

落石防止擁壁の設計法に関する提案

A PROPOSAL FOR A DESIGN OF CATCH WALL

右城猛*, 筒井秀樹**, 水田勝也***, 森伸一郎****

Takeshi USHIRO, Hideki TSUTSUI, Katsuya NIZUTA, Shinichiro MORI

*工博 (株)第一コンサルタンツ 常務取締役 (〒780-8122 高知市高須新町 3-1-5)

** (株)第一コンサルタンツ技術部設計二課 課長補佐 (〒780-8122 高知市高須新町 3-1-5)

***工修 (株)第一コンサルタンツ技術部設計二課 (〒780-8122 高知市高須新町 3-1-5)

****工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町 3)

キーワード：落石防止擁壁，落石対策，エネルギー法
(catch wall, rockfall preventive, energy method)

1. まえがき

わが国では、コンクリート山留め擁壁の上部に落石防止柵を設置した落石防止擁壁を耐衝撃性能が不明なまま多用してきた。土圧荷重で設計された擁壁に落石が衝突しても、転倒や滑動しないことが経験的にわかってきたためである。ところが近年、安全性を定量的に評価することが求められていることもあり、

- ①落石が落石防止柵の 2/3 の高さで衝突すると仮定した上で、支柱の降伏荷重を算定し、それを擁壁に静的に作用させる方法(慣用法)¹⁾。
- ②擁壁底面が弾性バネで支持され振動モデルとした方法(落石対策便覧法)²⁾。

等の設計法が実務で用いられている。しかしながら、これらを適用すると明らかに過大な設計となる。

落石防止擁壁の破壊形態は、落石の衝突位置により

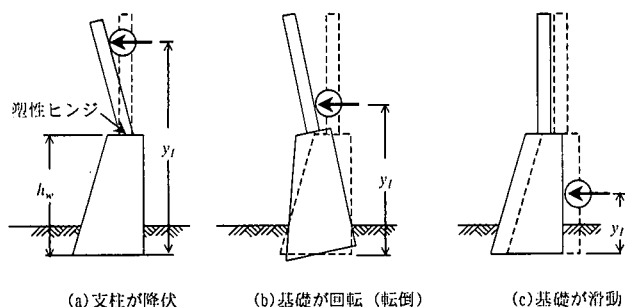


図1 落石防止擁壁の破壊モード

図1に示す3種類が考えられる。擁壁に持ち込まれる落石の運動エネルギーが、いずれかの破壊にいたるまでの吸収エネルギーより小さいと擁壁は安定を保つ。

本論文では、運動量保存則とエネルギー保存則を用いた落石防止擁壁の安定性照査法を提案する。その上で、提案式の妥当性を模型実験により検証する。さらに、提案式と従来の方法とで試算を行い、提案式を採用することによるコスト縮減効果を示す。

2. 落石防止擁壁の吸収エネルギー

(1) 支柱降伏時の吸収エネルギー

落石の衝突によって支柱に持ち込まれるエネルギーは式(1)で与えられる。

$$E = \frac{1}{2}mv_0^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 m は落石の質量、 v_0 は落石の速度である。

支柱の降伏による吸収エネルギー E_{fa} は、式(2)で算出される。ただし、ロープの変形性能は十分大きく、ロープよりも先に支柱が降伏するものとする。

$$E_{fa} = M_y \cdot \theta_o + E_n \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 M_y は支柱の降伏モーメント、 θ_o は支柱の許容回転角で一般には $15\text{deg}=0.26\text{rad}$ 、 E_n はロープとネットによる吸収エネルギーで一般に 25kJ である。

