

柵高が高い落石防護柵支柱に曲げとせん断が連成する荷重が作用する場合における衝撃応答解析

Impact response analysis of post for higher rockfall protection fence under impact loading 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 柁 (Syu Takada) 室蘭工業大学 名誉会員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

著者らの研究グループでは、これまでに落石防護柵支柱の根入れ深さに関する衝撃荷重載荷時の動的挙動特性を考慮した合理的設計法の確立を最終目的として、実規模による静荷重載荷や衝撃荷重載荷による数多くの屋外実験を実施してきた。これらの実験では、防護柵高さが2mで支柱にはH200×100×5.5×8のH形鋼を用いている。一方、防護柵高さが4m程度の場合には、通常支柱にも曲げ剛性の大きいH200×200×8×12のH形鋼が用いられている。このように、高曲げ剛性を有する支柱を使用した場合における落石防護柵支柱の根入れ深さの決定に関しては、設計法の妥当性を含め十分に検討が行われていないのが現状である。

このような観点から、本研究では、支柱にH200×200×8×12 H形鋼を用いた場合において、曲げとせん断が連成するような落石衝撃荷重が比較的低い位置に作用する場合を対象に根入れ深さを変化させた弾塑性衝撃応答解析を行い、落石防護擁壁および防護柵支柱に関する耐衝撃性状に関する検討を行った。なお、数値解析は、構造解析汎用コードLS-DYNA¹⁾(ver. R11)を用い、著者らによって実規模実験結果を用いて妥当性が検証されている手法²⁾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防護柵支柱モデルの形状寸法を示している。ここでは、北海道開発局道路設計要領³⁾(以後、設計要領)を参考に、コンクリート擁壁は、高さ3m、幅3m、天端幅0.6m、道路側の勾配を1:0.4とした。

支柱には柵高4m以上の場合において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のH形鋼を用い、根入れ深さは600、500、400、300mmの4種類に変化させた。支柱は擁壁天端中央に設置し、その柵高は4mと設定した。なお、擁壁幅は実防護柵の中間支柱の間隔が3mで擁壁天端に設置されていることから、支柱1本分を考慮した3mと設定した。衝撃荷重作用位置(以後、載荷点)には、既往の衝撃荷重載荷実験と同様に、フランジの局部座屈を防ぐために厚さ6mmの補剛材を設置している。

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”は実規模落石防護擁壁及び防護柵支柱を用い曲げとせん断が連成する場合であることを示し、後続の数値nは根入れ深さ(n×100mm)を

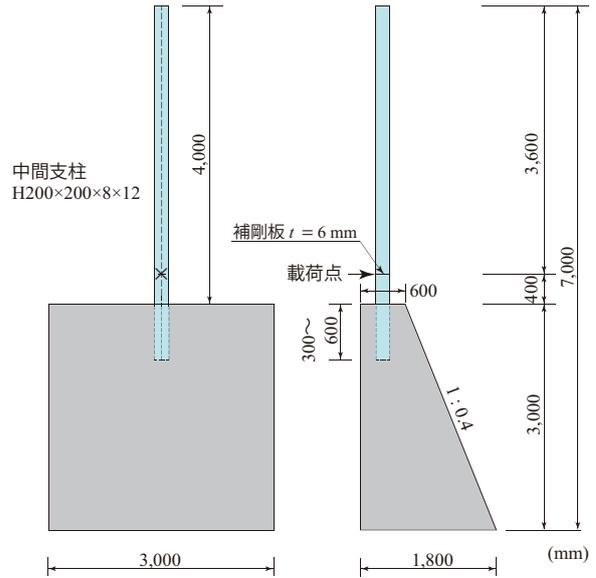


図-1 落石防護擁壁および支柱の形状寸法

表-1 数値解析ケース一覧

ケース名	載荷位置 L (m)	根入れ深さ d (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)
PS6	0.4	600	5.0	9.9	49.0
PS5		500			
PS4		400			
PS3		300			

