論文 曲げとせん断が連成する衝撃荷重載荷時の擁壁上に設置した柵高が高 い落石防護柵支柱に関する弾塑性衝撃応答解析

林 茂樹*1・小室 雅人*2・瓦井 智貴*3・岸 徳光*4

要旨:本論文では,高さ3mのコンクリート擁壁に定着される高さ4mの落石防護柵に用いられる鋼製支柱 を対象に,曲げとせん断が連成する比較的低い位置に落石衝撃荷重が作用する場合において,根入れ深さを 変化させた3次元弾塑性衝撃応答解析を行い,必要定着長に関する検討を行った。その結果,1)高さが高く 高曲げ剛性を有する支柱に衝撃荷重が作用する場合において,擁壁天端表面に発生するせん断破壊面は載荷 側及び非載荷側フランジ端部から形成されること,2)支柱の必要根入れ深さは,500mm程度として評価され ること,3)現行設計法に基づいて評価される必要根入れ深さは安全側の値を示すこと等が明らかになった。 キーワード:防護柵支柱,落石防護擁壁,曲げ剛性,根入れ深さ,衝撃応答解析

1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線などの急崖斜面に沿った道路 沿いには,落石から道路交通や人命を守るために数多く の落石対策工が設置されている。その1つである従来型 落石防護柵は,H形鋼を用いた支柱,ワイヤロープ,ひ し形金網および間隔保持材等から構成され,写真-1に 示されるように落石防護擁壁(以後,防護擁壁あるいは単 に擁壁)天端に設置される場合が多い。その場合には,支 柱は一般に擁壁天端部を箱抜きして埋設される。

防護柵支柱の擁壁への根入れ深さに関する現行設計は, 落石対策便覧(以後,便覧)¹⁾に即し,落石衝撃による動 的挙動は考慮せずに静力学に基づいて行われている。し かしながら,落石衝突によって支柱埋設部近傍のコンク リートがブロック化して剥落するような事例も報告され ていることから,支柱の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,衝撃荷重載荷時における 動的挙動特性を考慮した合理的設計法を確立することは, 極めて重要であるものと判断される。

このような背景より,著者らの研究グループでは,実



写真-1 擁壁天端に設置される従来型落石防護柵の例

規模落石防護擁壁上に設置した落石防護柵支柱を対象に, 静荷重載荷²⁾や衝撃荷重載荷³⁾⁻⁵⁾に関する数多くの屋外実 規模実験を実施してきた。

これらの実験では、柵高が2mで、支柱にはH200× 100×5.5×8断面のH形鋼を用いている。一方、柵高が4 m程度の場合には、通常防護擁壁の高さも高くかつ支柱 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。このように、支柱の高さが高く断面 剛性が大きくなった場合における支柱の必要根入れ深さ 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、高さが3mの防護擁 壁天端に高さが4mの防護柵を設置する場合を想定して、 支柱にH200×200×8×12断面のH形鋼を用いた場合に おける必要定着長に関する検討を行うことを目的に、落 石衝撃荷重が曲げとせん断が連成するような比較的低い 位置に作用する場合を対象に弾塑性衝撃応答解析を行っ た。なお、本数値解析は、実規模実験⁵⁾結果との比較に よって妥当性が検証されている有限要素モデル⁶⁾を踏襲 し、構造解析用汎用コードLS-DYNA⁷⁾(ver. R14)を用い て行うこととした。

2. 数值解析概要

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。コンクリート擁壁の断面形状は、北海道開発局道路設計要領⁸⁾(以後、設計要領)を参考に、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、通常柵高4m以上を有する実防

*1	室蘭工業大学大学院	大学院工学研究科	博士後期課程]	二学専攻	て (正会員	員)
*2	室蘭工業大学大学院	もの創造系領域	土木工学ユニット	教授	博(工)	(正会員)
*3	室蘭工業大学大学院	もの創造系領域	土木工学ユニット	助教	博(工)	(正会員)
*4	室蘭工業大学大学院	もの創造系領域	土木工学ユニット	特任教	牧授 工博	(正会員)



