

高曲げ剛性を有する落石防護柵支柱の 曲げとせん断が連成する衝撃荷重载荷に関する衝撃応答解析

Impact response analysis of steel posts with high flexural stiffness for rockfall protection fence
under combining flexural and shearing actions

勇建設(株) ○正会員 林 茂樹(Shigeki Hayashi) 室蘭工業大学 正会員 小室 雅人(Masato Komuro)
(株)砂子組 正会員 近藤 里史(Satoshi Kondo) (株)砂子組 正会員 佐藤 昌志(Masashi Sato)
室蘭工業大学 正会員 瓦井 智貴(Tomoki Kawarai) 勇建設(株) 正会員 岡本 淳敏(Atsutoshi Okamoto)
室蘭工業大学大学院 学生員 高田 柊(Shu Takada) 室蘭工業大学 名誉会員 岸 徳光(Norimitsu Kishi)

1. はじめに

著者らは、これまで、衝撃荷重载荷時の動的挙動特性を考慮した落石防護柵支柱の根入れ深さに関する合理的設計法の確立を最終目的として、数多くの屋外実規模実験を実施してきた。これらの実験では、防護柵高さが2 mで支柱にはH200×100×5.5×8断面のH形鋼を用いている。一方で、防護柵高が4 m程度の場合には、通常防護擁壁(以下、擁壁)の高さも3 m以上と高くかつ支柱にも曲げ剛性の大きいH200×200×8×12断面のH形鋼が用いられている。

このような場合における支柱の根入れ深さに関しては、現行設計要領(根入れ深さ: 1,000 mm, 擁壁天端幅: 600 mm)の妥当性を数値解析的に検討¹⁾し、支柱の定着長が力学的に十分確保されていることを明らかにしている。しかしながら、最適な根入れ深さや擁壁の天端幅を変化させた場合等に関しては、設計法の妥当性を含め十分に検討が行われていない。

このような観点から、本研究では、擁壁高3 mの天端に柵高が4 mの防護柵を設置する場合を対象に、曲げとせん断が連成するような衝撃荷重载荷時における支柱の根入れ深さに関する数値解析的検討を行うこととした。なお、支柱の根入れ深さに関しては、拘束効果等埋設する擁壁の形状寸法も影響することから、擁壁の天端幅を慣用的に決定されている場合よりも100 mm増幅させた場合についても検討を行うこととした。本数値解析は、構造解析用汎用コードLS-DYNA²⁾(ver. R15)を用いて、柵高が2 mの場合における実規模実験結果との比較によってその妥当性が検証されている手法³⁾を踏襲して行うこととした。

2. 数値解析概要

2.1 落石防護擁壁および支柱の概要

図-1には、本研究で対象とした落石防護擁壁および支柱の形状寸法を示している。本研究で用いた擁壁の基本寸法は、北海道開発局道路設計要領⁴⁾(以下、設計要領)を参考に高さ3 m、支柱1本が分担する幅3 mとし、天端幅600 mm、道路側の勾配を1:0.4とした。天端幅に関しては、擁壁の拘束効果を検討するために、設計要領⁴⁾に準ずる600 mmとする場合の他、100 mm増幅させた700 mmの2種類とした。

支柱には、柵高4 m以上の場合における実防護柵の中間支柱として通常使用されているH200×200×8×12断面のH形鋼を用い、根入れ深さは予備解析に基づき700, 600, 500, 400 mmの4種類に変化させることとした。また、既

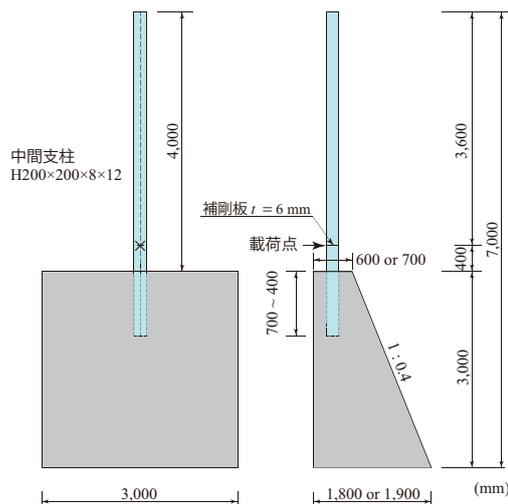


図-1 落石防護擁壁および支柱の形状寸法

往の研究³⁾と同様に擁壁天端中央に支柱を埋設設置するとともに、その柵高は4 mと設定した。载荷点には、既往の衝撃荷重载荷実験と同様に、フランジの局部屈曲を防ぐために厚さ6 mmの補剛材を設置している。

