

落石防護擁壁上に設置される鋼製防護柵支柱模型に対する アーム長を変化させた場合における静荷重載荷実験

Static loading test of steel post of rockfall protection fence installed into concrete wall

(株) 砂子組

室蘭工業大学大学院

室蘭工業大学大学院

室蘭工業大学大学院

室蘭工業大学大学院

○正 員 山元 康弘 (Yasuhiro Yamamoto)

正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)

正 員 近藤 里史 (Satoshi Kondo)

フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

学生員 沼田あずさ (Azusa Numata)

1. はじめに

一般に、急崖斜面に沿って建設されている道路網には、落石から人命や道路交通網を守るために落石防護擁壁が建設されている。特に、斜面が擁壁に迫っている箇所には、図-1に示すような落石防護柵が擁壁の天端部に設置され、落石が道路上に達することを防ぐ構造¹⁾になっている。このような落石防護擁壁は通常重力式の無筋コンクリート構造であり、防護柵の鋼製支柱は無筋コンクリート部に箱抜きして設置されるのが一般的である。

このような鋼製支柱の根入れ深さは、落石対策便覧(以下、便覧²⁾)に基づいて設計が行われ、落石等による動的な作用は考慮せずに静荷重に置き換えて検討されているのが一般的である。しかしながら、実際に落石等によって衝撃荷重を受けた鋼製支柱の被害状況を見ると、写真-1に示すように支柱埋込部のコンクリートが剥落し、柵が機能を失っている場合のあることが報告されている³⁾。従って、落石防護柵の安全性をより向上させるためには、支柱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、落石衝撃荷重に対する合理的な設計法を確立することが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、本研究では、落石防護擁壁上に



写真-1 支柱基部の損傷例³⁾

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、鋼製支柱において昨年度実施した曲げが卓越する場合⁴⁾に加え、曲げと共にせん断作用も顕在化する場合に着目し、動的挙動の基準となる静荷重載荷実験を行い、静荷重載荷時における必要根入れ深さやコンクリート躯体のひび割れ分布性状等について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-2には、L400 試験体の形状寸法と配筋状況を一例として示している。L800 試験体については既往の研究⁴⁾を参照されたい。試験体の形状寸法(幅×高さ×長さ)は、700×400×2,400 mm である。支柱基礎部に相当するコンクリート躯体部の形状寸法は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、躯体側面部には100 mm 間隔で13本、定着部には上下面も含めて7本を配置した。なお、支柱基礎部への配筋に当たっては、便覧²⁾に準拠してコンクリート内に埋設されたH形鋼のフランジ端部から45°方向にせん断破壊面が形成された場合においても、せん断補強筋による影響が極力小さくなるように配慮した。

支柱に相当するH形鋼には、H100×100×6×8を使用した。なお、従来型落石防護柵の鋼製支柱は、H200×100×5.5×8が広く用いられている。しかしながら、本研究では、衝撃荷重作用時におけるコンクリート躯体内の支柱の根入れ

