

腐食した落石防護柵用支柱の静的載荷実験

Static loading tests of corroded steel posts for rock fall protection fences

(国研) 土木研究所寒地土木研究所 ○正員 中村拓郎 (Takuro Nakamura)
 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 正員 山澤文雄 (Fumio Yamasawa)
 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 非会員 仁平陽一郎 (Youichiro Nihira)
 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 正員 畠山乃 (Osamu Hatakeyama)

1. はじめに

従来型落石防護柵は、ひし形金網とワイヤロープ、H形鋼で構成され、小規模な落石への対策工として数多く設置されている。著者らが実施した北海道における落石防護施設の損傷形態に関する事例調査の結果、従来型落石防護柵では、落石衝突に起因すると考えられる変形等に加えて、金網、ワイヤロープ、支柱の腐食も確認されている¹⁾。腐食による断面減少や欠損によって鋼材の耐荷性能は低下するため、腐食の発生部位や進行程度によっては、落石防護柵として期待される性能を発揮できなくなることが懸念される。

落石対策便覧²⁾には、維持管理上の点検項目等が示されているものの、健全性の診断や対策区分の判定に関する明確な指標は示されていない。既設の落石防護柵を効率的に維持管理していくためには、損傷状態と諸性能の関係を明確にし、状態に応じた補修や補強、部材交換といった適切な措置を選択できることが望ましい。

今野らは、既設の落石防護柵等から採取した金網とワイヤロープを対象にした各種載荷試験を実施し、腐食した金網は、健全な状態に比べて小さな衝突エネルギーで破断に至る場合があること、腐食したワイヤロープでは、破断荷重や破断伸びが低下する場合があることを報告している³⁾。従来型落石防護柵は、金網、ワイヤロープ、支柱の弾塑性変形によって落石の運動エネルギーを吸収する機構であり、特に支柱は設計時に許容最大変位角が15度まで見込まれるなど、降伏耐力だけでなく、その変形性能も期待されている。

本研究では、落石防護柵の点検調査手法や性能評価手法の確立に向けて、腐食が落石防護柵用支柱の耐荷性能

に及ぼす影響を確認することを目的に、既設の落石防護柵より採取したI形鋼製支柱を対象にした静的載荷実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 既設の落石防護柵からの支柱の採取

実験対象は、廃道区間の海岸線道路沿いに設置されていたコンクリート製擁壁を基礎とする落石防護柵から採取した支柱とした。支柱には、写真-1(a)に示すように、防錆処理と推察される緑色の塗装が施されていたが、供用期間中の経年劣化によって、塗装の剥がれや鋼材の断面減少や欠損が生じていた。なお、供用年数や部材寸法等の詳細は不明である。

支柱は、写真-1(b)に示すように、擁壁基礎の箱抜き部に後打ちコンクリートによって固定されていたため、大型ブレーカーを用いて支柱に損傷を与えないように後打ちコンクリートとともに慎重に採取した。後打ちコンクリート部は、実験室に運搬後、丁寧にはつり落とした。後打ちコンクリート除去後の支柱の様子を写真-1(c)に示す。採取した支柱は、根入れ部長さが650mm、気中部長さ1,550mm、全長2,200mmであった。

採取した支柱の断面をノギスで計測した結果、ウェブ近傍とフランジ外縁の厚さが異なっており、フランジ厚さに勾配が認められた。計測値をJIS G3192:2021“熱間圧延形鋼の形状、寸法、質量及びその許容差”に示される標準断面寸法と照らし合わせると、支柱はI形鋼であり、断面寸法はI150×75×5.5×9.5であると推察された。間隔保持材が未設置であったことや、現在の従来型落石防護柵の支柱にはH形鋼が採用されていること⁴⁾を