载荷位置は、曲げとせん断が連成して作用する場合を想定して擁壁天端から400 mmの高さとした。また、より実挙動に近い条件とするため、擁壁底面は固定せず道路側つま先部にアングル材を設置して回転のみを許容した。なお、H形鋼の強軸方向に関する断面二次モーメントは、既往の研究³⁾で使用したH200×100×5.5×8の場合には $1.81 \times 10^7 \text{ mm}^4$ であるのに対し、本研究で対象としたH200×200×8×12の場合には、約2.6倍の $4.72 \times 10^7 \text{ mm}^4$ である。

2.2 数値解析ケース

表-1には、本研究で実施した数値解析ケースの一覧を示している。表中の第1項目の“PS”は実規模擁壁および支柱を用い曲げとせん断が連成して作用する位置(擁壁天端から0.4 m)に衝撃荷重を作用させることを示し、後続の数値nは根入れ深さ(n×100 mm)を表している。なお、擁壁天端幅を広く(700 mm)した場合に関しては、2項目として“w”を付している。数値解析は、1,000 kgの重錘を用い、その落下高さは、H200×200×8×12断面のH形鋼の可能吸収エネルギーと同程度であるH=5 mとした。コンクリートの圧縮強度 f'_c は、既往の実規模実験³⁾で実施した材料試験結果と同様の値を設定し、30 N/mm²とした。

表-1 数値解析ケース一覧

ケース名	荷重位置 P (m)	根入れ 深さ d (mm)	擁壁 天端幅 W (mm)	設定重錘 落下高 H (m)	入力重錘 衝突速度 V (m/s)	入力 エネルギー E (kJ)
PS7	0.4	700	600	5.0	9.9	49.0
PS6		600				
PS5		500				
PS4		400	700			
PS7w		700				
PS6w		600				
PS5w		500				
PS4w	400					

2.3 有限要素モデルおよび境界条件

図-2には、本研究で用いた有限要素モデルを示している。本研究では、条件を既往の研究³⁾と可能な限り等しくし、実験時における境界条件の影響を適切に反映させるために、試験体の他、荷重治具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。

H形鋼支柱のフランジおよびウェブに関しては、板厚方向に4ないし6分割し、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ている。また、計算時間を節約するために、擁壁底部近傍の要素分割は徐々に粗くしている。なお、本数値解析では、重力は考慮しているものの、H形鋼の初期不整や減衰は簡略化して考慮していない。本モデルの総節点数および総要素数は、それぞれ130万、120万程度である。

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に示す設定重錘衝突速度 V を重錘要素の全節点に付加することで与えた。重錘吊り下げ治具の上部はピン支持としている。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関しては、接触面によるタイド条件を設定することによって完全結合とした。

接触条件に関しては、重錘と支柱間、擁壁とストッパー間、擁壁とコンクリート基盤間には剥離・滑りを考慮した面と面の接触を定義しており、実験時と同様に擁壁が重錘衝突によって回転できるように設定した。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、接触条件に関しては、予備解析に基づき摩擦係数を0.3と仮定した。接触解析にはペナルティ法を採用している。

2.4 材料構成則

図-3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に適用した応力-ひずみ関係を、表-2には、H形鋼支柱の物性値一覧を示している。本研究では、実構造物により近い条件下で検討を行うこととし、各材料物性値には実規模実験³⁾と同様の数値を採用した。なお、実規模実験³⁾では、H形鋼ウェブおよびフランジからの試験片を用いて引張試験を行っている。

