

エネルギー基準による落石防止擁壁 の設計法と計算例

Takeshi Ushiro 右城 猛*
Katsuya Nizuta 水田 勝也**

1. はじめに

わが国の地形は国土の 4 分の 3 が山岳・丘陵地で占められている上、地質は度重なる造山活動の結果、極めて脆弱かつ複雑なものになっている。加えて、台風や梅雨前線などによる豪雨、冬季の豪雪・凍結など厳しい条件下にあること、さらには環太平洋地震地帯に属していることなどから、落石による道路災害が毎年あとを絶たず、時には人命・財産を奪い、交通を遮断し、地域住民の生活に重大な影響を与えている。

本稿は、落石対策工の代表的工法である落石防止擁壁について、エネルギー基準に基づいた設計法を提案し、それをを用いた計算例を紹介するものである。

2. 落石の運動エネルギー

何らかの原因で斜面上で発生した落石は、斜面の地形、地質、植生、落石の形状・寸法などの影響を受け、滑り、転がり、跳躍、衝突の運動を複雑に繰り返しながら落下する。そして、斜面の途中で停止することもあるが、斜面でのエネルギー損失が小さければ路面まで到達することになる。

落石発生源から落差 h_d の地点における落石速度 V は、式(1)で示される¹⁾。

$$V = \alpha_v \sqrt{2g \cdot h_d} \quad (1)$$

ここに、 α_v は速度残存係数、 g は重力加速度である。

また、落石の重量を W とすれば、落石の運動エネルギー E は式(2)となる¹⁾。

$$E = \alpha_v^2 \cdot W \cdot h_d \quad (2)$$

速度残存係数は、斜面の地質、傾斜角、植生状況、凹凸の程度、落差などによって異なる。図 2 は、これまでの落石実験および実際の落石災害斜面調査から得られた速度残存係数と斜面勾配の関係を示したものである。これより、速度残存係

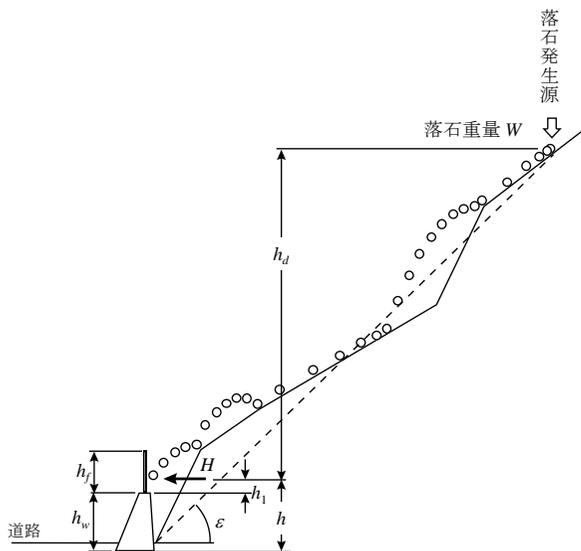


図 1 斜面を落下する落石の運動

* (株)第一コンサルタンツ常務取締役・工学博士

** (株)第一コンサルタンツ技術部構造設計課

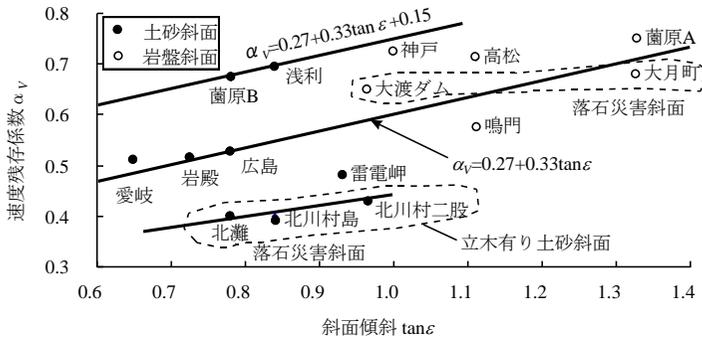


図 2 速度残存係数と斜面勾配の関係¹⁾

数は、式(3)で推定できる¹⁾。

$$\alpha_v = (0.27 + 0.33 \tan \varepsilon)K + 0.15 \leq 1.0 \quad (3)$$

ここに、 ε は路面から落石発生源までの斜面の平均傾斜角、 K は斜面の立木による補正係数であり樹木の多い斜面では 0.75、樹木の少ない岩盤斜面では 1.0 である。

