矩形基礎上に設置した落石防護柵支柱に関する重錘衝突実験

Steel-weight impact loading of posts in rockfall protection fence set on rectangular-shaped foundation

（国研）土木研究所寒地土木研究所　○正　員　山澤文雄 (Fumio Yamasawa)
（国研）土木研究所寒地土木研究所　正　員　今野久志 (Hisashi Konno)
（国研）土木研究所寒地土木研究所　正　員　安中新太郎 (Shintaro Yasunaka)
室蘭工業大学大学院　正　員　小室雅人 (Masato Komuro)
室蘭工業大学大学院　名誉会員　岸　徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線の道路沿いには、落石災害を防止するための落石防護施設が数多く設置されている。その中で従来型落石防護柵（以下、防護柵、写真－1）は、H 形鋼支柱、ひし形金網、ワイヤロープ等の部材を組み合わせた施設で、広く採用されている。この防護柵の基礎には、落石防護擁壁を兼ねるものやコンクリート躯体形式がある。この支柱や基礎に関する設計は、一般に落石対策便覧 [1]（以下、便覧）に基づいて行われている。しかしながら、防護柵基礎が塑性状態に至るような衝突エネルギーが大きい場合については、不明な点が多く、今後の研究開発が待たれるとの記載があるのみである。

本研究では、防護柵支柱基礎の安定性（転倒等）に関する合理的な照査手法を確立することを最終目標として、防護柵支柱に落石が衝突した場合における基礎部の耐衝撃性能を把握するための野外実験を実施した。本稿では、矩形コンクリート基礎躯体（以後、躯体）に防護柵支柱を設置した模型を製作し、落石が支柱部を直撃する場合を想定して、重錘の落下高さを変化させた衝突実験を行い、支柱の変形および躯体の回転性状に関する検討を行ったので報告する。

(a)　落石防護擁壁基礎

(b)　躯体形式（土中コンクリート基礎）

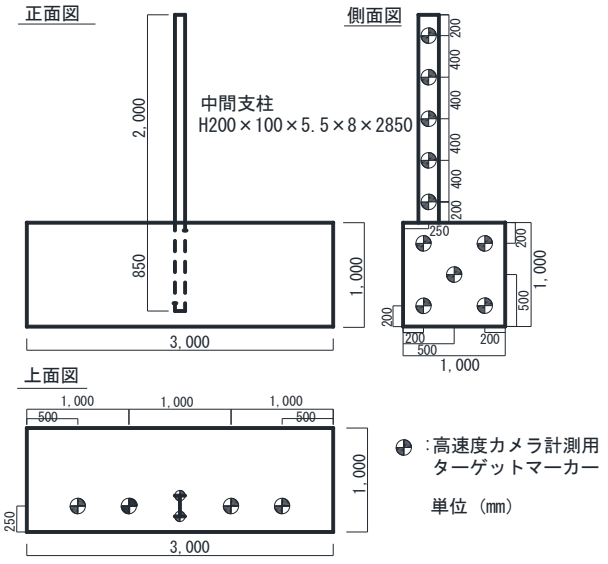
写真－1　従来型落石防護柵の例

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図－1 には、試験体の形状寸法図を示している。躯体の断面形状は、高さ H = 1.0 m、壁厚 B = 1.0 m の矩形状とした。実防護柵の中間支柱が 3.0 m 間隔に基礎上に設置されていることから、躯体の幅は支柱 1 本が分担する長さである L = 3.0 m とした。

中間支柱の部材には、防護柵としての使用実績が多い H-200×100×5.5×8（材質：SS400）を用いることとした。中間支柱の根入れ深さは、北海道開発局の標準設計図集に従い 0.85 m としている。また、載荷点である躯体天端から 1.4 m の位置にはフランジの局部座屈を防止するためにスティフナーを溶接している。



図－1　試験体の形状寸法図

2.2 実験方法および計測項目

図－2、3 には、それぞれ実験概要図、ロードセル一体型重錘の形状寸法を示している。また、写真－2 には実験風景を示している。衝撃荷重は、質量 1,000 kg のロードセル一体型重錘（以降、重錘）を、高さ約 10 m の門型フレーム吊桁から 4 本の PC 鋼棒（Φ17mm）を用

いて吊り下げ、振り子運動によって支柱に衝突させることにより載荷した。

擁壁は、直接基礎の場合には地盤が良好な箇所か良質土等に置き換えた地盤に設置される。しかしながら、落石防護擁壁に関する既往の実験 [2] において、基礎地盤による防護擁壁に関する動的応答への顕著な影響が認められなかったことから、本実験では躯体をコンクリート基盤上に設置することとした。また、載荷による躯体の運動を回転のみに制限するため、躯体の回転中心となるつま先部に相当するコンクリート基盤上には躯体の水平移動を抑止するために、ストッパーを設けることとした。

