

載荷位置を変化させた貫通型落石防護柵支柱に関する衝撃荷重載荷実験

Impact loading tests of through-type steel posts embedded into prototype rockfall protection wall with different loading points

(株)砂子組 ○正会員 近藤 里史 (Satoshi Kondo) 室蘭工業大学 正会員 小室 雅人 (Masato Komuro)
室蘭工業大学大学院 正会員 林 茂樹 (Shigeki Hayashi) 勇建設 (株) 正会員 岡本 淳敏 (Atsutoshi Okamoto)
室蘭工業大学 正会員 瓦井 智貴 (Tomoki Kawai) (株)砂子組 正会員 佐藤 昌志 (Masashi Satoshi)
室蘭工業大学大学院 学生員 竹内 観月 (Mizuki Takeuchi) 室蘭工業大学 名誉会員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

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。その一つである従来型落石防護柵は、道路沿いのコンクリート基礎上に設置される他、落石防護擁壁天端に設置される場合も多い。特に、無筋コンクリート製である落石防護擁壁の上に設置される場合には、天端部を箱抜きして埋設される。

支柱の防護擁壁への根入れ深さに関する現行設計は、落石衝撃による動的挙動は考慮せずに静力学に基づき落石対策便覧 (以後、便覧)¹⁾ に即して行われている。しかしながら、支柱埋設部コンクリートが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、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、防護柵支柱の根入れ深さに関する合理的な設計法を確立することを最終目的に、鋼製支柱をモデル化した H 形鋼 (H100×100×6×8) をコンクリート躯体中に貫通させた小型試験体模型を製作し、曲げが卓越する場合と曲げと共にせん断力が卓越する場合に対して室内静荷重載荷実験および衝撃荷重載荷実験を実施してきた^{2)~4)}。その結果、1) 静荷重および衝撃荷重載荷を問わず根入れ深さが確保されている場合には、支柱基部近傍に塑性ヒンジが形成されること、2) 衝撃荷重載荷時には静荷重載荷時に比較して根入れ深さが浅く評価される傾向を示すこと、3) 便覧¹⁾ に基づいて照査した場合の根入れ深さは、押抜きせん断破壊性状が実験結果と異なるものの、実験結果の根入れ深さとほぼ対応していること、等が明らかになっている。

しかしながら、これらの室内実験結果はいくつかの課題も指摘される。すなわち、1) 実支柱に用いられている H 形鋼断面よりも曲げ剛性が小さい断面のみの結果であること、2) コンクリート躯体の形状寸法が室内での実験装置の制約により直方体状であるため、実擁壁のように根入れ深さの増加に伴って支柱のかぶりが大きくなっていないこと、3) コンクリート躯体後部を定着版に固定していることにより、実構造と境界条件が異なること、である。

このような観点から、本研究では高さ 2 m、幅 3 m の実構造と同一断面を有する落石防護擁壁模型に実防護柵に用いられている支柱 (H200×100×5.5×8 形鋼) を擁壁内に貫通させた試験体を製作し、衝撃荷重載荷実験を実施した。本研究では、荷重作用位置が支柱や擁壁の挙動に及ぼす影響を検討するために、重錘衝突位置を曲げが卓越する擁壁天端から 1.4 m の高さに載荷する場合 (以後、FH14 試験

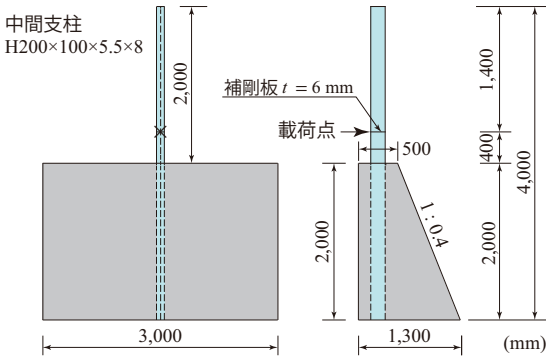
体)、曲げとともにせん断が卓越する高さ 0.6 m の位置とする場合 (以後、FH6 試験体)、およびせん断がより卓越する高さ 0.4 m の位置とする場合 (以後、FH4 試験体) の 3 種類について実験を実施した。なお、FH14 試験体は落石が擁壁天端から 5 本目と 6 本目のロープ中間部に衝突する場合を、FH6 試験体は 2 本目と 3 本目のロープの中間に衝突する場合を、FH4 試験体は 2 本目のロープに衝突する場合を想定している。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図－1 には、本研究で使用した支柱模型 (FH4 試験体) の形状寸法を示している。擁壁は高さ 2 m、幅 3 m、天端幅 0.5 m であり、道路側の勾配は 1: 0.4 である。なお、擁壁幅に関しては、実防護柵支柱が 3 m 間隔に設置されることから、支柱 1 本分を考慮することとし 3 m と設定した。また、支柱は擁壁天端の中央部に貫通して埋設しており、重錘衝突部の支柱ウェブ部にはフランジの局部座屈を防止するために、厚さ 6 mm の補剛板を溶接している。

