

論文 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

竹内 観月^{*1}・小室 雅人^{*2}・岸 徳光^{*3}・林 茂樹^{*4}

要旨：本論文では、落石防護擁壁上に設置する防護柵支柱模型の根入れ深さを变化させた衝撃荷重載荷重実験を対象に三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、実験結果との比較によって解析モデルの妥当性を検討するとともに、支柱の根入れ深さに関する数値解析的検討を行った。その結果、1) 擁壁回転角を除く各種時刻歴応答波形は実験結果を概ね再現可能であること、2) 提案の数値解析モデルを用いることによって、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であること、および3) 基部近傍における支柱の変形性状を適切に評価できる可能性があること、などが明らかになった。

キーワード：防護柵支柱、根入れ深さ、落石防護擁壁、衝撃応答解析

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ものと判断される。



写真－1 擁壁天端に設置される従来型落石防護柵の例

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、別途実施した実規模衝撃荷重載荷重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2 m、幅3 m、天端幅500 mm、道路側の勾配を1:0.4とした。支柱には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3 m間隔で設置されていることから、支柱1本分を考慮した3 m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0.4 m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。

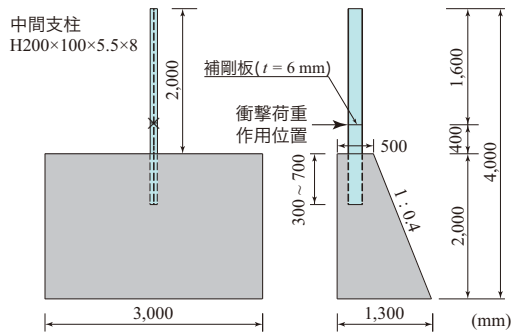
本論文では、支柱の根入れ深さによる支柱および擁壁に関する動的応答特性への影響を検討するために、根入れ深さを3種類(700, 500, 300 mm)に変化させている。**表－1**には実験ケースを一覧にして示している。試験体名の第1項目のPSに後続する数値 n は根入れ深さ($n \times 100$

*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科 博士前期課程 環境創生工学系専攻 (工) (学生会員)

*2 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 教授 博(工) (正会員)

*3 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 特任教授 工博 (正会員)

*4 室蘭工業大学 大学院工学研究科 博士後期課程 工学専攻 (正会員)



図－１ 試験体の形状寸法

表－１ 実験ケース一覧

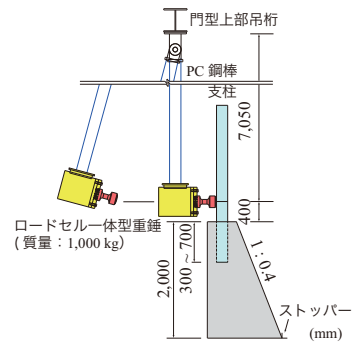
試験体名	荷重位置 L (m)	設定重錘 落下高さ H (m)	設定重錘 衝突速度 V (m/s)	実測重錘 衝突速度 V' (m/s)	実測入力 エネルギー E (kJ)
PS7-H1	0.4	1	4.43	4.40	9.7
PS5-H1				4.38	9.6
PS3-H1				4.50	10.1
PS7-H2		2	6.26	6.16	19.0
PS5-H2				6.21	19.3
PS3-H2				6.31	19.9

mm)を表している。第2項目のHは衝撃荷重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とした。

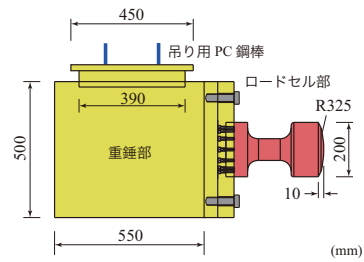
2.2 実験方法および測定項目

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: 1,000 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、振り子式により支柱に衝突させることによって载荷した。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。重錘の载荷点部形状は、片当たりを防止するために半径325 mmで高さが10 mm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、道路側つま先部には、衝撃荷重载荷による擁壁の水平移動を抑制するために、L形鋼を用いたストッパーを設置している。