実験は、表－1 に示すように重錘の落下高さを変化させた全 3 ケースについて実施した。表中の試験体名において、第一項目目の H に続く数値は設定した重錘の落下高さである。また、表中には高速度カメラ画像から算定した重錘衝突速度や衝突エネルギー、実験時のコンクリートの圧縮強度および支柱 H 形鋼の降伏点強度も示している。なお、載荷位置は実防護柵において落石が下から 5 本目と 6 本目のロープの中間部に衝突する場合を想定し、躯体天端から 1.4 m とした。

本実験における計測項目は、(1)上空からの高速度カメラ画像に基づいて算定した支柱の天端および躯体天端の変位、(2) 側面からの高速度カメラ画像に基づいて算定した支柱および躯体天端の変位及び回転角、(3) 重錘先端部に配置したロードセルによる衝撃荷重である。なお、高速度カメラの有効画素数は 1,600 × 1,200、フレームレートは 2,000 fps である。ロードセルから得られる荷重データは、サンプリング周波数を 10 kHz としてデジタルデータレコーダにて収録した。

2.3　躯体の設計照査法に基づく評価

実験結果と比較するために、便覧の安定照査法に基づいた支柱の変形や躯体の回転運動に関する評価を行う。製作した支柱付き躯体の安定性を、図－4(a)に示すようにモーメントのつり合い式(1)から計算する。躯体は、水平荷重によるモーメントが躯体の自重による抵抗モーメントを超えると回転運動を開始する。その条件は次式のように示される。

$$P\,l = W\,x_G \qquad (1)$$

ここで、P：水平荷重 (kN)、l：躯体底面からの作用高さ(m)、W：支柱および躯体の自重 (kN)、x_G：支柱付き躯体の重心からつま先までの距離 (m)である。

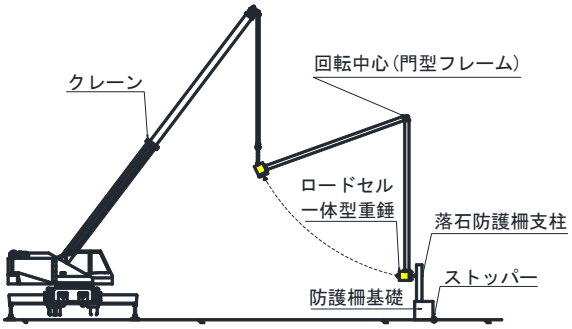
いま、水平荷重の載荷位置を躯体底面から 2.4 m（躯体天端からの高さ 1.4 m）の高さとすると、躯体が回転を開始する荷重は、上式から P = 14.4 kN として求まる。

支柱の下端に塑性ヒンジが形成される時の力 F_p は、次式より求められる（図－4(b)参照）。

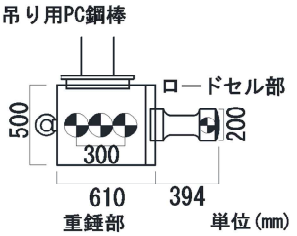
$$F_p = M_0 / h_2 = \sigma_y Z_P / h_2 \qquad (2)$$

ここで、M_0：全塑性モーメント (kN･m)、h_2：荷重の作用高さ (m)、σ_y：支柱 H 形鋼の降伏強度（実験使用値：316 N/mm^2）、Z_P：H 形鋼の全塑性断面係数（205×10^3 mm^3）である。式 (2)より載荷位置が 1.4 m の場合には、F_p は 46.3 kN として求まる。

以上より、躯体が回転を開始する水平荷重 P と支柱



図－2　実験概要図

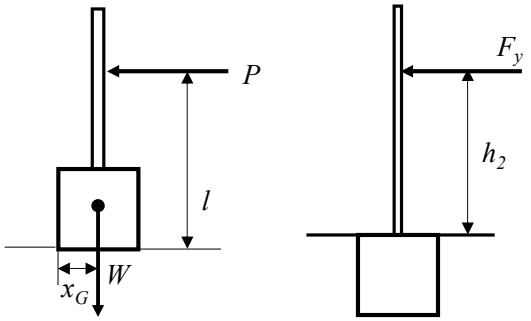


図－3　ロードセル一体型重錘の形状寸法図

写真－2　実験風景

表－1　実験ケース一覧

試験体名	載荷位置 (m)	落下高さ (m)	支柱の根入れ深さ (m)	実測重錘衝突速度 (m/s)	重錘衝突エネルギー (kJ)	コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)	H形鋼降伏点応力度 (N/mm^2)
H0.5	1.4	0.5	0.85	3.0	4.5	27.0	316
H1.0		1.0		4.3	9.2		
H1.5		1.5		5.3	14.0		