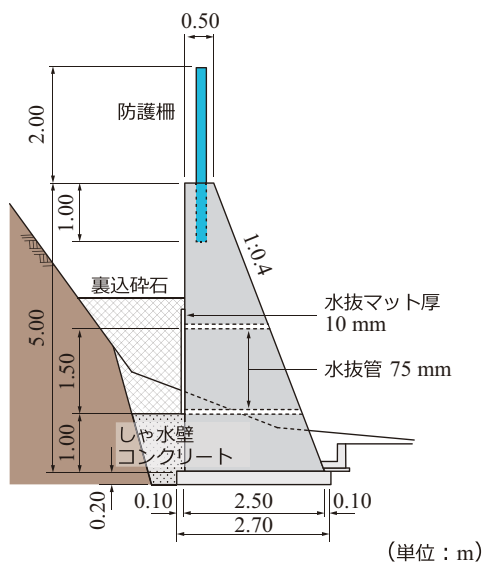


図-1 防護柵基礎を兼ねた落石防護擁壁の例

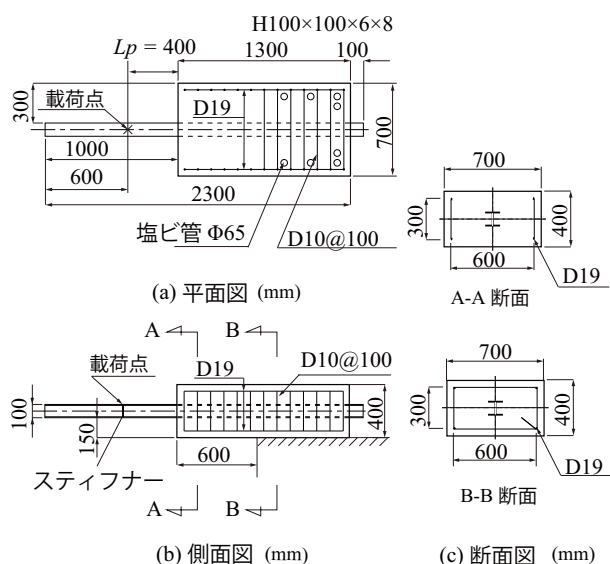


図-2 試験体の形状寸法と配筋状況

深さと共に動的挙動性状把握やコンクリート躯体の破壊挙動に着目していることから、実部材よりも桁高の小さい鋼材を使用することとした。ただし、図-2に示すようにH形鋼のかぶり厚さは標準断面と同じ150 mmとなるように配慮している。なお、本実験では、衝撃荷重作用時の根入れ深さ(定着長)を明らかにするために、H形鋼はコンクリート躯体内部を貫通するように配置することとし、その張出長さは1000 mmとした。静荷重載荷位置は、コンクリート端部から800 mmもしくは400 mmとし、載荷点部におけるH形鋼の局部座屈を防止するために、載荷点ウエブ部に厚さ6 mmの補剛材を添加した。コンクリート躯体部は、端部から700 mmまでが完全固定となるように、試験体に設けた貫通孔にボルトを通して鋼製底版(厚さ:50 mm)に固定し、上から鋼板とボルト・ナットで挟み込むように固定している。鋼製底版はボルトを介して山留め材(H400×400×13×21およびH300×300×10×15)と接続し、山留め材の底部および背面の一部を剛体壁とボルトを用いて固定した。また山留め材同士は、溝形鋼(150×75×6.5×10)を使用し、それらはボルトを介して連結している。

2.2 実験方法および計測項目

静荷重載荷実験は油圧ジャッキを用いて鉛直方向に荷重を作用させることで実施した。静荷重載荷実験に関しては、後述の図-6に示すようにコンクリート躯体の下フランジ端部から発生したひび割れが側面に達した時点で載荷を終了した。

コンクリートの圧縮強度 f_c' は、別途実施した材料試験結果から、それぞれ L800 試験体では 34.5 (MPa)、L400 試験体では 26.9 (MPa) である。また、H 形鋼の降伏応力 f_y および破断強度 f_u はミルシートより、L800 試験体では 354 (MPa) および 449 (MPa)、L400 試験体では 338 (MPa) および 449 (MPa) である。

図-3には、本実験の計測位置を示している。図に示すように、試験体の変形状況を確認するために、レーザ式変

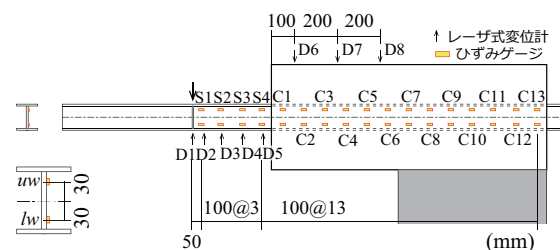


図-3 計測位置

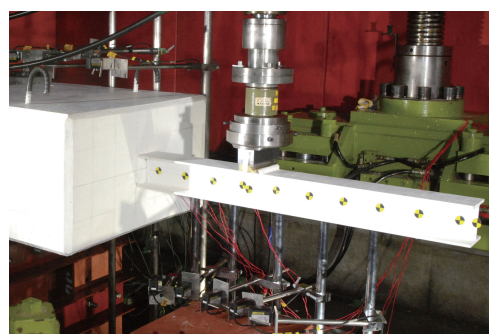


写真-2 静荷重載荷実験状況

位計を設置した。また、図には、H 形鋼へのひずみゲージ添付位置を示している。本研究では、ひずみゲージは H 形鋼の中立軸から上下 30 mm の位置に添付することとした。軸方向のひずみゲージ添付位置は、コンクリート躯体部に対しては、端部から 50 mm を基点に 100 mm 間隔の全 13 断面に、また、H 形鋼部には載荷点位置より 50 mm の位置からコンクリート躯体部に向かって 100 ないし 150 mm 間隔とした。