式(1)と式(2)から、支柱降伏に対する落石の限界速度が式(3)のように求められる。

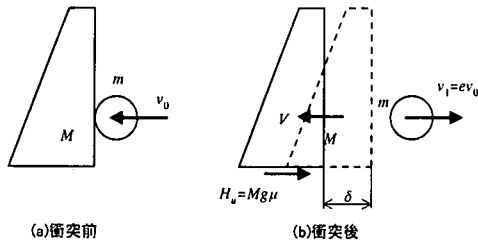


図 2 滑り運動

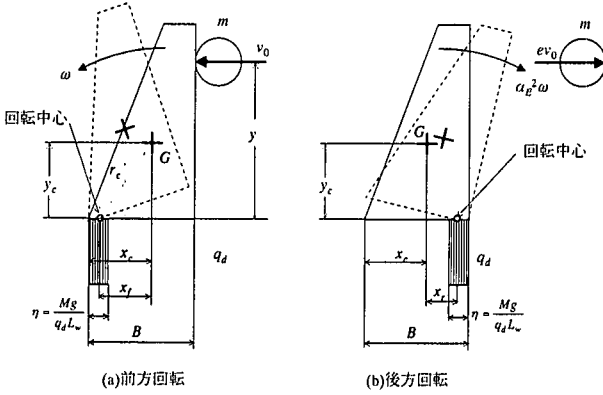


図 3 回転運動

$$V_{fl} = \sqrt{\frac{2(M_y \theta_a + E_n)}{m}} \dots \dots \dots (3)$$

(2) 擁壁の滑りによる吸収エネルギー

落石衝突後の擁壁の速度 V は、運動量保存則から式(4)となる。ただし、 M は擁壁の質量、 e は反発係数。

$$V = \frac{mv_0(1+e)}{M} \dots \dots \dots (4)$$

擁壁に持ち込まれる運動エネルギーは式(5)となる。

$$E_k = \frac{1}{2} MV^2 = \frac{m^2 v_0^2 (1+e)^2}{2M} \dots \dots \dots (5)$$

底面の摩擦係数を μ 、許容滑り量を δ_a とすると、摩擦吸収エネルギーは式(6)で求めることができる。

$$E_{ka} = Mg \mu \delta_a \dots \dots \dots (6)$$

式(5)と式(6)から、滑りに対する落石の限界速度が次のように求められる。

$$V_{kl} = \frac{M \sqrt{2g \mu \delta_a}}{m(1+e)} \dots \dots \dots (7)$$

(3) 擁壁の回転による吸収エネルギー

落石衝突後の擁壁の角速度 ω は、角運動量保存則から式(8)となる。

$$\omega = \sqrt{\alpha_E} \frac{mv_0(1+e)y_l}{I} \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 y_l は、擁壁底面から落石衝突点までの高さ、 I は回転中心に関する擁壁の慣性モーメント、 α_E はロッキングによるエネルギー残存率である。落石の衝突によって擁壁が前方へ回転するときは $\alpha_E = 1$ 、ロッキングによって後方へ回転するときは $\alpha_E < 1$ となる。

落石の運動エネルギーは、式(9)で与えられる。

$$E_R = \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{\alpha_E}{2I} \{mv_0(1+e)y_l\}^2 \dots \dots \dots (9)$$

擁壁の回転によって吸収できるエネルギーは、式(10)で求めることができる。ここに、 F_s は転倒の安全率、 x, y_c はそれぞれ回転中心から擁壁図心までの水平距離と鉛直距離である。擁壁が前方へ回転するときは $x = x_p$ 、後方へ回転するときは $x = x_r$ となる。

$$E_{Ra} = \frac{Mg}{F_s} (\sqrt{x^2 + y_c^2} - y_c) \dots \dots \dots (10)$$

転倒に対する落石の限界速度は式(11)となる。

$$V_{Rl} = \frac{1}{m(1+e)y_l} \sqrt{\frac{2IMg}{F_s \alpha_E} (\sqrt{x^2 + y_c^2} - y_c)} \dots \dots (11)$$

3. 室内模型実験

(1) 実験の方法

図4に示すように鋼板の上にコンクリート製の模型擁壁を置き、天井から紐で吊した鉛球(質量 1.2kg, 2.0kg, 3.5kg)を衝突させ、擁壁の挙動をビデオカメラ、デジタルカメラで測定した。擁壁は、矩形断面(質量 18kg)と台形断面(質量 16kg)の2種類である。呼び強度 18N/mm²、スランプ 180mm、粗骨材の最大寸法 20mm のコンクリートで製造し、前面には緩衝材として厚さ 4mm のコルク板を貼り付けた。