3. 落石防止擁壁の吸収エネルギー

落石防止擁壁上に設置された落石防止柵に落石が衝突するものとすれば、落石防止柵の支柱、ロープ、金網および擁壁基礎地盤の変形によってエネルギーが吸収される。これらによる吸収エネルギーの総和が落石の運動エネルギーよりも小さいと落石防止擁壁は破壊する。

落石防止柵の吸収エネルギー

落石防止柵の吸収エネルギーは、落石の衝突位置やロープと支柱の剛比によって異なる。これに関しては、落石対策便覧に詳述されているので、ここではロープが十分長く、ロープよりも先に支柱が降伏する場合についてのみ述べる。

(1)支柱の吸収エネルギー

落石が支柱の中間のロープに当たって、両側の 2 本の支柱の下端に塑性ヒンジが形成されるとすれば、支柱 2 本当りの降伏荷重 F_y は式(4)で与えられる。

$$F_y = \frac{M_y}{h - h_w} \quad (4)$$

ここに、 h は擁壁下端から落石衝突点までの高さ、 h_w は擁壁高さ、 M_y は支柱 2 本当りの降伏モーメントで式(5)で与えられる。

$$M_y = 2\sigma_y \cdot Z \quad (5)$$

ここに、 σ_y は支柱の降伏強度、 Z は支柱の断面係数である。

支柱の許容変位角を θ_{pa} (一般に $15^\circ = 0.262\text{rad}$)²⁾ とすれば、支柱が降伏することで吸収するエネルギーは式(6)で表される。