表す。本研究では、支柱定着部に曲げとせん断が連成する場合の載荷位置の影響を検討するため、可能な限り擁壁天端に近い位置に衝突させることとし、擁壁天端からの載荷点位置を0.4mと設定した。数値解析には、1,000kgの重錘を衝突させることによって行い、その落下高さは、H形鋼の可能吸収エネルギーを参考としH=5mとした。コンクリートの圧縮強度 f'_c は、実規模実験²⁾(以後、既往の研究)と同様の値を設定し、30N/mm²とした。なお、支柱の主軸に関する公称断面係数は $Z_x = 472 \times 10^3 \text{ mm}^3$ であり、H200×100×5.5×8の場合(181×10³mm³)に比較して2.6倍程度大きい値となる。

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、既往の研究²⁾と同様に、実験時における

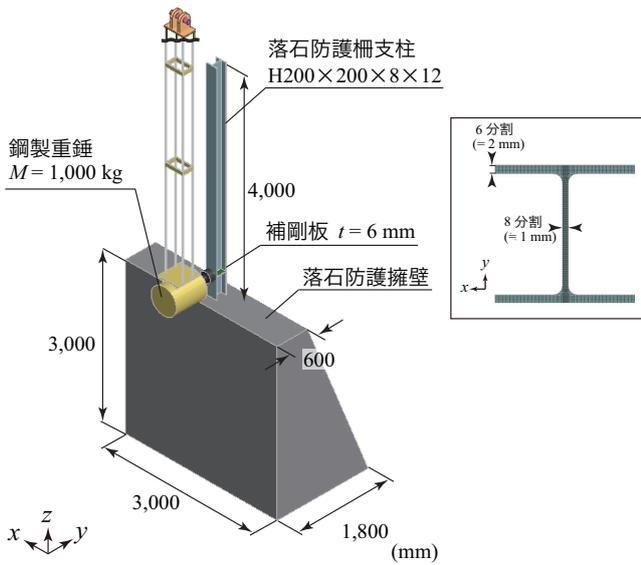


図-2 有限要素モデル

境界条件を適切に反映させるために、試験体の他、载荷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。本研究では、基部近傍で発生する局部座屈を適切に評価するために、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分割とした。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、擁壁底部近傍の要素分割は徐々に粗くしている。また、本数値解析では、重力は考慮しているものの試験体の初期不整は考慮していない。本モデルの総節点および総要素数は、それぞれ120万、110万程度である。

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。拘束条件は、重錘吊り下げ治具の上部をピン支持とし、コンクリート擁壁の底部は支柱と擁壁の挙動特性を安全側で評価することとして完全固定とした。また、ボルトを用いて接続している箇所やH形鋼と補剛材間は、節点を共有することで結合した。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、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、予備解析より摩擦係数は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の下で検討を行うこととし、各材料物性値には既往の研究²⁾と同様の数値を採用した。なお、既往の研究²⁾では、H形鋼ウェブ及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応力-ひずみ関係を基に、マルチリニア型のモデルを適

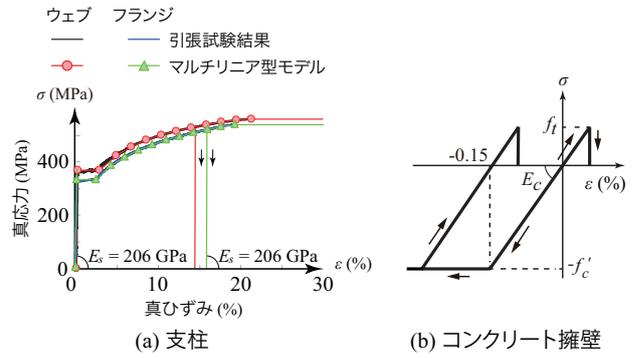


図-3 材料構成則

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)	引張強度到達時ひずみ ϵ_u (%)
ウェブ	368	0.19	560	21.3
上下フランジ	326	0.17	532	19.2

用した。また、ウェブおよびフランジにおいて、それぞれ異なる応力-ひずみ関係を設定している。なお、表-2に示すように、H形鋼のウェブとフランジには材料試験より得られた結果を真応力、真ひずみに換算した値を用いた。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、上述のとおり 30 N/mm^2 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。