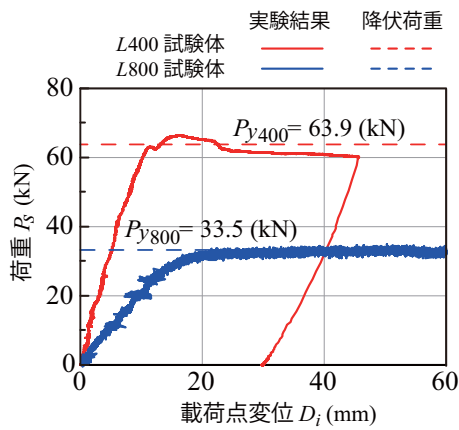
本実験の測定項目は、(1) 油圧ジャッキ先端に取り付けたロードセルによる荷重 P_3 、(2) レーザ式非接触型変位計によるたわみ量 D_i 、および (3) H 形鋼に貼付したひずみゲージからの軸方向ひずみ ε 、である。また、実験終了後には、コンクリート側面のひび割れ性状の観察を行った。なお、これらの物理量は、デジタルデータレコーダにて一括収録を行っている。そのサンプリング周波数は 10 Hz とした。写真-2 には、実験装置と試験体の設置状況を示している。

3. 実験結果

3.1 荷重変位関係

図-4には、実験から得られた荷重-載荷点変位（以後、単に変位）関係を示している。また、図には、H形鋼の断面係数 $Z_x (= 75.6 \times 10^3 \text{ mm}^3)$ と降伏応力 f_y から求められる降伏モーメント M_y を用いて算出される降伏荷重 P_y も併せて示している。

まず、L800 試験体に着目すると、図より、荷重 P_3 は変位 D_i が約 12 mm に至るまでほぼ線形的に増大し、その後、緩やかに荷重が増加するとともに、変位が 24 mm 程度からはほぼ一定値を示していることが分かる。次に、L400 試験体に着目すると、L800 試験体と比較して荷重の増加勾配は約 2 倍程度となっている。しかしながら、荷



図－４ 荷重-変位関係の比較

重 P_s は変位 D_i が約 10 mm に至るまでほぼ線形的に増大し、その後、緩やかに増加するとともに、変位が 25 mm 程度からはほぼ一定値を示していることが分かる。これは L800 試験体とほぼ同様の傾向を示している。なお、実験結果から得られた最大荷重は、ほぼ降伏荷重に達しているものの変位が 35mm 前後から除荷傾向を示し、約 60 kN に漸近している。これは、載荷初期にはコンクリート躯体前面で固定条件を満足するが、荷重の増加と共に躯体前面部が損傷を受け、固定端が躯体内部に推移し、見かけ上アーム長が増加したことによるものと推察される。

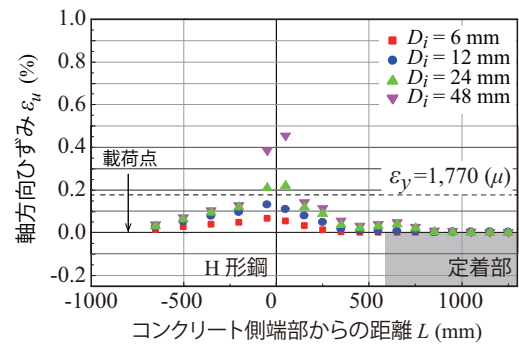
また、L800 試験体と L400 試験体を実験結果を比較すると、両試験体の荷重 P_s が等しい場合、L800 試験体の変位 D_i は L400 試験体の約 2 倍程度となっている。

3.2 ひずみ分布性状

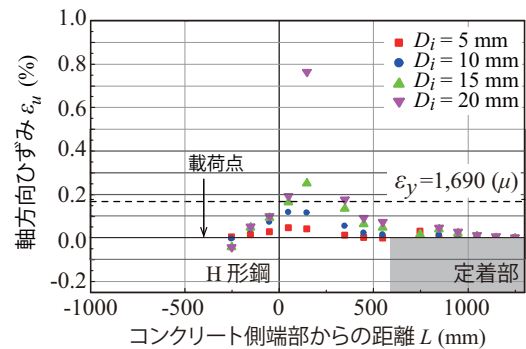
図－５には、代表的な変位点における H 形鋼上縁の軸方向ひずみ ε_u 分布を示している。なお、上縁の軸方向ひずみ ε_u は、ウェブ内に貼付した 2 点のひずみゲージ出力 ε_{uw} 、 ε_{lw} (図－３参照) と平面保持を仮定することで換算している。また、図中には降伏応力 f_y から算出される降伏ひずみ ε_y も示している。

