

# コンクリート基礎上に設置した落石防護柵の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討

Numerical study on impact resistance behavior of rockfall protection fences constructed on concrete foundation

室蘭工業大学大学院  
室蘭工業大学大学院  
室蘭工業大学大学院  
(国研)寒地土木研究所  
(国研)寒地土木研究所  
室蘭工業大学大学院

○ 学生員 久井 昭史 (Akifumi Hisai)  
正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)  
正 員 瓦井 智貴 (Tomoki Kawarai)  
正 員 山澤 文雄 (Fumio Yamasawa)  
正 員 中村 拓郎 (Takuro Nakamura)  
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、落石から人命や道路交通網を守るために数多くの落石防護構造物が設置されている。その中の1つとして、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て製作される従来型落石防護柵がある。この防護柵の基礎には、地中コンクリート基礎および擁壁基礎がある。現在、擁壁基礎の安定性照査は、落石対策便覧<sup>1)</sup>(以下、便覧)に基づいて行われている。便覧に基づいた基礎の安定性照査は、支柱基部あるいはロープが降伏するときの荷重が落石衝突位置に水平かつ静的に作用するものとして実施される<sup>1)</sup>。したがって、その落石衝突による動的な荷重効果については考慮されていない。

このような背景の下、著者らは基礎上に設置した落石防護柵を対象に重錘落下衝撃実験を実施し、基礎の安定性に関する検討を行ってきた<sup>2)</sup>。しかしながら、このような実験的検討のみでは時間的・経済的な負担も大きいことから、

耐衝撃挙動を適切に再現可能な数値解析手法の確立は肝要である。

このような観点から、本研究ではコンクリート基礎ブロック(以後、単に基礎)上に設置した落石防護柵の耐衝撃挙動を適切に再現可能な数値解析手法の確立を目的に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。また、本研究では基礎に支柱を埋設した従来(C)型防護柵と、施工性の観点から支柱を埋設することなく支柱基部のベースプレートを基礎に直接アンカー固定するベースプレート(BP)式防護柵を対象に数値解析を行い、実験結果との比較を行うことによって提案解析手法の妥当性を検討した。なお、本解析にはLS-DYNA<sup>3)</sup>(Ver. R11)を使用している。

## 2. 実験概要

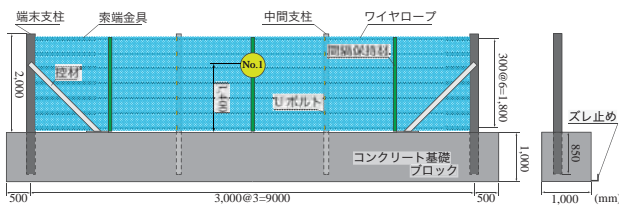
### 2.1 試験体概要

表-1には、本研究で実施した実験ケース一覧を示している。試験体名の第一項目は支柱の定着形式を(C:従来型, BP:ベースプレート式)、第二項目は基礎末端からの設定重錘衝突高(m)を表している。実験時の入力エネルギーは、便覧で規定している柵の吸収エネルギー量(45~53 kJ程度)を踏まえて、後述の1,181 kg 鋼製重錘を用い、落下高さを3.8, 4.5 mとして、それぞれ44, 52 kJ程度と設定した。また、C-H1.4およびBP-H1.4に関しては、想定していた衝突位置より重錘が上下左右に若干のズレが生じていることを確認しており、実測のズレに関する値も合わせて示している。なお、左右のズレは、载荷側から見て左側を正の方向として示している。

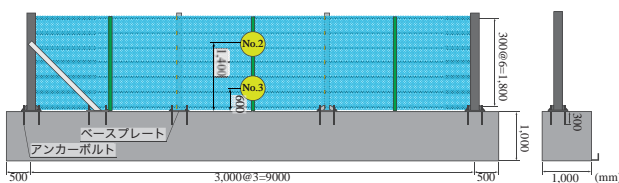
図-1には、本実験に用いた2種類の防護柵に関する形状寸法を示している。柵基礎は、高さ、幅ともに1 mとし、防護柵の延長9 m(柵高2 m, 支柱間隔3 m, 3スパン)よ

