

曲げ剛性の異なる貫通型落石防護柵支柱の挙動性状に関する実験的検討

Experimental study on dynamic behavior of through-type steel posts with different flexural stiffness for rockfall protection fences

(株)砂子組
(株)砂子組
(株)砂子組
室蘭工業大学
室蘭工業大学

○正員 近藤 里史 (Satoshi Kondo)
正員 山元 康弘 (Yasuhiro Yamamoto)
正員 佐藤 昌志 (Masashi Sato)
正員 小室 雅人 (Masato Komuro)
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1つである落石防護柵は、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天端に設置される場合が多い。一般に落石防護擁壁は無筋コンクリート製であることから、防護柵支柱基部は無筋コンクリート中に埋設定着されている。

この定着長に関する設計は、現在落石対策便覧に基づいて行われている。その基本的な考え方は、落石による衝撃的な挙動性状は考慮せずに、支柱の静的耐荷力と静力学に基づいているのが現状である。

しかしながら、落石による落石防護柵の被害状況を見ると、写真-1に示すように支柱埋設部コンクリートが剥落する場合も報告されており、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喫緊の課題であるものと判断される。

このような背景より、著者等の研究グループでは、落石防護擁壁上に設置されている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H100×100×6×8のH形鋼をコンクリートブロック中を貫通させた試験体模型を作製し、曲げが卓越する場合に加え、曲げと共にせん断力が卓越する場合に対する重錘落下衝撃実験を実施してきた。その結果、1) 静荷重載荷および衝撃荷重載荷の場合には、載荷位置に拘わらず支柱のコンクリート躯体前面近傍部に塑性ヒンジが形成される、2) せん断力が卓越する場合には、躯体前面がより損傷することにより、塑性ヒンジ発生位置は躯体内部に移行する傾向を示す、3) 載荷終了後の残留変位による支柱の回転角は、入力エネルギーに対してほぼ線形な増加傾向を示す、4) 実験結果の支柱の根入れ深さは、便覧に基づいて算定した値よりも大きく評価される傾向にあること、等が明らかになっている。

しかしながら、これらの実験結果は、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場合に対して得られたものであり、実支柱断面を用いる場合には支柱の必要根入れ深さがより増加することも懸念される。

このような観点から、本研究では支柱に用いられるH形鋼断面の曲げ剛性が支柱の必要根入れ深さ等の緒特性に与える影響について明らかにすることを目的に、曲げが卓越する場合に限定して静的及び衝撃荷重載荷実験を実施することとした。本研究では、これまで実施してきたH100×100×6×8断面を用いる場合と、実支柱に供されているH200×100×5.5×8断面を用いる場合につい



写真-1 支柱基部の損傷例

表-1 試験体一覧

試験体名	断面係数 Z_x ($\times 10^3 \text{ mm}^3$)	降伏強度 f_y (MPa)	設定重錘 落下高さ H (m)	実測重錘 落下高さ H' (m)
H100-S	75.6	354	-	-
H100-H1			1.0	1.04
H200-S	181	358	-	-
H200-H1			1.0	1.01

て実験を行い、比較検討を行うこととした。

2. 実験概要

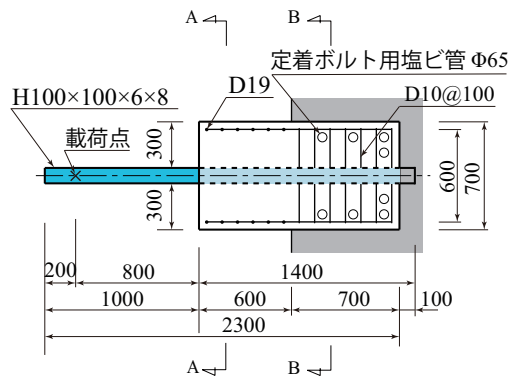
2.1 試験体概要

表-1には、本研究で対象とした試験体の一覧を示している。本研究では、支柱であるH形鋼の桁高を2種類に変化させた全4ケースである。表中の試験体名のうち、第1項目のHに付随する数値は支柱であるH形鋼の桁高(mm)を示しており、H100の場合はH100×100×6×8形鋼を用いており、H200の場合にはH200×100×5.5×8形鋼を用いている。後続のSは静的荷重載荷実験を、またHは重錘落下衝撃荷重載荷実験を示している。Hに付随する数値は、重錘の設定落下高さ(m)を示している。本実験では、落下高さを $H=1\text{ m}$ に限定して実験を実施している。