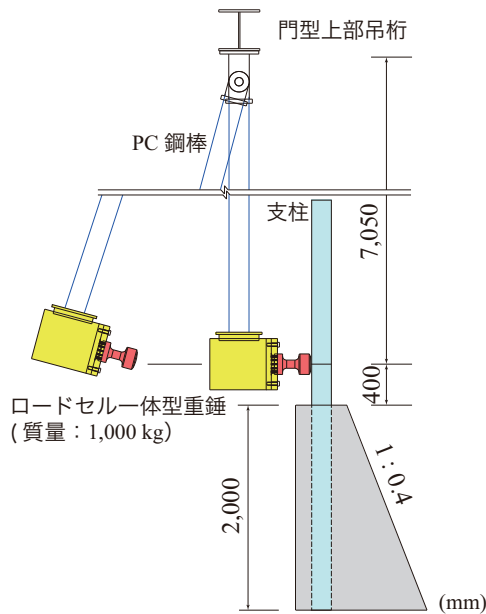
表－1 には、本研究で実施した実験ケースの一覧を示している。実験は重錘衝突位置を 3 種類に変化させ、各試験



図－1 試験体の形状寸法 (FH4 試験体)

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)	実測重錘 衝突速度 <i>V</i> (m/s)	実測入力 エネルギー <i>E</i> (kJ)	コンクリート 圧縮強度 <i>f</i> _c ' (MPa)	H 形鋼 降伏強度 <i>f</i> _y (MPa)
FH14	1.4	1.0	5.30	14.0	33.0	350
FH6	0.6		5.65	15.9		
FH4	0.4		4.41	9.7	28.5	316



図－2 荷重装置の概要図

体に対して一度だけ重錘を衝突させることで実施した。なお、重錘の落下高さはいずれも $H = 1\text{ m}$ 落下とした。表中、重錘の実測衝突速度は、高速度カメラから重錘の変位を計測し、それを微分することで算出した。なお、FH14とFH6試験体の実測衝突速度は、理論速度 ($V = 4.43\text{ m/s}$) よりも大きい値となっている。これは、実験時の落下高さは光波測距儀を用いて計測し決定しているが、計測の都合上、重錘重心位置ではなく先端部にターゲットを合わせて実施したことにより、重錘重心位置が計測ターゲットよりも高いことに起因している。また、表にはコンクリートの圧縮強度 f'_c および H 形鋼の降伏強度 f_y も合わせて示している。なお、支柱の公称断面係数は $Z_x = 181 \times 10^3\text{ mm}^3$ 、塑性断面係数は $Z_{px} = 205 \times 10^3\text{ mm}^3$ である。

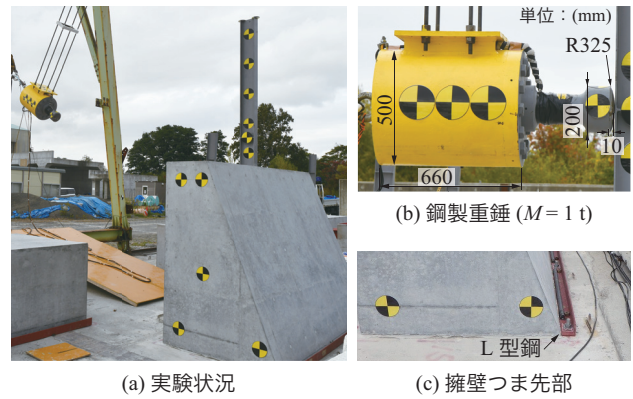
2.2 実験方法および計測項目

図－2には、衝撃荷重荷重装置の概要図を、写真－1には実験状況写真を示している。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(径17 mm)を用いて門型クレーンの上部吊桁より吊り下げ、振り子式によって支柱に衝突させることにより荷重した。なお、重錘の先端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。