表-1 実験ケース一覧

試験体名	設定衝突高 $H_1$ (m)	実測衝突高 $H'_1$ (m)	载荷位置左右のズレ (m)	重錘落下高 $H_2$ (m)	実測衝突速度 $V'$ (m/s)	設計可能吸収エネルギー (kJ)	実測エネルギー (kJ)
C-H1.4	1.4	1.25	-0.075	4.5	9.63	52	50
BP-H1.4		1.54	+0.03		9.07		54
BP-H0.6	0.6	0.6	0	3.8	8.51	44	44



(a) 従来(C)型



(b) ベースプレート(BP)式

図-1 試験体の形状寸法



写真-1 実験状況

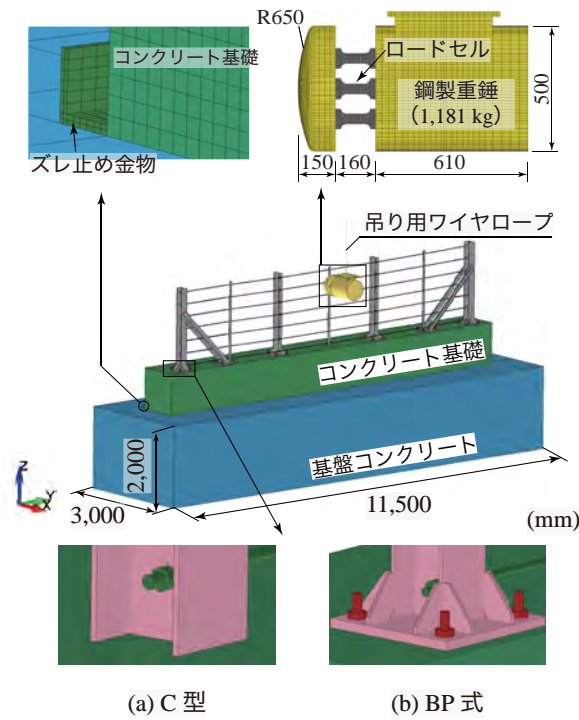


図-2 有限要素モデル

りも若干長い10 mとしている。なお、基礎の回転についても検討を行うことより、基礎背面にはズレ止めを設け、滑動を防止した。落石防護柵のワイヤロープは300 mm間隔で7本配置し、ひし形金網には素線径3.2 mmを用いた。なお、C型は支柱を基礎に850 mm埋設しているのに対し、BP式はアンカーボルトを介して直接固定されている。

2.2 実験方法および計測項目

写真-1には衝撃荷重実験状況を示している。実験は、トラッククレーンで吊り下げたロードセル一体型の鋼製重錘(質量:1,181 kg)を振り子運動により試験体中央部の間隔保持材(基礎天端からの設定落下高さ1.4および0.6 m)に衝突させることによって実施した。なお、本実験で使用した鋼製重錘は、5個から構成されるロードセルとの一体型となっており、载荷点部は片当たりを防止するために半径650 mmの球形状を有している。

本実験における測定項目は、(1)重錘に組み込まれた衝撃荷重測定用ロードセルによる重錘衝撃力、(2)索端金具に貼付したひずみゲージによるワイヤロープ張力、(3)支柱に貼付したひずみゲージによる軸方向ひずみ、(4)重錘貫入量や衝突速度、基礎の回転角、支柱の変形状況等を検討するための2,000 fpsでの高速度カメラ撮影である。なお、実験終了後に、支柱基部近傍に若干のひび割れが確認されたものの、それ以外には認められなかったことから、ひび割れ分布は記録していない。

3. 数値解析概要

3.1 有限要素モデル

図-2には、本数値解析で用いた有限要素モデルを示している。本解析では、重錘吊り用ワイヤロープは2節点梁要素を用い、その他の部材は8節点固体要素を基本として基礎コンクリート(以後、単に基礎)までを可能な限り詳細にモデル化した。各要素の積分点数は、2節点梁要素、8節

