ハーフプレキャスト落石防護擁壁「Rs ウォール」工法の技術開発

松井建材有限会社 森 中央

有限会社創友 社長 宮崎洋一

愛媛大学防災情報研究センター特定教授・(株)第一コンサルタンツ代表取締役社長 右城 猛

(株) 第一コンサルタンツ設計部橋梁構造課 吉田 萠

1. 技術開発の目的

わが国は国土の約 70%を山地が占めている。こうしたことから山肌を縫うように道路整備が行われてきたため、落石危険箇所が多くその対策が重要な課題となっている。落石が特に多い中山間地域においては、技能労働者不足が顕在化している。また、中山間の道路は生活道路としての役割が大きいが、代替えとなる迂回路が存在しないことから長期間の通行規制はできない。

落石防護施設の施工においては、現場での型枠組立・溶接等の技能労働者を必要せず、交通規制期間を短縮できる施工法が求められている。このような背景から(有)松井建材では、プレキャストコンクリート製型枠を現場で組み立て、内部にコンクリートを打設してハーフプレキャスト重力式擁壁とする「Rs ウォール」工法を落石防護擁壁として利用するする工法を開発している。

現場打ちコンクリートの落石防護擁壁に対しては、落石対策便覧¹⁾で慣用設計法が示されている。 しかし、ハーフプレキャスト落石防護擁壁の場合には、①落石が防護柵に作用したとき擁壁が剛体的 に挙動すること、②落石が擁壁に作用したとき衝撃力でプレキャト型枠が剥離破壊しないことを明ら かにする必要がある。

本研究は、「Rs ウォール」工法が落石防護擁壁としての耐衝撃性能を明らかにすることを目的として実物大重錘衝突実験を実施したものである。

2. Rs ウォールの重錘衝突実験

(1)実験の方法

高さ 1.5m、天端幅 0.5m、底面幅 1.25m、奥行き長 10m の重力式擁壁を Rs ウォール工法で施工し、 擁壁の上部に高さ 3.0m、支柱間隔 3m、延長 9m の従来型落石防護柵(ストンガード)を設置した。

Rs ウォール工法の施工手順を写真1に示す。厚さ10cmの均しコンクリートを施工後、その上に台形状のプレキャスト型枠(製品長3m、高さ0.5m)を延長方向および高さ方向に跳び箱のように積み重ね、内部にコンクリートを打設した。また内部には鉛直方向に1製品当り3本、水平方向に1段2本の補強鉄筋D13を配置した。

擁壁の圧縮強度は、シュミットハンマーで測定した結果 22.8N/mm² であった。

実験は、質量 0.8t のコンクリート製多面体 SAEFL 型重錘 ³をトラッククレーンで吊り上げ、防護 柵の下端から 2m の位置と、擁壁の下端から 1.1m の位置にそれぞれ 6.5m の高さから振り子方式で防 護柵の阻止面、および擁壁の壁面に垂直に衝突させた。衝突速度は共に 11.3m/s、運動エネルギーは 51kJ である。運動エネルギーは、ストンガードの可能吸収エネルギーを落石対策便覧式で求めた値と 一致させた。

擁壁の中央と左右の壁面の上端と下端に合計6個の加速度計を貼り付けた。また、擁壁の中央において壁面の上部と下部の2カ所でレーザー変位計により擁壁の水平変位を測定した。なお、加速度と変位を測定できたのは重錘を防護柵に衝突させたケース1の実験のみであった。





均しコンクリート(10cm)の上こ プレキャスト型枠を設置(上面)



3段目のプレキャスト型枠設置状況(斜め前)



プレキャストコンクリート型枠 (長さ3m、高さ05m)

3段目設置後の状況(側面)



ストンガードの設置状況

写真1 Rs ウォールの施工状況



補銭税と中詰むコンクリート対け設して完成



多面体重錘とRsフォール工法による擁壁



ケース1の実験





1.25m

1.1m

V

写真2 実験の状況

_

(2)実験結果

重錘を防護柵に衝突させたケース1の実験の連続写真を写真3に示す。2本の中間支柱は根元付近 で座屈変形し除荷後も変形は残留するが、ワイヤロープは弾性的挙動を示し除荷後に変形は復元した。

支柱の変形状態を写真 5(a)、(b)に示す。中間支柱の根元は、ねじれ座屈をしている。支柱の変形角 は右側が 9.5 度、左側が 8.5 度であった。支柱根入れ部のコンクリートには、押し抜きせん断破壊等 の損傷は見られなかった。

重錘を擁壁の壁面に衝突させたケース2の実験の連続写真を写真4に示す。重錘は衝突時の衝撃力 で破損した。重錘衝突後の擁壁壁面の状態を写真5(c)に示す。壁面に損傷は見られない。

図1は、ケース1の実験で得られた擁壁中央上部の加速度波形と加速度を積分して求めた変位を示している。加速度波形から防護柵阻止面への衝突時間は0.1秒、擁壁上端の水平変位は7.65mmである。