$$E_p = M_y \cdot \theta_{pa} \quad (6)$$

(2)ワイヤーロープの吸収エネルギー

ワイヤーロープの伸び(弾性変形)による吸収エネルギー E_R は、支柱や金網の吸収エネルギーに比べて小さいので本計算では無視することにする。

(3)金網の吸収エネルギー

金網の吸収エネルギー E_N は、過去の実験より 25(kJ)とされている²⁾。

(4)落石防止柵の吸収エネルギー

支柱が降伏した場合の落石防止柵全体の吸収エネルギー E_f は式(7)となる。

$$E_f = E_p + E_R + E_N = M_y \cdot \theta_{pa} + 25 \quad (7)$$

基礎地盤の吸収エネルギー

(1)擁壁底面のモーメントと回転角の関係

擁壁底面から h の高さに水平力 H が作用すると、底面には $M = H \cdot h$ のモーメントが発生し、擁壁は回転を生じる。

擁壁底面が図 3(a)に示すように離散型の弾性バネで支持されているものと仮定すれば、回転角 θ とモーメント M_L の関係は式(8)で表される。

$$M_L = K_r \cdot \theta \quad (8)$$

ここに、 K_r は回転バネ定数であり、式(9)で算出される。

$$K_r = \frac{B^3 \cdot L}{12} k_v \quad (9)$$

ここに、 B は底面幅、 L は擁壁の長さ(目地間距離)、 k_v は鉛直方向地盤反力係数で、道路橋示方書式³⁾を変形した式(10)から推定できる⁴⁾。

$$k_v = 7,567N(B \cdot L)^{-0.375} \quad (10)$$

ここに、 N は標準貫入試験より求められる基礎地盤の N 値である。

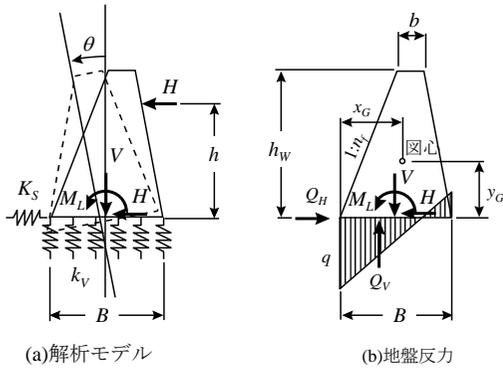


図3 線形応答解析モデル

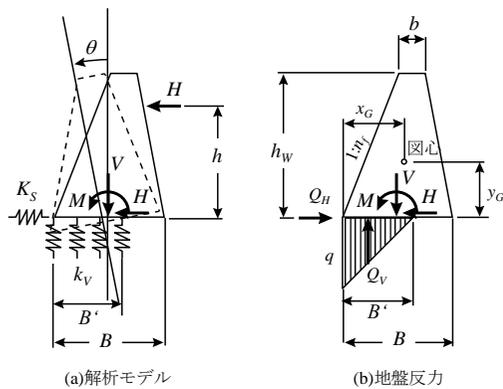


図4 非線形応答解析モデル

ところで、図3(a)のようなモデルを用いれば、回転角とモーメントの関係は直線で表されるので解析は簡便であるが、 M_L が式(11)で求められるモーメント M_0 を超えると図3(b)のように負の地盤反力を認めるという不合理を生じる。

$$M_0 = \frac{B \cdot V}{6} \quad (11)$$

ここに、 V は底面に作用する鉛直力

そこで、 $M_L > M_0$ の場合には底面の圧縮域のみに鉛直バネを設けた図4(a)のモデルを用いて解析することにすれば、回転角 θ とモーメント M_N の関係は式(12)で表される³⁾。

$$M_N = \left(3 - 2\sqrt{\frac{M_0}{K_r \cdot \theta}} \right) M_0 \quad (12)$$

底面のモーメントと回転角の関係を図5に示す。式(8)は直線 0-a-b に、式(12)は曲線 0-a-c と

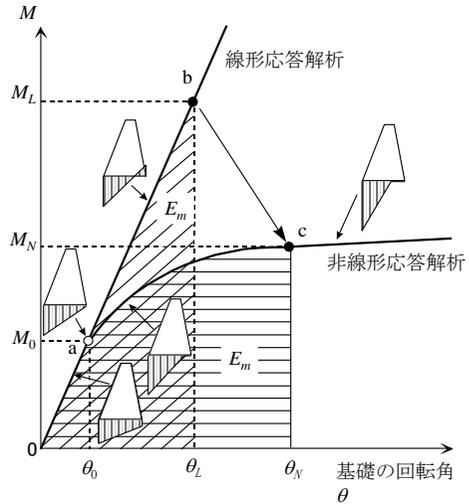


図5 底面のモーメントと回転角の関係

なる。そこで、ニューマークのエネルギー一定則を適用すれば、線形応答モーメント M_L と非線形応答モーメント M_N の関係は式(13)となる。

$$M_L = M_0 \sqrt{\frac{8M_N^2}{3(3M_0 - M_N)^2} + \frac{1}{3}} \quad (13)$$

(2) 擁壁底面に作用する水平力

落石の衝突で擁壁のコンクリートがせん断破壊しないものとするれば、落石防止擁壁の破壊モードは落石防止柵の降伏破壊か、擁壁の転倒か擁壁の滑動のいずれかである。擁壁に作用する水平力 H は擁壁の破壊モードによって異なり、式(14)で求められる。

$$H = \min(H_m, H_u, F_y) \quad (14)$$

ここに、 H_m は擁壁の回転角が式(17)で与えられる許容回転角に達する際の水平力であり、式(15)で求めることができる。 H_u は擁壁が滑動を生じる限界水平力であり式(16)で与えられる。 F_y は落石防止柵支柱の降伏荷重である。

$$H_m = \frac{M_{Na}}{h} \quad (15)$$

$$H_u = V \cdot \mu \quad (16)$$

$$\theta_a = \frac{1}{F_y} \tan^{-1} \frac{x_G}{y_G} \quad (17)$$

ここに、 M_{Na} は許容非線形応答モーメントであり、式(17)で求まる θ_a を式(12)に代入すれば算出される。 F_s は転倒の安全率(=1.2)、 x_G は擁壁のつま先から重心までの水平距離、 y_G はつま先から重心までの鉛直距離、 μ は底面の摩擦係数である。

