

重錘実験概要

1. 業務の背景と目的

落石防護柵は、道路における落石対策の標準的工法として採用されている。設計法には落石対策便覧の方法が用いられているが、基礎の高さが低い場合や支持地盤が硬い場合には、防護柵に比べて基礎の安全余裕が大きくなる傾向にあることが経験的に知られている。

右城らは、(財)四国建設弘済会の「平成10年度建設事業の技術開発に関する助成事業」を受け「剛体運動力学に基づいた落石防護柵基礎の設計法」に関する研究を行い、既往の設計法には表-1の問題点があることを指摘した上で、角運動量保存則を適用した新しい設計法を提案している。

本業務は、右城らが提案した設計法の実用化に向けた検討を目的としている。実物大落石防護柵基礎を用いた重錘衝突実験により基礎の動的応答を明らかにし、防護柵基礎のより合理的な設計法について検討した。

表-1 落石対策便覧の設計法

	落石が防護柵に衝突した場合	落石が基礎に衝突した場合
設計法	落石が柵高の2/3の位置に衝突して2本の支柱が降伏するものと仮定し、支柱の降伏荷重を静的に作用させ、擁壁設計と同様に転倒、滑動、支持力の照査を行う。 基礎の抵抗有効長は目地間隔と仮定。	基礎に伝達される衝撃エネルギーを地盤の歪みエネルギーで吸収するものとし、地盤破壊を塑性率で照査する。 落石と擁壁の衝突は完全弾性衝突と仮定。 基礎の抵抗有効長は、基礎高の4倍と仮定。
問題点	落石質量や速度の影響が解析に考慮されていない。 柵高の2/3の高さ以外に衝突する場合や、支柱の降伏より先にロープが破断する場合の検討ができない。	衝突時のエネルギーロスや基礎回転時の重心移動によるエネルギー吸収が無視されている。 基礎の抵抗有効長が過小に評価されている。

2. 重錘衝突実験

(1) 供試体

高さ1m、幅0.6m、長さ1.5mの直方体のプレキャストコンクリートブロックを連結し、4タイプの基礎を製作した。タイプ1とタイプ2は長さ4.5m、タイプ3は長さ7.5m、タイプ4は長さ10.5mである。タイプ2のみ基礎底面をアンカー筋(D19×500mm)8本でベースコンクリートに固定した。

