

# 衝突位置を変化させた貫通型落石防護柵支柱に関する衝撃応答解析

Impact response analysis on through-type steel post embedded into prototype rockfall protection wall with different loading height

室蘭工業大学大学院 ○学生員 竹内 観月 (Mizuki takeuchi)  
 室蘭工業大学 正会員 小室 雅人 (Masato Komuro)  
 室蘭工業大学 正会員 瓦井 智貴 (Tomoki Kawarai)  
 勇建設(株) 正会員 林 茂樹 (Shigeki Hayashi)  
 室蘭工業大学 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、落石などから道路交通や人命を守るための対策工として従来型落石防護柵が数多く設置されている。同防護柵は、H形鋼支柱、ワイヤーロープ、ひし形金網および間隔保持材などの比較的安価な部材から構成されており、コンクリート基礎に設置される他、写真-1に示すように無筋コンクリート製落石防護擁壁天端に設置される場合も多い。

防護擁壁に設置される支柱の根入れ深さに関する現行設計法は、落石対策便覧<sup>1)</sup>(以後、便覧)に規定されており、落石衝突による動的な影響を考慮せず、静力学に基づいた考えによって設計が行われている。しかしながら、落石衝突によって支柱埋設部のコンクリート擁壁が剥落する場合も報告されていることから、支柱根入れ深さに関する現行設計法の妥当性を検証するとともに、落石衝突による衝撃荷重を考慮した合理的な設計法を確立することは、重要であるものと考えられる。

このような観点から、本研究では、落石防護擁壁天端に設置する防護柵支柱の根入れ深さに関する合理的な設計手法を確立することを最終目的として、別途実施した载荷位置を変化させた防護柵支柱模型の衝撃荷重载荷実験<sup>2)</sup>を対象に三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。実験結果との比較によって数値解析手法の妥当性を確認するとともに、支柱の根入れ深さに関する解析的検討を行った。本数値解析には、構造解析用汎用コードLS-DYNA<sup>3)</sup>(ver. R9)を使用している。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図-1には、本研究で対象とした防護柵支柱模型の形状寸法を示している。擁壁部については高さ2m、幅3mとし、擁壁の天端幅は500mm、道路側の勾配は1:0.4とした。支柱に関しては、実防護柵支柱として通常使用されているH形鋼(H200×100×5.5×8)を用い、擁壁天端中央に



写真-1 擁壁天端に設置される従来型落石防護柵の例

設置している。また、衝撃荷重作用位置の支柱ウェブには、フランジの局部座屈を防ぐために厚さ6mmの補剛材を溶接している。

本論文では、支柱および擁壁の動的応答特性に及ぼす重錘衝突位置の高さの影響を検討するために、重錘衝突位置の高さを3種類に変化させている。その位置は、支柱に対して曲げが卓越する擁壁天端から1.4mの高さとする場合(以後、FH14試験体)、曲げとともにせん断が卓越する高さ0.6mとする場合(以後、FH6試験体)、およびせん断がより卓越する高さ0.4mとする場合(以後、FH4試験体)とした。

表-1には実験ケースを一覧にして示している。実験は各試験体に対して一度だけ重錘を衝突させることで実施した。重錘の落下高さはいずれも $H=1\text{m}$ とした。なお、FH14とFH6試験体の実測衝突速度は、理論速度( $V=4.43\text{m/s}$ )よりも大きい値となっている。これは、実験時の落下高さは光波測距儀を用いて計測し決定しているが、計測の都合上、重錘重心位置ではなく先端部にターゲットを合わせて実施したことにより、重錘重心位置が計測ターゲットよりも高いことに起因している。表には、実験時におけるコンクリートの圧縮強度 $f'_c$ およびH形鋼の鋼材検査証明書(ミルシート)より得られた降伏応力 $f_y$ も示している。