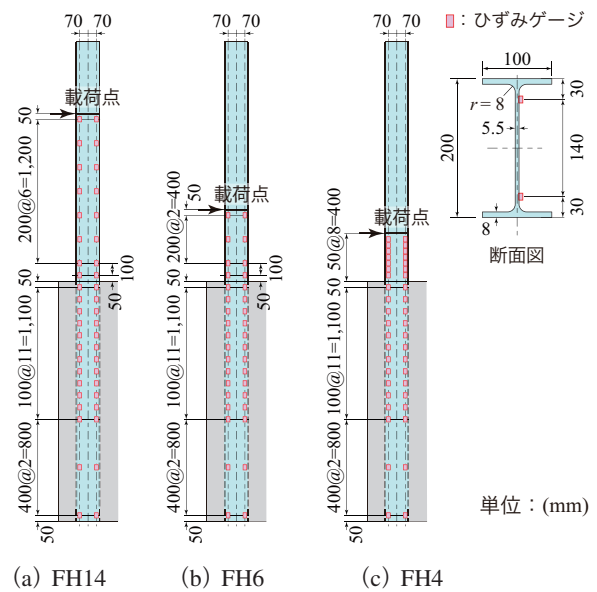
落石防護擁壁模型はコンクリート基盤上に設置することとし、実構造と同様に基盤に定着せずに擁壁の回転を許容するものとした。また、荷重による擁壁の運動を回転のみに制限するため、擁壁の道路側端部には写真に示すように L 型鋼のストッパーを設けている。

図－3には各試験体に関するひずみゲージの貼付位置を示している。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、H 形鋼のウェブ中心位置から上下70 mmの位置に貼付した。

本実験における測定項目は、(1) 重錘衝撃力 P_i 、(2) 支柱各点の軸方向ひずみ ε_i 、(3) 重錘の衝突速度 V やコンクリート擁壁の回転、支柱の変形状況等を検討するための2,000 fpsでの高速度カメラ撮影である。なお、実験終了後



写真－1 実験状況



図－3 ひずみゲージの貼付位置

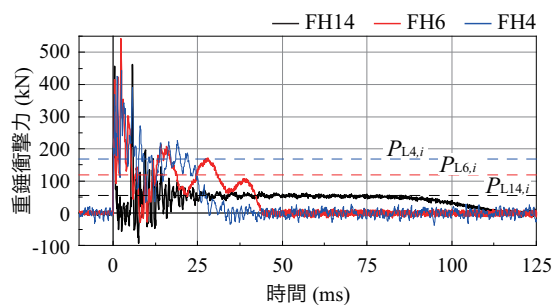
における擁壁のひび割れ分布をスケッチする予定であったが、ひび割れがほぼ確認されなかったことより、スケッチはしていない。

3. 実験結果および考察

3.1 各種時刻歴応答波形

図－4には、重錘衝撃力 P_i に関する全ケースの時刻歴応答波形を比較して示している。また、表－2には、重錘衝撃力波形より得られた重錘衝突初期以降の平均衝撃力、および擁壁天端を固定端と仮定し静的に荷重を荷重した場合における梁理論に基づいた降伏荷重 P_y および全塑性荷重 P_p について、実験ケース毎に一覧にして示している。

図より、重錘衝撃力波形はFH6/4試験体で衝突初期の継続時間が10 ms程度の正弦半波と高周波成分を伴う第一波その後の低周波成分から構成されていることが分かる。一方、FH14試験体の場合には、正弦半波の波形が示されずに高周波成分のみが励起している。正弦半波の波形は、両試験体で同程度の振幅を示し、ほぼ300 kN程度の値を示している。高周波成分は、重錘が支柱に衝突した際に発生する音波等に起因する振動成分であるものと推察される。また、荷重初期以降の低周波成分が卓越する領域に着目す



図－４ 重錘衝撃力波形

表－２ 各荷重値一覧

試験体名	衝突初期以降の平均衝撃力 P_i (kN)	降伏荷重 P_y (kN)	全塑性荷重 P_p (kN)
FH14	53	45	51
FH6	117	106	120
FH4	167	143	162

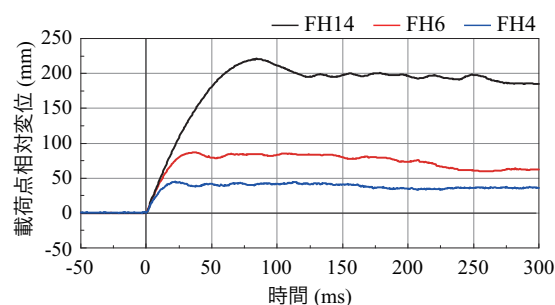
ると、荷重位置が低いほど周期が短く振幅が大きく示されるときともに、継続時間も短くなる傾向にあることが分かる。これは、基部からの荷重位置までの距離が短いほどたわみ剛性が大きくなり、かつ支柱の降伏荷重 P_y あるいは全塑性荷重 P_p が大きくなることによるものと推察される。さらに、点線で示した各試験体の衝突初期以降の平均衝撃力 P_i に着目すると、荷重位置が低いほど大きくなる傾向にあることが分かる。