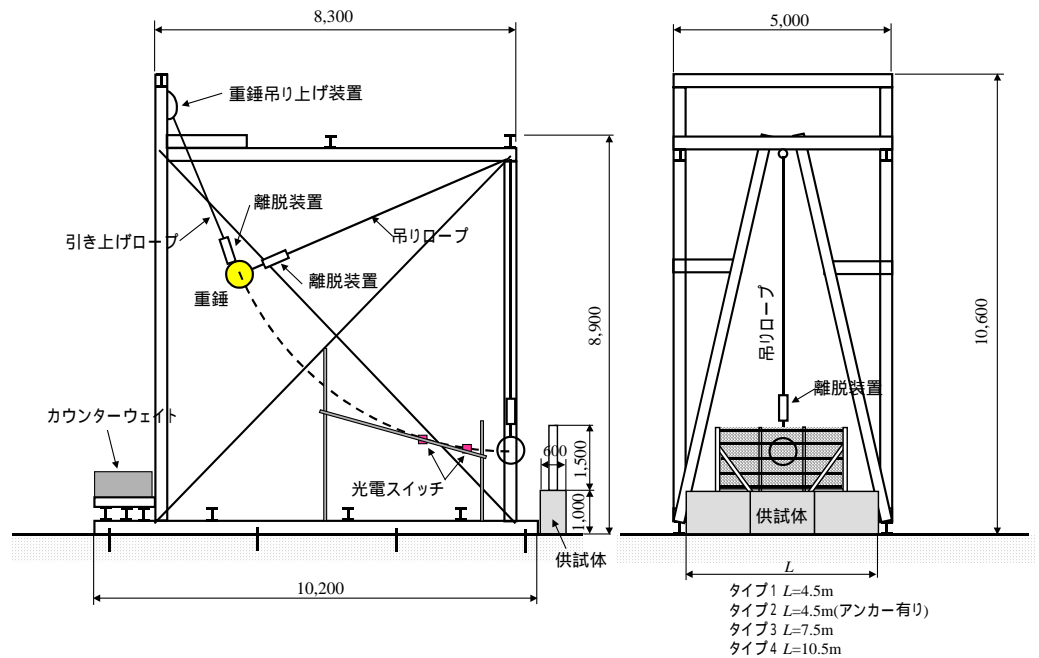


図-1 重錘衝突実験装置

基礎の上には、高さ1.5mの防護柵を設置した。防護柵延長は、タイプ4のみ9m(中間支柱2本)で、その他は3mであり中間支柱は設置していない。

(2) 計測機器

重錘の重心位置に三軸加速度計を埋め込んだ。基礎前面には一軸加速度計を6個貼り付けた。ワイヤーロープ端部の引出棒、支柱、基礎コンクリート表面、アンカー筋には歪みゲージを貼り付けた。さらに、基礎前面には、基礎の変位を直接測定するためにレーザー式変位計を2個設置した。

(3) 実験の方法

H形鋼を組み立てて図-1に示す架台を製作し、直径0.72m、質量0.47tの球体の重錘をロープで吊り下げ、振り子を造った。架台から前方へ1m離れた位置に供試体を設置した後、重錘を高さ1~5mまで持ち上げてから落下させ、振り子が鉛直になった時点で重錘をロープから自動的に切り離し、供試体に衝突させた。

実験は図-2の6ケース実施した。いずれのケースも重錘落下高を順次高くし、防護柵あるいは基礎が破壊するまで繰り返し衝突させた。各センサーで測定されたアナログ信号は0.2ms間隔でデジタル量として記録した。

(4) 実験結果

実験結果は図-2のようになった。タイプ1の供試体を用いたcase1とcase3の実験で基礎の転倒が見られた。そのときの重錘落下高さはcase1が3m、case3が2.5mであった。case6は重錘落下高4mで基礎の連結部が破断、その他のcaseは重錘落下高4m~5mでワイヤーロープと金網に変状が発生したため以後の衝突を中止した。

基礎の応答は、アンカーの有無によって異なる。写真-1は、タイプ1供試体に重錘を高さ2.5mから落下させて衝突させたときのビデオカメラの映像である。アンカーがない場合、重錘が衝突すると、まず、金網とワイヤーロープが孕みだし、約0.04秒遅れて基礎がつま先を中心に回転運動を始める。基礎の回転角が最大になるのは、重錘衝突から約0.2~0.4秒後である。基礎の重心が回転によってつま先より前方に出ると転倒する。出なければロッキング運動をして元の姿勢に戻る。アンカーがあると、重錘落下高2mで基礎はほとんど動かず、落下高3mでアンカーが抜け出した。

(5) 実験から得られた知見

実験から得られた知見をまとめると以下ようになる。

重錘衝撃力波形は正規分布のような形になる。衝

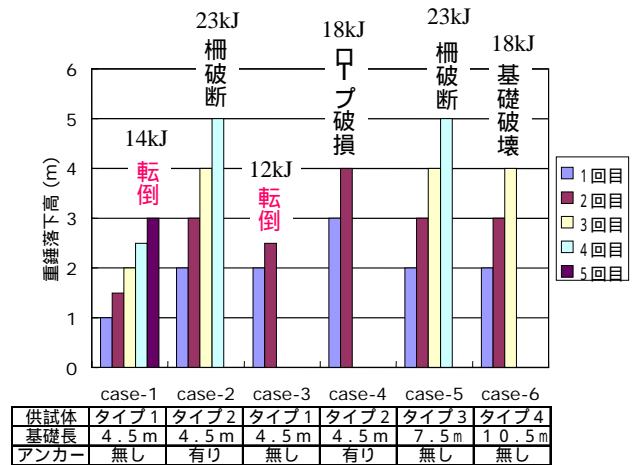


図-2 実験結果



写真-1 基礎の応答(case-1 落下高2.5m)

