

論文 高曲げ剛性を有する落石防護柵支柱に柵の設計衝撃荷重載荷時における必要根入れ深さに関する数値解析的検討

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3 mのコンクリート擁壁に設置する高さ4 mの落石防護柵に用いられる鋼製支柱を対象に、防護柵の可能吸収エネルギー相当の衝撃荷重を載荷させ、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、必要根入れ深さに関する検討を行った。その結果、1)支柱の必要根入れ深さは、800 mm程度として評価される、2)便覧に基づいて算定される必要根入れ深さは、数値解析結果と比較して3倍以上の安全側の値を示すこと、3)著者らによって提案されている計算モデルの場合には、本解析結果と比較して設計的に安全側の値を与える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、弾塑性衝撃応答解析

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、落石などから人命や道路交通網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、急崖斜面が迫っている箇所に敷設されている落石防護擁壁(以後、擁壁)天端に設置される場合が多い。その場合には、防護柵支柱(以後、単に支柱)は、一般に擁壁天端部を箱抜きして埋設設置される。

その支柱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⁾に準拠し、衝撃的挙動性状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、写真-1に示されるように落石衝突によって支柱埋設部のコンクリートが剥落する事例も報告されていることから、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、著者らは、実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、柵高が2 mで、支柱にはH200×100×5.5×8断面のH形鋼(以後、H200×100形鋼)を用いた、数多くの屋外実規模実験²⁾を実施して、

支柱の必要根入れ深さに関する検討を行い、合理的な評価手法も提案している。

また、柵高が4 m程度の場合には、通常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(以後、H200×200形鋼)が用いられている。これより、著者らは、高さが3 mの擁壁天端に高さが4 mの防護柵を設置する場合を想定して、支柱にH200×200形鋼を用い、基部に塑性ヒンジが発生して15度傾斜する場合の支柱の可能吸収エネルギー(49 kJ程度)を衝撃荷重として載荷させた場合を対象に弾塑性衝撃応答解析^{3)~4)}を実施し、現行設計法に基づく根入れ深さが安全側の値を示すことを明らかにしている。

一方で、防護柵全体の可能吸収エネルギーは100 kJ程度として求まり、支柱の可能吸収エネルギーよりも大きく評価される。しかしながら、実現象的には防護柵全体の可能吸収エネルギーを有する落石が支柱に衝突することも想定されことから、このような状況に対する検討を行うことは、設計工学上肝要であるものと判断される。

このような観点から、本研究では、防護柵全体の可能吸収エネルギーを有する落石が支柱に載荷する場合を想定し、支柱の必要根入れ深さに関する現行設計法や上述の著者らが提案している評価手法²⁾の妥当性を検証することを目的に、落石衝撃荷重が曲げが卓越する高い位置に作用する場合と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とし、根入れ深さを変化させた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²⁾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⁵⁾を踏襲し、構造解析用汎用コードLS-DYNA⁶⁾(ver. R15)を用いて行うこととした。



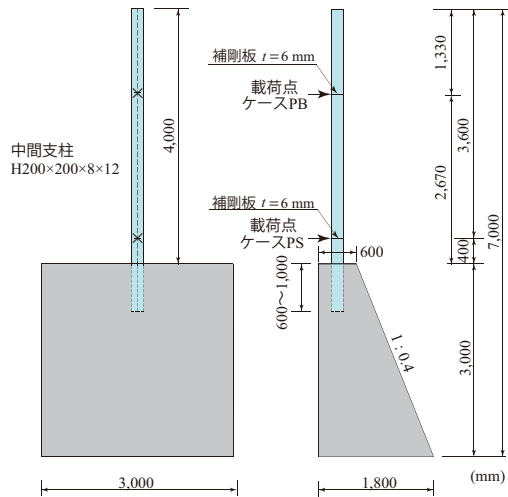
写真-1 擁壁の支柱基部近傍部における損傷例

*1 勇建設(株) 営業部 博(工) (正会員)

*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 特任教授 工博 (正会員)