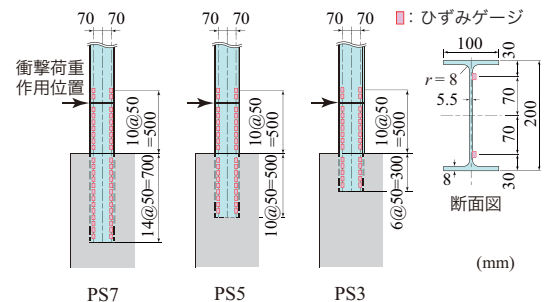
支柱には、根入れ深さの妥当性に関する検討を行うためにひずみゲージを貼付している。図－4には、ひずみゲージ貼付位置を示している。なお、ひずみゲージは、支柱とコンクリート間の付着挙動への影響を極力小さくす



図－２ 载荷装置概要



図－３ 重錘の形状寸法



図－４ 支柱に関するひずみの測定位置

るために、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、载荷点から上方には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' 、擁壁模型の回転角 θ や支柱の载荷点変位 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、载荷治具およびコンクリート基

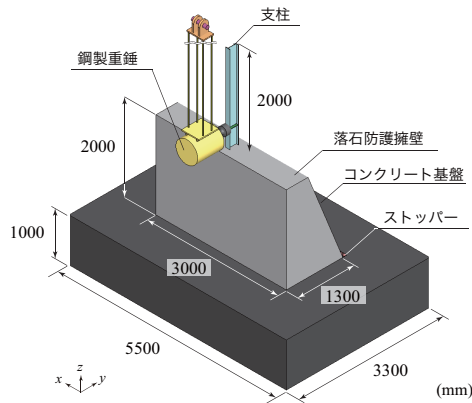


図-5 有限要素モデル

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。

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、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、静的と動的な場合を等しく0.3と仮定した。接触解析にはペナルティ法を採用した。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であった。

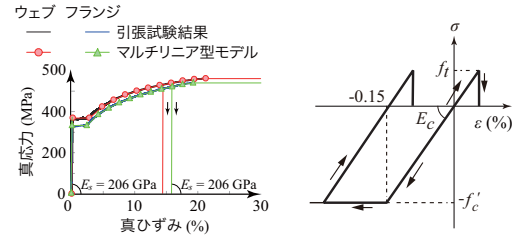
3.2 材料構成則

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

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	373	0.19	560	21.3
フランジ	343	0.17	532	19.2



(a) 支柱

(b) 擁壁

図-6 材料構成則

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

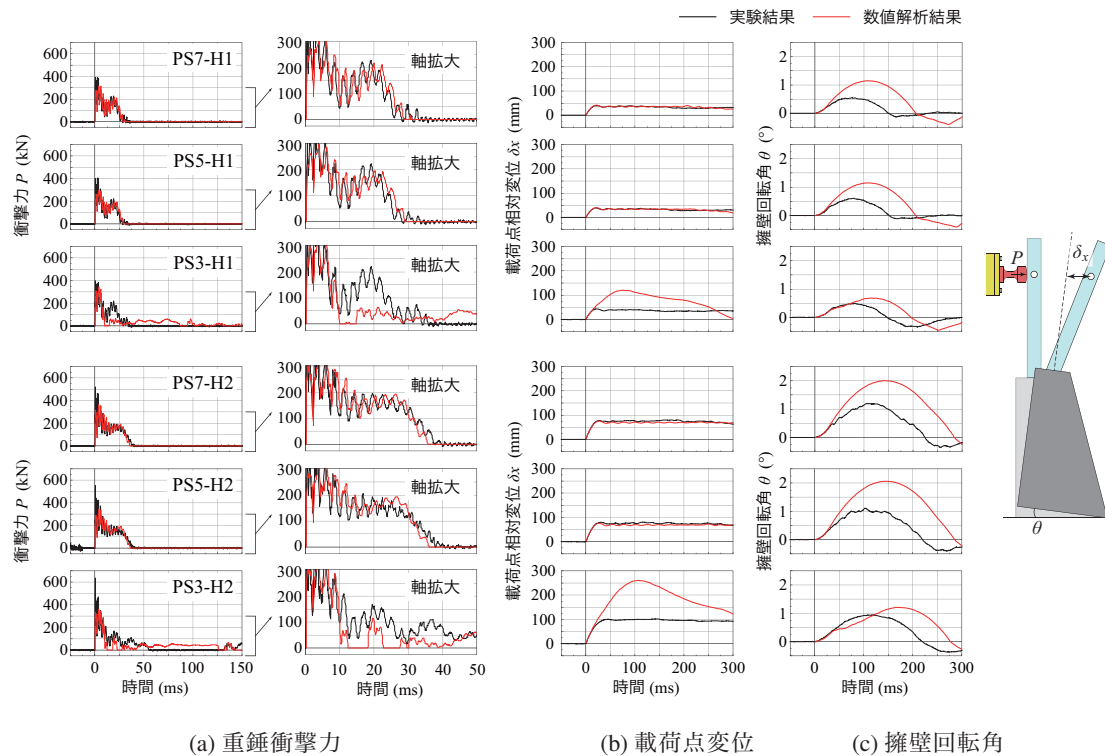
図-6 (a)には、H形鋼支柱に適用した応力-ひずみ関係を示している。H形鋼支柱の応力-ひずみ関係は、別途実施して得られた材料試験結果の真応力-真ひずみ関係を基に多直線近似によりモデル化した。なお、引張強度以降に関してはひずみが一定値となるように仮定した。また、圧縮側の応力-ひずみ関係は引張側と同一であると仮定した。降伏判定には von Mises の降伏条件を用いた。単位体積質量 ρ_s およびポアソン比 ν_s は、それぞれ $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_s = 0.3$ とした。