### 2.2 実験方法および測定項目

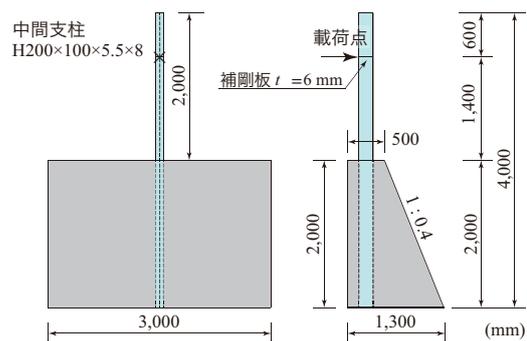


図-1 試験体の形状寸法 (FH14 試験体)

表-1 実験ケース一覧

試験体名	载荷位置 $L$ (m)	設定重錘 落下高さ $H$ (m)	実測重錘 衝突速度 $V$ (m/s)	実測入力 エネルギー $E$ (kJ)	コンクリート 圧縮強度 $f'_c$ (MPa)	H形鋼 降伏強度 $f_y$ (MPa)
FH14	1.4	1.0	5.30	14.0	33.0	350
FH6	0.6		5.65	15.9		
FH4	0.4		4.41	9.7		

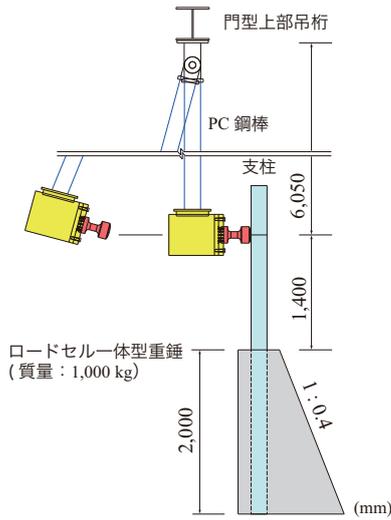


図-2 荷重装置概要

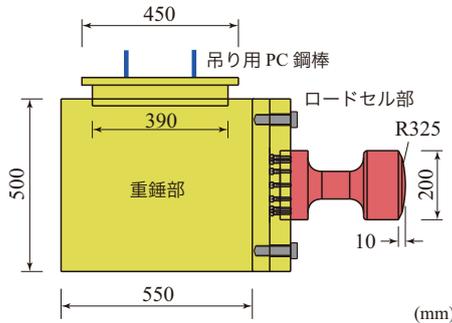


図-3 重錘の形状寸法

図-2には、FH1.4試験体における実験装置の概要図を示している。衝撃荷重は、ロードセル一体型の重錘(質量:1,000 kg)を4本のPC鋼棒( $\phi 17$  mm)を用いて門型クレーン(高さ:約10 m)の上部吊桁に吊り下げ、振り子式により支柱に衝突させることによって荷重した。図-3には、本実験で用いたロードセル一体型の鋼製重錘の形状寸法を示している。ロードセルは、荷重点部の形状は片当たりを防止するために半径325 mmで高さが10 mmの球形状となっている。実験は、各試験体に対して重錘を設定落下高さから一度だけ衝突させることで実施した。また、落石防護擁壁模型はコンクリート基盤上に設置し、荷重時には実構造と同様に基盤に定着せずに擁壁の回転を許容するものとした。なお、荷重による擁壁の運動を回転のみに制限するため、擁壁の道路側端部にはL型鋼のストッパーを設けている。

本実験では、支柱および擁壁の動的応答特性の他に、根入れ深さに関する検討を行うために支柱部にひずみゲージを貼付している。なお、ひずみゲージは支柱とコンクリート間の付着挙動への影響を極力小さくするために、H形鋼のウェブ中心位置から上下のフランジ方向70 mmの位置に貼付した。その貼付位置は、いずれのケースにおいても、擁壁内部に関しては天端から50 mmを基点に100 mm間隔の12断面、それ以降は400 mm間隔で2断面とする合計14断面とし、気中部に関しては荷重位置によって異なり、FH14およびFH6の場合では荷重点位置から下方50