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	荷重位置 L (mm)	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)
PB10	2,670	1,000	10.0	14.0	98.0
PB8		800			
PB6		600			
PS10	400	1,000	10.0	14.0	98.0
PS8		800			
PS6		600			

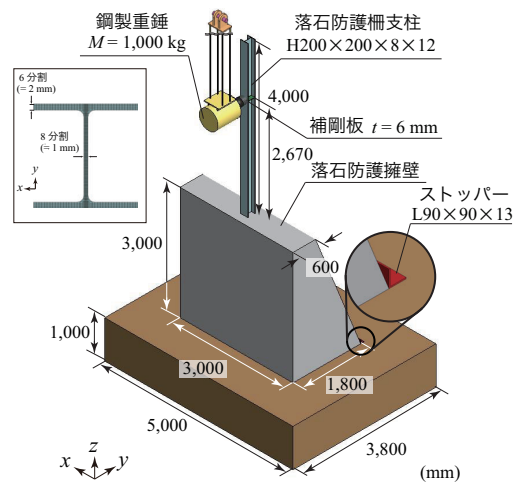
2. 数値解析概要

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。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⁷⁾を参考に、実防護柵として通常採用されている高さ 3 m、幅 3 m、天端幅 0.6 m、道路側の勾配を 1:0.4 とした。支柱には、柵高 4 m 以上を有する実防護柵の中間支柱として通常使用されている H200×200 形鋼を用い、根入れ深さを 1,000、800、600 mm の 3 種類に変化させて数値解析を行った。支柱は擁壁天端中央に埋設設置し、その柵高を 4 m と設定した。なお、擁壁幅は、実防護柵の中間支柱間隔が 3 m として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 3 m と設定した。衝撃荷重作用位置（以後、荷重点）には、既往の衝撃荷重載荷実験²⁾と同様に、フランジの局部座屈を防ぐために厚さ 6 mm 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。表中のケース名における“PB”は、曲げが卓越する場合であることを示し、“PS”は曲げとせん断が連成する場合を示す。また、後続の数値 n は根入れ深さ ($n \times 100$ mm) を表している。なお、曲げが卓越する場合には、重錘は便覧¹⁾において規定されている落石衝突位置



図－２ 有限要素モデル(ケース PB)

の最大高さである柵高の 2/3（擁壁天端から 2.67 m）の位置に作用させることとした。また、曲げとせん断が連成する場合には、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ため、荷重点を擁壁天端から 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、落下高さは前述のように既往の研究^{3)~4)}で対象とした支柱の可能吸収エネルギーよりも大きく、便覧¹⁾に掲載されている H200×200 形鋼を用いた落石防護柵の可能吸収エネルギーを参考に $H = 10$ m とした。コンクリートの圧縮強度 f'_c は、実規模実験²⁾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 $Z_x = 472 \times 10^3$ mm³ であり、H200×100 形鋼の場合 ($Z_x = 181 \times 10^3$ mm³) 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^{3)~4)}と同様に試験体の他、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、8 節点固体要素を用いかつ対称性を考慮せずに構造全体をモデル化した。支柱のフランジおよびウェブに関する要素分割は、板厚方向に 6 ないし 8 分割とし、幅方向の要素長は 1~2 mm 程度、軸方向には 10 mm 程度を基本に行っている。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 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に示す入力重錘衝突速度 V を重錘要素の全

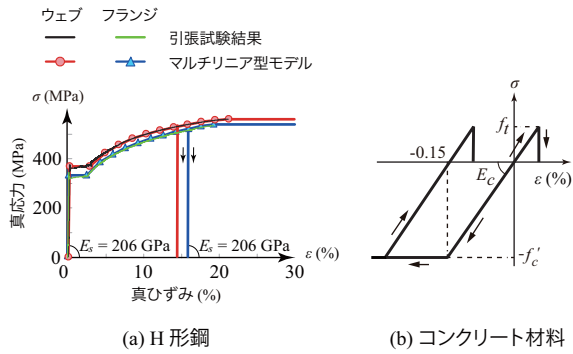


図-3 材料構成則

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、実規模実験時²⁾と同様に擁壁が重錘衝突によって回転できるように、擁壁の道路側底面端部に沿ってL形鋼材(L90×90×13)を設置した。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。