L800 試験体に着目すると、図より、弾性的な挙動を示すと考えられる、変位が $D_i = 6, 12$ mm 時点で、軸方向ひずみは載荷点から基部に向かってほぼ線形的に増加していることが分かる。一方、コンクリート躯体内部において、軸方向ひずみは徐々に減少傾向を示し、躯体前面から 450 mm の位置ではほぼ零ひずみを示していることが分かる。図－４の荷重－変位関係から、剛性勾配が緩やかになる $D_i = 24$ mm 時点では、躯体前面近傍の上縁軸方向ひずみ ε_u が降伏ひずみ ε_y を超えており、H 形鋼が降伏状態にあることが分かる。さらに、変位が大きい $D_i = 48$ mm に着目すると、躯体前面近傍の軸方向ひずみのみが増大し、他の領域のひずみはほとんど変化してしないことが分かる。これは、H 形鋼の躯体前面近傍に塑性ヒンジが形成されたことによるものと考えられる。なお、 $D_i = 24$ mm において、コンクリート躯体内の $L = 750$ mm 近傍で軸方向ひずみが緩やかに増加する傾向が見られるが、これは試験体定着部の影響によるものと推察される。

L400 試験体の場合も L800 試験体の場合と同様の傾向



(a) L800 試験体



(b) L400 試験体

図－５ フランジ上縁の軸方向ひずみ分布 (静載荷実験)

を示している。しかしながら、コンクリート躯体内部の軸方向ひずみは、 $D_i = 10$ mm 時点の弾性状態では躯体前面から $L = 550$ mm 程度の位置で零ひずみを示しているが、 $D_i = 15, 20$ mm 時点では $L = 1000$ mm 近傍でほぼ零ひずみを示している。これより、L800 試験体と比較すると、H 形鋼が塑性状態に至る場合において、軸方向ひずみが発生する領域はより広範囲になることが分かる。

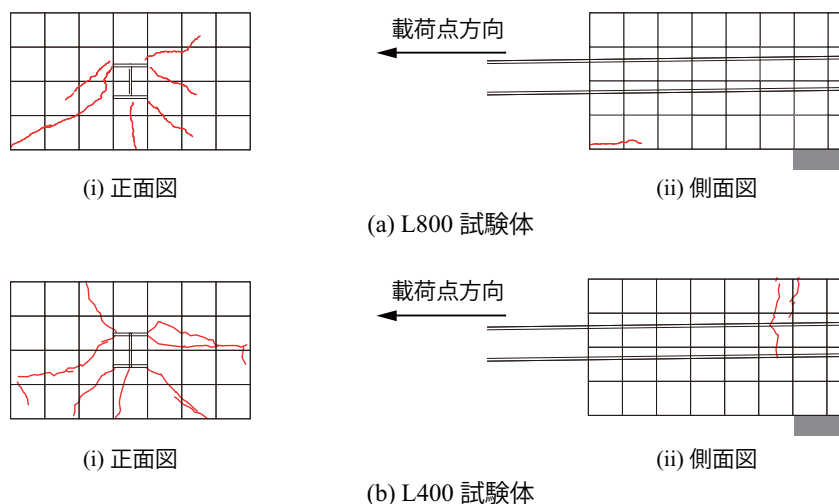
また、L800 試験体では $L = -50, 50$ mm 付近にて降伏ひずみを大きく超えるひずみが発生している。一方で、L400 試験体の場合には $L = 150$ mm 付近にて降伏ひずみを大きく超えるひずみが発生していることから、 $L = 150$ mm 近傍に塑性ヒンジが形成されたものと推察される。これは、載荷荷重が大きいためにより、H 形鋼の支圧力も増加し後述のひび割れ分布図 (図－６ (b)) から明らかに躯体前面近傍がより損傷したことによるものと推察される。

3.3 ひび割れ分布

図－６には、実験終了後の各試験体における正面および側面のひび割れ分布性状を示している。図中、(a) 図が L800 試験体、(b) 図が L400 試験体の結果である。