(3) 擁壁の回転による吸収エネルギー

擁壁の回転によって吸収されるエネルギー E_m は式(18)で求めることができる。

$$E_m = \frac{M_L^2}{2K_r} = \frac{M_0^2}{2K_r} \left\{ \frac{8M_{Na}^2}{3(3M_0 - M_{Na})^2} + \frac{1}{3} \right\} \quad (18)$$

(4) 擁壁の滑動による吸収エネルギー

擁壁が滑動することによって吸収するエネルギー E_s は式(19)で求められる。

$$E_s = \left(\delta_a - \frac{1}{2K_s} H \right) H \quad (19)$$

ここに、 K_s はせん断バネ定数で、式(20)で求められる。 δ_a は擁壁の許容水平変位量であり、落石防止擁壁が設置される地点の道路の路側の余裕幅を考慮して決定すればよい。

$$K_s = \frac{1}{3} k_V \cdot B \cdot L \quad (20)$$

落石防止擁壁の吸収エネルギー

落石防止擁壁の破壊モードは落石の衝突高 h によって異なり、その判定は式(21)で与えられる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{支柱が降伏} \quad h > \frac{M_{Na}}{M_{Na} - M_y} h_w \\ \text{擁壁が転倒} \quad \frac{M_{Na}}{H_u} < h \leq \frac{M_{Na}}{M_{Na} - M_y} h_w \\ \text{擁壁が滑動} \quad h \leq \frac{M_{Na}}{H_u} \end{array} \right\} \quad (21)$$

落石防止擁壁の吸収エネルギー E_{in} も破壊モードによって異なる。支柱の弾性変形あるいは擁壁の弾性的水平変位によるエネルギー吸収は微小であるのでこれを無視するものとするれば、支柱が降伏するときは $E_{in}=E_f$ 、擁壁が転倒するときは $E_{in}=E_m$ 、擁壁が滑動するときは $E_{in}=E_s$ となる。

4. 計算例

設計条件

(1) 落石防止柵

柵高 $h_f=2.0$ m

支柱 H-200×100

$$Z=184,000 \text{ mm}^3, \quad \sigma_y=240 \text{ N/mm}^2(\text{SS400})$$

(2) 落石

落石重量 $W=10$ kN

落差 $h_d=20-h$ (衝突高) m

斜面傾斜角 $\varepsilon=45^\circ$

斜面の状態 立木の少ない岩盤斜面

(3) 擁壁

擁壁高 $h_w=2$ m

擁壁延長 $L=10$ m

天端幅 $b=0.6$ m

底面幅 $B=1.2$ m

壁面勾配 前面 1:0.3 背面 1:0.0

単位体積重量 $\gamma_c=23$ kN/m³

許容水平変位量 $\delta_a=0.5$ m

地盤への根入れ深さ $D_f=0.5$ m

(4) 基礎地盤

底面の摩擦係数 $\mu=0.6$

地盤の N 値 20

落石の運動エネルギー

(1) 速度残存係数

斜面上に立木が少ないので立木による補正係数は $K=1.0$ とする。

$$\begin{aligned} \alpha_V &= (0.27 + 0.33 \tan \varepsilon) K + 0.15 \\ &= (0.27 + 0.33 \times \tan 45^\circ) \times 1.0 + 0.15 = 0.75 \end{aligned}$$

(2) 運動エネルギー

$$\begin{aligned} E &= \alpha_V^2 \cdot W \cdot h_d = 0.75^2 \times 10 \times (20 - h) \\ &= 112.5 - 5.6h \text{ kJ} \end{aligned}$$

地盤のバネ定数

(1) 鉛直地盤反力係数

$$\begin{aligned} k_V &= 7,567 N (B \cdot L)^{-0.375} \\ &= 7,567 \times 20 \times (1.2 \times 10)^{-0.375} = 59,600 \text{ kN / m}^3 \end{aligned}$$

(2)回転バネ定数

$$K_r = \frac{B^3 \cdot L}{12} k_v$$

$$= \frac{1.2^3 \times 10}{12} \times 59,600 = 85,800 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{rad}$$

(3)せん断バネ定数

$$K_s = \frac{1}{3} k_v \cdot B \cdot L$$

$$= \frac{1}{3} \times 59,600 \times 1.2 \times 10 = 238,000 \text{ kN} / \text{m}$$