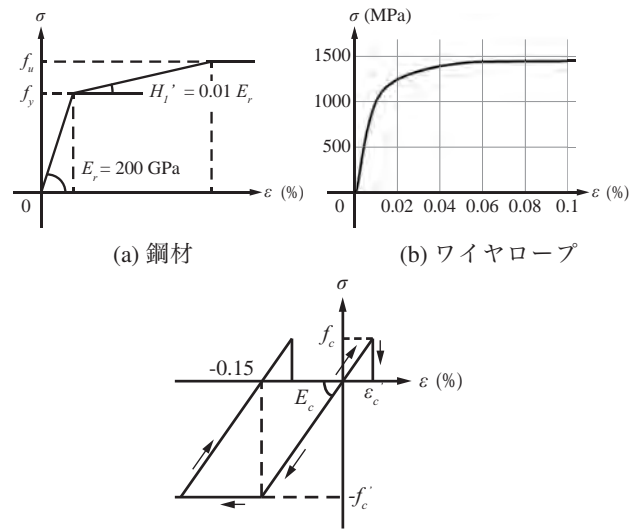


図-3 材料構成則

表-2 鋼材の材料物性値一覧

部材名	寸法 (mm)	降伏強度 $f_y$ (MPa)	引張強度 $f_u$ (MPa)
端末支柱	H-175×175×7.5×11-2,850	320	435
中間支柱	H-200×100×5.5×2,850	374	479
控材	C-100×50×5×7.5-1,997	345	465
間隔保持材	PL-4.5t×65×980 (2枚)	341	466
索端金具	25φ×500	351	541
アンカーボルト	D25 (M24)×390	414	596

点固体要素でそれぞれ4点、1点積分とした。なお、本研究では重錘を間隔保持材に衝突させることから、ひし形金網の影響は小さいものと判断し、そのモデル化は行っていない。

索端金具と支柱、支柱と柵基礎、柵基礎と基盤および重錘と間隔保持材間には、面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義し、既往の研究を参考に摩擦係数は全て0.4と設定した。基盤部の境界条件に関しては、底部は完全固定、側面部は法線方向変位を固定とした。また、重錘吊り用ワイヤロープの上部はピン支持としている。ズレ止めと基盤、中間支柱とUボルトおよび端末支柱と控材の接続については接触面によるタイド条件を設定することで結合し、ワイヤロープと索端金具、間隔保持材とUボルトは節点共有によって結合した。

衝撃荷重は、表-1に示す実測の衝突位置に重錘要素を配置し、実験で得られた衝突速度を重錘全要素の節点に付加することで作用させた。なお、本解析では数値解析の複雑化を避けるために、ワイヤロープおよびアンカーボルトの初期張力は考慮していない。

3.2 材料構成則

図-3には、本研究で使用した鋼材、ワイヤロープおよびコンクリートの応力-ひずみ関係を示している。

(a) 図に示すように、鋼材(H形鋼支柱、間隔保持材他)にはトリリニア型の弾塑性体モデルを用い、降伏の判定はvon Misesの降伏条件を採用した。降伏強度および引張強度はミルシートを参考に決定した。表-2には各鋼材の材

