

根入れ深さを变化させた落石防護柵支柱に関する衝撃応答解析

Impact response analysis on steel post for rockfall protection fence embedded into concrete wall varying anchoring depth

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、落石から道路交通や人命を守るための落石対策工の一つ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、コンクリート基礎上に設置される他、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。落石防護擁壁天端に設置される場合においては、支柱は無筋コンクリート躯体内に埋設されるのが一般的である。

防護擁壁に埋設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¹⁾に基づき、落石衝突による動的な影響は考慮せず、静力学に基づいた考え方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事例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、喫緊の課題であるものと考えられる。また、この種の検討を実施する場合には、実験的検討と合わせて、経済性の観点から数値解析的検討も肝要である。

このような観点から、本研究では、根入れ深さが異なる

防護柵支柱の耐衝撃挙動を適切に評価可能な数値解析手法の確立を目的として、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、別途実施した実規模衝撃荷重実験結果との比較を行うことによって、提案手法の妥当性について検討を行った。なお、本数値解析には、構造解析用汎用コードLS-DYNA²⁾(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。擁壁部は、高さ2m、幅3m、天端幅を500mmとし、道路側の勾配を1:0.4とした。支柱は、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、擁壁天端中央に設置している。重錘は、衝撃荷重によって曲げと共にせん断が卓越する場合を想定し、防護擁壁天端から0.4mの高さに作用させることとした。なお、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。本研究では、支柱の根入れ深さによる支柱および擁壁の動

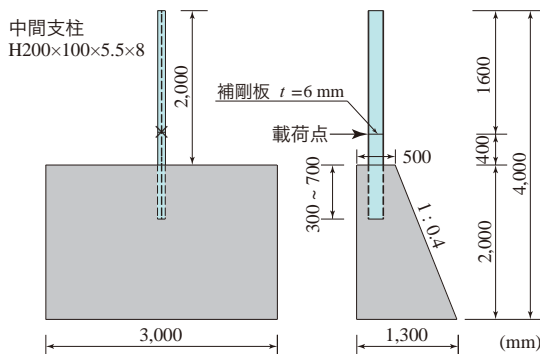


図-1 試験体の形状寸法

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)	設定重錘設定速度 V (m/s)	実測重錘衝突速度 V' (m/s)	実測入力エネルギー E (kJ)
PS7-H1	0.4	1	4.43	4.40	9.7
PS5-H1				4.38	9.6
PS3-H1				4.50	10.1
PS7-H2	0.4	2	6.26	6.16	19.0
PS5-H2				6.21	19.3
PS3-H2				6.31	19.9