重錘および载荷治具に関しては、全て弾性体と仮定した。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は公称値を用いた。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には、本数値解析より得られた重錘衝撃力 P_i に関する時刻歴応答波形を、図-5には、 $t = 300 \text{ ms}$ までの载荷点変位(以後、単に変位) δ_x に関する時刻歴応答波形を示している。図-4には、载荷後35 msまでの波形に加えて、梁理論に基づき基部を固定端と仮定した静荷重载荷時における降伏荷重 P_y および全塑性荷重 P_p も示している。また、表-3には、各ケースにおける最大衝撃力 P_i と衝撃力の継続時間 t および最大変位 δ_{max} とその到達時間 t_{max} を一覧にして示している。

図-4に着目すると、いずれのケースにおいても载荷初期に最大衝撃力値を示した後、2~5 ms程度において静的な全塑性荷重 P_p にほぼ対応する衝撃力平坦域を形成して

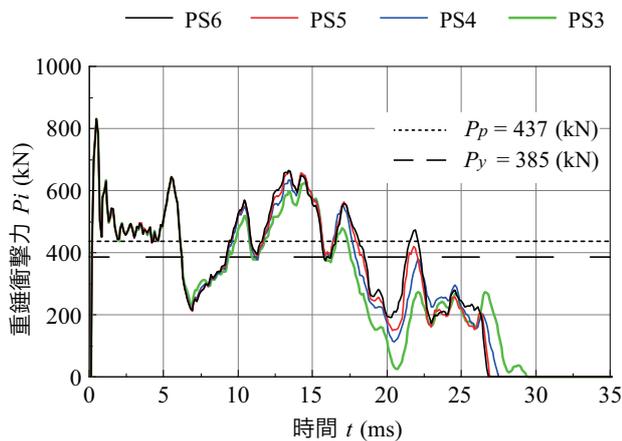


図-4 重錘衝撃力の時刻歴応答波形図

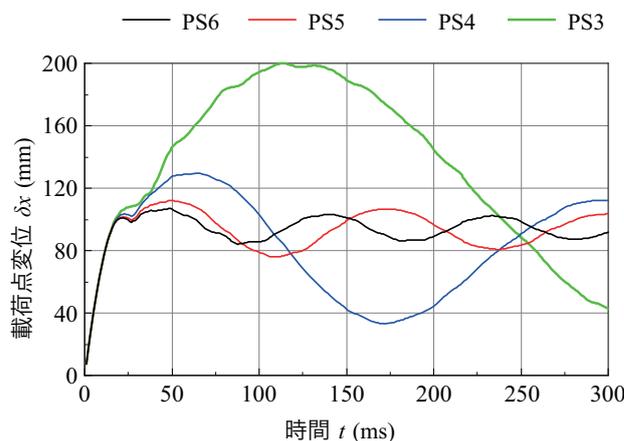


図-5 載荷点変位の時刻歴応答波形図

表-3 最大衝撃力および最大変位に関する解析結果一覧

ケース名	最大衝撃力 P_i (kN)	継続時間 t (ms)	最大変位 δ_{max} (mm)	到達時間 t_{max} (ms)
PS6	830	26.9	107	48
PS5	830	27.0	112	49
PS4	830	27.6	130	65
PS3	830	29.6	200	114

いることが分かる。いずれのケースにおいても経過時間が16 ms程度まではほぼ類似した波形分布を示し、それ以降は衝撃力の大きさに差異はあるものの類似した周期の振幅を繰り返して減衰している。衝撃力波形の継続時間は、ケースPS6とPS5は類似しており27 ms程度、ケースPS4は27.6 ms、ケースPS3は29.6 msとなっており、ケースPS4より根入れ深さが浅い場合については、根入れの浅さに対応して衝撃力の継続時間が延びる傾向を示している。既往の研究²⁾では、根入れ深さが十分確保されている試験体と比較して、根入れ深さが不足している場合は衝撃力の継続時間が延び、挙動性状が異なる結果となっていることより、ケースPS4およびPS3は根入れ深さが不足していることが推察される。

図-5において、ケースPS6とPS5の変位波形に着目すると、除荷後わずかに減衰する波形性状を示している。最大変位は110 mm程度、その到達時間は50 ms程度となっており、前述の衝撃力継続時間と同様に互いに類似した値を示している。

一方、ケースPS4とPS3は経過時間が30 ms程度までは、類似した波形性状を示すものの、その後は根入れ深さが浅くなるにつれて周期が延びており、それに伴い最大変位は増加傾向を示し、到達時間も延びる傾向を示している。これは、根入れ深さが不足していることによりコンクリート擁壁に損傷が生じ、それに伴い最大変位量も増加傾向を示したことによるものと推察される。