ここで、表－２を見ると平均衝撃力 P_i は、静的な梁理論から算出した全塑性荷重 P_p の値と概ね対応していることが分かる。すなわち、衝撃荷重載荷時における作用荷重は、荷重位置によらず静的な全塑性荷重 P_p を用いて評価可能であることが明らかとなった。

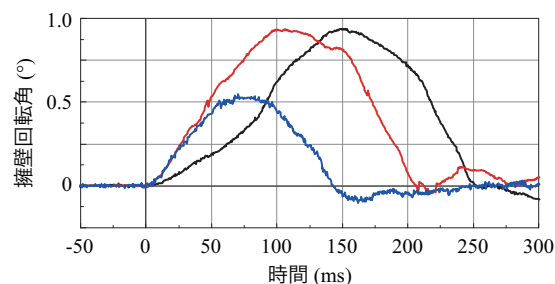
図－５には、全ケースに関する荷重点における相対変位および擁壁回転角の時刻歴応答波形を比較して示している。なお、横軸は重錘衝突時から 300 ms までを示している。また、荷重点の相対変位波形は擁壁回転による変位成分を除去した結果である。

(a) 図の荷重点の相対変位波形を見ると、荷重位置の高さの増加に対応して相対変位が大きくなっていることが分かる。また、いずれも最大変位到達後、残留変位が生じ減衰自由振動状態に至っていることも読み取れる。前述の重錘衝撃力波形(図－４)と比較すると、いずれの試験体に関しても平均衝撃力程度の荷重が載荷している状態の場合には荷重点変位が増加傾向を示し、衝撃力が除荷状態に推移する時点で最大変位を示していることが分かる。

(b) 図の擁壁回転角波形を見ると、いずれの試験体に関しても最大回転角を示した後に、荷重側に回転する傾向を示していることが分かる。これは、回転の復元時におけるリバウンドであるものと推察される。また、FH14 試験体を除き、荷重位置の高さに対応して最大回転角も増加傾向にあることが分かる。なお、FH14 試験体の場合には、他の試験体よりも曲げが卓越する傾向にあり、後述するように支柱基部に発生した局部座屈変形にエネルギーが消費されたことにより、FH6 試験体と同程度の最大回転角に至つ



(a) 荷重点の相対変位



(b) 擁壁回転角

図－５: 荷重点の相対変位および擁壁回転角の時刻歴応答波形



(a) FH14 試験体



(b) FH6 試験体



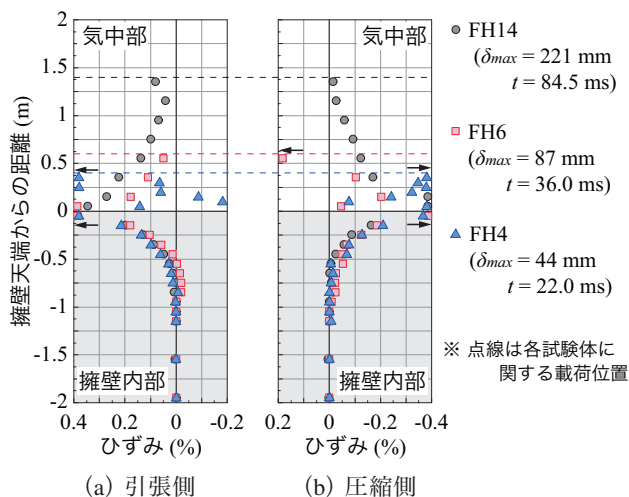
(c) FH4 試験体

写真－２ 支柱基部の変形および損傷状況

たものと推察される。

3.2 支柱基部の変形および擁壁天端部の損傷状況

写真－２には、実験終了後における各試験体の支柱基部近傍の変形および擁壁天端の損傷状況を比較して示している。写真中の赤線は、ひび割れあるいはコンクリートの剥離部分が明確となるように実験終了後に描いたものである。



図－6 最大変位発生時の支柱縁ひずみ分布

写真より、FH14 試験体の場合には、非衝突面である圧縮側フランジに局部座屈が生じていることが確認できる。また、引張側フランジには擁壁天端表面のみの軽微なコンクリートの剥離が確認できる。FH6 試験体の場合には、FH14 試験体と同様に、圧縮側フランジには局部座屈が生じているものの、その程度は FH14 試験体と比較して軽微となっている。また、引張側フランジ周囲の擁壁天端にも FH14 試験体と同様にコンクリートの剥離が確認される。FH4 試験体の場合には、圧縮側フランジの座屈変形が他の試験体と比べて非常に小さい。これは、荷重位置が低いことにより座屈荷重が大きくなったことによるものと推察される。また、引張側フランジ端部に剥離が確認できるが、その損傷は軽微であることが確認される。