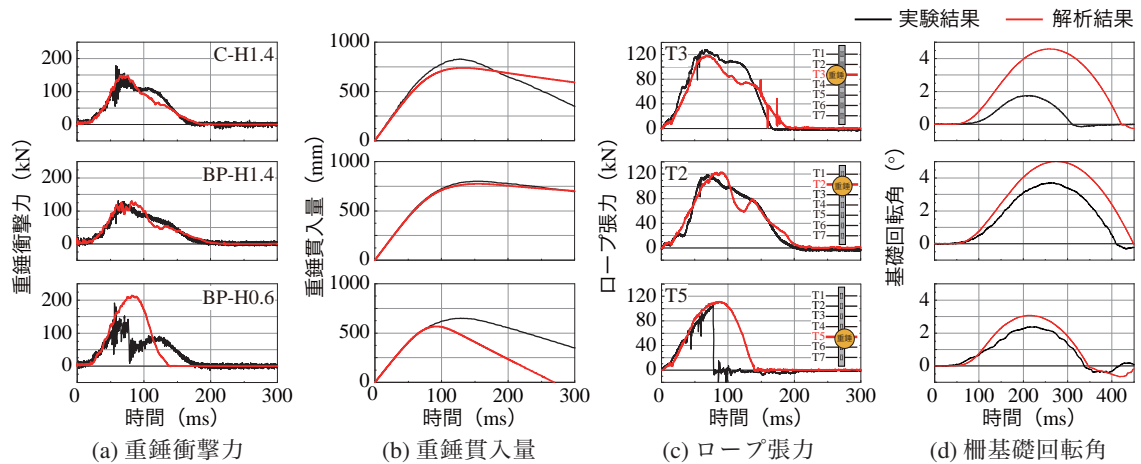


図-4 各種時刻歴応答波形の比較

料物性値一覧を示している。

(b) 図には、ワイヤロープに用いたマルチリニア型の弾塑性体モデルを示している。既往の研究で実施された引張試験により得られた荷重-伸び関係を参考に、応力-ひずみ関係を設定した。なお、降伏強度  $f_y$  および引張強度  $f_u$  は、それぞれ  $f_y = 931 \text{ MPa}$ 、 $f_u = 1,475 \text{ MPa}$  である。

(c) 図には、基礎に用いた応力-ひずみ関係を示している。圧縮側は相当ひずみが 0.15% に達した段階で完全降伏するバイリニア型としている。降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用し、圧縮強度  $f'_c$  は材料試験結果に基づき 28 MPa とした。また、引張側は引張強度に達した段階でカットオフされ、応力が完全に解放されるものとした。引張強度は、圧縮強度の 1/10 に設定している。

その他、U ボルト、重錘、重錘吊り用ワイヤロープおよび基盤は全て弾性体と仮定し、弾性係数、密度およびポアソン比は公称値を用いることとした。すなわち、U ボルトおよび重錘に関しては、弾性係数  $E_s = 200 \text{ GPa}$ 、ポアソン比  $\nu_s = 0.3$  とした。密度に関しては、U ボルトの場合には  $\rho_b = 7.85 \text{ g/cm}^3$  とし、重錘の場合には所定の質量 (1,181 kg) を有限要素モデルの体積で除すことで換算した。基盤に関しては、コンクリート造であることより、弾性係数  $E_c = 20 \text{ GPa}$ 、ポアソン比  $\nu_c = 0.167$ 、密度  $\rho_c = 2.35 \text{ g/cm}^3$  と設定した。

#### 4. 実験結果と数値解析結果の比較および考察

##### 4.1 各種時刻歴応答波形

図-4 には、全ケースに関する各種時刻歴応答波形に関する実験結果を数値解析結果と比較して示している。なお、ロープ張力に関しては衝突位置に最も近いロープの結果を示した。

(a) 図の重錘衝撃力波形に着目すると、C/BP-H1.4 において、実験結果の最大衝撃力は 150 kN 程度、その継続時間は約 100 ms であることが分かる。また、BP-H0.6 の場合には実験時に T5 ロープの引き抜けが発生し、衝撃力は 80 ms 付近で急激に低下している。数値解析結果に着目すると、C/BP-H1.4 の場合には、衝突初期の荷重勾配から最大衝撃力およびその到達時間に至るまでは実験結果を概ね再現していることが分かる。一方、BP-H0.6 の場合には、実

験時に発生したロープの引き抜け現象をモデル化していないことにより、220 kN 程度の重錘衝撃力が発生している。しかしながら、ロープ引き抜け直前までの重錘衝撃力の立ち上がりは、概ね実験結果と一致していることが分かる。