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

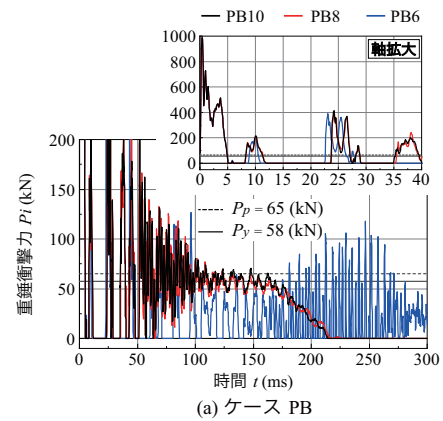
図-3には本数値解析で用いたH形鋼およびコンクリート材料に関する応力-ひずみ関係を示している。本研究では、実構造により近い条件下で検討を行うこととし、各材料物性値には実規模実験²⁾と同様の値を採用した。

(a)図より、H形鋼には材料試験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。図に示すように、ウェブおよびフランジ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 ν_s は、公称値である $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_s = 0.3$ とした。降伏の判定にはvon Misesの降伏条件を用いている。

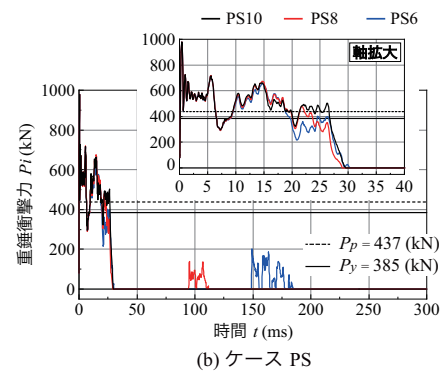
(b)図より、コンクリート材料に関しては、圧縮側は圧縮強度に到達した段階で完全降伏するバイリニア型、引張側は引張強度に到達した段階で引張応力を伝達しないモデルを採用した。圧縮強度 f'_c は、前述のとおり 30 N/mm^2 とし、引張強度は圧縮強度の1/10と簡略化して仮定した。単位体積質量 ρ_c およびポアソン比 ν_c には公称値を用いることとし、 $\rho_c = 2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_c = 0.167$ を用いた。

重錘および荷重治具に関しては、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としてモデル化し、これらの弾性係数、単位体積質量およびポアソン比には公称値を用いた。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。

また、ひずみ速度効果に関しては、数値解析手法の妥

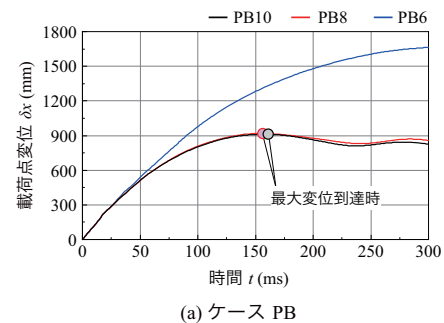


(a) ケース PB

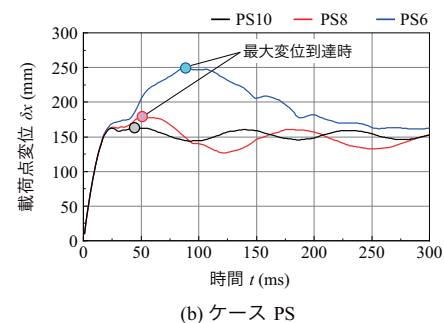


(b) ケース PS

図-4 重錘衝撃力の時刻歴応答波形



(a) ケース PB



(b) ケース PS

図-5 荷重点変位の時刻歴応答波形

当性検討⁵⁾と同様に、全ての材料に関して簡略化して考慮していない。

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

表－２ 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 $P_{i,max}$ (kN)	波動継続時間 T (ms)	最大変位 δ_{max} (mm)	経過時間 t_{max} (ms)
PB10	988	214	911	159
PB8	988	225	919	155
PB6	988	300 以上	1,672	300 以上
PS10	979	29.6	163	46
PS8	979	29.0	179	52
PS6	979	30.4	249	88