(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 ν_c は、それぞれ $\rho_c = 2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_c = 0.167$ 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 $E_w = 206 \text{ GPa}$ 、 $\rho_w = 7.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_w = 0.3$ 、載荷治具の場合には $E_j = 206 \text{ GPa}$ 、 $\rho_j = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_j = 0.3$ 、コンクリート基盤の場合には $E_g = 20 \text{ GPa}$ 、 $\rho_g = 2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_g = 0.167$ とした。なお、重錘の密度 ρ_w は、重錘



図－7 各種時刻歴応答波形の比較

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全ケースの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 δ_x は、図－7に示すように擁壁の回転成分を除き、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 $H = 1\text{ m}$, 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 程度長い。落下高 $H = 2\text{ m}$ 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。

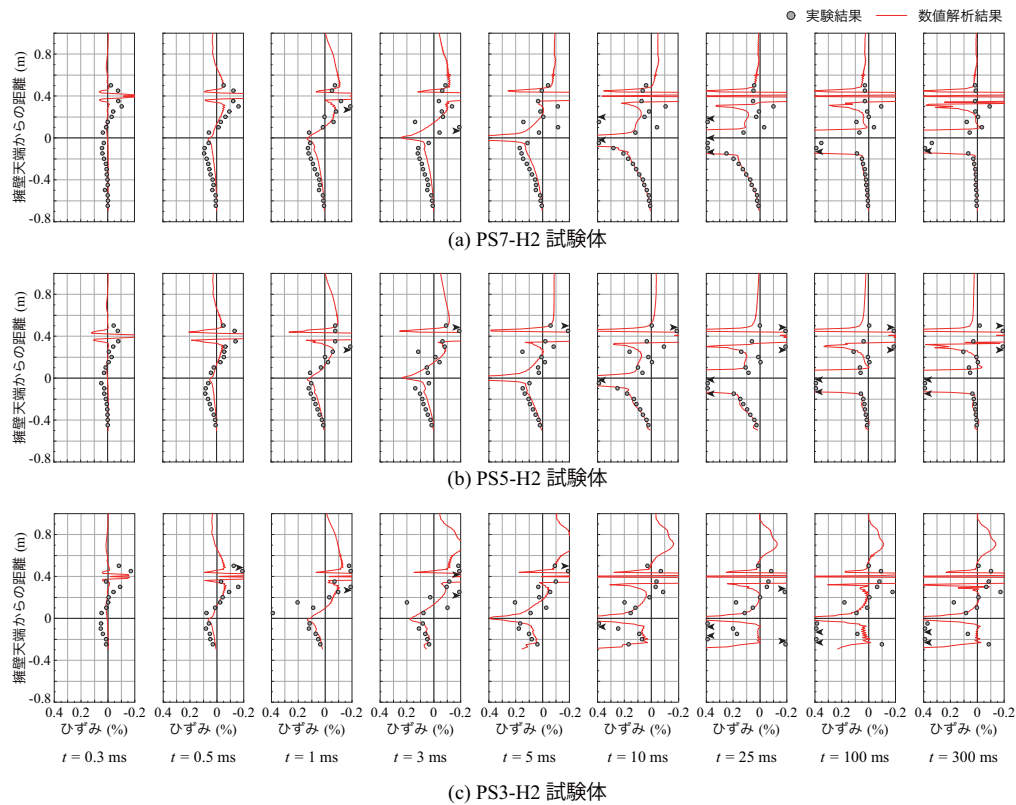
数値解析結果(赤線)に着目すると、PS7/5 試験体の場合には、重錘衝突初期の高周波成分を伴った第一波やその後の低周波成分波形に至るまで実験結果をほぼ適切に再現していることが分かる。一方、PS3 試験体の場合には、重錘衝突初期の高周波成分を伴った第一波目は概ね再現できているものの、その後の低周波成分波形に関しては実験結果と大きく異なり、その継続時間も実験結果と比較して長いことが確認できる。

