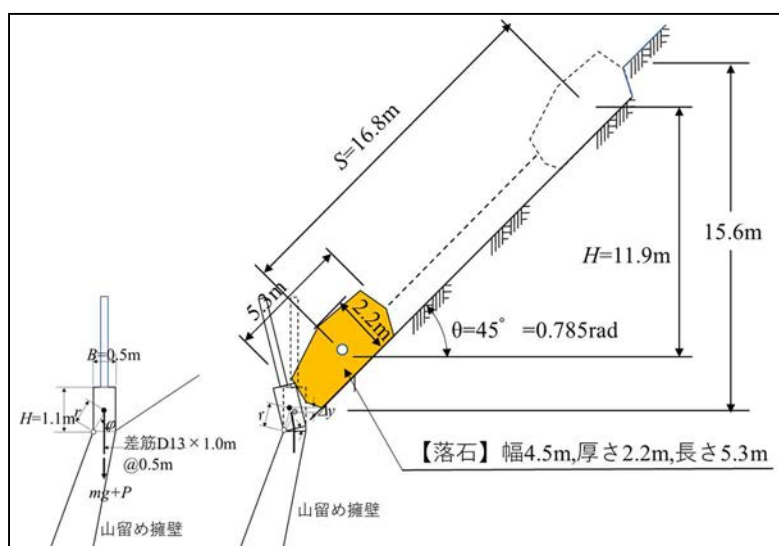


図2 被災状況(中間支柱15付近断面図)

3.2 ワイヤロープと金網の吸収エネルギー

落石対策便覧では、ワイヤロープ 2 本で落石を捕捉したと仮定している。便覧式で推定するとワイヤロープの吸収エネルギーは 9kJ である。

金網の吸収エネルギーは、落石対策便覧を根拠に 25kJ とする。

3.3 基礎の吸収エネルギー

防護柵基礎には山留め擁壁と結合するため鉄筋 D13 (SD295A) 1.0m が 0.5m 間隔に設置されている。落石が防護柵に衝突したことで中間支柱 P8～P11 区間の防護柵基礎($L=12\text{m}$)が 6° (0.1rad)、P12～P15 区間の防護柵基礎($L=10\text{m}$)が 15° (0.27rad)回転変位した。基礎が回転すれば重心が上昇しエネルギーを吸収する。基礎の吸収エネルギー(E_f)は次式で求める。

$$E_f = (mg + P)\Delta_y$$

ここに

$$\Delta_y = r\{\sin(\varphi + \theta) - \sin \varphi\}$$

$$r = \frac{1}{2}\sqrt{B^2 + H^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{H}{B}$$

$$P = \min(P_c, P_s)$$

P_c =差し筋の引き抜き抵抗

P_s =差し筋の降伏強度

m =基礎の質量, B =基礎の幅, H =基礎の高さ

これを計算すると防護柵基礎による吸収エネルギー(E_f)は 44kJ となる。

以上のことから、落石防護柵と基礎の吸収エネルギーは $46+9+25+44=124\text{kJ}$ であると推定できる。



図 3 落石防護柵基礎擁壁の変状

4. 結論

質量 120t の転石が傾斜角 45 度の斜面の土砂を削りながら滑落し、落石防護柵に衝突し停止したと推測される。落石防護柵の可能吸収エネルギーを落石対策便覧式で算定すると 57kJ であるが、防護柵の損傷から推定される吸収エネルギーは 124kJ であり、便覧式の 2 倍以上となった。

等価摩擦係数を用いた落石対策便覧式で落石の運動エネルギーを算定すると、9100kJ ととんでもなく大きな値となる。防護柵に持ち込まれた運動エネルギーは 124kJ であつたと考えられ、落石防護柵に衝突したときの速度は 1.8m/s(=6.6km/h)であつたと考えられる。

落石エネルギーを 124kJ と仮定し、等価摩擦係数を逆算で求めると次のようになる。

$$\mu_e = \left(1 - \frac{E}{mgH}\right) \tan \theta = \left(1 - \frac{124}{120 \times 9.8 \times 11.9}\right) \tan 45 = 0.991 > 0.35$$

当該現場のように斜面の表土を切削しながら滑落する落石の運動には、落石対策便覧の等価摩擦係数法は適用出来ないといえる。

5. あとがき

落石対策便覧では落石の速度や運動エネルギーを算出するのに、落石の運動をすべり運動と見なした上で $\mu_e = 0.05 \sim 0.35$ の等価摩擦係数を用いることになっている。当該現場のように落石が斜面の土砂を削りながら滑落する落石は希なケースである。落石は跳躍運動が主体である。実務では等価摩擦係数を用いて落石の速度を予測しているが、これについては検討の余地がある。