関する時刻歴応答波形を、载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。図中には、载荷初期から 40 ms までを拡大した波形と共に、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。

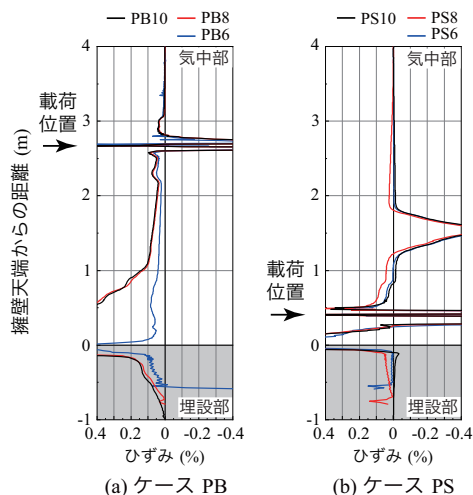
また、図－５には、支柱のみの相対的な载荷点変位（以後、単に変位） δ_x に関する時刻歴応答波形を示している。さらに、表－２には各ケースに関する最大衝撃力 $P_{i,max}$ と衝撃力の波動継続時間 T 、および最大変位 δ_{max} とその経過時間 t_{max} を一覧にして示している。

図－４の衝撃力波形 P_i に着目すると、(a) 図のケース PB の PB10/PB8 の場合には、载荷初期に最大衝撃力を示した後、経過時間が $t = 23.5 \sim 212.5$ ms 前後まではほぼ台形状の平均衝撃力波形を示している。それに対して、PB6 の場合には $t = 300$ ms 経過後においても除荷状態には至らず高周波成分が励起しており、前 2 ケースとは異なった波形性状を示している。これより、ケース PB6 の場合には、根入れが不十分であることが示唆される。

一方、(b) 図のケース PS の場合には、3 ケース共に载荷初期に最大衝撃力 $P_{i,max}$ を示した後、 $t = 5$ ms 前後まで 550 kN 程度のほぼ一定の衝撃力波形を示し、その後 450 kN 程度の平均衝撃力を示して、経過時間が $t = 27$ ms 前後から零レベルへの除荷状態に至っている。

また、根入れが十分であると推察されるケース PB10/PB8 と PS 全ケースにおける最大衝撃力発生後の平均衝撃力は、静的な降伏荷重 P_y および全塑性荷重 P_p とほぼ対応していることが分かる。

図－５の载荷点変位波形 δ_x に着目すると、(a) 図のケース PB における PB10/PB8 の場合には、いずれも最大変位を示した後、減衰自由振動状態に移行していることが確認できる。一方で、PB6 の場合には解析終了時点（ $t = 300$ ms）においても単調増加の傾向を示しており、重錘衝撃力波形の場合と同様に支柱根入れ部が十分に定着されていないことが推察される。(b) 図のケース PS の場合には、PS10/PS8 において、共に最大変位到達後に自由振動状態に移行していることが分かる。最大変位およびその到達時間は、両ケース間で根入れ深さが浅い PS8 の場合が PS10 の場合と比較して若干大きな値を示し、かつ到達時間も



図－６ 最大変位到達時における载荷側支柱縁ひずみ分布

遅くなっている。これより、PS8 の損傷程度は PS10 よりも僅かに大きいことが推察される。一方で、PS6 の場合には、前 2 ケースの場合より 40 ms 程度遅れて最大変位に到達し、その後ほぼ単調に減少しており、減衰振動状態には至っていないことが分かる。これより、ケース PS6 の場合には、前述の 2 ケースと比較して根入れが若干不足していることがうかがわれる。