(b) 図に示す重錘貫入量に着目すると、実験結果の重錘は、いずれのケースにおいても最大貫入量を示した後にリバウンド状態に至っていることが分かる。また、最大貫入量は、C-H1.4、BP-H1.4、BP-H0.6 の場合でそれぞれ、827、804、650 mm を示し、衝突位置が低い BP-H0.6 の場合が最も小さい値となっている。数値解析結果に着目すると、C-H1.4 の最大貫入量は実験結果よりも 100 mm 程度小さく、かつリバウンドは実験結果よりも小さく評価されていることが分かる。BP-H1.4 に関する数値解析結果は、重錘の貫入初期からリバウンド後まで実験結果とほぼ対応している。BP-H0.6 の場合には、ロープ引き抜け発生直前までは実験結果とよく対応していることが見て取れる。

(c) 図に示すロープ張力波形に着目すると、実験結果は、いずれのケースにおいても降伏荷重 (= 118 kN) 近傍まで達していることが確認できる。数値解析結果を見ると、C/BP-H1.4 の場合におけるロープ張力波形や継続時間に関する数値解析結果は実験結果とよく対応していることが分かる。また、BP-H0.6 の場合には、重錘衝突後のロープ張力の立ち上がりが実験結果とよく対応していることより、ロープの引き抜けが発生しなかった場合には 111 kN 程度の最大張力が発生したことが推察される。

(d) 図に示す柵基礎回転角に着目すると、実験結果は、いずれのケースにおいても重錘衝突後 50 ~ 100 ms 程度経過した後に回転が生じており、200 ~ 250 ms 経過後に最大回転角に至っている。数値解析結果に着目すると、いずれのケースにおいても、柵基礎は回転していることが分かる。しかしながら、最大回転角度はいずれのケースにおいても実験結果よりも過大に評価している。その差は C-H1.4、BP-H1.4、BP-H0.6 の場合において、それぞれ 3、1、1 度程度である。これは、数値解析モデルにおいて、基礎回転部のズレ止めを基盤と完全に結合していることや柵基礎底面と基盤との接触面が理想化された状態であること等、必ずしも実験時の条件と完全に対応していないことが要因であるものと推察される。

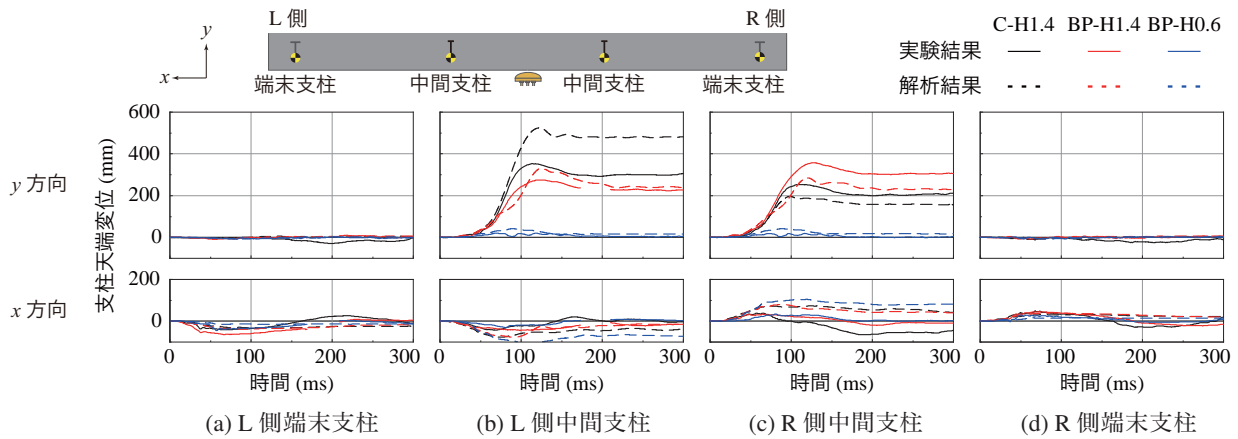


図-5 中間および端末支柱に関する天端変位波形の比較

4.2 中間および端末支柱の天端変位波形

図-5には、中間および端末支柱の天端変位に関する実験結果と数値解析結果を比較する形で示している。なお、各変位は衝突(y)方向およびL側(x)方向を正として表示している。