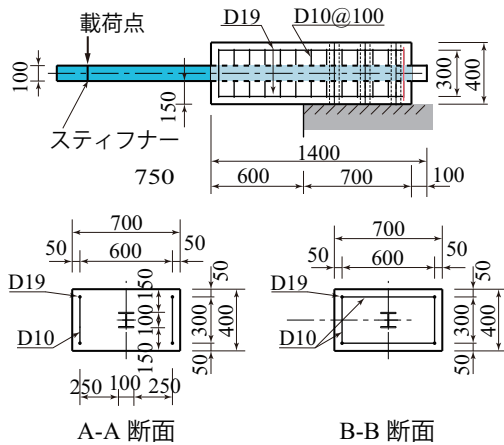
断面係数 Z_x は、各支柱に用いたH形鋼断面に対する値である。表より、H200試験体に用いたH形鋼の場合には、H100試験体の場合の2倍以上の値であることが分かる。

実測重錘落下高さ H' は、実験時の衝突直前における重錘の落下速度から換算した自由落下高さである。

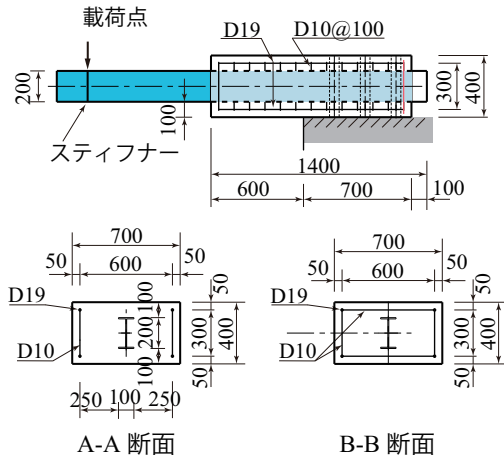
コンクリートの圧縮強度 f'_c は、別途実施した材料試験から、それぞれH100試験体では34.5 MPa、H200試験体では32 MPaであった。なお、H形鋼の破断強度 f_u は、ミルシートよりH100試験体、H200試験体でそれぞれ449



(a) H100 と H200 試験体の平面図



(b) H100 試験体の側面図と断面図

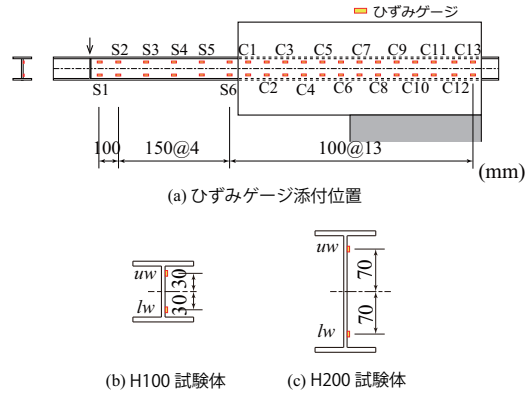


(c) H200 試験体の側面図と断面図

図－１ 試験体の形状寸法および配筋状況

MPa, 465 MPa であった。

図－１には、各試験体の形状寸法と配筋状況を示している。図に示しているように、試験体の形状寸法(幅×高さ×長さ)は、700×400×2,400 mm である。基礎部に相当するコンクリート躯体の形状寸法は 700×400×1,300 mm とし、実構造と同様に無筋コンクリート状態を再現するために、鉄筋の配筋は必要最低限に抑えた。従って、軸方向鉄筋は上下端に D19 を各 2 本(かぶり：50 mm)とし、せん断補強鉄筋(D10)は、側面には 100 mm 間隔で 13 本、



図－２ ひずみゲージ貼り付け位置とその名称

上下面には架台との定着部に 7 本のみを配置した。図より、支柱 H 形鋼のかぶり、H100, H200 試験体でそれぞれ 150 mm, 100 mm となる。

なお、本実験では、衝撃荷重用時の必要定着長を明らかにすることを目的にしていることより、H 形鋼はいずれの試験体もコンクリート内部を貫通するように配置することとした。また、コンクリート基部前面からの張り出し長さは共に 1,000 mm とした。

重錘落下位置は、コンクリート基部前面から 800 mm とし、重錘衝突時の局部座屈を防止するために、载荷点下部のウェブには厚さ 6 mm の補剛材を溶接している。

2.2 実験方法および計測項目

本実験は、地表面から 1.5m 程度の深さのピットを有する実験室で実施していることから、後述の変位計やカメラ撮影の配置を考慮して、山留め鋼材を用いた架台を組むことで試験体を地表面程度の高さに設置している。コンクリート躯体部は、図－１に示されているように後部 700 mm 部分が完全固定となるように、試験体に予め設けられている貫通孔を通して架台上の鋼制定盤(厚さ：50 mm)に定着している。