3.2 支柱縁軸方向ひずみ分布

図-6には、本数値解析より得られた載荷点最大変位発生時の載荷側における支柱軸方向縁ひずみ分布を示している。図中には、支柱の軸方向ひずみコンター図と最大変位

発生時の時刻 t_{max} も合わせて示している。支柱の変形状態は、擁壁天端面を基準にして示している。また、比較のために載荷前の擁壁内支柱の設置位置も示している。

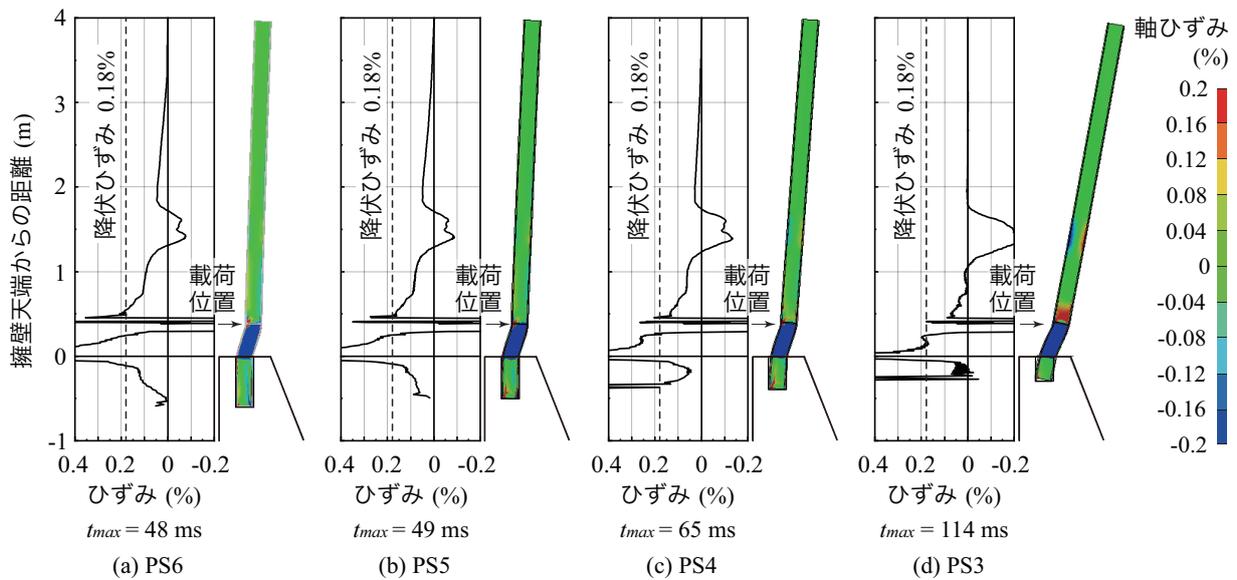
図より、いずれのケースにおいても支柱基部近傍において0.2%を超えるひずみが発生しており、降伏状態に至っていることが推察される。載荷点の上方に着目すると、いずれのケースにおいても擁壁天端から1.4 m程度付近では圧縮ひずみを示しさらにその上方では引張ひずみへ変化していることが確認できる。これより、載荷点より上方への波動伝播距離が長いことにより、載荷点で発生した引張ひずみがH形鋼の揺動により上方では逆方向のひずみに変化している状況が確認できる。支柱の根入れ端部に着目すると、ケースPS6とPS5は零ひずみに漸近する傾向を示しており、根入れ深さが確保されていることが分かる。一方、ケースPS4とPS3は根入れ端部近傍においても0.4%を超える大きなひずみ値を示しており、根入れ深さが不足していることがうかがわれる。その状況は、支柱端部の変形状況からも確認できる。