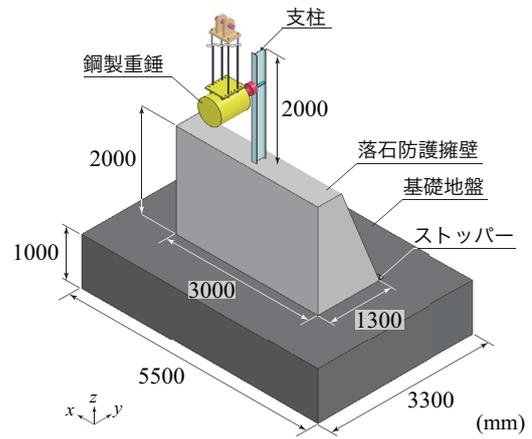


図-4 有限要素モデル(FH14試験体)

mmの位置より100ないし200 mm間隔でそれぞれ8断面、4断面とし、FH4の場合には荷重点から下方50 mmの位置より50 mm間隔で7断面とした。

本実験における測定項目は、1)重錘に内蔵された衝撃荷重測定用ロードセルによる重錘衝撃力 $P$ 、2)重錘の衝突速度 $V$ 、コンクリート擁壁模型の回転 $\theta$ や支柱の変形 $\delta_x$ を評価するための高速度カメラ撮影(2,000 fps)、および3)支柱に貼付したひずみゲージからの軸方向ひずみ $\epsilon_i$ である。なお、実験終了後には、支柱基部近傍に若干のひび割れは確認されたものの、それ以外には認められなかったことより、ひび割れ分布は記録していない。

### 3. 衝撃応答解析の概要

#### 3.1 有限要素モデル

図-4には、本研究で用いた数値解析モデルの一例として、FH14試験体の場合を示している。本解析では、実験における境界条件を適切に反映させるために、試験体における荷重治具および基礎地盤までを考慮してモデル化を行った。また、重錘衝突による支柱基部の局部座屈を適切に再現するために、対称性を考慮せずに構造全体をモデル化している。使用した要素は全て8節点固体要素とし、H形鋼支柱のフランジおよびウェブは板厚方向に4ないし6分割した。また、幅方向の要素長は2~4 mm程度、軸方向には10 mm程度を基本にして、要素分割を行った。なお、計算時間を節約するために、荷重点部上方や擁壁底部近傍の要素分割は徐々に粗くしている。

衝撃荷重は、重錘要素を支柱フランジと接する形で配置し、表-1に示す実測重錘衝突速度 $V$ を重錘要素の全節点に付加することで与えた。拘束条件は、基礎地盤の底部および側面を完全固定、重錘吊り下げ治具の上部をピン支持とした。また、ボルトを用いて接続している箇所や、H形鋼と補剛材の接続は、節点を共有することで結合することとした。一方、ロードセルと重錘胴体間には、ボルトなどのモデル化を省略し接触面によるタイド条件を設定することにより完全結合とした。接触条件については、重錘と支柱間、擁壁とストッパー間には剥離・滑りを考慮した面と面の接触を定義しており、実験時と同様に重錘衝突によって擁壁の回転が可能となるように設定した。支柱と擁壁間には付着特性を考慮せず剥離・滑りを考慮した面と面の接触を定義している。なお、予備解析より摩擦係数は0.3と