撃力作用時間は約 0.1 秒と長い。

基礎に伝達される衝撃力は、重錘衝撃力の 80% ~ 98% である。

重錘が防護柵に衝突すると、まず金網とロープが変形し、衝撃力による転倒モーメントが基礎自重による抵抗モーメントに達したときに基礎の回転が始まる。

基礎は回転と並進運動(すべり)を伴うが、並進運動は少なくつま先を中心にした回転運動が卓越する。

アンカーが抜けなければ基礎は回転運動しない。アンカーが引き抜ける際、基礎スラブは表面から深さ 5cm 程度の範囲でコーン状にせん断破壊する。

基礎が破壊しなければ、基礎全長で転倒に対して抵抗する。

3. 基礎の応答解析法の提案

(1) 基礎応答の数値計算法

右城らは、非衝撃力の影響が無視できるという前提で角運動量保存則を適用し、基礎の角速度を算定する方法を提案した。しかし、落石が防護柵に衝突すると衝撃力作用時間が長くなるため、非衝撃力の影響を無視できないことがわかった。そこで、衝撃力以外に非衝撃力(基礎自重)を考慮した解析法について検討した。

図 - 3 に示すような質量 M の剛体基礎に衝撃力 P_i が作用したときの運動方程式は式(1)で表される。

$$\left. \begin{aligned} M\dot{V}_{xi} &= P_i - R_{xi} \\ M\dot{V}_{yi} &= R_{yi} - Mg \\ I_G\dot{\omega}_i &= P_i y_{Pi} \cos\theta_i + R_{xi} r_G \cos(\beta - \theta_i) - R_{yi} r_G \sin(\beta - \theta_i) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

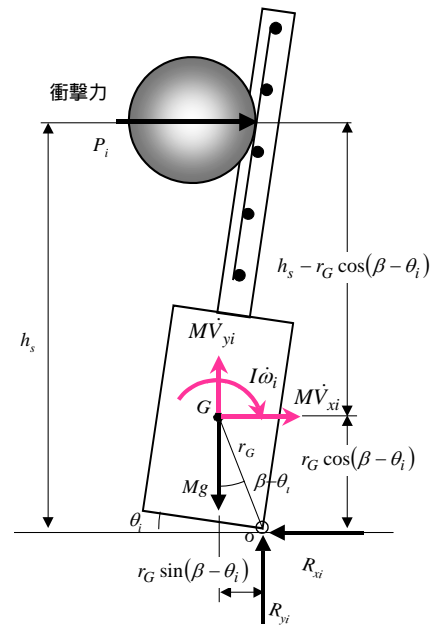


図 - 3 記号の説明

基礎が滑らない場合は式(2)、式(3)の条件式がたてられる。

$$V_{xi} = r_G \cos(\beta - \theta_i) \omega_i \quad (2) \quad V_{yi} = r_G \sin(\beta - \theta_i) \omega_i \quad (3)$$

式(1) ~ 式(3)を連立させて解けば、任意時刻 $t=t_i$ における基礎の角速度 ω_i と回転角 θ_i が次のように求められる。

$$\omega_i = \int \frac{P_i y_{Pi} \cos\theta_i - Mgr_G \sin(\beta - \theta_i)}{I_O} dt \quad (4) \quad \theta_i = \int \omega_i dt \quad (5)$$