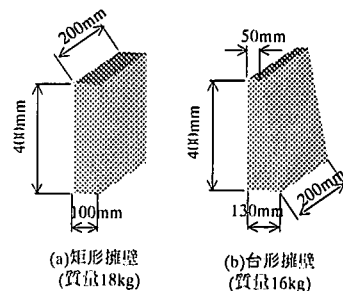
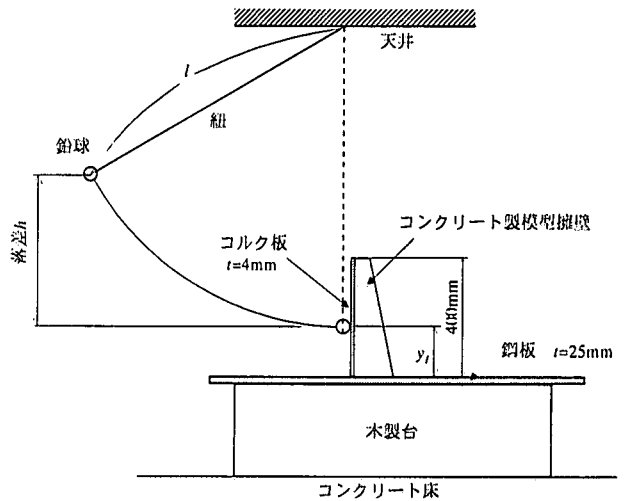
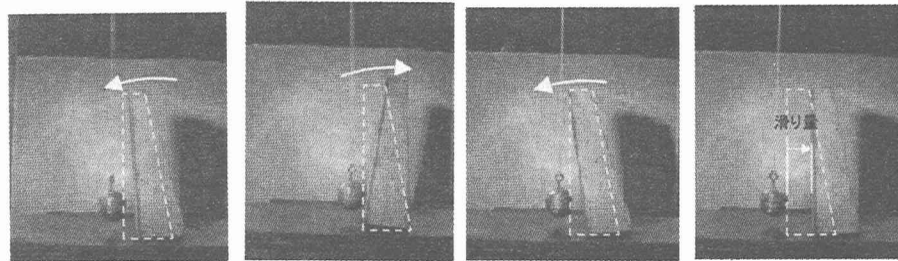
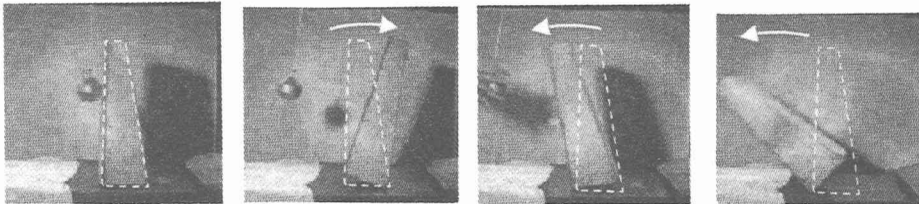


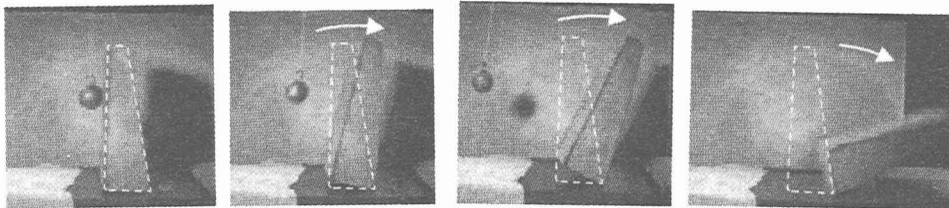
図 4 実験装置



①前方へ滑りながら後方へ回転 ②前方へ回転 ③後方へ回転 ④停止



①擁壁に衝突 ②前方へ回転 ③後方へ回転 ④後方へ転倒



①擁壁に衝突 ②前方へ回転 ③前方へ転倒 ④前方へ転倒

写真1 擁壁の応答

(2) 実験結果

a) 擁壁の応答

鉛球を衝突させたときの擁壁の応答は、衝突位置、落差によって図5に示す4パターン(矩形断面は3パターン)が観察された。

鉛球を擁壁の重心よりも下に衝突させた場合には、滑動とロッキングが現れ、直ぐに減衰し、運動が停止した。重心よりも上に衝突させると、ロッキングのみであった。台形断面の場合、衝突速度が大きいと、前方へロッキング→後方へロッキング→後方へ転倒する現象が見られた。衝突速度をさらに大きくすれば、