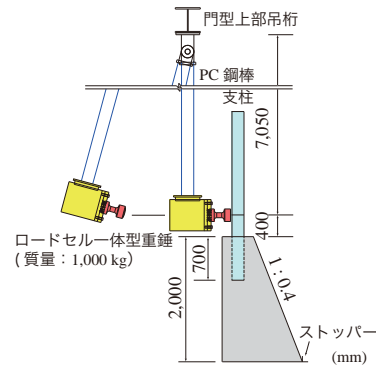


図-2 载荷装置概要

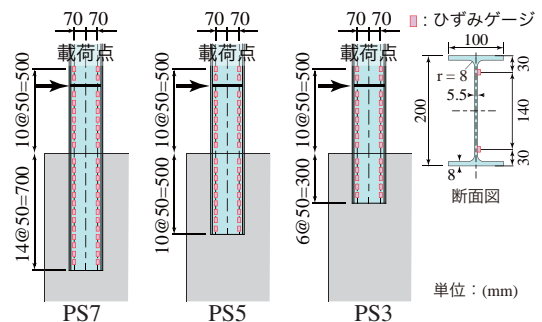


図-3 ひずみゲージの貼り付け位置

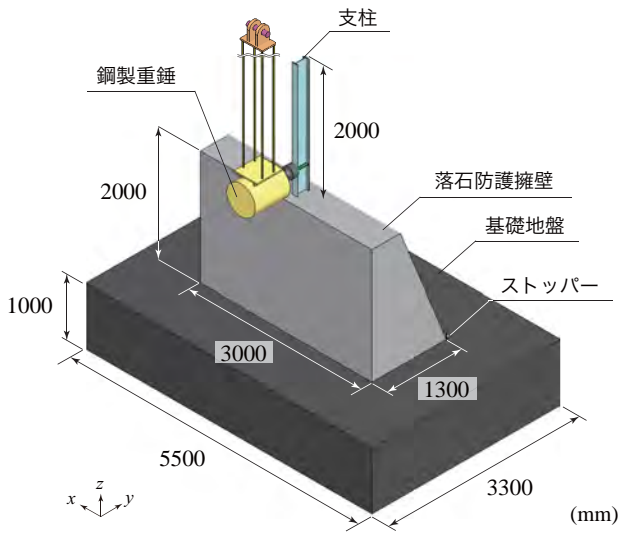


図-4 有限要素モデル

的応答特性への影響を検討するために、根入れ深さを3種類に変化させることとした。その根入れ深さは、700 (以後、PS7 試験体)、500 (以後、PS5 試験体)、300 mm (以後、PS3 試験体)である。

表-1には実験ケースの一覧を示している。表中の第1項目のPSは曲げと共にせん断が卓越する荷重方法であることを示し、後続の数値 n は根入れ深さ ($n \times 100$ mm) を表している。第2項目のHは衝撃荷重実験で重錘の設定落下高さであることを示し、後続の数値はその落下高さ (m) を表している。また、表には、重錘が支柱に衝突する直前の速度 V' (m/s)、およびその速度から換算した入力エネルギー E (kJ) も示している。

2.2 実験方法および測定項目

図-2には、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、振り子式によって支柱に衝突させることにより荷重した。実験は、重錘を設定落下高さから一度だけ衝突させることにより実施した。落石防護擁壁模型はコンクリート基盤上に設置し、実構造と同様に基盤に定着せずに回転を許容するものとした。なお、荷重による擁壁の水平移動を抑制するために、擁壁の道路側つま先部にはL形鋼を用いたストッパーを設置している。

図-3には、本実験で使用した支柱部のひずみゲージ貼付位置を示している。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フランジ方向70 mmの位置に貼付した。その軸方向貼付位置は、擁壁内部に関しては天端から50 mmの位置を基点に50 mm間隔とし、PS7, PS5, PS3 試験体でそれぞれ13, 9, 5断面とした。気中部に関しては、荷重点から上方においては50 mmの位置を基点に50 mm間隔で2断面、下方においては50 mmの位置を基点に50 mm間隔で7断面とする合計9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 θ や支柱の変形 δ_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

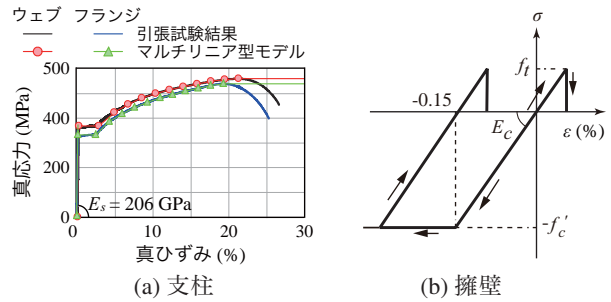


図-5 材料構成則

表-2 H形鋼支柱の各真応力, 真ひずみ値

	降伏強度 f_y (MPa)	降伏ひずみ ϵ_{uw} (%)	引張強度 f_t (MPa)	引張強度到達時ひずみ ϵ_{uw} (%)
ウェブ	373	0.19	560	21.3
フランジ	343	0.17	532	19.2

柱に貼付したひずみゲージからの軸方向ひずみ ϵ_i である。

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を示している。本解析では、実験における境界条件を可能な限り適切に反映させるために、試験体の他、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。接触条件に関しては、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、予備解析結果に基づいて、摩擦係数は0.3と仮定した。

3.2 材料構成則

表-2には、本解析で用いたH形鋼支柱の物性値を、図-5には、本数値解析で用いたH形鋼支柱ウェブ、フランジ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。