ここに、 I_O は基礎のつま先 O に関する慣性モーメントである。その他の記号は図 - 3 を参照のこと。

衝撃力作用時間 t は、衝撃力波形を図 - 4 のようにピーク値 P_m と力積が重錘衝撃力の実験値と一致する三角形と仮定すると式(6)で求められる。任意時刻 t_i に基礎に作用する衝撃力 P_i は、基礎への衝撃伝達率を α とすると式(7)で与えられる。

$$\Delta t = \frac{2m(v_1 - v_2)}{P_m} \quad (6)$$

$$t_i \leq \Delta t: P_i = 2\alpha P_m \frac{t_i}{\Delta t}, \quad t_i > \Delta t: P_i = 2\alpha P_m \left(1 - \frac{t_i}{\Delta t}\right) \quad (7)$$

case3(z=2m)の実験について、式(4) ~ 式(7)で基礎の角速度

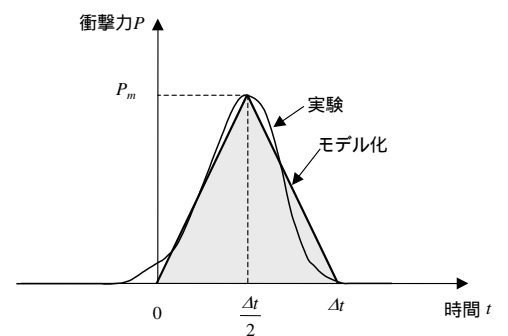


図 - 4 衝撃力波形のモデル化

と回転角を数値計算した結果を図 - 5 に示す。ただし、衝撃伝達率は $\eta = 0.8$ としている。数値計算結果は実験と高い精度で一致する。他の実験ケースも同様である。

(2) 角速度と回転角の簡便的算定法

数値計算法を用いれば、基礎の応答を高い精度で解析可能であるが、実用的ではない。そこで、衝撃力作用期間中における基礎重心の移動を無視できるものとする、運動方程式の解が次のように求められる。

$$\omega_{\max} = \frac{1}{I_O} \left(\frac{\alpha P_m h_s}{2} + N_S + \frac{N_S^2}{2\alpha P_m h_s} \right) \Delta t \quad (8)$$

$$\theta_{\max} = \beta - \cos^{-1} \left\{ \frac{I_O \omega_{\max}^2}{2Mg r_G} + \cos(\beta - \theta_{\omega_{\max}}) \right\} \quad (9)$$

ただし、

$$\theta_{\omega_{\max}} = \frac{\Delta t^2}{4I_O} \left\{ \alpha P_m h_s + 3N_S + \frac{N_S^2}{\alpha P_m h_s} \left(3 + \frac{N_S}{\alpha P_m h_s} \right) \right\} \quad (10)$$

$$N_S = -Mg x_G \quad (11)$$

ここに、 N_S は自重による抵抗モーメント、 $\theta_{\omega_{\max}}$ は角速度が最大になる時刻の回転角である。

(3) 最大衝撃力と衝撃力作用時間の算定法

落石の最大衝撃力と衝撃力作用時間は、防護柵のロープの張力と伸びの関係から導くことができる。ワイヤーロープの張力 T と伸び量 Δ の関係を、図 - 6 のバイリニヤ型にモデル化できるものとする、最大衝撃力 P_m は式(14)、衝撃力作用時間 t は式(15)で求められる。

$$P_m = \frac{2\sqrt{(2\psi a + \Delta)\Delta}}{\psi a + \Delta} T \quad (14) \quad \Delta t = \frac{mv_1(1+e_0)(\psi a + \Delta)}{T\sqrt{(2\psi a + \Delta)\Delta}} \quad (15)$$

ただし、

$$\Delta \leq \Delta_y : T = K_1 \Delta, \quad \Delta > \Delta_y : T = T_y + K_2(\Delta - \Delta_y) \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} v_1 \leq \Delta_y \sqrt{\frac{K_1}{m}} : \Delta = v_1 \sqrt{\frac{m}{K_1}}, \quad e_0 = \sqrt{\frac{1}{\eta}} \\ v_1 > \Delta_y \sqrt{\frac{K_1}{m}} : \Delta = \Delta_y - \frac{1}{K_2} \left\{ T_y - \sqrt{T_y^2 - K_2(T_y \Delta_y - mv_1^2)} \right\}, \quad e_0 = \frac{1}{v_1} \left\{ \sqrt{\frac{T_y^2 - K_2(T_y \Delta_y - mv_1^2)}{\eta m K_1}} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ここに、 T はロープ張力、 T_y は降伏張力、 Δ_y は降伏伸び量、 K_1 は弾性域のバネ定数、 K_2 は歪み硬化後のバネ定数、 η は除荷時のバネ剛性残存率、 e_0 は反発係数、 a は支柱間隔、 ψ はロープ変形の補正係数である。