ロッキングせず一気に前方へ転倒した。

b) 落差と滑り量

図6は、鉛球を台形断面擁壁の下面から $y_f=0.1m$ の高さに衝突させたときの滑り量の実験結果と理論計算結果を比較したものである。実験値に若干ばらつきがあるものの、理論値とほぼ一致している。ばらつきの原因は、鉛球の衝突位置が擁壁中心と完全には一致せず、衝突時に鉛直軸回りの回転を生じたことによるものと考えられる。

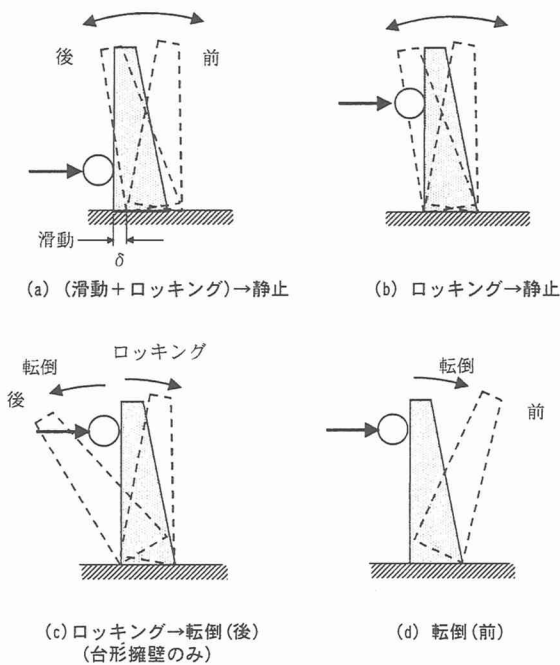


図5 擁壁の応答

鉛球とコルク板を貼り付けた擁壁の反発係数を落下高と跳ね返り高から求めると0.15であった。擁壁底面と鋼板との動摩擦係数は、バネ量りで測定した結果0.5であった。擁壁の移動量は、スケールで測定した。

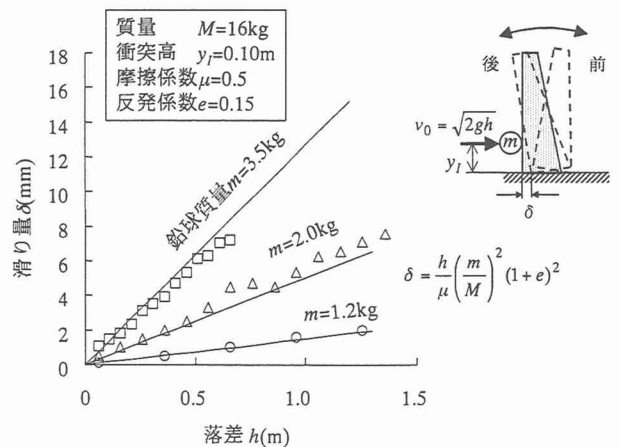


図6 鉛球の落差と擁壁の滑り量(台形断面)

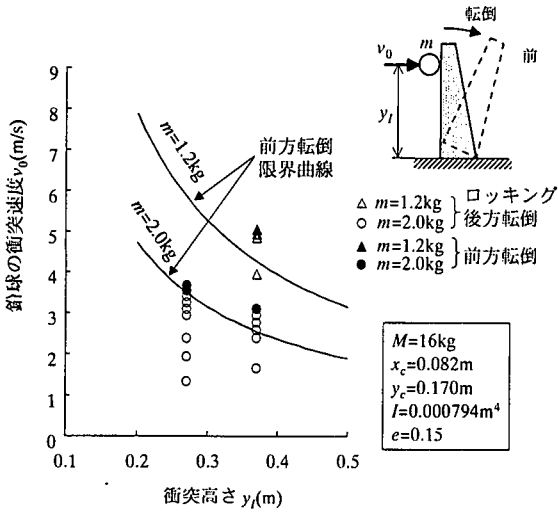


図 7 擁壁が前方へ転倒するときの限界速度曲線(台形擁壁)