(a)モーメントのつり合い　　(b)塑性ヒンジ

図－4　荷重と作用位置の関係

基部に塑性ヒンジが形成される荷重 F_p を比較すると、いずれの載荷位置においても、$P < F_p$ となる。このことから本実験の載荷条件においては、静的な力のつり合いによる試算上では、支柱が塑性ヒンジを形成するまでに至らず、擁壁は回転に至ることとなる。

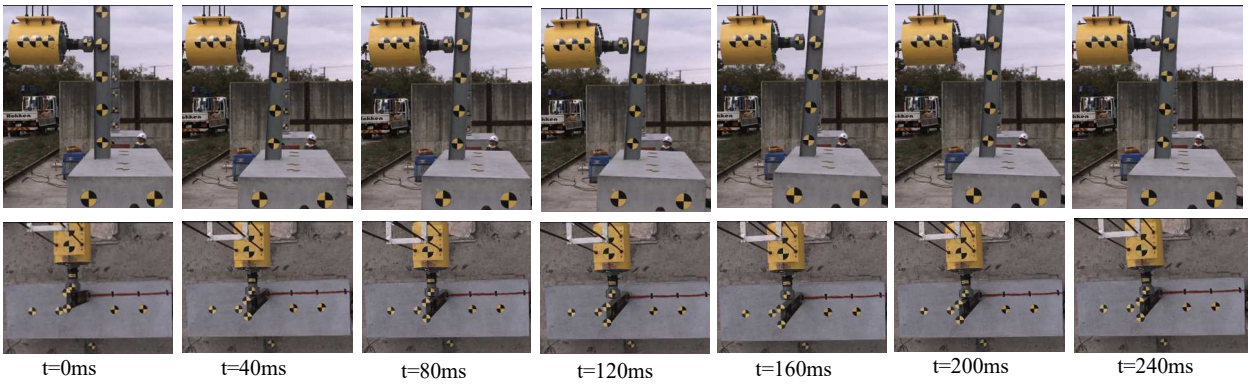
次に便覧の慣用設計法に基づく本試験体の安定性の照査を行う。便覧では、支柱の基部に塑性ヒンジが形成される時の荷重 F_p と自重との合力が作用する場合の躯体底部における偏心量を求め、その値が躯体の中心軸から底版幅 B の 1/3 以下であれば安定性が確保されるとしている。計算では $B/3 < e$ となり（$B/3$=0.33 m、e =1.61 m）、転倒とすると評価される。

3.　実験結果および考察

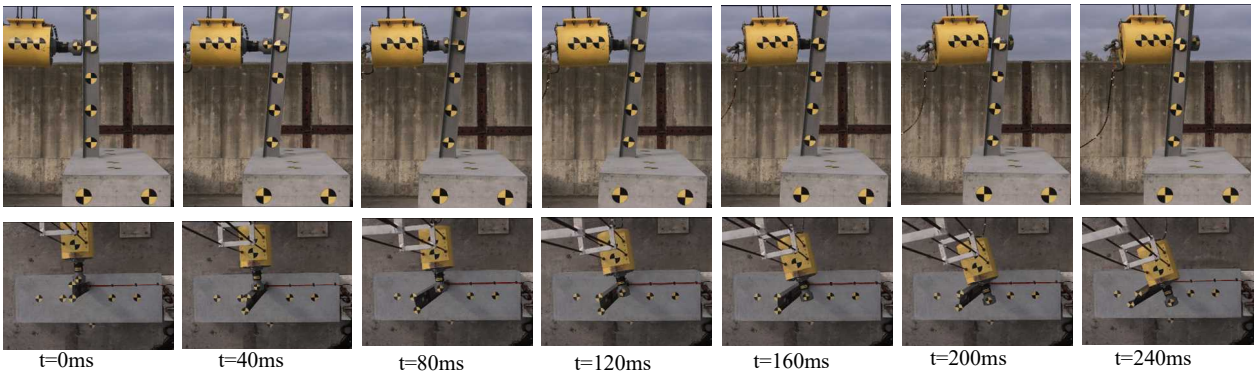
3.1　重錘衝突による支柱の変形挙動

写真－3 には、側面および上面に設置した高速度カメラから撮影した各ケースの重錘衝突時から 240 ms 後までの画像を示している。H0.5 の場合には重錘は支柱に真っすぐ当たって跳ね返り、再度支柱に衝突している。H1.0 の場合には支柱に衝突した後、支柱が弱軸方向に変位するとともにロードセル部が支柱からずれ、若干速度を落としながら、再度重錘が支柱に衝突している。H1.5 の場合には、重錘が支柱に衝突し跳ね返った後、重錘自体が多少回転しながら再度支柱に衝突している。