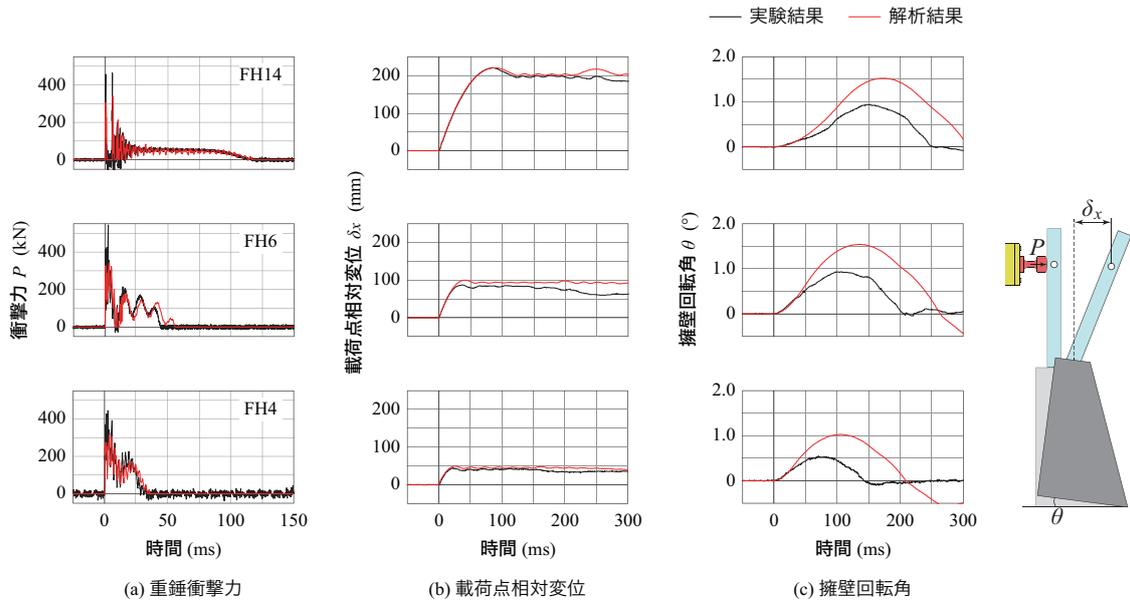


図-6 各種時刻歴応答波形の比較

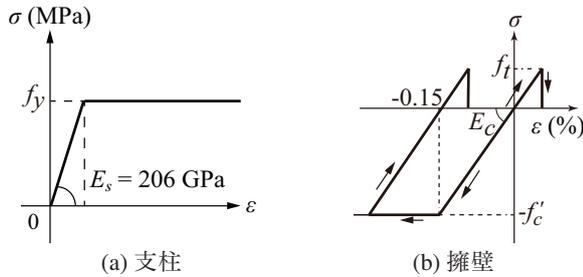


図-5 材料構成則

仮定した。

本解析では、重力を考慮することとし、解析モデル全体に重力加速度を作用させ応力が安定した状態であることを確認後、衝撃荷重を作用させている。なお、減衰定数  $h$  は質量比例成分のみを考慮することとし、予備解析に基づき 5% と設定した。

### 3.2 材料構成則

図-5には、本数値解析で用いた H 形鋼支柱およびコンクリート擁壁の応力-ひずみ関係を示している。予備解析の基に、支柱には降伏後の塑性硬化による影響を無視し、(a) 図に示すようなバイリニア型の完全弾塑性体モデルを適用した。単位体積質量  $\rho_s$  およびポアソン比  $\nu_s$  は、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_s = 0.3$  とした。なお、降伏応力は鋼材の検査証明書(ミルシート)を参考に表-1 に示す値を用いた。降伏判定には von Mises の降伏条件を用いている。

(b) 図には、コンクリート要素に適用した応力-ひずみ関係を示している。圧縮側は圧縮強度に到達した段階で完全降伏するバイリニア型、引張側は引張強度に到達した段階で引張応力を伝達しないモデルを採用した。圧縮強度  $f'_c$  は、材料試験結果に基づき表-1 示す値を用いた。引張強度は圧縮強度の 1/10 と仮定した。単位体積質量  $\rho_c$  およびポアソン比  $\nu_c$  は、 $\rho_c = 2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_c = 0.167$  を用いた。

重錘、载荷治具および基礎地盤要素に関しては、実験時

に塑性変形が確認されていないことより、全て弾性体モデルを適用することとした。これらの要素に関する弾性係数、密度およびポアソン比は公称値を用いた。なお、重錘の単位体積質量  $\rho_w$  には、重錘質量を解析モデルの体積で除した値を入力している。