3.3 最大変位発生時における支柱縁ひずみ分布

図－6 には、各試験体における最大変位発生時の支柱縁ひずみ分布 ε_f を比較して示している。なお、各縁ひずみ ε_f は、ひずみゲージからの出力と、断面の平面保持仮定の下に算出・評価した結果である。また、点線は各試験体に関する荷重位置を表している。

図より、気中部のひずみ分布を見ると、FH14 試験体の場合には、荷重点から基部に至るひずみ分布は、梁理論に基づく線形分布とはならず、引張側、圧縮側ともにやや放物線状の分布性状を示している。また、基部近傍で降伏ひずみ ($\varepsilon_y \approx 0.15\%$) を超過する大きなひずみ値を示していることから、基部近傍が塑性化するとともに、写真－2(a) に示すように局部座屈が発生していることと対応している。

FH6 試験体の場合には、荷重点近傍の圧縮側フランジにおいて引張ひずみが生じている。これは、荷重点が設定位置より若干下側に荷重したことによるものと推察される。しかしながら、基部近傍においては FH14 試験体と同様に荷重側基部近傍でひずみ値が大きく示され、非荷重側ではひずみが大きく乱れており、塑性化および局部座屈の傾向がうかがわれる。

FH4 試験体の場合には、気中部のひずみ分布は大きく乱れており、片持ち梁のひずみ分布性状とは大きく異なっている。これは、荷重点が基部に近いことから、たわみ剛性が大きいことにより発生衝撃力も大きくなったことが大きな要因として挙げられる。

一方、擁壁内部のひずみ分布性状を見ると、いずれの試験体もその分布性状は類似しており、荷重位置の影響は小さいことが分かる。これは、塑性ヒンジ荷重が異なるものの、支柱基部で塑性ヒンジが形成され、全試験体で類似した応力状態に至ったことによるものと推察される。また、天端から擁壁内部 150 mm 程度までは、いずれの試験体も降伏ひずみに到達しており、支柱基部近傍埋設部においても塑性化に至っていることが確認できる。

深さ方向へのひずみの分布性状に着目すると、いずれの試験体に関しても、零ひずみに漸近する性状を示している。荷重側では、FH6 試験体が 500 mm 程度から、FH14/4 試験体の場合には 750 mm 程度の位置で零ひずみを示している。一方、非荷重側では、FH14/4 試験体が 500 mm 程度から、FH6 試験体の場合には荷重側と異なり 1,000 mm 程度となっている。荷重荷重的には FH4 試験体の場合が最も大きい荷重が作用していることより、実験誤差を考慮して最も厳しい FH4 試験体で評価すると必要根入れ深さは 750 mm 程度であることが推察される。

4. まとめ

本論文では、落石防護擁壁上に設置される防護柵支柱の必要根入れ深さに関する合理的な設計法の確立を最終目的に、実規模擁壁上に実防護柵に用いられている H200×100×5.5×8 形鋼支柱を貫通させて設置した試験体を対象に、荷重点高さを 3 種類に変化させた衝撃荷重載荷実験を実施した。本研究で得られた結果を整理すると、以下のように示される。

- 1) 高周波成分を除いた平均衝撃力は、荷重点にかかわらず静的な全塑性荷重 P_p を用いて評価可能である。
- 2) 擁壁天端部には表面に薄い剥離が見られる程度であり、擁壁のひび割れによる損傷は極めて小さい。
- 3) 衝撃荷重載荷実験における支柱の根入れ深さは、ほぼ 750 mm 程度として評価される。

以上の結果を基に、今後は有限な根入れ長を設定した実験を実施する予定である。

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学生諸君には、実験計測、データ分析など多大な支援をいただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) (公社) 日本道路協会：落石対策便覧, 2017.
- 2) 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実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 2, pp. 691-696, 2019.
- 3) 近藤里史, 小室雅人, 岸徳光, 山元康弘, 沼田あずさ：荷重点を変化させた貫通型鋼製防護柵支柱模型に関する重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, Vol. 66A, pp. 963-974, 2020.
- 4) 近藤里史, 小室雅人, 岸徳光, 山元康弘：コンクリート躯体中に埋設された落石防護柵支柱の必要根入れ深さに関する実験的研究, 砂防学会誌, Vol. 74, No.4, pp. 3-14, 2021.