

C 製および RC 製落石防護擁壁の転倒安定性評価に関する一検討

A CONSIDERATION OF SAFETY ALLOWANCE FOR OVERTURNING OF C/CR TYPE ROCK-FALL RETAINING WALL

(株) 構研エンジニアリング
北海道開発土木研究所
北海道開発土木研究所
室蘭工業大学建設システム工学科

○正員 川瀬 良司 (Ryoji Kawase)
正員 今野 久志 (Hisashi Konno)
正員 池田 憲二 (Kenji Ikeda)
正員 岸 徳光 (Norimitu Kishi)

1. はじめに

山岳道路沿いには、小規模落石等に対する防災対策の一つとして落石防護擁壁が設置されている。現在、落石防護擁壁は、落石対策便覧¹⁾に基づいて設計が行われている。その設計の基本的考え方は、擁壁を弾性地盤に支持された剛体と仮定し、落石の衝突により擁壁に伝達された運動エネルギーが地盤の弾性応答時の変形エネルギーと等しくなるまで、擁壁が水平変位および回転を生ずるものとして、その規模を決定している。しかしながら、落石の衝撃力に対する耐衝撃性に関する検討が義務付けられていないことから、通常、重力式の無筋コンクリート構造(以下、C 製)が採用されている。著者らは、C 製落石防護擁壁の実規模衝撃実験や数値解析を実施しその耐衝撃挙動を明らかにしている。²⁾ その結果を要約すると、1) 重錘衝突位置が擁壁高さの9割程度の場合には、衝突位置近傍の損傷の他、載荷点を中心として高さ方向および幅方向に曲げひび割れ、壁厚方向にせん断ひび割れが発生すること、2) 剛基礎上では設計入力エネルギーの1/2以下の状態で終局に至る、などである。また、落石防護擁壁の耐衝撃性を向上させる簡易な方法として、鉄筋コンクリート構造(以下、RC 製)とする方法が考えられる。このことから、RC 製落石防護擁壁の実規模衝撃実験や数値解析を実施して、C 製の場合と比較することで耐衝撃向上効果を明らかにしている。³⁾ その結果を要約すると、RC 製の場合はC 製の擁壁と同様に曲げひび割れが発生するものの、異型鉄筋の効果によって大幅に耐衝撃性を向上可能であるなどが明らかになっている。

本研究では、C 製および RC 製の耐衝撃設計法の確立を目的として、転倒安定問題に着目し、その評価手法を提案し、妥当性について検討を行った。検討は実規模衝撃実験結果と比較することによって実施した。

2. 実験概要

2.1 実験方法

落石防護擁壁は、一般的に良質な支持層に根入れされていることから、本実験では擁壁の転倒および損傷のみに着目することとし、コンクリート基礎上にストッパーを設けて水平移動を拘束することとした。実験に使用した重錘は、直径が1.0 m、先端部が半球状で質量が2,000 kgの鋼製重錘である。衝撃荷重は、門型フレームに吊り下げられた重錘をトラッククレーンで所定の高さまで吊り上げ、着脱装置による振り子運動によって作用させることとした。実験は、繰り返し載荷の場合には初速度および増分速度を1m/sとして擁壁が転倒するかひび割れが貫通



写真-1 実験風景

するまで実施した。また、単一載荷時の衝突速度は、繰り返し載荷実験から得られた終局時の速度を把握し、その衝突速度と同一の速度とした。測定項目は、ひずみゲージ式加速度による重錘加速度および、レーザー式変位計による擁壁各点の変位波形である。写真-1には実験風景を示す。

2.2 試験体および実験ケース

実験に使用した試験体は、実規模の擁壁を用いて行うこととした。そのために、擁壁の断面形状は、C 製、RC 製共に実構造で多用される標準断面⁴⁾を参考に、擁壁高さを $H=2.0$ m、天端および基部の壁厚をそれぞれ0.4 m、1.0 mとし、擁壁延長は実施工時を考慮して $L=8.0$ mの場合とした。RC 製については、鉄筋量の違いによる耐衝撃性の評価手法も検討するために、鉄筋量は断面に対して0.2%程度と0.4%程度の場合を設定し、それぞれSD345D16、D345D22を幅および高さ方向に300 mmピッチで配置している。図-1には実験で用いた試験体形状を示し、表-1には実験ケースの一覧を示している。