図より、実験結果の端末支柱は、いずれのケースにおいても両支柱がスパン中央部方向に倒れていることが分かる。また、y方向変位波形はほぼ零を示しており、衝突方向への変形はほぼ生じていないことが分かる。

中間支柱は、C/BP-H1.4の場合には、衝突方向に最大変位を示した後50~100mm程度減少し、それ以降はほぼ一定値を示している。また、両ケースともに重錘衝突位置にズレが生じており、衝突位置に近い支柱の変位が大きく示されていることも確認できる。一方、BP-H0.6の場合には他の2ケースと比較して低い位置に衝突していることにより、その変形量は小さい。

数値解析結果に着目すると、いずれのケースにおいても実験時の実衝突位置を反映して数値解析を実施している。しかしながら、C/BP-H1.4の場合における衝突方向の変位特性は実験結果と大略的な対応をしているものの、L側中間支柱は実験結果に対して過大に、R側中間支柱は過小に評価していることが分かる。

4.3 最大重錘貫入時の支柱軸方向縁ひずみ分布

図-6には、最大重錘貫入量発生時におけるL側中間支柱の衝突面側軸方向縁ひずみ分布に関する実験結果を数値解析結果と比較して示している。なお、実験結果の軸方向縁ひずみは、支柱のウェブに貼付したひずみゲージの出力と断面内の平面保持を仮定することで換算評価した。

実験結果に着目すると、いずれのケースにおいても、支柱基部から0.25m点も含めそれより下の領域では塑性化が進行しているが、それより上の領域ではほぼ弾性状態であることが分かる。

数値解析結果に着目すると、C/BP-H1.4の場合には、支柱基部近傍で非常に大きなひずみが発生しており、実験結果と概ね対応していることが分かる。また、BP式の場合における塑性化の領域は、C型よりも若干上方に推移していることが見て取れる。これは、BP式の場合には支柱が基礎天端において完全に定着されているのに対して、C型の場合には支柱が基礎に埋設されていることにより固定部が基礎内に推移する傾向を示すことによるものと推察され

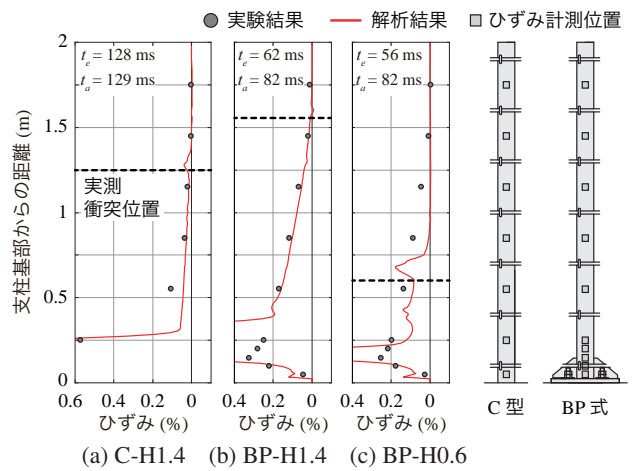


図-6 最大重錘貫入時におけるL側中間支柱軸方向縁ひずみ分布の比較

る。また、载荷位置が低いBP-H0.6の場合に関しても、数値解析結果は実験結果とよく対応していることが分かる。

5. まとめ

- 1) 本研究で提案の解析手法を用いることで、ロープが引き抜ける場合を除いたいずれのケースにおいても、重錘衝撃力、重錘貫入量、ロープ張力波形は実験結果を概ね適切に評価可能である。一方、基礎回転角は、実験結果よりも過大に評価される傾向にある。
- 2) 支柱の天端変位波形や最大重錘貫入時軸方向縁ひずみ分布は、提案の解析手法を用いることで実験結果の性状を概ね適切に評価可能である。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧，2017。
- 2) 山澤文雄，今野久志，安中新太郎，小室雅人，岸徳光：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，土木学会北海道支部論文報告集，Vol. 78，A-31，2022。
- 3) Livemore Software Technology, An Ansys Company：LS-DYNA User's Manual, 2021。