(a) 図より、H形鋼支柱には材料試験の結果から得られ

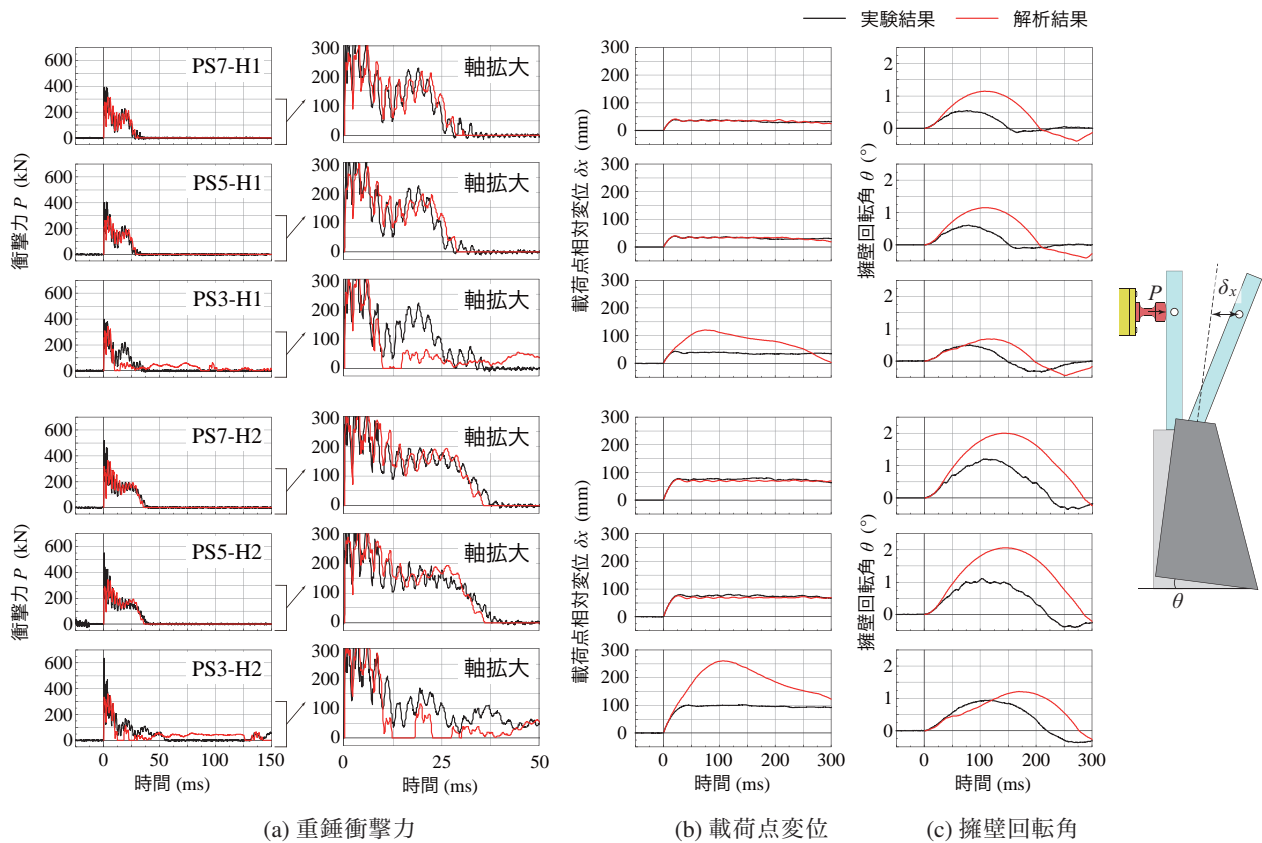


図-6 各種時刻歴応答波形の比較

た応力-ひずみ関係を基に、マルチニア型のモデルを適用した。図に示すように、ウェブおよびフランジ部には、それぞれ材料試験結果から得られた応力-ひずみ関係を設定し、表-2に示すように真応力-真ひずみに換算した値を入力した。単位体積質量 ρ_s およびポアソン比 ν_s には公称値を用いることとし、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_s = 0.3$ とした。降伏判定には von Mises の降伏条件を用いている。