静荷重載荷実験は、容量が 500 kN の油圧ジャッキ及び 200 kN のロードセルを用い、鉛直方向に荷重を作用させることで実施した。なお、静荷重載荷は除荷状態に至っているか、ひび割れ幅が拡大しひび割れの数が増加傾向を示さないことを確認の後終了した。

衝撃荷重載荷実験は、質量 300 kg、先端直径 200 mm の鋼製重錘を所定の高さから一度だけ H 形鋼に自由落下させる単一載荷法に基づいて行っている。

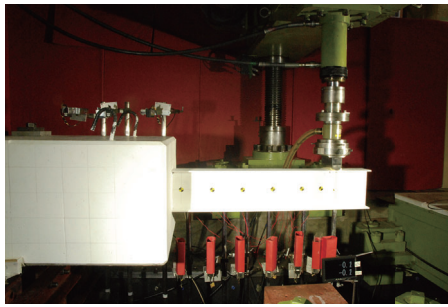
図－２には、ひずみゲージ貼り付け位置を示している。ここでは測定位置を明記していないが、レーザ式非接触型変位計を用いて、载荷点の他 H 形鋼各点における変位も計測している。

この他、本実験では重錘に内蔵された衝撃荷重測定用ロードセルによる重錘衝撃力や 2,000 fps の高速度カメラによる時々刻々の応答性状も記録している。また、実験終了後にはひび割れ分布の観察を行った。写真－２には、実験装置と試験体の設置状況を示している。

3. 実験結果

3.1 静載荷実験

図－３には、静荷重載荷時における荷重-载荷点変位曲



(a) 静荷重実験



(b) 重錘落下衝撃荷重実験

写真-2 実験状況

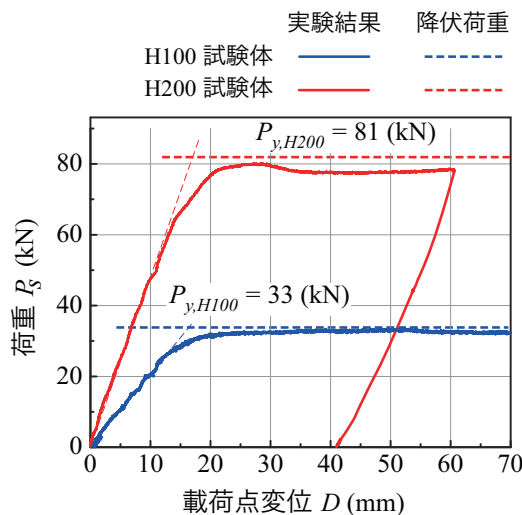


図-3 静荷重載荷時における荷重-載荷点変位曲線

線を比較して示している。図中の $P_{y,H100}$, $P_{y,H200}$ は、各部材の公称断面係数 Z_x を用い、片持ち梁を仮定した上下縁降伏時における計算降伏荷重値を意味している。図より、H100 試験体の実験結果は、ほぼ降伏荷重に漸近するような分布性状を示しているが、H200 試験体の場合には最大荷重が降伏荷重に達していないことが分かる。これは、H200 試験体の場合には支柱に用いた H 形鋼の曲げ剛性が H100 試験体の 4.5 倍以上 ($I_{x,H100} = 378 \times 10^4 \text{ mm}^4$, $I_{x,H200} = 1,810 \times 10^4 \text{ mm}^4$) も大きいことにより、コンクリート躯体前面がより損傷し完全な固定条件を満たすことができず、塑性ヒンジ発生位置がコンクリート躯体内部に移行する傾向を示したことによるものと推察される。