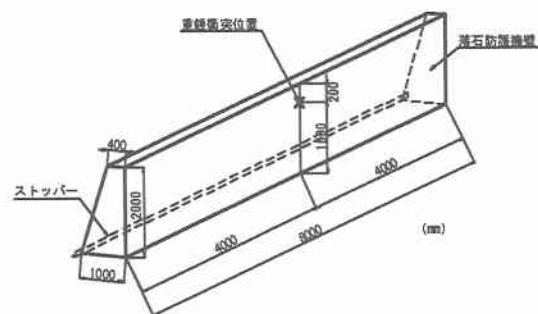


図-1 C 製および RC 製落石防護擁壁試験体形状

表－１ 実験ケース一覧

実験ケース	構造形式	鉄筋量 (%)	載荷方法	衝突速度 (m/s)
C-C-V2～4	C	—	繰り返し	2～4
RC-0.2-C-V1～7	RC	0.2	繰り返し	1～7
RC-0.4-C-V1～7	RC	0.4	繰り返し	1～7
C-S-V4	C	—	単一	4
RC-0.2-S-V1～7	RC	0.2	単一	6
RC-0.4-S-V1～7	RC	0.4	単一	6

表中の実験ケースは、構造形式 (RC 構造: RC, C 構造: C), RC 製については鉄筋量 (0.2 % : 0.2, 0.4 % : 0.4), 載荷方法 (繰り返し載荷: C, 単一載荷: S), 衝突速度 V (m/s) をハイフンで結び表わしている。重錘衝突位置は、 H を擁壁高さとして、設計時の最も厳しい条件である基部から $0.9H$ (1.8 m) の点に限定した。

実験時のコンクリートの力学特性は、C 製, RC 製で材齢が 85 日, 60 日, 平均圧縮強度が $f_c = 18.7$ MPa, 26.4 Mpa である。

3. 安定性評価検討に関する基本的考え方

擁壁の転倒は、実験では擁壁前面の下端を滑動に対して抑制している。従って、擁壁前面の下端を回転中心として、擁壁が回転運動を起こし、擁壁重心位置が回転中心より前面に移動した場合に転倒するものとした。このことから、転倒に関する評価は、回転運動による擁壁の重心浮上量について検討を行うこととする。まず、1) C 製および RC 製落石防護擁壁に石が直接擁壁本体構造に衝突することから、実験で得られた重錘衝撃力を用い、Hertz の接触理論に基づく振動便覧式⁵⁾の適用を試み、重錘衝撃力を推定することとする。2) 回転中心に関する衝撃力の力積モーメントを算定する。3) 求められた力積モーメントと角運動量が等価であるとの関係から、初期加速度を算定する。さらに、4) エネルギー保存の法則に基づいて擁壁重心位置の最大浮上量を試算する。5) 算定した擁壁重心位置の最大浮上量と実験で得られた擁壁の最大浮上量とを比較して評価方法の妥当性を検証する。

4. 安定性評価の検討

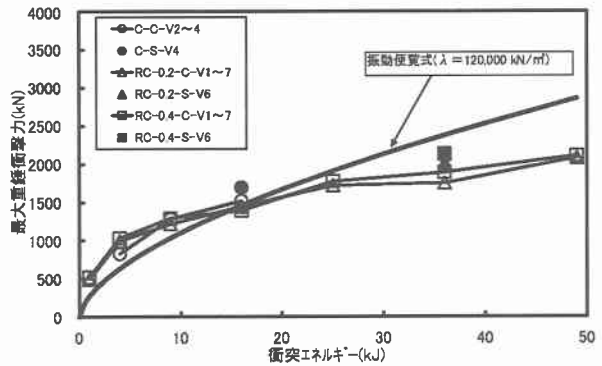
4.1 最大重錘衝撃力の算定

最大重錘衝撃力を算定評価するために、ここでは、Hertz の接触理論に基づく振動便覧式の適用を試みる。振動便覧式は (1) のように示される。

$$P_a = 2.108 W^{2/3} \lambda^{2/5} H^{3/5} \quad (1)$$

ここで、 P_a : 最大重錘衝撃力 (kN), λ : 擁壁本体の剛性特性を考慮した見かけのラーメ定数 (kN/m²), H : 落石の落下高さ (m), W : 落石等の重量 (kN) である。

