擁壁高さが2mの場合における防護柵支柱に関する弾塑性衝撃応答解析

Impact response analysis of steel post for rockfall protection fences embedde into retaining wall having 2 m height

林茂樹*, 小室雅人**, 岸徳光***, 瓦井智貴****, 高田柊***** Shigeki Hayashi, Masato Komuro, Norimitsu Kishi, Tomoki Kawarai, Syu Takada

*室蘭工業大学大学院,工学研究科博士後期課程(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1) **博(工),室蘭工業大学大学院教授,もの創造系領域(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1) ***工博,室蘭工業大学大学院特任教授,もの創造系領域(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1) ****博(工),室蘭工業大学大学院助教,もの創造系領域(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1) *****室蘭工業大学大学院,工学研究科博士前期課程(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

キーワード: 防護柵支柱, 根入れ深さ, 衝撃応答解析 Keywords: steel post for rockfall protection fences, anchoring depth, impact response analysis

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の一つとし て,従来型落石防護柵(以後,単に防護柵)が数多く設 置されている.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 される場合のほか,写真-1に示すように無筋コン クリート製の落石防護擁壁(以後,防護擁壁あるいは 単に擁壁)天端に設置される場合も多い.防護擁壁天 端に設置される場合には,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,落石衝



写真-1 従来型落石防護柵の例

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, この種の検討は,経済性の観点から実験的手法ととも に数値解析的手法を援用して効率的に実施することが 重要である.

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 析モデル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、別途実施した擁壁高さが2mの場合に おける防護柵支柱に関する実規模衝撃荷重載荷実験 結果との比較を行うことによって提案モデルの妥当 性について検討を行った.また、得られた結果を踏ま え支柱の根入れ深さに関する数値解析的検討も実施 した.なお、本数値解析には、構造解析用汎用コード LS-DYNA²⁾ (ver. R9) を使用した.

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500mm,道路側の勾配を1:0.4とする実規模 擁壁である.支柱には擁壁高さが2m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H形 鋼(H200×100×5.5×8)を用い,擁壁天端中央に設置 している.なお,擁壁幅は、実防護柵支柱が3m間隔 で設置されていることから、支柱1本分のみを考慮し た3mと設定した.また、衝撃荷重作用位置(以後、載 荷点)には、フランジの局部座屈を防ぐために厚さ6 mmの補剛材を溶接している.本研究では、支柱定着



表-1 実験ケース一覧

| 試験 体名 | 載荷 位置 <i>L</i> (m) | 設定重錘 落下高さ <i>H</i> (m) | 設定重錘 衝突速度 V(m/s) | 実測重錘 衝突速度 V' (m/s) | 実測入力 エネルギー <i>E</i> (kJ) |
|----------|--------------------------|------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| PS7-H1 | | | | 4.40 | 9.7 |
| PS5-H1 | | 1 | 4.43 | 4.38 | 9.6 |
| PS3-H1 | | | | 4.50 | 10.1 |
| PS7-H2 | 0.4 | | | 6.16 | 19.0 |
| PS5-H2 | | 2 | 6.26 | 6.21 | 19.3 |
| PS3-H2 | | | | 6.31 | 19.9 |

部の曲げとせん断が卓越する場合に着目するため,載 荷点を擁壁天端から0.4mの高さとした.これは,可 能な限り載荷点位置を低くすることで支柱の全塑性荷 重を大きくし,押抜きせん断破壊の起因となるせん断 力が大きい場合を想定するためである.

本論文では、支柱の根入れ深さによる支柱および擁 壁に関する動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(700,500,300 mm)に変化させた. 表-1には実験ケースを一覧にして示している.試験 体名の第1項目のPSに後続する数値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 載荷実験における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.表 には、重錘が支柱に衝突する直前の実測速度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.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H =1 m および 2 m である.