図より、L800 試験体および L400 試験体において、上フランジおよび下フランジからのひび割れは両者ほぼ 45° 下方に進展している。さらに、上フランジ端部からのひび割れが大きく進展している。これは、H 形鋼が固定端となる躯体前面での変形時に上フランジ端部に過度な支圧力が作用することによるものと推察される。

また、L800 試験体と L400 試験体を比較すると、L400 試験体の場合が L800 試験体よりもコンクリート躯体の損傷が大きい。これは、H 形鋼による支圧力が L800 試験体



図－6 実験終了後におけるひび割れ分布性状の比較

よりも大きいことに起因しているものと推察される。

側面のひび割れ分布に着目すると、L800 試験体の場合には躯体前面下縁近傍に水平のひび割れが発生しているが、L400 試験体の場合には支持架台端部位置に相当する上縁から下方に進展するひび割れが発生している。これは、載荷荷重が大きいことにより支持架台端部を支点とする負曲げの発生によるものと推察される。

4. 根入れ深さに関する実験結果と便覧に基づいた結果の比較

便覧²⁾では、擁壁基礎への柵支柱根入れ部において、曲げモーメントと押し抜きせん断力に対して照査をすることが規定されている。ここでは、便覧に基づいて算定される必要根入れ深さ d と静載荷実験結果に基づいた値の比較を試みる。

便覧²⁾では、曲げ応力に関しては、擁壁における必要根入れ深さ d までの部分を短柱にモデル化し、軸力と曲げモーメント作用時の支圧応力が割増し係数を考慮した設定応力よりも小さくなること。一方、せん断応力に関しては、支柱下フランジ両下端から 45° 方向にせん断破壊面が形成されると仮定し、せん断面に発生するせん断応力度 τ が設定応力度 τ_a 以下となるように規定している。

上述の規定に基づいて算定される L800 試験体及び L400 試験体の必要根入れ深さ d_r は、それぞれ $d \simeq 350$ mm, 450 mm 程度であった。

一方、実験結果からは、L800 試験体の場合には載荷点変位が 12 mm 時点で約 450 mm, L400 試験体の場合には載荷点変位が 10 mm 時点で約 550 mm として評価される。

これより、より根入れ深さが大きい L400 試験体の場合に着目して、両者を比較すると、実験結果は 100 mm 程度大きいことが明らかになった。ただし、本実験結果は、支柱モデルをコンクリート躯体中を貫通させた場合の結果であることに注意する必要がある。

5. まとめ

本論文では、落石防護擁壁上に設置する防護柵支柱の

根入れ深さを合理的に決定することを最終目的に、H 形鋼支柱を無筋コンクリート躯体中を貫通させて設置し、載荷位置を曲げが卓越する場合と曲げと共にせん断力も卓越する場合を対象に、静荷重載荷実験を実施した。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) 落下位置にかかわらず、コンクリート躯体前面近傍に塑性ヒンジが形成される。
- 2) その塑性ヒンジ発生位置は、曲げが卓越する場合にはコンクリート躯体前面に、また曲げと共にせん断力が卓越する場合には躯体前面が損傷することにより躯体内部に移行する傾向を示す。
- 3) 曲げと共にせん断力が卓越する場合には、コンクリート躯体のひび割れ等による損傷が大きくなる。
- 4) 曲げが卓越する場合には側面には躯体前面下縁近傍に水平のひび割れが発生し、曲げと共にせん断力が卓越する場合には支持架台端部位置に相当する上縁から下方に進展するひび割れが発生することが明らかになった。
- 5) 支柱モデルがコンクリート躯体を貫通していることを条件に、実験結果の根入れ深さを便覧に基づいて評価される値と比較すると、静荷重載荷実験結果であるにも拘わらず 100mm 程度大きく評価され、L400 試験体で 550 mm 程度となる。

今後、落石防護柵支柱のコンクリート擁壁内への合理的な根入れ深さの評価法について、衝撃荷重載荷実験結果も含め総合的に検討を進めて行きたいと考えている。

参考文献

- 1) (社)日本河川協会：建設省河川砂防技術基準(案)同解説設計編 II, 2008.
- 2) (公社)日本道路協会：落石対策便覧, 2017.
- 3) 株式会社シビルホームページ
<https://www.rcnet.co.jp/product/list/listless.php> (最終閲覧日：2019 年 11 月 12 日)
- 4) 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