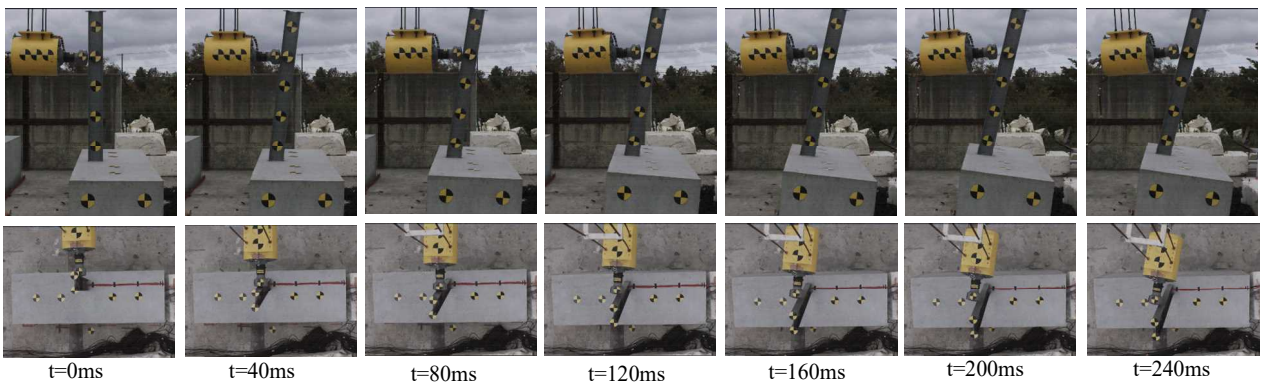
図－5 には側面の高速度カメラ画像より算定した支柱の変位角に関する時刻歴波形を、図－6 には擁壁の真上に設置した高速度カメラ画像より算定した支柱基部に対する天端の相対変位に関する時刻歴波形を示している。なお、支柱天端の相対変位は躯体の回転による支柱基部の変位を差し引いて算出している。支柱の変位角は落下高さ（重錘衝突速度やエネルギー）の増加に応じて増加する傾向を示している。また、天端の相対変位を見ると、H1.0 の場合には支柱の弱軸方向に大きく変位していることが確認できる。