ひずみ速度効果に関しては、本研究で対象としている载荷速度が低速度域であること、および数値解析の簡易化を図るため、ここでは考慮しないこととした。

## 4. 結果および考察

### 4.1 各種時刻歴応答波形

図-6には、本数値解析より得られた全3ケースの各種時刻歴応答波形を実験結果と比較する形で示している。なお、载荷点変位は擁壁の回転成分を除去した相対変位である。

(a) 図に示す重錘衝撃力波形に着目すると、実験結果は、FH6/4 試験体で衝突初期の継続時間が 10 ms 程度の正弦半波と高周波成分を伴う第一波その後の低周波成分から構成されていることが分かる。一方、FH14 試験体の場合には、正弦半波の波形が示されずに高周波成分のみが励起している。また、载荷初期以降の低周波成分が卓越する領域に着目すると、载荷位置が低いほど周期が短く振幅が大きく示されるとともに、継続時間も短くなる傾向にあることが分かる。一方、数値解析結果に着目すると、重錘衝突初期の高周波成分を伴った第一波やその後の低周波成分波形に至るまで、数値解析結果は実験結果をほぼ適切に再現していることが分かる。

(b) 図に示す载荷点の相対変位波形に着目すると、载荷位置の高さの増加に対応して相対変位が大きくなっていることが分かる。この傾向は、数値解析結果でも同様に確認される。なお、解析結果と実験結果を比較すると、FH6 試験体における最大変位が実験結果と比べて若干過大に評価しているものの、数値解析結果は実験結果の波形性状を概ね再現していることが分かる。

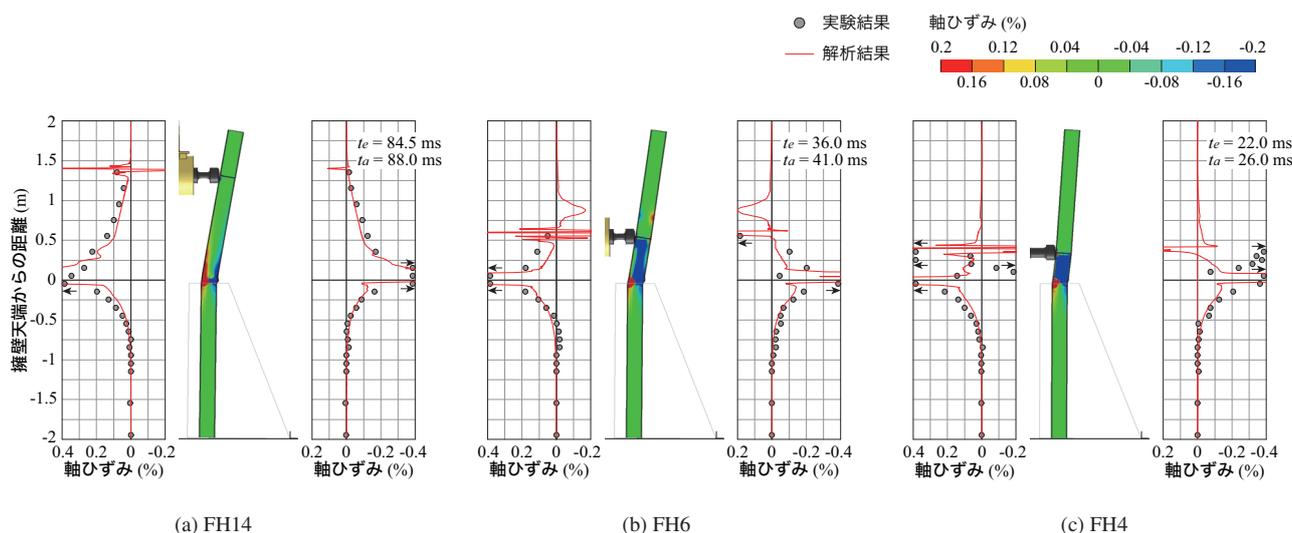


図-7 支柱の軸方向ひずみ分布の比較

(c) 図に示す擁壁の回転角波形を見ると、実験結果では、FH14 試験体を除き、荷重位置の高さに対応して最大回転角も増加傾向にあることが確認される。なお、FH14 試験体の場合には他の試験体よりも曲げが卓越する傾向にあり、基部近傍に発生した局部座屈変形に多くのエネルギーが消費されたことにより、FH6 試験体と同程度の最大回転角を示したものと考えられる。数値解析結果の回転角は、いずれの場合も実験結果よりも過大に評価しており、その再現が難しいことが分かる。