擁壁の諸元

(1)重量

$$V = \frac{h_w}{2} (b+B) \gamma_c \cdot L$$

$$= \frac{2.0}{2} \times (0.6+1.2) \times 23 \times 10 = 414 \text{ kN}$$

(2)重心

$$x_G = \frac{B}{2} + \frac{h_w}{6} \cdot \frac{2b+B}{b+B} (n_f - n_r)$$

$$= \frac{1.2}{2} + \frac{2.0}{6} \times \frac{2 \times 0.6 + 1.2}{0.6 + 1.2} (0.3 - 0.0)$$

$$= 0.73 \text{ m}$$

$$y_G = \frac{h_w}{3} \cdot \frac{2b+B}{b+B} = \frac{2.0}{3} \times \frac{2 \times 0.6 + 1.2}{0.6 + 1.2} = 0.89 \text{ m}$$

(3)浮き上がり限界モーメント

$$M_0 = \frac{B \cdot V}{6} = \frac{1.2 \times 414}{6} = 82.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(4)許容回転角

$$\theta_a = \frac{1}{F_s} \tan^{-1} \frac{x_G}{y_G} = \frac{1}{1.2} \times \tan^{-1} \frac{0.73}{0.89} = 0.572 \text{ rad}$$

(5)許容非線形応答モーメント

$$M_{Na} = \left(3 - 2 \sqrt{\frac{M_0}{K_r \cdot \theta_a}} \right) M_0$$

$$= \left(3 - 2 \sqrt{\frac{82.8}{85,800 \times 0.572}} \right) \times 82.8 = 241.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

落石防止擁壁の破壊モード

落石防止柵支柱の降伏モーメント

$$M_y = 2\sigma_y \cdot Z = 2 \times 240 \times 184,000$$

$$= 88,320,000 \text{ N} \cdot \text{mm} = 88.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

滑動抵抗力

$$H_u = V \cdot \mu = 414 \times 0.6 = 248 \text{ kN}$$

支柱の降伏と擁壁の転倒の境界点

$$h = \frac{M_{Na}}{M_{Na} - M_y} h_w = \frac{241.6}{241.6 - 88.3} \times 2.0 = 3.152 \text{ m}$$

擁壁の転倒と滑動の境界点

$$h = \frac{M_{Na}}{H_u} = \frac{241.6}{248} = 0.974 \text{ m}$$

以上より破壊モードは次のようになる。

0.5m(地盤面)<h≤0.974m：擁壁が滑動

0.974m<h≤3.152m：擁壁が転倒

3.152m<h≤4.00m：防止柵の支柱が降伏

落石防止擁壁の吸収エネルギー

(1)落石の衝突高 0.5m(地盤面)≤h≤0.974m

破壊モードは滑動

水平力 H=H_u=248 kN

擁壁の滑動による吸収エネルギー

$$E_s = \left(\delta_a - \frac{1}{2K_s} H \right) H$$

$$= \left(0.5 - \frac{1}{2 \times 238,000} \times 248 \right) \times 248 = 124 \text{ kJ}$$

(2)落石の衝突高 0.974m<h≤3.152m

破壊モードは転倒

水平力

$$H = \frac{M_{Na}}{h} = \frac{241.6}{h}$$

h=0.974m で H=H_u=248 kN

$$h=3.152\text{m} \text{ で } H = \frac{M_y}{h - h_w} = \frac{88.3}{3.152 - 2.0} = 76.7 \text{ kN}$$

擁壁の回転による吸収エネルギー

$$E_m = \frac{M_0^2}{2K_r} \left\{ \frac{8M_{Na}^2}{3(3M_0 - M_{Na})^2} + \frac{1}{3} \right\}$$

$$= \frac{82.8^2}{2 \times 85,800} \left\{ \frac{8 \times 241.6^2}{3 \times (3 \times 82.8 - 241.6)^2} + \frac{1}{3} \right\}$$