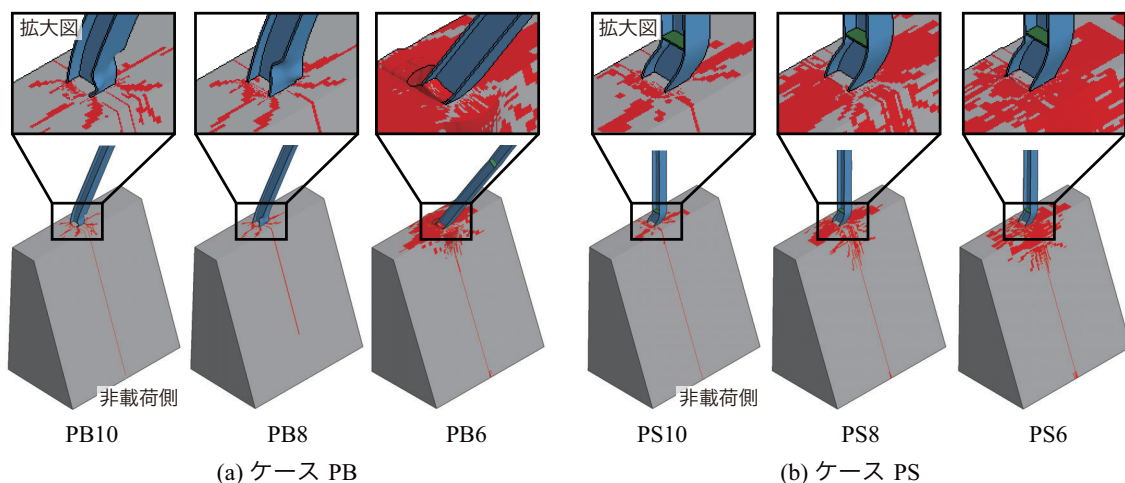
3.2 最大変位到達時における支柱縁ひずみ分布

図－６には、最大変位到達時における载荷側支柱縁ひずみ分布を示している。载荷点近傍部のひずみ分布に着目すると、いずれのケースの場合においても 0.4% 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。基部近傍に関しては、(a) 図のケース PB の場合において、PB10/PB8 の場合には基部から上方 500 mm の領域において塑性化に至っていることから、塑性ヒンジ状態に至っていることが推察される。それに対して、PB6 の場合には擁壁天端位置近傍の狭い領域においてのみ 0.4% 程度に達していることから塑性ヒンジは形成されず、支柱は基部における角折れの状態には至っていないことが推察される。(b) 図のケース PS の場合には、3 ケース共に類似した領域において塑性化に至っている。

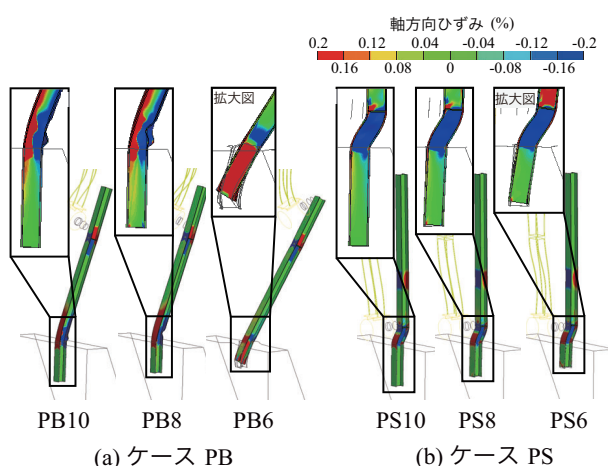
根入れ端部に着目すると、(a) 図のケース PB の場合には、PB6 のみが -0.4% に達しており、根入れが十分でないことが推察される。(b) 図のケース PS の場合において、PS10 の場合には零ひずみ状態を示していることから、完全に定着されていることが見て取れる。それに対して、PS8/PS6 の場合には最大 0.15% 程度の引張ひずみが示されており、弾性範囲内に収まっているものの定着性は若干低下していることが推察される。

3.3 支柱基部近傍および擁壁天端の損傷状況

図－７には、最大変位発生時における支柱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を比較して示している。(a) 図のケース PB に着目すると、支柱基部近