#### 4.2 支柱縁軸方向ひずみ分布

図-7には、各試験体における最大変位発生時の支柱軸方向縁ひずみ分布を、実験結果と解析結果を比較する形で示している。なお、実験結果の軸方向ひずみ  $\epsilon_i$  は、支柱のウェブに貼付した2点のひずみゲージ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。また、数値解析結果から得られる支柱の軸方向ひずみ分布図も合わせて示している。

まず、実験結果の気中部のひずみ分布に着目すると、FH14 試験体の場合には、荷重点から基部に至るひずみ分布は圧縮側と引張側ともにやや放物線状の分布性状を示している。また、支柱基部近傍において0.2%を超えるひずみが発生しており、降伏域に達していることが分かる。FH6 試験体の場合には、荷重側基部近傍においてFH14 試験体の場合と同様に大きなひずみが発生していることが分かる。なお、FH4 試験体のひずみ分布は乱れており、片持ち梁のひずみ分布性状とは大きく異なっている。これは、荷重点が基部に近いことから、たわみ剛性が大きいことにより発生衝撃力も大きくなったことが要因として挙げられる。一方、擁壁内部のひずみ分布を見ると、いずれの試験体もその分布は類似しており、荷重位置の影響は小さいことが分かる。また、天端から下方に150 mm程度まではいずれの場合も降伏ひずみ ( $\epsilon_y \approx 0.15\%$ ) に到達しており、支柱基部近傍の擁壁内部でも塑性化に至っていることが見て取れる。なお、深さ方向へのひずみ分布性状を見ると、いずれの試験体も零ひずみに漸近する性状を示していることが分かる。

次に、数値解析結果に着目すると、荷重点近傍では非常

に大きなひずみが発生しているものの、荷重点から基部に至るひずみ分布は実験結果を概ね再現していることが分かる。また、擁壁埋設部についても、天端に近い領域において実験結果よりも小さな値を示す傾向が確認されるものの、零ひずみに至る深さは実験結果とほぼ一致している。なお、支柱軸方向ひずみが零となる根入れ深さは、実験結果では500~750 mm程度であるのに対し、数値解析結果では800 mm程度として評価される。

#### 5. まとめ

本論文では、落石防護擁壁上に設置する防護柵支柱の根入れ深さを決定するための合理的な設計手法の確立を最終目的とし、別途実施した荷重位置を変化させた防護柵支柱模型の衝撃荷重荷重実験を対象に三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。また、実験結果を数値解析結果と比較することで、同解析手法の妥当性および支柱の根入れ深さに関して検討を行った。本研究で得られた事項を整理すると、以下のように示される。

- 1) 各種時刻歴応答波形に関しては、解析結果は衝撃力波形および支柱の荷重点変位を概ね適切に評価可能である。また、擁壁回転角に関しては、実験結果よりも過大な評価となる。
- 2) 支柱の軸方向ひずみ分布に関する解析結果は、擁壁内も含めて実験結果と大略一致する。また、解析結果による支柱の必要根入れ深さは800 mm程度と評価され、実験結果よりも若干大きい。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧, 2017.
- 2) 岡本淳敏, 近藤里史, 小室雅人, 岸徳光：実規模擁壁に貫通させた防護柵支柱の静的及び衝撃荷重荷重実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, No. 2, pp. 463-468, 2021.
- 3) Hallquist, J. O.: *LS-DYNA User's Manual*, Livermore Software Technology Corporation, 2018.