(a)図より、H形鋼支柱には材料試験の結果から得られた真応力-真ひずみ関係を基に、マルチリニア型のモデルを適用した。なお、引張強度以降に関しては、塑性硬化を

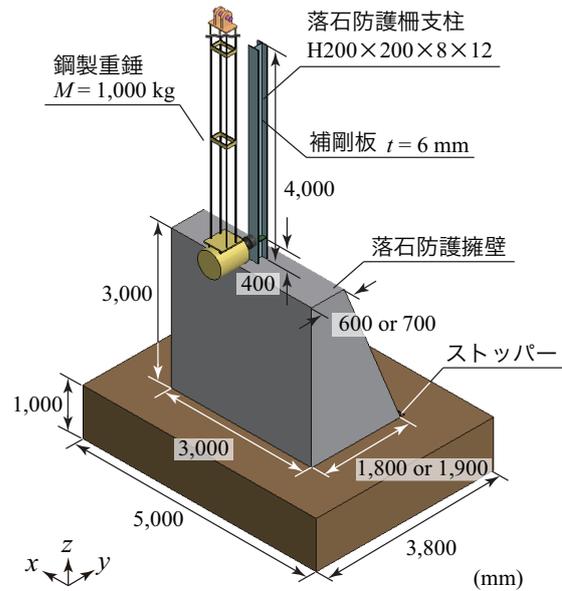


図-2 有限要素モデル

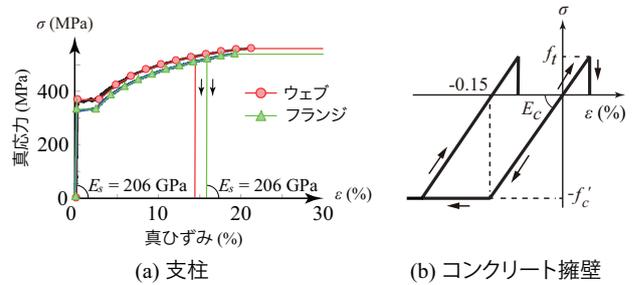


図-3 材料構成則

表-2 H形鋼支柱の材料物性値

	降伏強度 f_y (MPa)	降伏ひずみ ϵ_y (%)	引張強度 f_u (MPa)
ウェブ	368	0.19	560
上下フランジ	326	0.17	532

考慮せず応力一定として設定した。また、圧縮側の応力-ひずみ関係は引張側と同じものを採用した。単位体積質量 ρ_s およびポアソン比 ν_s は、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_s = 0.3$ 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 N/mm²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。

重錘と荷重治具(鋼材)およびコンクリート基盤要素に関しては、全て弾性体モデルとした。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ている。なお、重錘の単位体積質量 ρ_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。

3. 数値解析結果および考察

3.1 各種時刻歴応答波形

図-4 (a)には、本数値解析において重錘先端部における接触反力から得られた重錘衝撃力 P_i に関する時刻歴応答波形を示している。図には、載荷後 300 ms までと載荷初期の波形と共に、全塑性荷重 P_p および降伏荷重 P_y も示している。なお、上段の図は設計要領⁴⁾に準じた天端幅 (600 mm)、下段の図は天端幅を増幅した場合 (700 mm) について示している。図より、いずれの天端幅や根入れ深さにおいても、載荷初期に最大衝撃力値を示した後、450 kN 程度まで除荷後、継続時間が 22.5 ms 程度の衝撃力平坦域を形成していることが分かる。平坦域における平均的な衝撃荷重は静的な降伏荷重 P_y あるいは全塑性荷重 P_p にほぼ対応していることが見て取れる。また、衝撃力の継続時間はいずれも 27 ms 程度であるものの、ケース PS5, PS4, PS4w の場合には僅かに継続時間が延びていることが分かる。既往の研究³⁾より、根入れ深さが不足している場合における衝撃力の継続時間は、根入れ深さが十分確保している場合に比較して延びることが明らかになっている。これより、ケース PS5, PS4, PS4w の場合には根入れ深さが不足していることが推察される。

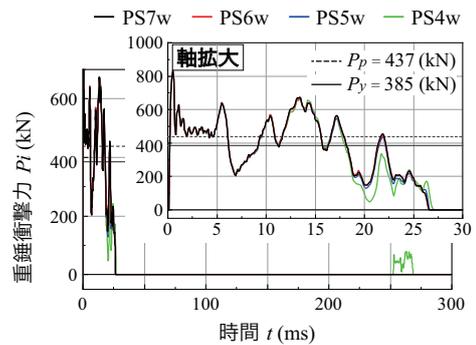
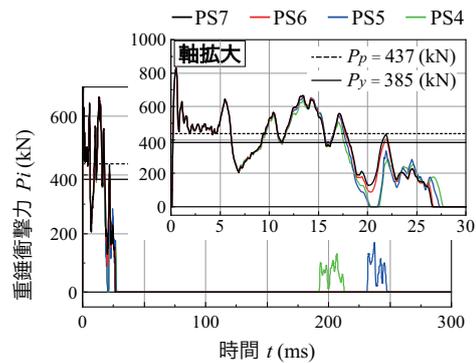
図-4 (b)には、本数値解析より得られた支柱の載荷点変位 δ_x に関する時刻歴応答波形を示している。上段に示す天端幅 600 mm の場合に注目すると、根入れが浅くなることに対応して振動周期が増加傾向を示し、最大載荷点変位も大きい値を示していることが分かる。下段に示す天端幅 700 mm の場合に注目すると、ケース PS7w, PS6w の場合には同様の波形性状を示している。一方で、他の 2 ケースの場合には、根入れ深さの減少に対応して振動周期や最大載荷点変位は増加傾向を示している。特にケース PS4w の場合には周期、最大載荷点変位共に他の 3 ケースの場合と比較して大きな値を示していることから、支柱の根入れ深さが不十分であることが推察される。