図－２には、最大重錘衝撃力を実験結果と振動便覧式による結果を衝突エネルギーで整理し比較した結果を示している。実験結果の重錘衝撃力は、重錘加速度に重錘質量を乗じて表している。また、衝突エネルギーは、重錘質量 M , 衝突速度 V を用いて $MV^2/2$ より算定している。図

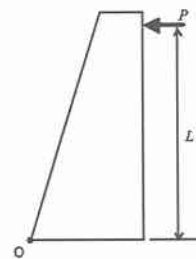


図－２ 最大重錘衝撃力と衝突エネルギーの関係

より、繰り返し載荷の場合は、衝突エネルギーが増加することにより、ひび割れが進展し衝撃エネルギーの吸収が考えられることから、衝突エネルギーの増加と伴に、最大衝撃力の増加率低下している。しかしながら、擁壁の構造形式および鉄筋量による明瞭な差が生じてない。これらのことから、擁壁本体に作用する最大衝撃力は、構造形式、鉄筋量にかかわらず、見かけのラーメ定数を $\lambda = 120,000$ kN/m² と仮定することにより、実験結果の最大重錘衝撃力と大略対応することが分かる。

4.2 力積モーメントの算定

擁壁は並進運動が拘束されていることより、回転運動のみが発生することとなる。従って、擁壁の回転初角速度 ω を算定するためには、重錘衝突時の衝撃力による力積モーメントを算定しなければならない。いま、図－３に示すように、回転中心 O 点、重錘が底面から高さ L の点で衝突するものと仮定すると、力積モーメント M_t は、



図－３ 載荷条件

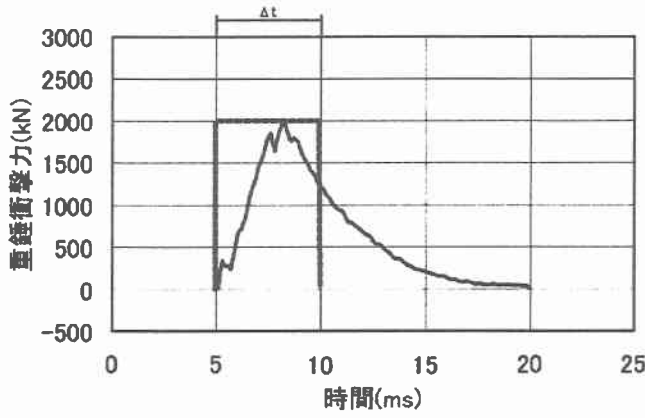


図-4 重錘衝撃力波形 (RC-0.4-S-V6)

$$M_t = L \int P dt \quad (2)$$

として求められる。ここで、式(2)の右辺第2項は、衝撃力による力積である。いま、

$$F_t = \int P dt \quad (3)$$

とすると、

$$M_t = L F_t \quad (4)$$

となる。すなわち、力積モーメント M_t は、力積 F_t に L を乗じることにより評価可能となる。

図-4には、代表的な実験結果の重錘衝撃力波形を示している。表-1で示した全実験ケースについての力積を式(1)から評価される計算最大重錘衝撃力を横軸に取って整理すると図-5のように示される。ただし、重錘衝撃力波形の高周波成分を除去するために2.5 msの矩形移動平均の処理を施している。図より、力積は最大重錘衝撃力とほぼ線形の関係にあることが分かる。回帰直線を求めると、

$$F_t = 0.005 P_a \quad (5)$$

として示される。これより衝撃力波形を衝撃力強度が最大重錘衝撃力である矩形衝撃力であると仮定すると、式(5)より、仮想荷重継続時間 Δt は、 $\Delta t = 5 \text{ ms}$ として評価可能である。図-6には、実験結果と計算式から得られる力積を衝撃エネルギーを横軸に取って整理している。図より、提案の力積評価式は、実験結果とほぼ対応していることが分かる。