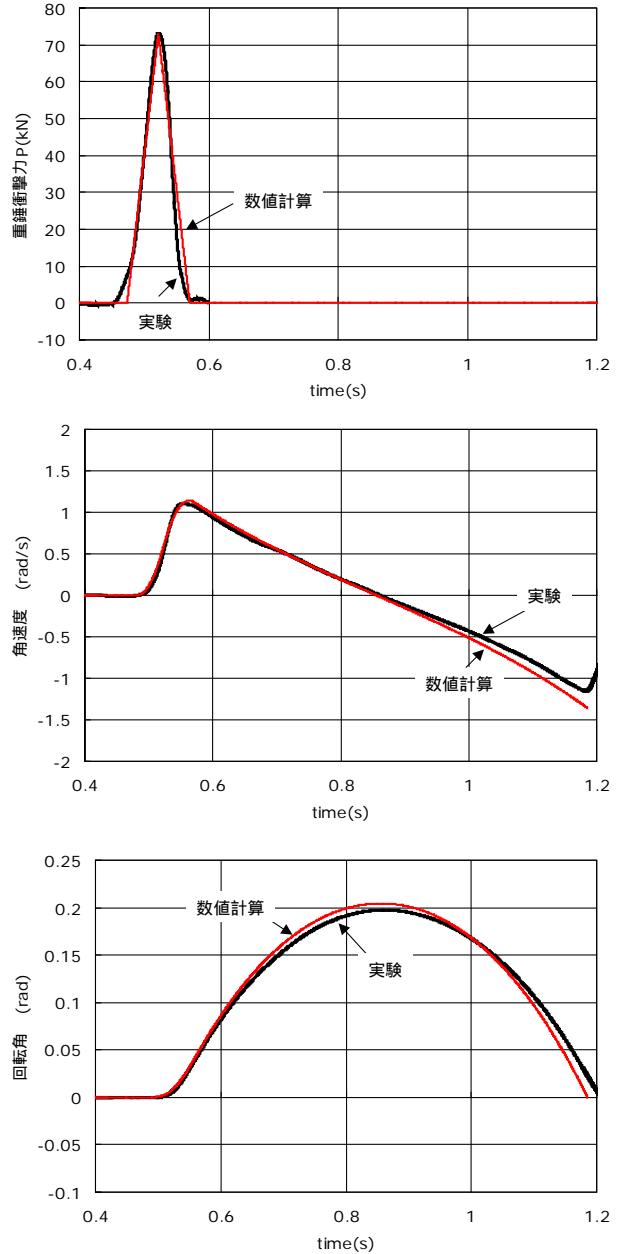


図 - 5 基礎応答の数値計算結果 case3(z=2m)

(4) 実験結果との比較

提案式の式(8)～式(11)の妥当性を検証するため、基礎の最大角速度を計算し、実験値と比較した。その結果を図-7に示す。

ただし、重錘質量は $m=0.47t$ 、支柱間隔は $a=3m$ 、補正係数 $=1.0$ である。ワイヤーロープの力学特性は過去の引張試験データを参考に、断面積 $A_w=133.9mm^2$ 、降伏強度 $\sigma_y=1200MPa$ 、破断強度 $\sigma_u=1400MPa$ 、降伏張力 $T_y=160.68kN$ 、破断荷重 $T_u=187.46kN$ とした。case2,case4