3.2 支柱軸方向ひずみ分布

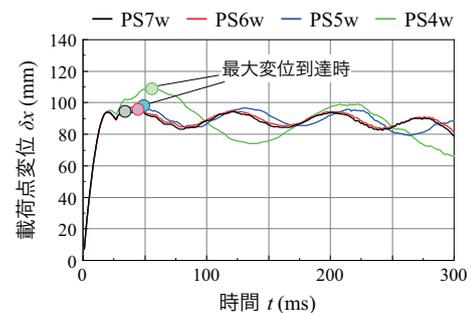
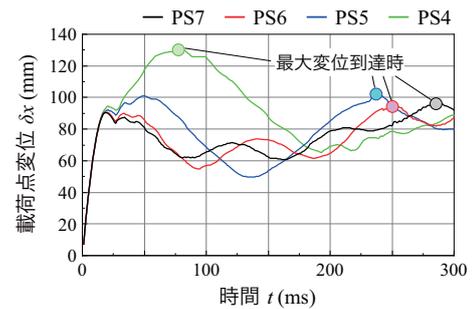
図-5には、本数値解析終了時点 ($t = 300$ ms) における支柱基部の変形および軸方向ひずみコンターを示している。

図より、いずれの解析ケースの場合においても、載荷側フランジ基部近傍には降伏ひずみ以上の引張ひずみが発生していることが分かる。また、支柱の擁壁基部近傍部から載荷点間において、ウェブ部は著しいせん断変形に至っていることが確認できる。天端幅 600 mm の場合に注目すると、ケース PS4 の場合には載荷側フランジ根入れ端近傍部において塑性ひずみ以上の引張ひずみが発生していることが確認できる。この傾向は根入れの深いケース PS7, PS6 の場合には確認できない。一方で、ケース PS5 の場合においても僅かに同様の引張ひずみの発生が確認できることより、ケース PS5, PS4 の場合には根入れが不足している可能性が示唆される。天端幅 700 mm の場合に注目すると、ケース PS5w, PS4w の場合にはケース PS5, PS4 の場合に見られた載荷側フランジ根入れ端部の引張ひずみは確認されない。これは、天端幅が増幅したことによって擁壁の拘束効果が発揮されたことによるものと推察される。

なお、支柱の根入れ端部の引き抜け量は、ケース PS4 を除いていずれも約 5 mm 以内に収まっているのに対して、ケース PS4 の場合には約 16 mm と非常に大きな値を示し



(a) 重錘衝撃力



(b) 載荷点変位

図-4 各種時刻歴応答波形

ている。これより、ケース PS4 の場合には、根入れ深さが不足しているものと推察される。

3.3 支柱基部近傍および擁壁天端の損傷状況

図-6には、解析終了時点 ($t = 300$ ms) における支柱の変形および擁壁の損傷状況を示している。また、支柱基部を拡大した図も合わせて示している。なお、赤色領域は数値解析的にひび割れが発生している要素を示している。

擁壁部のひび割れ分布に着目すると、天端幅が 600 mm の場合にはケース PS5, PS4、天端幅が 700 mm の場合にはケース PS4w の場合において、天端面は著しいひび割れを