(a) 採取前の状態

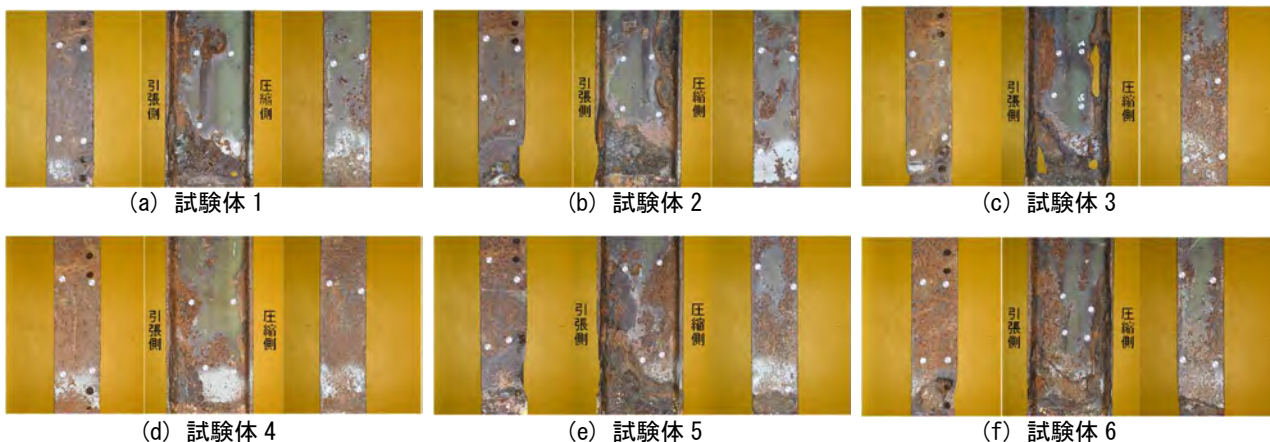


(b) 支柱の採取



(c) 後打ちコンクリート除去後の状態

写真-1 既設の落石防護柵からの支柱の採取



注) 右側：引張側フランジ，中央：ウェブ側面，左側：圧縮側フランジ

写真-2 基礎コンクリート上面から 300mm 付近の腐食状況

考慮すると，対象とした落石防護柵は旧型の仕様であったと考えられる。

2.2 試験体の製作

試験体には，既設の落石防護柵より採取した支柱から任意に抽出した 6 本を使用した。試験体の高さは，図-1 に示すように，気中部と根入れ部をそれぞれ 1,550mm, 300mm とした。支柱毎に端部の腐食状況が異なっていたため，根入れ部長さが 300mm となるように支柱端部を切断し，端部を厚さ 22mm で 1 辺が 400mm の矩形鋼板の中央に溶接した。また，根入れ部では，厚さ 9mm で 1 辺が 250mm の角形鋼管を矩形鋼板の底板に溶接し，呼び強度 21 のレディーミクストコンクリートを充填して基礎コンクリートとした。

2.3 支柱の腐食状況

試験体毎の腐食状況を写真-2 に示す。写真は，基礎コンクリート上面から高さ 300mm 程度の範囲について，引張側フランジ，ウェブ側面，圧縮側フランジの順に掲載している。支柱は，環境作用がほぼ等しい条件の箇所から採取しているが，それぞれで腐食の発生箇所や進行程度にばらつきが認められた。全体的な傾向として，フランジとウェブの境界部や，気中部と根入れ部の境界である基礎コンクリート付近での腐食による断面減少が生じていた。また，引張側フランジには，ワイヤロープを固定するための金具の取付け孔のほかに，金網を設置するために用いられる吊り線用の孔が基礎コンクリート近傍に設けられており，この部分を中心に腐食が進行している様にも見受けられた。

2.4 荷重方法

荷重実験の概要図を図-1 に，荷重実験中の様子を写真-3 に示す。荷重は，基礎コンクリート上面から 1,000mm の高さのウェブ中央に直径 28mm の孔を開け，丸鋼を通した両端に厚さ 38mm の鋼板とシーブを設置し，ワイヤロープを介して油圧ジャッキにより引張荷重を作用させた。計測項目は，ロードセルによる荷重，ワイヤ式変位計による変位とした。変位は，荷重中に試験体が弱軸方向にねじれることを想定し，高さ 900mm および 1,100mm の位置に対して，それぞれ左右 2 方向からワイ