(b) 図より、コンクリート要素には、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 30 MPa とし、引張強度は圧縮強度の 1/10 と仮定した。単位体積質量 ρ_c およびポアソン比 ν_c には公称値を用いることとし、 $\rho_c = 2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_c = 0.167$ を用いた。

重錘、荷点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。また、これらの要素に関する弾性係数、密度およびポアソン比には公称値を用いた。なお、重錘の単位体積質量 ρ_w 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。

4. 数値解析結果および考察

4.1 各種応答時刻歴応答波形

図-6には、本数値解析より得られた全ケースに関する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、荷点変位は擁壁の回転成分を除去した値を示している。

(a) 図に示す重錘衝撃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正弦半波と高周波成分を伴う第一波および、その後の低周波成分から構成されていることが分かる。また、波形の継続時間は、PS7/5 試験体に関しては、落下高が $H = 1 \text{ m}$ 、 2 m の場合でそれぞれ 35 ms、40 ms 程度である。PS3 試験体に関しては、落下高 $H = 1 \text{ m}$ の場合には PS7/5 試験体と類似の波形性状を示しているものの、その継続時間は両試験体よりも数 ms 長い。また、落下高 $H = 2 \text{ m}$ の場合における波動の継続時間は 55 ms 程度であり、PS7/5 試験体と比較して長い。

数値解析結果に着目すると、数値解析結果は PS7/5 試験体の場合において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実験結果をほぼ適切に再現していることが分かる。一方で PS3 試験体の場合における数値解析結果は、重錘衝突初期の高周波成分を伴った第一波目は概ね再現できているものの、その後の低周波成分波形に関しては実験結果よりも長く評価されていることが確認できる。

(b) 図に示す荷点変位波形に着目すると、実験結果は、いずれのケースにおいても落下高にかかわらず最大値を示した後に変位が残留していることが分かる。この傾向は、PS7/5 試験体における数値解析結果においても同様に確認でき、実験結果の波形性状を概ね再現していることが分かる。一方で、PS3 試験体の場合における数値解析結果は、最大変位が実験結果と比較して過大に評価する傾向を示している。

実験結果において、PS3 試験体の場合には、根入れ深さが不足していることより、他の 2 試験体と比較してその挙動性状が異なっている。数値解析結果においても、PS3 試