図-4 には、代表的な各載荷点変位時における支柱上縁の軸方向ひずみ ε_u 分布を比較して示している。図中に

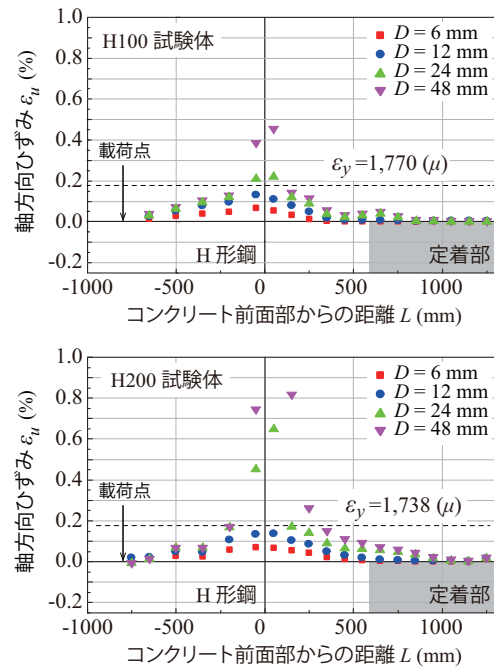


図-4 静荷重載荷時における支柱上縁ひずみ分布

は、鋼材の降伏ひずみ値も示している。なお、上縁の軸方向ひずみ分布 ε_u は、ウェブ内に添付した 2 点のひずみゲージ出力 ε_{uw} , ε_{lw} と断面内の平面保持仮定の下で換算評価している。図より、H100 試験体の場合において、載荷点変位の増大と共に躯体前面近傍部のひずみ値が降伏ひずみを大きく超過しており、塑性ヒンジが形成されていることが分かる。また、ひずみ分布を見ると、載荷点変位が $D = 24 \text{ mm}$ 時点では、ひずみはコンクリート躯体前面から 500 mm 程度で零ひずみに至っていることが分かる。なお、架台先端部近傍でひずみ値が再度増加傾向にある。これは、コンクリート躯体を定着するための架台先端部で躯体全体が片持ち的な性状を示すためと推察される。

一方、H200 試験体の場合には、躯体前面近傍部における塑性ひずみが躯体内部で最大値を示しており、前述のように塑性ヒンジ点が躯体内部に推移していることが推察される。また、載荷点変位が $D = 24 \text{ mm}$ においては、軸方向ひずみは躯体前面からほぼ $1,000 \text{ mm}$ 程度まで零レベルに減少していないことが分かる。これは、H200 試験体の曲げ剛性が大きいことと下縁かぶりが H100 試験体に比して小さく躯体による拘束の程度が小さくなったことが要因であるものと推察される。

載荷点変位 $D = 12 \text{ mm}$ の場合には、いずれの試験体もひずみが弾性範囲内で分布しており、図-3 の荷重-変位曲線と対応していることが分かる。

3.2 重錘落下衝撃荷重実験

図-5 には、2 試験体の重錘衝撃力及び載荷点変位波形を比較して示している。衝撃力波形の図中には、図-3 と同様に静荷重載荷時における降伏荷重も示している。図より、載荷初期には高周波成分が励起しているが、徐々に減衰しほぼ一定の値を示した後に完全に除荷していることが分かる。なお、H200 試験体の場合には、荷重がほぼ一定値を示した後減少傾向を示すものの、衝突後 20 ms 前後で数 ms 間減少勾配が小さくなっている。静的な梁理

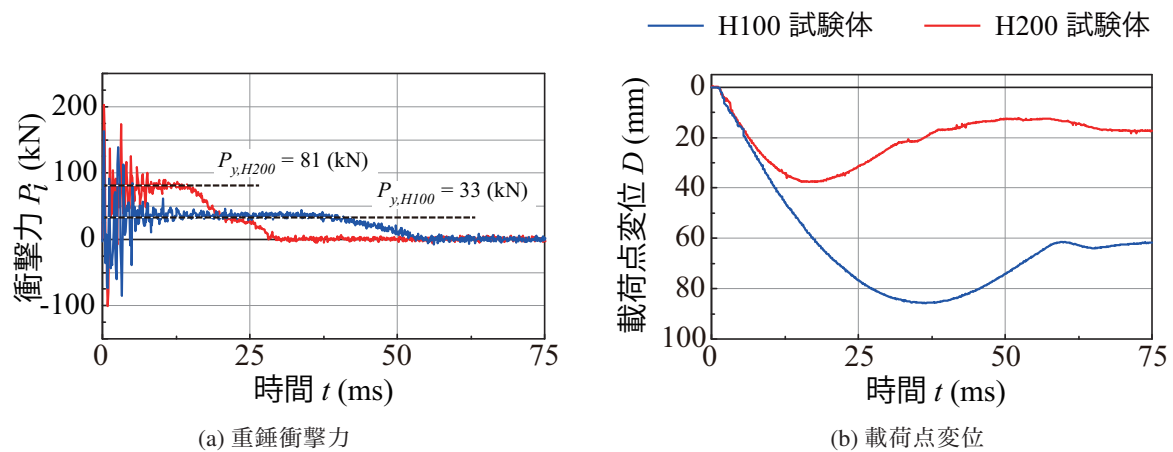
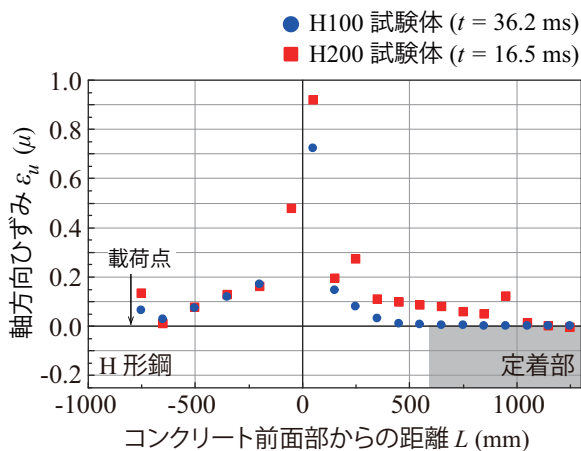
図-5 重錘衝撃力および載荷点変位波形の比較 ($H = 1.0$ m)