2.2 実験方法および測定項目

図-2には、本実験で使用した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:1,000kg)を4本のPC 鋼棒(¢17mm)を用いて 門型クレーン(高さ:約10m)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載荷した。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。重錘の載荷点部 形状は、片当たりを防止するために半径 325mm で高 さが10mmの球形状となっている。また、通常の擁



壁は、地盤が良好な地点や良質土等に置き換えた地盤 上に設置されるとともに、擁壁下部は原則として 500 mm 程度土中に根入れする必要がある¹⁾.しかしなが ら、本研究では、それらの影響を可能な限り排除する こととし、擁壁をコンクリート基礎上に設置した場合 について検討を行うこととした.なお、擁壁つま先部 には、衝撃荷重載荷による擁壁の水平移動を抑制する ために、ストッパー(L 形鋼)を設置している.

支柱には根入れ深さの妥当性に関する検討を行うた めに,ひずみゲージ(図-4参照)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,図のように H 形鋼のウェブ中心位置から両フランジ方向 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,載荷点から上方には 50 mm の位置を基点に 50 mm 間隔で 2 断面,下方には 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)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',擁 壁の回転角 θ や支柱の載荷点変位 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)支柱に貼付 したひずみゲージ出力からの軸方向ひずみ ε_i である.

3. 数値解析概要

3.1 有限要素モデル



図-5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適切に 反映させるために、試験体の他、載荷治具およびコン クリート基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.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、支柱の載荷点 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.また、本数値解析において、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。

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,コ ンクリート基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,節点を共有せずに接触面 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

表-2 H 形鋼支柱の材料物性値

| | 降伏 強度 <i>f</i> y (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>ε</i> _u (%) |
|------|------------------------------|----------------------------|--|---|
| ウェブ | 373 | 0.19 | 560 | 21.3 |
| フランジ | 343 | 0.17 | 532 | 19.2 |



した.また,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,これらの接触面における摩擦係数は,既往の研 究^{3),4)}を参考に 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.また,数値解析における時間 増分は,クーラン条件を満たすように解析プログラム 内で自動的に設定されており,本解析条件の場合には 1.29×10^{-7} s である.

3.2 材料構成則

表-2には本数値解析で用いたH形鋼支柱の物性値 を、図-6には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-ひずみ関係を示して いる.

なお、本研究では低速度衝撃荷重載荷実験を対象と していることから、鋼材およびコンクリート材料のひ ずみ速度効果は考慮していない.

(1) H 形鋼支柱

図-6(a)には、H 形鋼支柱に適用した応力-ひずみ関係を示している。H 形鋼支柱の応力-ひずみ関係 は、別途実施して得られた材料試験結果の真応力-真 ひずみ関係を基に多直線近似によりモデル化を行っ た.なお、引張強度以降に関してはひずみが一定値と なるように仮定した。また、圧縮側の応力-ひずみ関 係は引張側と同一であると仮定している。降伏の判 定には von Mises の降伏条件を用いた。単位体積質量 ρ_s およびポアソン比 v_s は、それぞれ $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³、 $v_s = 0.3$ とした。

(2) コンクリート

図-6(b)には、コンクリートに適用した応力-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.したがって、圧縮軟化及び引張軟化挙動は考慮していない.また、降伏の判定には Drucker-Prager の降 伏条件式を採用し、ひび割れモデルは分布ひび割れモ デルを用いている。圧縮強度 f'_c は別途実施した材料 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 v_c は、それぞれ $\rho_c = 2.35 \times 10^3$ kg/m³、 $v_c = 0.167$ とした。

(3) 重錘, 載荷治具および基礎地盤

重錘と載荷治具 (鋼材) およびコンクリート基盤要 素に関しては、実験時に塑性変形やひび割れが確認 されていないことより、全て弾性体と仮定した.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、重錘の場合には $E_w = 206$ GPa、 $\rho_w = 7.65 \times 10^3$ kg/m³、 $v_w = 0.3$ 、載荷治具の場合には $E_j = 206$ GPa、 $\rho_j = 7.85 \times 10^3$ kg/m³、 $v_j = 0.3$ 、コンクリート基盤の場 合には、 $E_g = 20$ GPa、 $\rho_g = 2.35 \times 10^3$ kg/m³、 $v_g = 0.167$ とした.なお、重錘の密度 ρ_w は、重錘質量を解析モ デルの体積で除して評価している。