4.3 回転初角速度および重心浮上量の算定

衝撃力 P の载荷により、擁壁が O 点を中心に回転を始めるものとする。回転初角速度 ω は次式より求めることができる。すなわち、擁壁の単位体積重量を ρ 、擁壁の設計延長を B とし、図-7に示すように回転中心 O 点から任意の微小要素 dA までの距離 r とすると、擁壁の角運動量 H_O は、

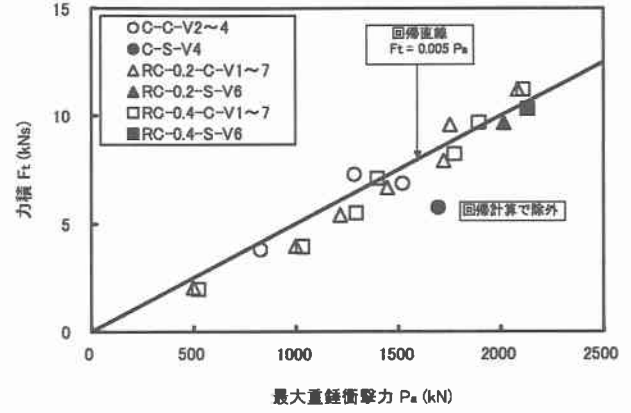


図-5: 力積と最大重錘衝撃力から回帰直線で求めた载荷時間 (Δt)

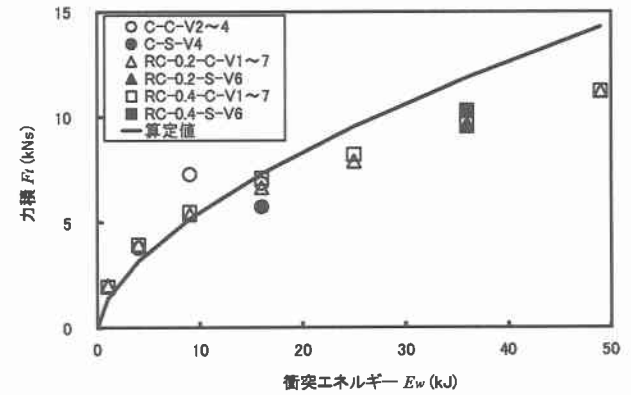


図-6 力積と衝突エネルギー

$$H_O = \rho B \int_A r^2 dA \omega \quad (6)$$

として示される。ここで、 O 点に関する擁壁の回転慣性モーメント I_O は、

$$I_O = \rho B \int_A r^2 dA \quad (7)$$

であることより、式(7)は、

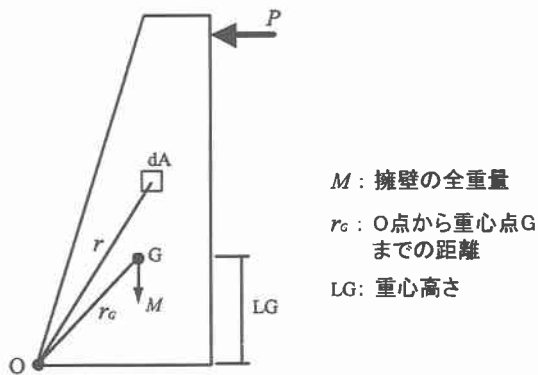
$$H_O = I_O \omega \quad (8)$$

として示される。ここで、力積モーメントと角運動量が等価であることより、初角速度 ω は、

$$\omega = \frac{M_t}{I_O} = \frac{L}{I_O} F_t \quad (9)$$

として求めることができる。なお、 O 点に関する回転慣性モーメントは、図-7より、

$$I_O = I_G + M r_G^2 \quad (10)$$



図－7 擁壁回転運動の模式図

となる。ここで I_G は重心点の回転慣性モーメント、 M は設計する擁壁の質量、 r_G は重心点から O 点までの距離である。

いま、運動エネルギーが保存されるものと仮定すると、並進運動を伴わないことより、擁壁の回転量 θ あるいは、重心点の浮上量 h_G は、回転エネルギーと位置エネルギーが等価の関係より以下のように算定される。