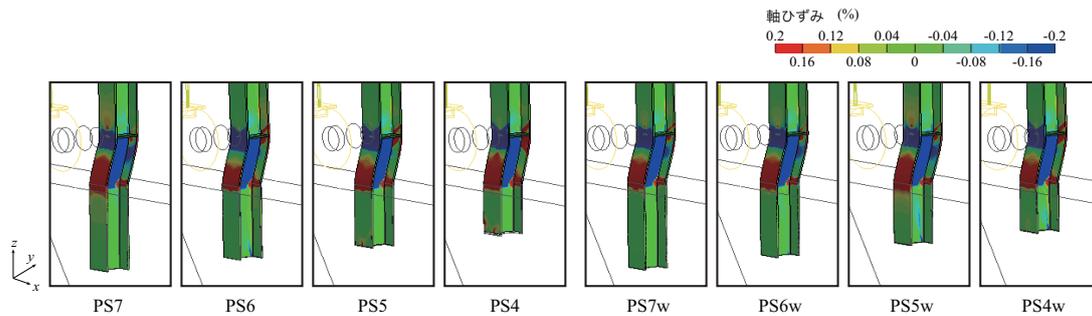


図-5 解析終了時点 ($t = 300 \text{ ms}$) における支柱基部の変形状況および軸方向ひずみに関する等ひずみ分布図

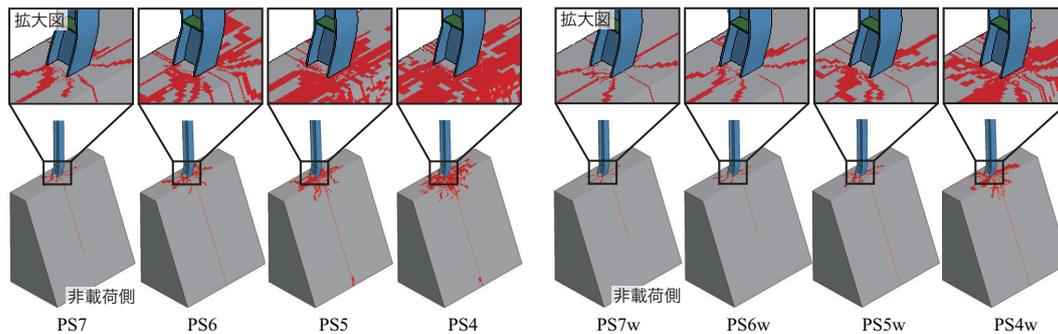


図-6 解析終了時点 ($t = 300 \text{ ms}$) における支柱の変形および擁壁の損傷状況

示しており、損傷が著しいことが分かる。これより、これらの解析ケースの場合には、支柱の根入れが不足していることが示唆される。一方、その他の解析ケースの場合には、線状のひび割れが示されており、損傷が軽微であることより、支柱の根入れが十分確保されているものと推察される。

以上より、前述の各種時刻歴応答波形、支柱軸方向ひずみコンター、支柱の変形状況や擁壁天端の損傷状況から総合的に判断すると、天端幅 600 mm の場合にはケース PS5 と PS4, 700 mm の場合にはケース PS4w の場合には、支柱の根入れが不足していることが示唆される。一方、その他の解析ケースの場合には根入れが十分確保されているものと推察される。

これより、通常施工されている天端幅が 600 mm の場合には支柱の根入れ深さは 600 mm 以上必要であることや、天端幅を通常よりも 100 mm 増幅させることによって 100 mm 程度根入れ深さを浅くすることが可能であることが明らかになった。

なお、設計要領⁴⁾では、H200×200×8×12 断面の H 形鋼支柱を用いる場合における根入れ深さは、現行設計法である落石対策便覧⁵⁾に即して 1 m としている。これより、現行設計法は、本研究で得られた必要根入れ深さと比較して十分安全側の値を与えることが明らかになった。

4. まとめ

本論文では、柵高が 4 m の落石防護柵に用いられる H200×200×8×12 断面の H 形鋼支柱に関する根入れ深さを合理的に決定することを目的に、曲げとせん断が連成して作用する場合を想定して、支柱の根入れ深さおよび防擁壁天端幅を変化させた三次元弾塑性衝撃応答解析を行った。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) 本研究の条件下において、擁壁の天端幅を我が国の標準設計図集に示されている 600 mm とする場合における支柱の必要根入れ深さは、600 mm 程度である。
- 2) 擁壁の天端幅を 100 mm 増幅させることによって、必要根入れ深さは 500 mm 程度と、100 mm 程度浅くすることが可能となる。
- 3) 従って、擁壁天端幅を増幅することによって擁壁の拘束効果が向上し、支柱の必要根入れ深さを浅くすることが可能である他、擁壁天端の損傷も低減することが明らかになった。
- 4) なお、現行設計法に基づいて求められる支柱の必要根入れ深さは 1,000 mm として評価され、本数値解析結果に比較して十分安全側の値を与えることが明らかになった。

参考文献

- 1) 林 茂樹, 小室雅人, 岸 徳光, 瓦井智貴, 高田 柁: 落石防護擁壁上に設置された高曲げ剛性を有する落石防護柵支柱の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol. 70A, pp. 1031-1040, 2024.
- 2) ANSYS, Inc.: *LS-DYNA User's Manual R15*, 2024.
- 3) 竹内観月, 小室雅人, 岸 徳光, 林 茂樹: 根入れ深さを变化させた落石防護柵支柱に関する弾塑性衝撃応答解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No. 2, pp. 967-972, 2023.
- 4) 北海道開発局: 令和 6 年度北海道開発局道路設計要領 第 6 集 標準設計図集
- 5) (公社)日本道路協会: 落石対策便覧, 2017.