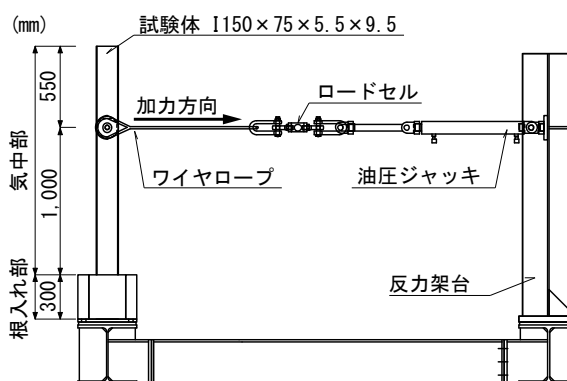


図-1 荷重実験の概要図



写真-3 荷重実験中の様子

ヤ式変位計を設置し，加力方向である強軸方向と弱軸方向の平面内の変位を計測した。

3. 実験結果

3.1 強軸および弱軸方向への変形

各試験体の荷重点における加力方向（強軸方向）と弱軸方向の変形を図-2 に示す。なお，高さ 1,000mm に位

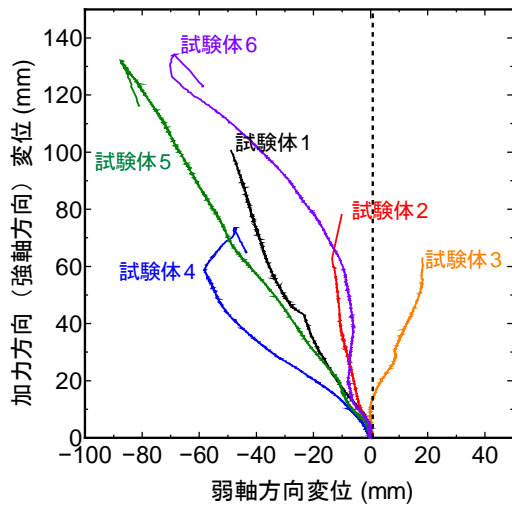


図-2 強軸・弱軸方向の変位

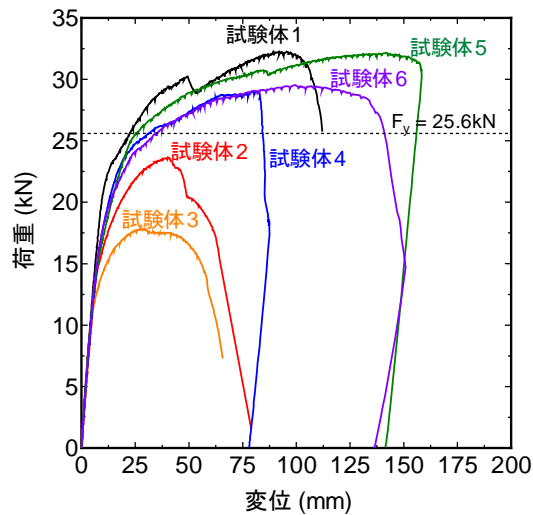


図-3 荷重-変位関係

置する載荷点の変位は、高さ 900mm と 1,100mm での変位の計測値を線形補完した値としている。また、弱軸方向の変位については、加力方向に対して右側を正、左側を負としている。いずれの試験体においても、荷重初期は加力方向のみに変形するが、徐々に弱軸方向にも変形し、荷重の増加にともなって試験体がねじれる挙動が確認された。試験体 3 を除く 5 体の試験体では、弱軸方向は負側に変形する結果となった。基礎コンクリート近傍の引張側フランジには吊り線用の孔が設置されており、この孔近傍が弱部となって抵抗を失い、負側へ変形が生じた可能性がある。なお、正側へ変形した試験体 3 については、吊り線用孔がやや上方に設置されており、その孔よりも基礎コンクリート近傍の負側の断面減少箇所から亀裂が発生していた。

3. 2 荷重-変位関係と破壊状況

各試験体の荷重-変位関係を図-3 に、荷重実験後の破壊状況を写真-3 に示す。なお、ここでの変位は、載荷点変位であり、強軸方向と弱軸方向の平面の斜距離である。荷重初期における剛性には試験体毎の違いが認められなかったものの、剛性が変化する荷重や最大荷重、その時の変位は試験体毎に異なる結果となった。実験終



(a) 試験体 1



(b) 試験体 2



(c) 試験体 3



(d) 試験体 4



(e) 試験体 5



(f) 試験体 6

写真-3 荷重実験後の試験体の破壊状況

了までの試験体毎の挙動は次のとおりである。

試験体 1 では、荷重 22kN 程度より剛性が変化し、変位 95mm で最大荷重 32.3kN に達した。その後、荷重が

急激に低下し、変位が 110mm を超えた時点で突然引張側フランジが破断するとともにウェブの断面減少部に沿ったひび割れが開口し、脆性的に破壊した。基礎コンクリート近傍の引張側のウェブの断面減少が著しく、引張側の抵抗の大部分をフランジが担っていたため、フランジの破断にともない脆性的に破壊に至ったものと考えられる。

試験体 2 および試験体 3 では、荷重 12kN 程度で剛性の変化が認められ、試験体 2 では引張側フランジの吊り線孔近傍、試験体 3 では引張側フランジの左側の断面減少箇所からひび割れが徐々に開口し、最大荷重を示した後、荷重が低下した。最大荷重は試験体 2 が 23.7kN、試験体 3 が 17.8kN と、試験体 1 に比べて小さくなっている。また、いずれの試験体も引張側フランジは完全に断裂し、ウェブの亀裂は開口している。