$$\frac{1}{2} I_O \omega^2 = Mgh_G \quad (11)$$

上式は、 ω に関して (9) を代入すると、以下のように示される。

$$h_G = \frac{I_O}{2Mg} \cdot \frac{L^2 F_t^2}{l_o^2} = \frac{L^2 F_t^2}{2Mg l_o} \quad (12)$$

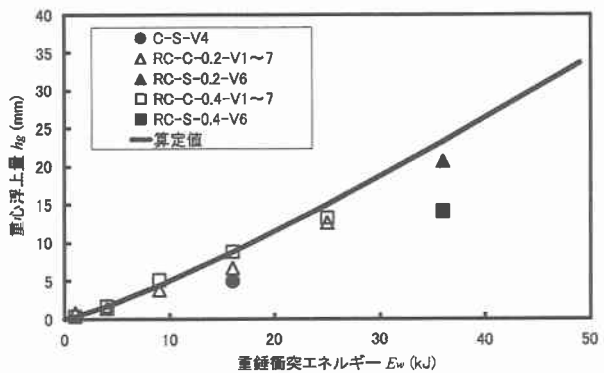
式 (12) を用いることにより、落石衝突時の擁壁の重心点の浮上量が算出可能となる。

回転安定の条件は、以下のように示される。

$$h_G < r_G - L_G \quad (13)$$

4.4 重心浮上量に関する実験値と算定値の比較

ここでは、重心浮上量に関する実験値と本章で提案した算定式の値との比較を行い、提案した算定式の妥当性を検証する。図－11 は、横軸に重錘の衝突エネルギー E_w を、縦軸に重心浮上量 h_G をとって整理している。実験値は、算定値が擁壁の剛体回転運動を前提としていることから、レーザ変位計で得られた擁壁各断面での最大変位から傾斜角度を求めて平均した値をもとに擁壁重心位置の浮上量を求めている。図より、重錘の衝突エネルギー E_w が大きい領域で、算定式の値が実験値を多少上回る傾向が見られる。これは、算定式が擁壁を剛体回転運動と仮定しているものの、衝突エネルギー E_w の増加に伴って、擁壁本体の局部変形や、断面損傷によるエネルギー損失も増加するためと思われる。しかし、実験値と算定式の値の差が小さいこと、算定式の値が実験値に比べ安全側に評価されていることから、本評価方法は工学的に妥当であるものと判断される。



図－8 重心浮上量と衝突エネルギー

5. まとめ

本研究では、C 製および RC 製の耐衝撃設計法の確立することを目的に、擁壁の転倒安定問題に着目して、その評価法を提案し、実験結果と比較することで妥当性の検討を行った。検討の結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 最大重錘衝撃力は、ラーメの定数を 120 MN/m^2 とすることで振動便覧式を用いて評価可能である。
- 2) 衝撃力による力積は、衝撃力強度が矩形衝撃力であると仮定すると、仮想荷重継続時間 $\Delta t = 5 \text{ ms}$ として評価可能である。
- 3) 擁壁の重心浮上量に関する提案の算定式は、設計的に安全側の評価を与える。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：平成 12 年度版落石対策便覧，2000.6
- 2) 川瀬良司，今野久志，岸徳光，松岡健一：落石防護擁壁の重錘衝突実験と数値シミュレーション，第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.227-232，2000.6
- 3) 川瀬良司，岸徳光，今野久志，池田憲二：RC 製落石防護擁壁の耐衝撃性向上効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.1357-1362，2001.6
- 4) 全日本建設協会：土木構造物標準設計第 2 巻擁壁類，建設省監修，1987
- 5) 土木学会編：土木技術者のための振動便覧，pp.18-27，1983.7