図-1 落石防護擁壁および支柱の形状寸法

試験体 名	載荷 位置 <i>L</i> (m)	根入れ 深さ d(mm)	設定重錘 落下高 <i>H</i> (m)	入力重錘 衝突速度 V(m/s)	入力 エネルギー <i>E</i> (kJ)
PS6 PS5 PS4 PS3	0.4	600 500 400 300	5.0	9.9	49.0

表-1 数値解析ケース一覧

護柵の中間支柱として使用されているH200×200×8×12 断面のH形鋼を用い,根入れ深さを600,500,400,300 mmの4種類に変化させて数値解析を行った。なお,設定 根入れ深さに関しては,高さが2mの防護柵に用いられ るH200×100×5.5×8 断面のH形鋼支柱に関する実規模実 験結果⁵⁾や予備解析結果を基に決定した。支柱は擁壁天端 中央に設置し,その柵高を4mと設定した。なお,実防 護柵の中間支柱間隔が3mとして擁壁天端に設置されて いることから,擁壁幅は支柱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の補剛板を設置している。

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。表中の試験体名における第1項目の"PS"は 実規模落石防護擁壁およ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×100 mm)を表している。本研究では、曲げ とせん断が連成する場合における必要定着長を検討する ために、可能な限り擁壁天端に近い位置に衝撃荷重を作 用させることとし、載荷点位置を擁壁天端から0.4 mと 設定した。

数値解析は 1,000 kg 重錘を支柱に衝突させることによっ て行い,その落下高さは,便覧¹⁾に準拠しH形鋼支柱が 15



図-2 有限要素モデル

度傾斜するときの可能吸収エネルギー $E_p = 48.8 \text{ kJ}$ を参 考にH = 5 mとした。コンクリートの圧縮強度 f'_c は、実 規模実験⁵⁾と同様の値を設定し、30 N/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 断面の場合 ($Z_x = 181 \times 10^3 \text{ mm}^3$)と比較して 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、実験時における境界条件を適切に反映 させるために、既往の研究⁶⁾と同様に試験体の他、載荷治 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。

各部材は,基部近傍で発生する局部座屈を適切に評価 するためにH形鋼支柱も含めて全て8節点固体要素を用 いてモデル化した。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6ないし8分割とし,幅方向の要 素長は1~2mm程度,軸方向には10mm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,本数値解析においては,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,支柱と擁壁の挙動特性を工学的に 安全側で評価することとして擁壁の底部を完全固定と仮 定した。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。



図-3 材料構成則

表-2 H 形鋼支柱の材料物性値

	降伏 強度 <i>f_y</i> (MPa)	降伏 ひずみ <i>ɛ</i> y(%)	引張 強度 <i>f_u</i> (MPa)	引張強度 到達時ひずみ <i>ɛ_u</i> (%)
ウェブ	368	0.19	560	21.3
上下フランジ	326	0.17	532	19.2

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,摩擦係数は,予備解析に基づき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形鋼およびコンク リート材料に関する応力-ひずみ関係を、表-2にはH 形鋼の物性値一覧を示している。本研究では、実構造に より近い条件の下で検討を行うこととし、各材料物性値 には実規模実験⁵⁾と同様の数値を採用した。なお、実規模 実験⁵⁾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。

図-3 (a) に示すように、H 形鋼には材料試験結果から 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 部にはそれぞれ異なる応力-ひずみ関係を設定している。 単位体積質量 ρ_s およびポアソン比 v_s は、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³、 $v_s = 0.3$ とした。降伏の判定には von Mises の降伏 条件を用いている。

図-3(b)に示すように、コンクリート材料に関しては、 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、前述のと おり 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 v_c は、それぞ れ $\rho_c = 2.35 \times 10^3$ kg/m³、 $v_c = 1/6$ と設定した。

重錘および載荷治具に関しては、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物性値に関しては、 弾性係数 E とポアソン比 v は等しく、それぞれ E = 206



図-4 重錘衝撃力の時刻歴応答波形



図-5 載荷点変位の時刻歴応答波形

GPa, v = 0.3とした。また、単位体積質量 ρ に関しては、 載荷治具の場合には $\rho_j = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とし、重錘に 関しては全体の質量(1,000 kg)を有限要素モデルの体積で 除すことにより評価した。