4. 数値解析結果及び考察

4.1 各種応答波形

図-7には、本数値解析より得られた各種時刻歴応 答波形を実験結果と比較する形で示している。なお、 載荷点変位 δ_x は、 図-7に示すように擁壁の回転成 分を除去し、支柱基部を基準とした相対変位である。

図-7(a) に示す重錘衝撃力波形において、実験結果

(黒線)は、いずれの試験体においても正弦半波と高周 波成分を伴う第一波と、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、PS7/5 試験体に関す る波形の継続時間は、落下高がH = 1 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 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 程度長い.落下高H = 2 mの場 合における継続時間は 55 ms 程度であり、PS7/5 試験 体と比較して長いことが確認できる.

数値解析結果(赤線)に着目すると,PS7/5 試験体の 場合には,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,PS3 試験体 の場合には,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と大きく異なり,その継続 時間も実験結果と比較して長いことが確認できる.

図-7(b)に示す載荷点変位波形に着目すると,実 験結果において,落下高H=2mの場合におけるPS3 試験体の変位量は,PS7/5 試験体の場合と比較して大 きいことが確認できる.これは,根入れ深さが不足し ていることが要因であるものと推察される.また,各 変位波形は,根入れ深さや落下高に関わらず,最大値 を示した後に残留していることが分かる.この傾向 は,PS7/5 試験体に関する数値解析結果においても同 様に確認され,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,PS3 試験体における数値解析



結果を見ると,波形の立ち上がりは実験結果とよく対応しているものの,最大変位に関しては過大に評価している.

図-7(c) に示す擁壁の回転角波形を見ると,実験結 果の最大回転角は,落下高が同一の場合には,支柱の 根入れ深さに関わらず同程度であることが分かる.一 方,数値解析結果には,いずれの場合においても波形 の立ち上がりは実験結果と一致しているものの,その 後は過大に評価しており,実験結果をよく再現できて いないことが分かる.

4.2 支柱の載荷側縁軸方向ひずみ分布に関する経時 変化

図-8には、落下高H = 2mの場合に関して、数値 解析結果から得られた支柱の載荷側縁軸方向ひずみ分 布の経時変化 ($t = 0.3 \sim 300$ ms)を、実験結果と比較 して示している。なお、実験結果の縁ひずみ ϵ_i は、支 柱ウェブに貼付した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。

実験結果(黒丸)に着目すると,重錘衝突直後t = 0.3 ms では,いずれの試験体においても載荷点近傍において圧縮ひずみが発生していることが分かる.また,擁壁内では擁壁天端から 250 mm 程度まで引張ひずみが発生していることが見て取れる. $t = 0.5 \sim 1$ ms では,擁壁内にひずみが伝播し,引張ひずみの発生領域が拡大している.t = 3 ms では,気中部のひずみ分布が乱れ始めている様子が確認できる.t = 10 ms では,いずれの試験体においても基部近傍において 0.2% を上回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. なお, 支柱の根入れ深さによる影響に着目すると, PS7/5 試験体の場合には根入れ端部 近傍において零ひずみに漸近しているのに対し, PS3 試験体の場合には根入れ端部近傍にひずみが発生して いることが確認できる. さらに時間が経過した t = 25 msにおいて, ひずみ分布が大きく乱れるとともに, 根 入れ端部近傍において非常に大きなひずみが発生して いることが分かる. この傾向は, PS7/5 試験体と大き く異なっている. また, これらのひずみ分布と後述の ひび割れ分布(図-9)を考慮すると, 支柱の必要根入 れ深さは 500 mm 程度であるものと推察される.