（a）H0.5

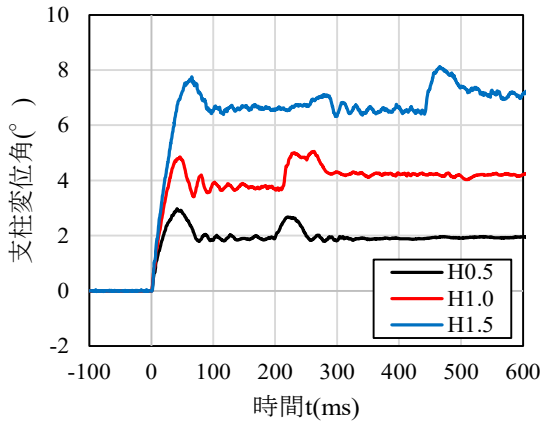


（b）H1.0

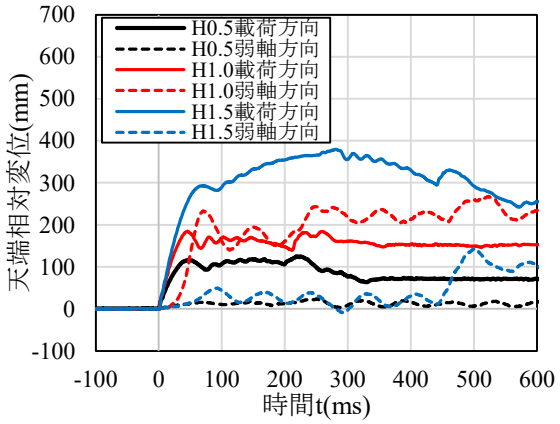


（c）H1.5

写真－3　高速度カメラ画像



図－5　支柱の変位角に関する時刻歴波形

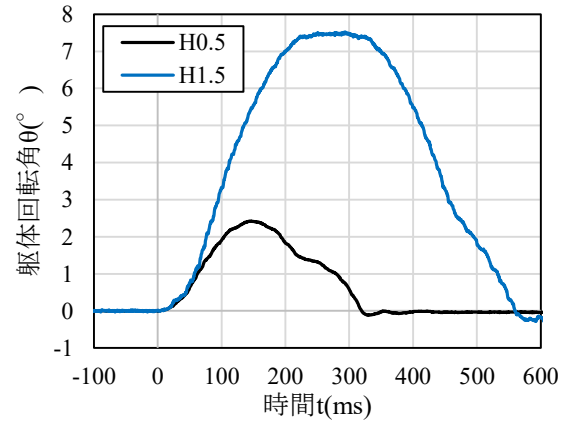


図－6　支柱天端の相対変位の時刻歴波形

3.2　重錘衝突による躯体の回転

本実験では、重錘衝突による躯体の損傷が天端の支柱フランジ端部近傍に浅いひび割れや剥離が発生する程度であったことから、躯体には落石の衝突によって損傷を及ぼさないものと仮定し、躯体の回転に限定して検討を行った。

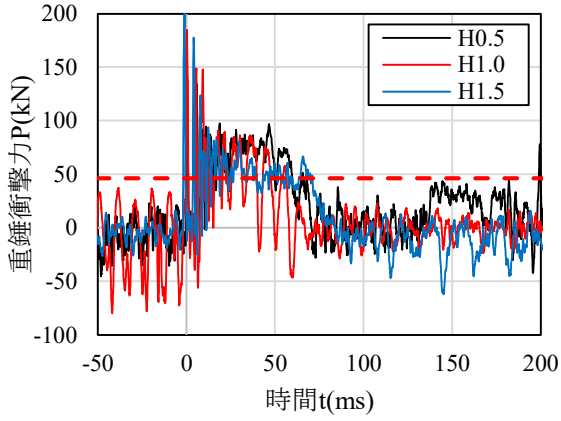
図－7 には、躯体の回転角の時刻歴波形を示している。なお、H1.0 の場合には支柱の弱軸方向への変形の影響が大きいため除外した。躯体の回転角も、前述の支柱の変位角と同様に落下高さ（重錘衝突速度やエネルギー）の増加に対応して増加するものと考えられる。前述の試算では、支柱は塑性ヒンジを形成するには至らずに躯体が回転する結果となった。しかしながら、実験結果は、全ケースにおいて支柱に塑性ヒンジが形成されて大きく変形するとともに、残留変位も認められる結果となった。また、支柱は塑性変形するとともに躯体も回転（浮き上がり）しているが、転倒には至らないことが明らかになった。



図－7　躯体回転角の時刻歴波形

3.3　重錘衝突による衝撃力波形

図－8 には、重錘衝撃力の時刻歴波形を示している。重錘衝撃力波形には衝突直後から 10 ms 程度まで高周波成分が励起している。これは、重錘が支柱衝突時に発生する音波等の振動成分であるものと推察される。重錘衝撃力波形は高周波で高振幅の性状を示した後，大略 15～70 ms 間において平均値が 60～75 kN 程度の値を示した後、零レベルに減少している。この値は、静的な全塑性荷重 P_P = 46.3 kN より多少大きい。また、H1.5 の場合には若干接触時間が長くなっている。一方、H0.5 と H1.0 の場合には大きな差は認められなかった。



図－8　重錘衝撃力の時刻歴波形

4.　まとめ

本研究では、矩形コンクリート躯体に落石防護支柱を設置した模型を製作し、落石が支柱に直撃する場合を想定して、重錘の落下高さを変化させた野外実験を行い、支柱の変形および躯体の回転に関する検討を行った。

その結果、設計上、支柱は塑性ヒンジを形成するには至らず、躯体は転倒すると評価される。しかしながら、実験結果は、支柱は衝撃荷重重載荷によって塑性変形し、躯体は回転するものの転倒に至らない。

また、支柱の変位角及び躯体の回転角は入力エネルギーの増加に対応して増加する傾向を示すが、支柱基部に塑性ヒンジが形成されることにより、躯体への影響は小さいことが明らかになった。

参考文献

1)　（公社）日本道路協会：落石対策便覧、2017.12.
2)　山澤文雄、今野久志、小室雅人、岸徳光：基礎地盤が異なる落石防護擁壁の耐衝撃挙動、コンクリート工学年次論文集、 Vol. 39、 No. 2、 p.649-654、2017.7