図-6 衝撃荷重載荷時の最大変位発生時における支柱上縁ひずみ分布の比較

論に基づく降伏荷重と比較すると、両試験体共にほぼ一定値の値は各降伏荷重値と類似していることが分かる。これより、支柱モデルである各H形鋼は静荷重載荷時と同様にコンクリート躯体の基部前面あるいはその近傍部断面が塑性域に達して降伏荷重に至り、その後塑性域が全断面に広がりヒンジ状態に達し回転が進行すると共に変形が大きくなっているものと推察される。このような結果は、落石等による衝撃荷重載荷によって作用する最大衝撃荷重は、工学的には固定端をコンクリート躯体基部に仮定し静的な塑性曲げモーメントから換算可能であることを暗示している。荷重継続時間は、H100 試験体、H200 試験体でそれぞれ約 55 ms、約 30 ms であり、曲げ剛性の大きい H200 試験体の場合が H100 試験体に比較して大幅に短いことが分かる。これは、H100 試験体の場合の塑性ヒンジの回転あるいは載荷点変位が 2 倍程度大きいことを暗示している。

一方、載荷点変位波形を見ると、衝撃荷重が減少傾向を示す時間と最大変位到達時間が類似していることが分かる。また、載荷点における最大応答変位および残留変位は H100 試験体の場合がそれぞれ 80.4 mm、62.1 mm、H200 試験体の場合が 37.6 mm、15 mm となっており、最大応答と残留変位の差は、それぞれ 18.3 mm、22.6 mm となってい

る。これより、H100 試験体の除荷勾配(約 33 kN / 18 mm)は図-3の静載荷時における載荷勾配(約 33 kN / 16 mm)に類似しており、H200 試験体の場合にも静載荷時における除荷勾配(約 80 kN / 20 mm)と類似の傾向を示していることが分かる。

図-6には、衝撃荷重載荷時において載荷点変位が最大値に達した時点における支柱上縁のひずみ分布を比較して示している。図中の上縁ひずみ値は、静載荷時と同様にウェブ上下縁ひずみ ε_{uw} 、 ε_{lw} の測定値と断面内の平面保持仮定の下に算定評価している。

図より、いずれの試験体もコンクリート躯体基部前面において 0.7%以上のひずみ値を示し、大きく塑性化していることが分かる。コンクリート躯体内部におけるひずみ分布を見ると、H100 試験体の場合には基部前面から 450 mm 程度で零ひずみに至っており、支柱の根入れ深さは、500 mm 前後で十分であることが分かる。一方、H200 試験体の場合には、基部前面から 1,000 mm 程度で零レベルに至っており、根入れ深さは静載荷時と同様に H100 試験体の 2 倍程度必要であることが分かる。このような結果は、H200 試験体の支柱の曲げ剛性が H100 試験体の場合の 4.5 倍以上であることが大きな要因であることは勿論であるが、支柱のかぶり厚が 100 mm であることも大きな要因であることが懸念される。従って、より信頼性の高い知見を得るためには、かぶり厚さを十分考慮した場合についての詳細な検討が必要であるものと判断される。

4. まとめ

本論文では、防護柵支柱の根入れ深さに着目し、支柱H形鋼の桁高の異なる2種類の試験体について、静的・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) 静載荷時には、いずれの試験体も降伏荷重程度で塑性ヒンジ状態に至る。
- 2) 衝撃荷重載荷時の平均的な載荷荷重は、静荷重載荷時の降伏荷重と類似している。
- 3) H200 試験体において信頼性の高い知見を得るためには、かぶりを十分考慮したさらなる検討が必要である。