試験体 4 および試験体 6 では、荷重 15kN 程度から剛性が変化し、いずれもフランジおよびウェブのひび割れが進行して急激に除荷状態に至った。試験体 4 は降伏後に荷重が微増している状態で変位が 80mm を超えた時点で急激に荷重が低下した。載荷実験後の基礎コンクリート近傍の状況は、ウェブの引張側の断面減少部にひび割れが認められるとともに、引張側フランジの左側端部からのひび割れの進展が確認できる。試験体 6 では、最大荷重 29.5kN を示した後、荷重が徐々に低下した状態で変位 140mm 程度よりフランジおよびウェブのひび割れが開口して荷重低下に至っている。

試験体 5 では、荷重 15kN 程度から剛性が変化し、荷重の増加とともに変位も増加し、変位 142mm で最大荷重 32.2kN に達した後、荷重が徐々に低下しはじめたため、変位 160mm 程度で載荷を終了した。実験終了後の引張側フランジには断面欠損部よりひび割れは発生していたが、基礎コンクリート上面より上方に離れた位置に発生したことから、ひび割れの進展による急激な荷重低下に至らなかったものと考えられる。

3. 3 腐食した支柱の可能吸収エネルギーについて

従来型落石防護柵の慣用設計法²⁾では、支柱の可能吸収エネルギーの算定において、支柱の降伏荷重 F_y を許容最大変位角 15 度まで保持することが仮定されている。本研究で対象とした支柱の断面寸法を $1150 \times 75 \times 5.5 \times 9.5$ と仮定し、降伏点強度を SS400 材の設計値相当の 235N/mm^2 とすると、 F_y は 25.6kN となり、許容最大変位角までの載荷点変位は 268mm となる。図-3 によると、フランジやウェブに明らかな断面欠損箇所のある試験体 2、試験体 3 では、最大荷重が設計で見込まれる降伏荷重以下となっており、設計時に要求されるエネルギー吸収性能を満足していない可能性が高い。その他の試験体では、最大荷重が設計降伏荷重を上回っているが、設計で見込まれる変位まで荷重を保持できなかった。本研究で対象とした支柱のように、フランジやウェブに明らかな断面欠損等が生じている場合には、設計で期待される落石の運動エネルギーを十分に吸収できないことが懸念される。

4. まとめ

本研究では、腐食が落石防護柵用支柱の耐荷性能に及ぼす影響を確認することを目的に、既設の落石防護柵より採取した鋼製支柱を対象とした静的載荷実験を実施した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) フランジやウェブに明らかな断面欠損が生じるほどに腐食が進行した場合には、エネルギー吸収性能が著しく低下している可能性がある。
- (2) 初期剛性に顕著な低下が認められない場合であっても、降伏耐力等の低下や、フランジの破断やウェブのひび割れの開口等をともなう脆性的な破壊が生じる恐れがあることを確認した。
- (3) 環境作用が同じと考えられる場合においても、支柱毎に腐食の状況が異なっていた。引張側フランジの吊り線孔付近が腐食している場合には、破断の起点や弱部になる可能性が示唆された。

本研究では、試験体数や損傷程度が限られた範囲で、かつ、静的な作用下での検討ではあるものの、腐食によって落石防護柵の支柱の可能吸収エネルギーが低下することを実験的に示した。本研究で対象とした支柱のように、フランジやウェブに明らかな断面欠損等が生じている場合には、早期に部材交換等の措置を講じる必要があると考えられる。一方、既設の落石防護柵を効率的に維持管理していくためには、損傷状態に応じた適切な措置を選択できることが望ましい。そのためには、各部材の損傷状態と諸性能の関係を明確にするとともに、現地にて損傷状態を適切に判定できる調査技術も求められる。今後、数値解析を併用しながら耐荷性能に影響を及ぼす断面減少や欠損を分類するとともに、現地での調査手法の確立等に向けて、継続して検討を進める予定である。

謝辞

本研究で試験体に使用した落石防護柵支柱は、国土交通省北海道開発局よりご提供いただきました。ここに付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中村拓郎, 今野久志, 安中新太郎: 従来型落石防護柵の損傷状況と構造細目に関する一考察, 第 64 回 (2020 年度) 北海道開発局技術研究発表会論文, pp.462-467, 2021.2
- 2) 日本道路協会: 落石対策便覧, 2017.12
- 3) 今野久志, 葛西聡, 橋口寛史, 堀謙吾, 松嶋秀士: 腐食劣化した従来型落石防護柵構成部材の各種載荷試験結果について, 第 12 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 2019.12
- 4) 国土交通省北海道開発局: 北海道開発局 道路設計要領, 第 6 集 標準設計図集, 2022.4