図－7(b)に示す荷点変位波形に着目すると、実験結果において、落下高 $H = 2\text{ m}$ 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 $H = 2\text{ m}$ の場合に関して、数値解析結果から得られた支柱の荷側縁軸方向ひずみ分布の経時変化($t = 0.3 \sim 300\text{ ms}$)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。



図－8 支柱の荷側縁軸方向ひずみ分布の比較(落下高 $H = 2$ m)

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、PS3 試験体の場合には擁壁内の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

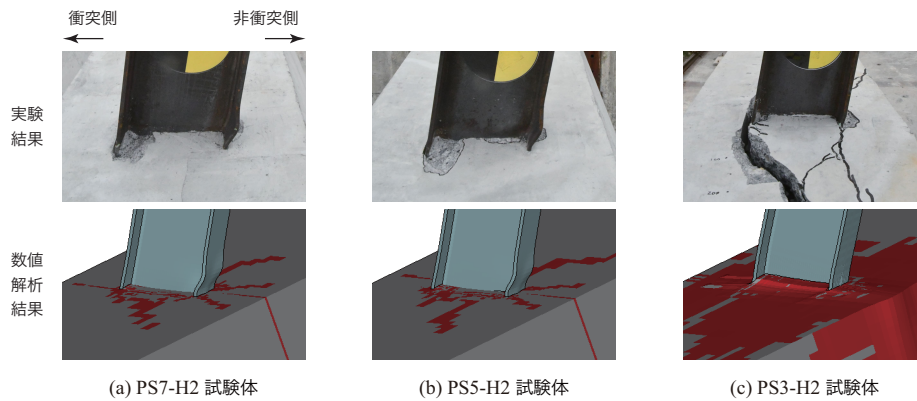
漸近する深さに関しても実験結果とほぼ対応していることも確認できる。一方、PS3 試験体の場合には、 $t = 25$ ms 以降で数値解析結果と実験結果に差異が確認されるものの、実験結果と同様に根入れ端部近傍では大きなひずみが発生していることが見て取れる。このことから、数値解析結果は、必要根入れが不足している場合の実験結果のひずみ分布性状を定性的に再現できているものと判断される。

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 $H = 2$ m の場合における実験終了後および数値解析終了時点($t = 300$ ms 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、数値解析結果における赤色の領域は、ひび割れの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 試験体の非荷側(圧縮)側フランジには局部座屈が発生しているものの、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ことが分かる。一方、PS3 試験体の場合には荷側フランジから非荷側側に向かってひび割れが大きく開口している様子が窺える。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



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)

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、PSP7/5 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に関して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できる可能性があるものと判断される。

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モデルの確立を目的に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、以下のように示される。

- 1) 提案の数値解析モデルは、根入れ深さが不足している PS3 試験体を除き、衝撃力波形および支柱の荷重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) 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ものと判断される。
- 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できる可能性がある。
- 4) 数値解析結果から得られる支柱基部の変形状は、

実験結果と大略一致する。また、擁壁の損傷状況については、PS3 試験体を除き概ね再現可能である。

6. 謝辞

本論文の作成にあたり、室蘭工業大学の瓦井智貴先生より有益なご助言を賜りました。また、室蘭工業大学構造力学研究室の久井昭史君、高田柊君をはじめとする学生諸君には、実験計測、データ処理など多大な支援を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

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.
- 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.
- 4) 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：荷重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.