図－8 解析終了時点 ($t = 300 \text{ ms}$) における支柱基部の変形および擁壁の損傷状況



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

傍では前述の通り PB10/PB8 の場合において塑性ヒンジが形成されていることが確認できる。それに対して、PB6 の場合には、埋設部のウェブ全体が引張ひずみ状態を呈し、かつ支柱は剛体的に変位し引き抜かれている状況が明確に示されている。(b) 図のケース PS に着目すると、3 ケース共に荷重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。根入れ端部の引き抜け状況を 3 ケースで比較すると、PS6 の場合に明確な引き抜けが確認できる。また、天端近傍埋設部においても擁壁部と支柱間に隙間が確認でき、埋設部は変位が小さいものの剛体的な挙動に至っていることが分かる。

図－8 には、解析終了時点 ($t = 300 \text{ ms}$) における支柱基部の変形および擁壁の損傷状況を示している。なお、本研究では、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、擁壁の非載荷側面の荷重点中心部の天端から底部に進展する曲げひび割れが確認できる。しかしな

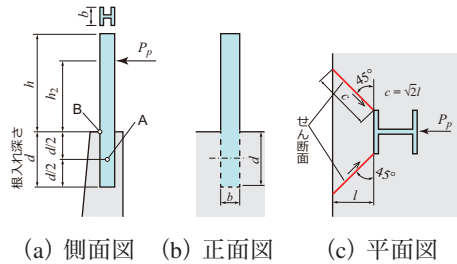
がら、全ての解析ケースの場合に発生していることから、支柱の根入れ深さに影響しない軽微な損傷であるものと判断される。(a) 図のケース PB に着目すると、PB10/PB8 の場合には支柱の非載荷側基部近傍に局部座屈を確認でき、支柱埋設部は擁壁中に十分定着されていることが示唆される。一方、PB6 の場合には局部座屈の兆候は示されず、基部から直線状に変位し、擁壁の損傷が著しく、支柱は十分に定着されていないことが分かる。

(b) 図のケース PS に着目すると、上述の通り 3 ケース共に著しいせん断変形に至っていることが分かる。擁壁の損傷度合いを見ると、PS10 の場合は最も軽度であり、ひび割れは曲げひび割れを除き天端面に限定していることが分かる。PS8 の場合において、非載荷側面には支柱の根入れ深さに対応した領域に斜めひび割れと共に曲げひび割れが発生しているが、損傷は顕在化していないことが分かる。それに対して、PS6 の場合には、擁壁の非載荷側面上における損傷が顕在化しており、図－7 に示されている支柱と擁壁間の隙間を考慮すると、支柱は擁壁中に十分に定着されていないことが推察される。

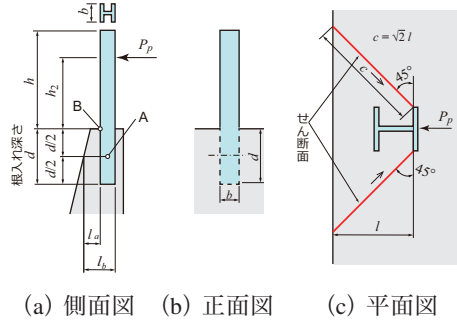
以上より、前述の各種時刻歴応答波形や支柱縁ひずみ分布、支柱の変形状況および軸方向ひずみコンターや、支柱近傍擁壁面におけるひび割れ発生状況から総合的に判断すると、ケース PB/PS 共に根入れ深さが 800 mm 程度までは十分に定着が確保されているものと判断される。これに対して、根入れ深さが 600 mm の場合には、荷重位置にかかわらずに根入れ深さが不足していることが推察される。

4. 設計根入れ深さと数値解析結果との比較

便覧¹⁾では、擁壁上に設置する防護柵支柱の根入れ深さは、図－9 に示すように、支柱の非載荷側フランジによる支圧応力も含めた曲げ圧縮応力と、非載荷側フランジ両端部からの押抜きせん断破壊に対して照査すること