図2はレーザー変位計による測定位置、レーザー変位計で測定した水平変位、水平変位から式(1)で 求めた擁壁の回転角 θ 、式(2)で求めた擁壁下端のすべり量 δ_0 を示している。擁壁の回転角 θ_m は0.30 度(=5.23×10⁻³rad)、擁壁下端のすべり量 δ_0 は0.8mm であった。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\delta_1 - \delta_2}{h_1 - h_2} \quad (1) \qquad \qquad \delta_0 = \delta_1 - B(1 - \cos\theta) - (h_1 - B\sin\theta)\tan\theta \quad (2)$$

回転角から擁壁天端の変位を求めると、 δ =5.23×10⁻³×1,500=7.85mm となり、加速度波形から求めた変位量とほぼ一致する。



写真3 防護柵へ重錘が衝突したときの挙動(ケース1の実験)



写真4 擁壁壁面へ重錘が衝突したときの挙動(ケース2の実験)





(a)加速度波形

(b)加速度波形から求めた変位



図1 擁壁中央上部の加速度波形と水平変位(ケース1)

図2 レーザー変位計で測定された水平変位、回転角、擁壁下端のすべり量(ケース1)

(3) 重錘衝突時の衝撃力

重錘を防護柵の阻止面および擁壁に衝突させたときの衝撃力を右城の式^{3)、4)}を用いて推定する。 重錘衝突時の衝撃力波形を最大衝撃力が*Pm*、作用時間がΔ*t*の三角形パルスと見なせば、重錘衝突 による擁壁の回転角θは式(3)で表される。

$$\theta = \beta - \cos^{-1} \left\{ \frac{I_o \omega^2}{2M \cdot g \cdot r} + \cos(\beta - \theta_\omega) \right\}$$
(3)

ただし、

$$\omega = \frac{1}{I_o} \left(\frac{P_m y_C}{2} + N_s + \frac{N_s^2}{2P_m y_C} \right) \Delta t \tag{4}$$

$$\theta_{\omega} = \frac{\Delta t^2}{4I_o} \left\{ P_m y_C + 3N_S + \frac{N_S^2}{P_m y_C} \left(3 + \frac{N_S}{P_m y_C} \right) \right\} \quad (5)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{x_G}{y_G} \quad (6) \qquad r = \sqrt{x_G^2 + y_G^2} \quad (7) \qquad N_s = -M \cdot g \cdot x_G \quad (8)$$

ここに、 I_o は回転中心Oに関する擁壁の慣性モーメント、Mは擁壁の質量、gは重力加速度、 x_G は回転中心Oから擁壁図心Gまでの水平距離、 y_G は回転中心Oから擁壁図心Gまでの鉛直距離, y_C は擁壁底面から重錘衝突点までの高さである。

式(3)~式(8)において、擁壁の回転角 θ_m が実験結果と一致する P_m を試行錯誤的に求めると、ケース1の実験では P_m =135kN、ケース2の実験では P_m =1,500kN となる。衝撃力作用時間は、ケース1の場合には加速度波形から求められた Δt =0.1 秒を使用した。ケース2の場合は、寒地土木研究所の実験⁵⁾を参考にして Δt =0.01 秒とした。

擁壁の回転角は、ケース1の場合にはレーザー変位計による測定結果から求めた $\theta=0.3$ 度、ケース2の場合にはビデオ画像から求めた $\theta=0.15$ 度とした。



図3 右城の提案式^{3),4)}

3. 実験結果の考察と今後の展開

Rs ウォール工法によって施工した高さ 1.5m、延長 10m の落石防護擁壁が、柵高 3m の従来型落石 防護柵の可能吸収エネルギーに相当する 51kJ の落石作用を受けた場合の安全性を、重錘衝突実験で 確認した。

落石対策便覧では落石防護擁壁の安定性照査において、中間支柱(H-200×100)2本分の降伏荷重 40.5kNを落石荷重と見なすことにしているが、重錘を防護柵の2/3の高さに衝突させた今回の実験で は、支柱降伏荷重の3.3倍の135kNの衝撃力が発生した。また、擁壁に重錘を衝突させたときは1,500kN もの衝撃力が発生した。大きな衝撃力が作用したにも関わらず擁壁は損傷を受けることなく、落石作 用に対する耐衝撃性能に優れていることが確認された。

Rs ウォール工法による落石防護擁壁は、高知県内の国道や町道などで既に4件の施工実積がある。 写真6はその中の1件である。現場作業は均しコンクリートの施工、プレキャスト製品の据え付け及 び中詰めコンクリートの打設のみであり、技能労働者はいなくても普通作業員だけで施工の品質確保 が可能であることが明らかになっている。また、従来の場所打ちコンクリートに比べて作業日数を1/2 に短縮できることが確認されている。

Rs ウォール工法を採用することで、技能労働者がいない地域でも短い工期での施工が可能になる ことから、山間部における落石対策に大きく貢献できるものと考えている。



写真 6 Rs ウォールエ法による一般国道 494 号の落石防護擁壁

【参考文献】

1) 日本道路協会: 落石対策便覧、2017.

2) W.Gerber : Guideline for the approval of rockfall protection, SAFEL and] the Swiss Federal ResearchnInstitue,2001.

3) 地盤工学会: 落石対策工の設計法と計算例、2014.

4) 地盤工学会四国支部地盤災害研究委員会落石対策研究会: 落石対策 Q&A、2009.

5) 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、2000.