については、アンカーの引き抜き抵抗力を式(11)に加味している。アンカーの引き抜き抵抗力 $F=30kN/本$ (付着強度 $=2.5MPa$) とした。

解析結果は実験値と概ね一致している。衝撃伝達率 $=1.0$ 、除荷時の剛性硬化率 $=1$ とすれば、全ての実験データを包含する大きめの角速度が与えられることがわかる。

4. 従来設計との比較

図-8に示すように、高さ0.85mで延長10mの基礎に高さ $h=2m$ の標準的な落石防護柵(中間支柱 $H-200 \times 100$ 使用)が設置されているものとし、これに質量 $0.5t$ の落石が衝突するものとして提案式と落石対策便覧の方法で基礎の試設計を行った。ワイヤーロープの諸元は3(4)に示したものと同一とした。

落石衝突位置は、落石対策便覧の場合、柵高の $2/3$ であるが、提案式では基礎下端から $1.5m$ 上方のワイヤーロープに衝突するものとした。この位置に衝突するとワイヤーロープが破断し、衝撃力によるモーメントが最大になり、基礎の安定性に対して最も不利になる。基礎に衝突する場合は、落石対策便覧の方法、提案式による方法とも基礎上端とした。

基礎幅 b は、式(17)で定義される転倒安全率を満たすように決定するものとした。落石が基礎に衝突した場合は、北海道開発土木研究所の実験結果を参考にして衝撃力 P_m を式(18)で、衝撃力作用時間 t を式(19)で算定した。