$$= 135 \text{ kJ}$$

(3)落石の衝突高 3.152<h≤4.00m

破壊モードは支柱の降伏

水平力

$$H = \frac{M_y}{h - h_w} = \frac{88.3}{h - 2.0}$$

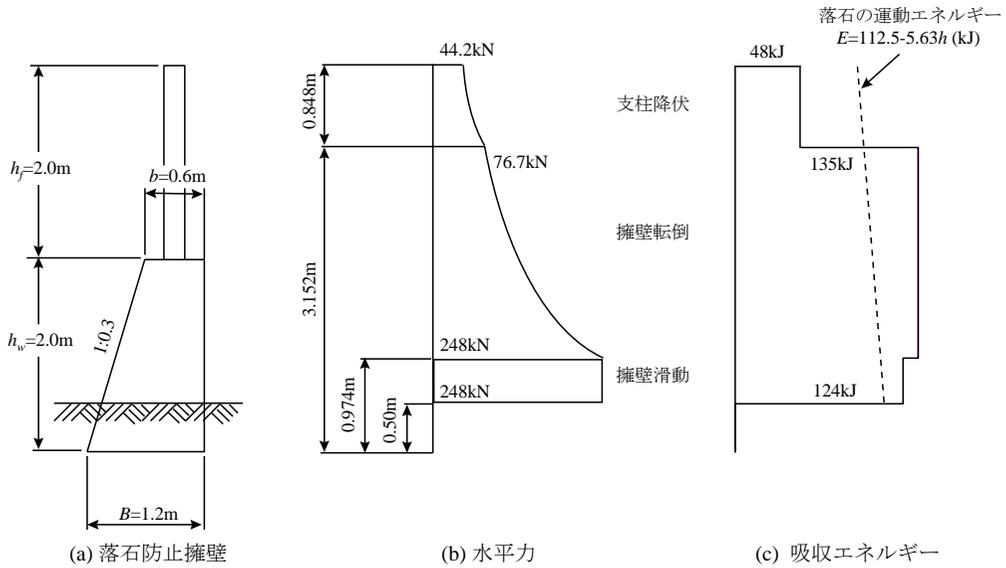


図 6 計算結果

$h=3.152\text{m}$ で $H=79.7\text{ kN}$

$h=4.00\text{m}$ で $H=44.2\text{ kN}$

支柱の降伏による吸収エネルギー

$$E_f = M_y \cdot \theta_{pa} + 25 = 88.3 \times 0.262 + 25 = 48\text{ kJ}$$

計算結果

計算結果を図 6 に示す。落石が落石防止柵の上端から 0.848m より下方に衝突すれば安全であるが、上方に衝突すれば $E=48\text{kJ}$ の運動エネルギーで支柱が降伏破壊する。

本計算例では、落石対策工として標準的に採用されている形状の落石防止柵と擁壁を取り上げたが、擁壁の剛性に比べて防止柵の剛性が小さすぎるという結果が得られた。両者のバランスをとらせ、安全性を確保するためには支柱の断面を大きくする必要がある。

本設計では、設計荷重として土圧を考慮しなかったが、背後のポケットに崩土が堆積する恐れがある場合には、当然、崩積土による土圧を考慮しなければならない。

5.あとがき

現在、落石防止柵の設計では、落石が柵高の 2/3 の位置に衝突するという仮定のもとに設計が行われている²⁾。また、そのときの支柱の降

伏荷重が擁壁に静的に作用するものとして擁壁の安定解析が行われてきた⁵⁾。

しかし、落石が柵高の 2/3 の位置に衝突するとする根拠があるわけではない。また、このような設計法では、落石が支柱の根元あるいは擁壁を直撃する場合の安全性を説明することができない。

これに対して、エネルギー基準を適用すれば、落石の衝突位置を考慮した解析が可能であり、落石防止擁壁の安全性を合理的に評価することができる。また、落石防止柵と擁壁の剛性のバランスがとれた設計を行うことも可能になる。

参考文献

- 1) 右城猛：剛性擁壁の合理的な土圧評価法と落石の運動に関する研究，愛媛大学学位申請論文，1997.
- 2) 日本道路協会：落石対策便覧，1983.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，1996.
- 4) 右城猛：新・擁壁の設計法と計算例，理工図書，1998.
- 5) 四国地方建設局：ストーンガード基礎の考え方(案)，1991.