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、重錘と支柱間の接触合力として求められる 重錘衝撃力 P_i に関する時刻歴応答波形を、載荷初期から の経過時間(以後、単に経過時間)tを横軸に取って示して いる。図中、基部を固定端と仮定し梁理論に基づいて求 められる静的な降伏荷重 P_y および全塑性荷重 P_p も示し ている。また、図-5には、載荷点における水平変位(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。 さらに、表-3には各試験体に関する最大衝撃力 $P_{i,\max}$ と衝撃力波形の波動継続時間Tおよび最大変位 $\delta_{x,\max}$ と その経過時間 t_{\max} を一覧にして示している。

図-4の衝撃力波形 P_i に着目すると、いずれの試験体においても載荷初期に最大衝撃力 $P_{i,\max}$ を示した後、全塑性荷重 P_p にほぼ対応する波形性状を示していることが分かる。表-3より、最大衝撃力値 $P_{i,\max}$ は根入れ深さにかかわらず全て等しい値を示していることから、最大衝撃力 $P_{i,\max}$ は衝突部の材料特性に依存することが示唆される。また、波動の継続時間 T は、PS6/5 試験体の場



図-6 支柱の載荷側軸方向縁ひずみ分布の比較

表-3 最大衝撃力および最大変位に関する解析結果一覧

試験 体名	最大衝撃力 P _{i,max} (kN)	波動 継続時間 <i>T</i> (ms)	最大変位 $\delta_{x,\max}$ (mm)	経過時間 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

合には類似しており 27 ms 程度, PS4 試験体の場合には 27.6 ms, PS3 試験体の場合には 29.6 ms を示している。こ れより,根入れ深さが PS5 試験体より浅い場合には,波 動継続時間 T は根入れ深さの浅さに対応して延びる傾向 にあることが分かる。既往の研究⁶⁰から,根入れ深さが 不足している場合には,衝撃力の波動継続時間 T が延び る傾向にあることが明らかになっていることより, PS4/3 試験体の場合における根入れ深さは不足の傾向にあるこ とが示唆される。

図-5の変位波形 δ_x に着目すると,最大変位 $\delta_{x,max}$ は 根入れ深さの減少に対応して増加しており,変位の振動 周期も延びる傾向にあることが分かる。また,PS6/5 試験 体の場合における最大変位 $\delta_{x,max}$ は,PS6 試験体の場合が PS5 試験体よりも若干小さいが共に 110 mm 前後であり, 最大変位 $\delta_{x,max}$ に達する経過時間 t は両試験体共に 50 ms 程度である。一方,PS4 試験体の場合における最大変位 $\delta_{x,max}$ は,PS6/5 試験体の場合に比較して 20 mm 程度増加 しており,根入れ深さが不足していることが示唆される。 また,PS3 試験体の場合には,PS4 試験体に比較して最大 変位到達までの経過時間 t が 50 ms 程度遅く,最大変位 $\delta_{x,max}$ が 70 mm も大きいことから,根入れ深さの不足している状況が明確に示されている。

3.2 支柱の載荷側軸方向縁ひずみ分布に関する経時変化

図-6には、t = 300 msまでの支柱の載荷側軸方向縁ひ ずみ分布に関する経時変化を示している。図より、t = 5ms 程度まではいずれの試験体も類似したひずみ分布を示 していることが分かる。その後、気中部におけるひずみ 分布に着目すると、全試験体において基部からの高さが 1.5 m 前後の領域ではt = 10 ms時に 0.2%以上の圧縮ひず みを示しており塑性化に至っていることが分かる。その 後 0.1%程度の圧縮ひずみを中心に振動状態を示している ことから、支柱は載荷点より上部で載荷側に変形してい ることが推察される。