図－9 現行設計法に基づく設計法の考え方¹⁾



図－10 著者ら²⁾によって提案された設計計算モデル

が規定されている。著者らは、これまでに各種時刻歴応答波形、支柱軸方向ひずみ分布および支柱の変形状態や擁壁の損傷状況等の実規模実験結果に基づき、図－10に示すように、支圧を考慮した曲げ応力度の照査は行わず、押抜きせん断破壊面が载荷側フランジ端から45°方向に形成されると仮定し、かつ根入れ深さの1/2の高さにおけるかぶり厚 l_b を考慮した場合のせん断応力度の照査を行うことのみで、必要根入れ深さが決定可能であることを提案²⁾している。しかしながら、このモデルは、支柱にH200×100形鋼を使用した場合に限定して検証されたものであり、本論文で検討しているH200×200形鋼の支柱における検証には至っていない。

ここでは、支柱にH200×200形鋼を使用した場合における便覧¹⁾に基づいて評価される必要根入れ深さ d_r 、著者ら²⁾によって提案されたモデルに基づいた必要根入れ深さ d_{mr} 、および本数値解析結果の d_{ar} に関する比較を試みることとする。

便覧¹⁾に基づく場合には、ケースPB载荷の場合に関しては支圧力作用下の曲げ圧縮応力に対して $d_{rb,b} = 912 \text{ mm}$ 、押抜きせん断破壊に対して $d_{rb,s} = 388 \text{ mm}$ 、同様にケースPS载荷の場合に関してはそれぞれ $d_{rs,b} = 1,563 \text{ mm}$ 、 $d_{rs,s} = 2,588 \text{ mm}$ として求められ、最終的な必要根入れ深さは $d_r = 2,588 \text{ mm}$ として評価される。また、提案モデル²⁾に基づいて評価される必要根入れ深さは、ケースPS载荷時の $d_{mr,s} = 894 \text{ mm}$ として求められる。一方で、本数値解析によって得られた必要根入れ深さは、前述のとおり $d_{ar} = 800 \text{ mm}$ 程度として評価される。

以上より、便覧¹⁾に基づいて算定される必要根入れ深さ

は本数値解析結果に対して工学的に3倍以上の安全側の値を示している。また、著者らによって提案された評価モデル²⁾の場合には、本数値解析結果に対して安全側の値を与え、支柱にH200×200形鋼を使用した場合においても十分適用可能であることが明らかになった。

5. まとめ

本論文では、高さが3 mの落石防護擁壁上に柵高4 mの防護柵を設置した場合を想定し、防護柵支柱にH200×200形鋼を用いた場合において、防護柵の可能吸収エネルギー相当の落石衝撃荷重が、曲げが卓越する高い位置と、曲げとせん断が連成する比較的低い位置に作用する場合を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施して支柱の必要根入れ深さ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) 本数値解析結果の必要根入れ深さは载荷位置に関わらず800 mm程度として評価される。
- 2) 現行設計法に基づき算定される必要根入れ深さは、解析結果と比較して3倍以上の安全側の値を示す。
- 3) 著者ら²⁾によって提案されたモデルに基づいた場合には、本解析結果と比較して安全側の値を与え、支柱にH200×200形鋼を使用した場合においても適用可能である。

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, 岸 徳光, 瓦井智貴, 近藤里史, 竹内観月：根入れ深さを变化させた実規模落石防護柵支柱の衝撃荷重载荷実験，構造工学論文集, Vol. 69A, pp. 1095-1106, 2023
- 3) 林 茂樹, 小室雅人, 瓦井智貴, 岸 徳光：曲げとせん断が連成する衝撃荷重载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，コンクリート工学年次論文集, Vol. 46, No. 2, pp. 847-852, 2024
- 4) 高田 柊, 小室雅人, 林 茂樹, 瓦井智貴：曲げが卓越する衝撃荷重载荷時における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，コンクリート工学年次論文集, Vol. 46, No. 2, pp. 853-858, 2024
- 5) 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
- 6) ANSYS, Inc.: LS-DYNA User's Manual R15, 2024
- 7) 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, 2024