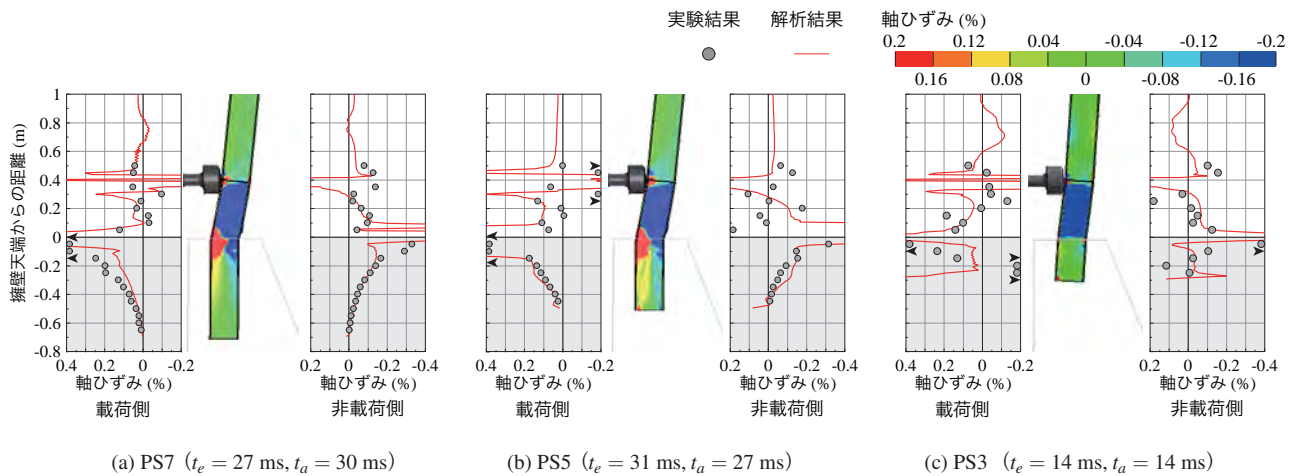


図-7 $H = 2$ m のケースにおける支柱の軸方向ひずみ分布の比較

験体の挙動性状が PS7/5 試験体と異なっていることより、その傾向は対応しているものと判断される。

(c) 図に示す擁壁の回転角波形を見ると、実験結果からは、その角度は、支柱の根入れ深さによらず、いずれも同程度であることがわかる。一方で、数値解析結果は、いずれの試験体の場合に対しても実験結果よりも過大に評価しており、再現できていないことがわかる。

4.2 支柱縁軸方向ひずみ分布

図-7には、重錘落下高 $H = 2$ m の場合に関して、各試験体の最大変位発生時における支柱軸方向縁ひずみ分布を、実験結果と数値解析結果を比較して示している。図中、数値解析結果から得られた支柱の軸方向ひずみコンター図も合わせて示している。なお、PS3 試験体の比較図は、第一波の衝撃力波形が伝搬した 14 ms 時点における結果である。また、実験結果の縁ひずみ ε_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結果である。

まず、実験結果の気中部のひずみ分布に着目すると、載荷点から基部に至るひずみ分布はいずれのケースにおいても乱れており、片持ち梁の静的なひずみ分布性状とは大きく異なっていることが分かる。これは、載荷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衝撃力も大きくなったことによるものと推察される。

一方、擁壁内部のひずみ分布を見ると、天端から下方 150 mm 程度まではいずれの試験体の場合も降伏ひずみ ($\varepsilon_y \approx 0.18\%$) に到達しており、擁壁内部の支柱基部近傍域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、PS7/5 試験体の場合には零ひずみに漸近する性状を示しており、端部は固定支持状態の傾向を示していることが分かる。一方で、PS3 試験体の場合には、擁壁天端から 250 mm 程度の位置においても 0.4% 以上の大きなひずみが発生しており、また根入れ端部では零ひずみに漸近せず固定状態に至っていないことがわかる。

数値解析結果に着目すると、載荷点近傍では非常に大きなひずみが発生しているものの、載荷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、擁壁埋設部において、PS7/5 試験体の場合には天端に近い領域では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対応していることがわかる。

一方、PS3 試験体の場合には、実験結果と解析結果に差異があるものの、実験結果と同様に支柱の根入れ端部では大きなひずみが発生していることが見て取れる。このことから、数値解析結果は、必要根入れ深さが 500 mm 程度であることを示す実験結果を適切に再現していることが明らかになった。

5. まとめ

本論文では、根入れ深さが異なる防護柵支柱の耐衝撃挙動を適切に評価可能な数値解析手法の確立を目的として三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、別途実施した衝撃荷重載荷実験結果との比較によってその妥当性に関する検討を行った。本研究で得られた事項を整理すると、以下のよう

- 1) 提案の数値解析手法は、PS3 試験体を除き、衝撃力波形および支柱の載荷点変位波形を概ね適切に評価可能である。また、擁壁回転角波形に関しては、実験結果よりも過大な評価となる。
- 2) PS3 試験体の実験結果は、根入れ深さが不足していることにより他の 2 試験体の挙動性状とは異なる。数値解析結果においても、その傾向は概ね対応している。
- 3) 支柱の軸方向ひずみ分布に関する数値解析結果は、擁壁内も含めて実験結果と大略一致する。また、提案の数値解析手法は、実験結果より得られる支柱の必要根入れ深さを適切に評価可能であることが明らかになった。

6. 謝辞

本論文の作成にあたり、室蘭工業大学構造力学研究室内の久井昭史君、高田柊君をはじめとする学生諸君には、実験計測、データ分析など多大な支援を頂いた。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧, 2017.
- 2) Hallquist, J. O.: *LS-DYNA User's Manual*, Livermore Software Technology Corporation, 2018.