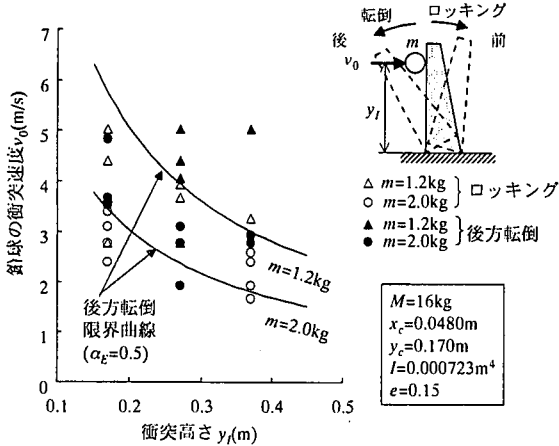


図 8 擁壁が後方へ転倒するときの限界速度曲線(台形擁壁)

c) 転倒の鉛球限界速度

図 7 は、鉛球の衝突で前方へ転倒するときの限界速度曲線と実験結果を示している。なお、回転中心は擁壁のつま先位置と仮定した。前方へ一気に転倒した実験データ(▲, ●印)は、理論曲線の近傍に位置しており、実験と理論値は概ね一致している。

図 8 は後方へ転倒するときの限界速度曲線と実験結果を示している。なお、回転中心は擁壁のかかと位置と仮定した。前方へロッキングした後、後方へ転倒した実験データ(▲, ●印)の多くは、理論曲線から離れ上方に位置している。理論曲線は、ロッキングによるエネルギー残存率を $\alpha_E=0.5$ と仮定しているためである。

4. 試算結果

高さ 2m, 延長 8m の擁壁の質量 1t の落石が $v_0=9.8\text{m/s}$ の速度で落石防止柵を直撃した場合の試算結果を図 9 に、擁壁頂部を直撃した場合の試算結果を図 10 に示す。ただし、反発係数 0.2, 底面の摩擦係数 0.6, 極限支持

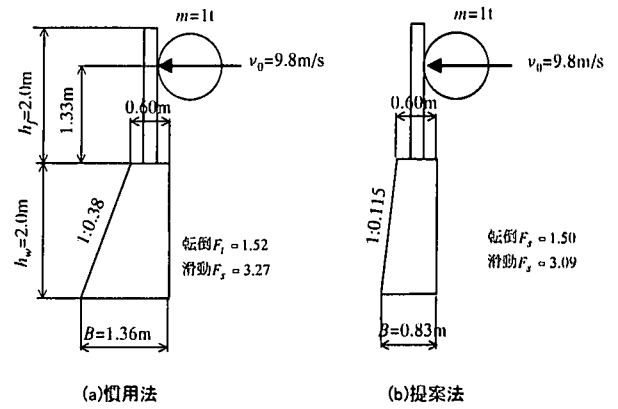


図 9 落石が落石防止柵を直撃した場合

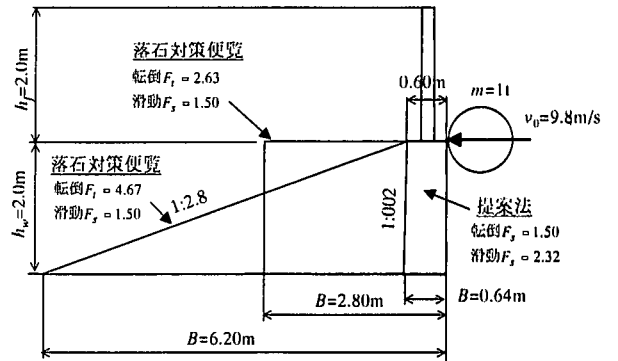


図 10 落石が擁壁頂部を直撃した場合

力度 900kN/m^2 , 許容滑り量 0.05m としている。

落石防止柵を直撃する場合、提案式を用いると慣用法で設計された擁壁断面の 73% ですむ。擁壁上端を直撃した場合は、落石対策便覧式で設計したものに対して 1/4.5~1/5.5 の断面ですむ、大幅なコスト縮減が可能になる。

5. 結論

運動量, 角運動量保存則とエネルギー保存則を用い、落石衝突時の滑り量及び転倒限界衝突速度の算定式を導いた。鉛球の振り子をコンクリート製模型に衝突させた実験を行ったところ、擁壁の滑り量, 転倒限界速度ともに理論値とほぼ一致する結果が得られた。また、提案式を用いれば、従来の設計法に比べて擁壁断面を大幅に縮減できることが明らかになった。

本研究は、社団法人四国建設弘済会の「平成 10 年度建設事業の技術開発支援制度」による助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 四国地方建設局：ストーンガード基礎の考え方(案), 1991.
- 2) 日本道路協会：落石対策便覧, 1993.