次に数値解析結果(赤線)に着目すると, PS7/5 試験 体の場合には,気中部において実験結果との差異は確 認されるものの,擁壁内部に関しては実験結果を概ね 再現していることが分かる.また,擁壁内部における 零ひずみに漸近する深さに関しても実験結果とほぼ対 応していることも確認できる.一方,PS3 試験体の場 合には,t = 25 ms 以降で数値解析結果と実験結果に 差異が確認されるものの,実験結果と同様に根入れ端 部近傍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 さが不足している場合の実験結果のひずみ分布性状を 定性的に再現できているものと判断される.

4.3 支柱基部近傍および擁壁天端の損傷状況

図-9には、落下高 H=2mの場合における実験終 了後および数値解析終了時点(t=300ms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、実験 結果と数値解析結果を比較して示している.なお、数



図-9 支柱基部の変形および擁壁の損傷状況の比較(落下高 H = 2 m)

値解析結果における赤色の領域は,ひび割れ発生箇所 を意味している.

まず,支柱基部の実験結果に着目すると,PS7/5 試 験体の非載荷側フランジには局部座屈が発生している が,PS3 試験体の場合にはその発生は確認できない. また,擁壁部の損傷について見ると,PS7/5 試験体の 場合には天端コンクリートに軽微な剥離が生じている 程度であることが分かる.一方,PS3 試験体の場合に は載荷側フランジから非載荷側に向かってひび割れが 大きく開口している様子がうかがえる.このように, PS3 試験体の損傷状況が PS7/5 試験体の場合と大きく 異なるのは,支柱の根入れ深さが不足していることに 起因しているものと推察される.

次に数値解析結果に着目すると,支柱基部の損傷状況は実験結果と概ね対応していることが分かる.擁壁の損傷状況に関しては,PS7/5 試験体の表面に若干のひび割れが確認できるものの,実験結果と同様に顕著なひび割れは発生していないことが見て取れる.一方,PS3 試験体の場合には,支柱基部近傍においてひび割れの領域が広く分布しており,実験結果の損傷状況とは異なっているものの,擁壁が大きく損傷する傾向は対応しているものと推察される.また,このような傾向は根入れ深さが不足している場合のみであり,前述の支柱軸方向ひずみ分布と併せて総合的に判断することによって,必要根入れ深さを数値解析的に評価可能であるものと判断される.

5. まとめ

- 提案の数値解析モデルは、根入れ深さが不足している試験体を除き、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ものと判断される.ただし、擁壁回転角波形に関しては、実験結果よりも過大な評価を与える.
- 2)実験結果において、根入れ深さが不足している場合における試験体の挙動は、根入れ深さが確保されている場合とは異なっている。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,提案の数値解析モデルを用いることで,実験 結果から得られる支柱の必要根入れ深さを適切に 評価可能性であるものと判断される.
- 4)数値解析結果から得られる支柱基部の変形性状は、実験結果と大略一致する.また、擁壁の損傷状況に関しては、支柱の根入れ深さが確保されていない場合を除き概ね再現可能である.

参考文献

- 1) 日本道路協会:落石対策便覧, 2017.
- Hallquist, J. O.: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2018.
- 3) 小室雅人, 瓦井智貴, 岸 徳光, 林 茂樹, 竹内 観月:落石防護擁壁上に設置された貫通型落石防 護柵支柱に関する衝撃応答解析, 構造工学論文集, Vol.68A, pp. 975-984, 2022.
- 小室雅人,岸 徳光,張 広鋒:部分的にコンク リートを充填した鋼管橋脚模型の耐荷性状に関す る数値解析的研究,応用力学論文集,Vol.6, pp. 475-486, 2003.
- 5) 近藤里史,小室雅人,岸 徳光,山元康弘:鋼 製防護柵支柱に関する重錘落下衝撃荷重載荷試 験,コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp. 691-696, 2019.
- 6) 沼田あずさ、小室雅人、近藤里史、岸 徳光:載 荷位置を変化させた貫通型鋼製防護柵支柱模型 の衝撃応答解析、コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp. 625-630, 2020.
- 7)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.