載荷点近傍部のひずみ分布を見ると,試験体にかかわ らずt = 1 msでは 0.2%を超える圧縮ひずみを示してお り,降伏域に達していることが見て取れる。また,基部 近傍ではt = 3 msから 0.4%に達する引張ひずみを示して おり,t = 300 ms時点においてもその状態が保持されて いることから,支柱は基部近傍において載荷方向への変 形状態にあるものと推察される。その塑性域は,気中部 では基部から 250 mm 程度,埋設部では 5~65 mm 程度 と狭い領域に限定されていることが分かる。

根入れ端部に着目すると, PS6 試験体の場合には, t = 100 ms 以降において最大 0.1%程度の局所的な引張ひずみ が発生しているが,その点を除くと零ひずみ近傍の分布 を示していることから,根入れ端部は十分定着されてい るものと推察される。また, PS5 試験体の場合において も PS6 試験体の場合と同様に,t = 100 ms 前後において



図-7 最大変位発生時における支柱の変形状況と軸方向ひずみに関する等ひずみ分布

0.2% に近い局所的な引張ひずみが発生している。しかし ながら,時間と共に減少傾向にあることと,端部近傍で はその点を除き零ひずみに近い値を示していることから, 支柱根入れ端部は定着状態にあることが推察される。

一方, PS4/3 試験体の場合には, t = 25 ms までは引張ひ ずみが 0.1% 以内に分布している。しかしながら, t = 50ms 以降においては引張ひずみが根入れ端部に向かって増 加する傾向を示しており, t = 65 ms からは端部において 0.4% 以上の引張ひずみを示していることから,支柱根入 れ端部は定着されていないことが示唆される。

3.3 支柱基部近傍および擁壁天端の損傷状況

図-7には、各試験体に関する最大変位発生時における 支柱の変形状況と軸方向ひずみに関する等ひずみ分布を 比較して示している。図には、根入れ端部から載荷点ま での拡大図と最大変位発生時までの経過時間 t_{max} も示し ている。図より、いずれの試験体も載荷点から基部まで は著しいせん断変形に至っていることが確認できる。但 し、PS6/5 試験体の場合には基部が十分に固定され、基部 近傍が鋭角的にせん断変形に至っていることが分かる。 一方で、PS4 試験体の場合には基部載荷側が上方に推移の 傾向を示し、緩やかなせん断変形状態を呈している。ま た、PS3 試験体の場合には、基部よりも下方から曲げ変 形と共にせん断変形状態に至っている状況を示している。

擁壁内部に着目すると、PS6/5 試験体の場合には根入れ 端部載荷側には浮きが確認される。しかしながら、その 値は、それぞれ6mm、12mmと小さく、十分定着してい る状態にあることが推察される。一方、PS4 試験体の場 合には、前述のように基部における固定度が低下したこ とにより載荷側基部近傍に擁壁との隙間が確認できると ともに、載荷側根入れ端部の明確な浮きも確認でき、端 部の定着度は十分でないことがうかがわれる。また、PS3 試験体の場合には、載荷側根入れ端部の浮き上がりが大 きく(50mm)、埋設部は剛体的に回転している状況が確 認できる。このことは、支柱埋設部近傍の擁壁が大きく 損傷していることを示唆している。

図-8には、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を比較して示している。また、支柱 基部の拡大図も合わせて示している。なお、本数値解析 では、図-3(b)に示すコンクリートの材料構成則に基 づき、第1主応力が零近傍応力状態を示す要素を数値解 析上のひび割れと判断し、その要素を赤色で示している。

図より,いずれの試験体においても,擁壁天端におけ るひび割れは主に支柱の載荷側および非載荷側フランジ 端より発生しており,載荷側フランジ端から発生したひ び割れがより顕在化して示されている。このような変状 は,せん断破壊面が非載荷側フランジ端部から形成され るとする便覧¹⁾の考え方とは異なるものの,実規模実験⁵⁾ においても同様に確認されていることから,既往の研究⁶⁾ と同様に実挙動を適切に評価しているものと判断される。