3.3 支柱基部近傍および擁壁天端の損傷状況

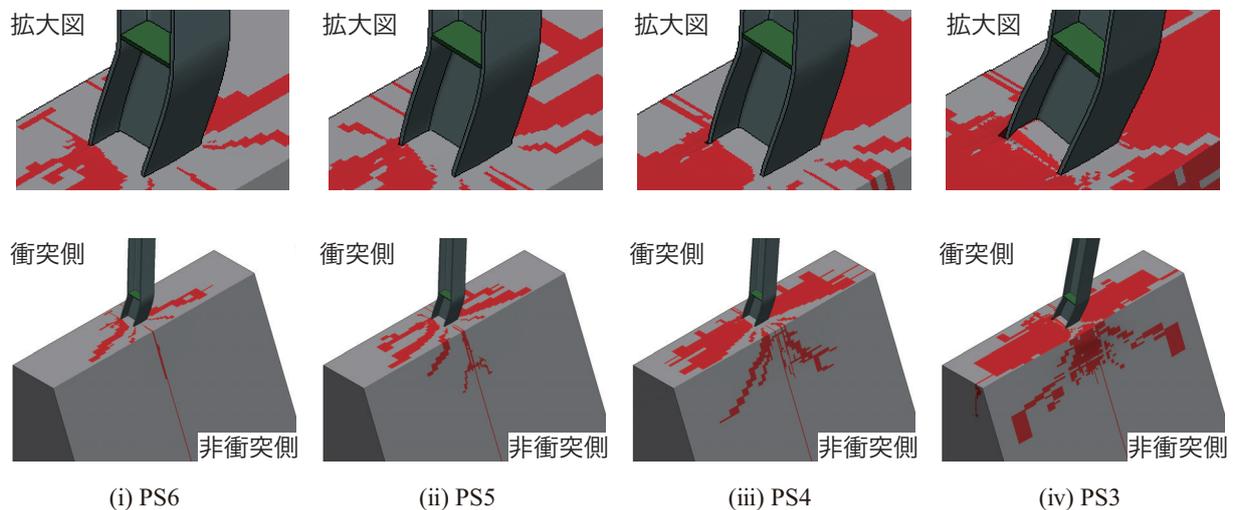
図-7には、載荷点最大変位発生時における支柱基部の変形および擁壁の損傷状況について示している。また、支柱基部を拡大した図も合わせて示している。なお、赤色は数値解析的なひび割れ発生部を示している。

ひび割れ分布に着目すると、ケースPS6とPS5の場合には擁壁天端の載荷側および非載荷側フランジより発生しており、その領域は擁壁非載荷面側にわずかに達している程度であり、擁壁への影響は小さいことが分かる。一方、ケースPS4とPS3の場合には、支柱基部近傍においてひび割れが広く分布しており、擁壁非載荷面側においても著しいひび割れが確認でき、擁壁の損傷が大きいことが分かる。これより、前述の時刻歴応答波形や支柱縁軸方向ひずみ分布からも明らかなように、ケースPS6とPS5は根入れ深さが十分確保されているが、ケースPS4とPS3は、根入れ深さが不足していることが明確になった。

なお、設計要領³⁾において、H200×200×8×12 H形鋼の根入れ深さは、落石対策便覧⁴⁾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安全側の値を示していることが分かる。



図－6 最大変位発生時における支柱荷側縁ひずみ分布の比較



図－7 最大変位発生時における支柱基部の変形および擁壁の損傷状況

4. まとめ

本論文では、高さが3 mの防護擁壁上に柵高4 mの防護柵を設置した場合を想定して、防護柵支柱にH200×200×8×12 H形鋼を用いた場合における根入れ深さの妥当性を含め、支柱および防護擁壁の耐衝撃挙動に関する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) H200×200×8×12のH形鋼を使用し、曲げとせん断が連成する荷点が低い場合における必要根入れ深さは、500 mm程度として評価される。
- 2) 現行での設計法に基づいて決定された支柱の根入れ深さは安全側の値を示す。

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の中森君をはじめとする学生諸君には、解析モデルの作成、データ分析など多大な支援をいただいた。ここに記して感

謝の意を表す。

参考文献

- 1) Hallquist, J. O.: *LS-DYNA User's Manual*, Livermore Software Technology Corporation, 2021.
- 2) 竹内観月, 小室雅人, 岸 徳光, 林 茂樹: 根入れ深さを変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.
- 3) 北海道開発局: 令和5年度北海道開発局道路設計要領第6集 標準設計図集
- 4) (公社)日本道路協会: 落石対策便覧, 2017.