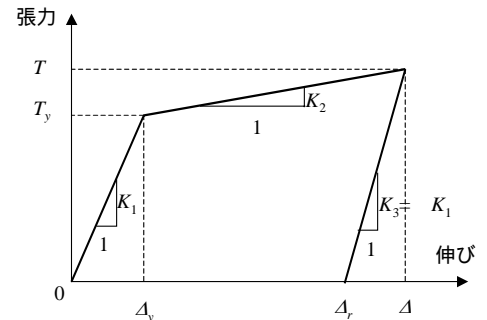


図-6 ワイヤーロープの張力と伸びの関係

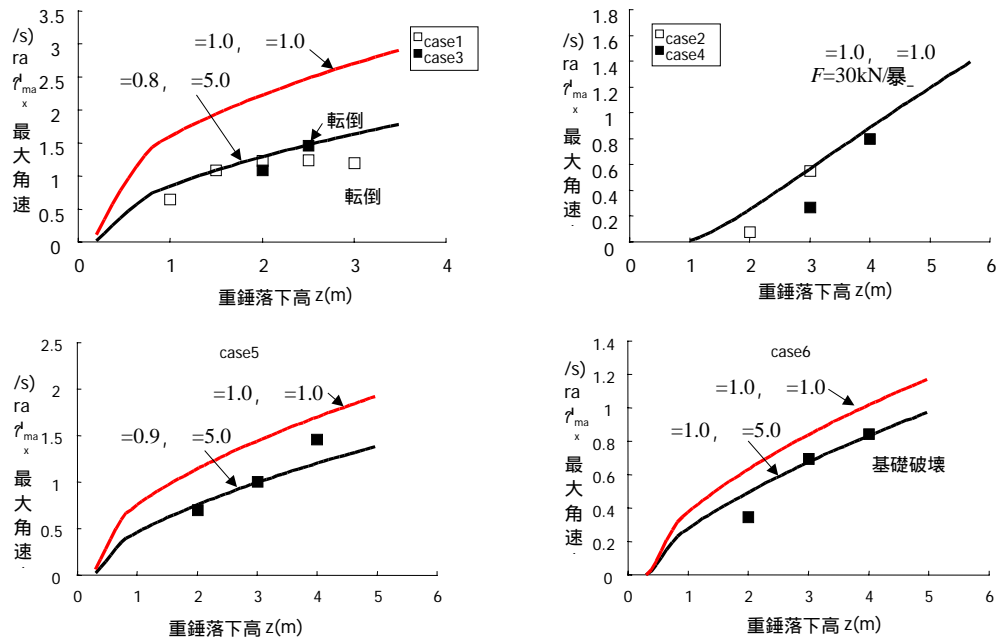


図-7 提案式による角速度と実験値の比較

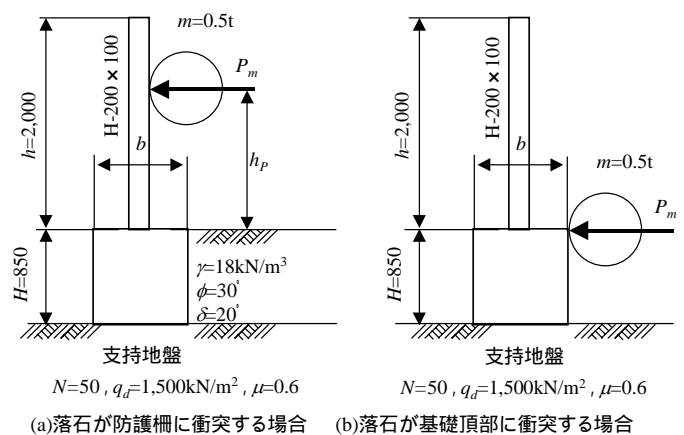


図-8 試算断面

なお、提案式の落石衝突速度は、ワイヤーロープの破断する限界速度 $v_1=8.07\text{m/s}$ 、便覧式では防護柵の終局限界速度 $v_1=14.86\text{m/s}$ とした。

$$F_s = \left(\frac{\beta}{\theta_{\max}} \right)^{0.1} \geq 1.2 \quad (17)$$

$$P_m = 174m^{2/3}v_1^{6/5} \quad (18)$$

$$\Delta t = \frac{2mv_1}{P_m} \quad (19)$$

計算結果を表 - 2

に示す。提案式で設計した場合の必要基礎幅は 0.7m であるが、落石対策便覧では落石が防護柵に衝突する場合 1.5m となる。これは、支柱 2 本分の降伏荷重 (63.8kN) を静的荷重として作用させてい

表 - 2 従来設計との比較

提案式	落石対策便覧式		
	落石が防護柵に衝突	落石が基礎に衝突	
		落石対策便覧に完全準拠	提案式と同一条件

るためである。落石が基礎を直撃する場合の基礎幅は 3m と異常に大きくなる。この原因は、落石が弾性衝突(反発係数 1.0)するものとし、基礎有効抵抗長を基礎高の 4 倍と仮定し、基礎の回転運動エネルギーが地盤の歪みによる可能吸収エネルギー以下になるように設計しているためである。提案式と同様に、落石衝突速度 8.07m/s、有効基礎長を全長、衝突は完全非弾性衝突($e=0$)の条件で計算すると、基礎幅は 0.75m になり提案式と大きくは変わらない。

5.まとめと今後の計画

今回の業務で、次のことが明らかになった。基礎の安定性に対して落石衝撃力とその作用時間の影響が大きい。衝撃力とその作用時間は、ワイヤーロープの荷重 - 変位関係から理論的に導くことができる。提案式を用いて解析すれば基礎の角速度と回転角を高い精度で予測できる。提案式を用いれば、防護柵と基礎のバランスのとれた設計ができ、大幅なコスト縮減が可能になる。

今回の業務により落石防護柵基礎の耐衝撃性能の評価が可能になった。しかしながら、現状の等価摩擦係数を用いた手法では、落石速度を正確に予測できない。落石防護柵の安全性を適切に評価するには、斜面特性を考慮した合理化な落石速度の予測法を確立することが不可欠である。このため、平成 15 年度には落石実験を実施し、落石速度の予測法に関して研究する計画である。

本業務の研究成果は、現在、性能規定型への改訂が検討されている落石対策便覧に反映される予定である。

本業務の実施にあたっては、斜面防災、衝撃問題の学識経験者で構成される技術検討会(委員長：矢田部龍一愛媛大学教授)にご指導頂いた。委員の皆様へ深甚の感謝を申し上げます。