PS6 試験体に着目すると、擁壁の非載荷面には天端から 底部に向かって進展する曲げひび割れが確認できる。ま た, 擁壁天端の載荷側および非載荷側フランジ端から発 生した斜めひび割れは, 擁壁の非載荷面側にわずかに達 している程度であり損傷の小さいことが分かる。PS5 試 験体に着目すると, 擁壁の非載荷側面に進展する曲げひ び割れは支柱の根入れ端部近傍において水平方向に進展 している。その要因に関しては不明で有り、今後の課題 としたい。また、非載荷側フランジ端から進展する斜め ひび割れは, 擁壁非載荷面に達しかつ深さ方向にも進展 しており、定着条件を満たす限界の状態であることがう かがわれる。一方, PS4 試験体の場合には, 支柱の非載荷 側フランジ近傍から進展する斜めひび割れが擁壁の非載 荷面に達し、さらに深さ方向に末広がり状に進展してい る。支柱載荷側フランジ端から進展するひび割れも擁壁 天端に広く分布していることから, 擁壁はこれらのひび 割れによって大きく損傷していることが推察される。こ れより,支柱根入れ端部の定着条件は満たされた状態に は至っていないものと判断される。PS3 試験体の場合に



図-8 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

は, PS4 試験の場合よりもさらに損傷が進展して示され ており,支柱根入れ端部は定着の状態にはないことが見 て取れる。

以上より,支柱に高曲げ剛性を有するH200×200×8×12 断面の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,衝撃荷重が比較的低い位置に作用する場 合の支柱の根入れ深さは500mm程度必要であることが, 数値解析的に明らかになった。この結果は,既往の研究⁵⁾ におけるH200×100×5.5×8断面のH形鋼を用いた場合 と同程度である。

なお,設計要領⁸⁾における H200×200×8×12 断面の支 柱の根入れ深さは,便覧¹⁾に即して1mとしている。これ より,落石による衝撃荷重が支柱の比較的低い位置に載 荷し曲げとせん断が連成して作用する場合には,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 側の値を与えることが明らかになった。

4. まとめ

本論文では,高さが3mの落石防護擁壁上に柵高4m の防護柵を設置した場合を想定し,高さが2mの落石防 護擁壁上に防護柵を設置する場合に比較して曲げ剛性の 大きいH200×200×8×12断面を有するH形鋼を防護柵 支柱として用いた場合において,曲げと共にせん断が連 成するような衝撃荷重が比較的低い位置に作用する場合 の必要根入れ深さを含め,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) 擁壁天端に発生するせん断ひび割れは,高さが2mの防護擁壁にH200×100×5.5×8断面のH形鋼支柱を設置する場合^{5),6)}と同様に,支柱の載荷側及び非載荷側フランジ端部から形成される。
- 2)曲げとせん断が連成するような比較的低い位置に衝 撃荷重が作用する場合における支柱の必要根入れ深 さは、既往の曲げ剛性が比較的小さいH200×100×

5.5×8 断面支柱を用いた場合⁵⁾と同様に,500 mm 程度として評価される。

3) 現行設計法に基づいて決定された支柱の根入れ深さは、高さが4mの防護柵に用いられる曲げ剛性が比較的大きいH200×200×8×12断面支柱を用いる場合においても安全側の値を示す。

参考文献

- 1) (公社)日本道路協会:落石対策便覧,2017
- 2) 林 茂樹,小室雅人,瓦井智貴,岸 徳光:根入れ 深さを変化させた実規模落石防護柵支柱の静荷重 載荷実験,コンクリート工学年次論文集, Vol. 44, No. 2, pp. 937-942, 2022
- 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動的荷重 載荷実験,コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, No. 2, pp. 463-468, 2021
- 林 茂樹,小室雅人,岸 徳光,瓦井智貴,近藤里 史:実規模擁壁に貫通埋設させた防護柵支柱に関 する曲げと共にせん断が卓越する場合の静的及び 衝撃荷重載荷実験,構造工学論文集,Vol. 68A, pp. 962-974, 2022
- 5) 林 茂樹,小室雅人,岸 徳光,瓦井智貴,近藤里 史,竹内観月:根入れ深さを変化させた実規模落石 防護柵支柱の衝撃荷重載荷実験,構造工学論文集, Vol. 69A, pp. 1095-1106, 2023
- 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
- ANSYS, Inc.: LS-DYNA Version R14 User's Manual, 2023
- 8) 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