

落石防護柵支柱の腐食による 可能吸収エネルギーの低下

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム ○中村 拓郎
山澤 文雄
畠山 乃

従来型落石防護柵のH形鋼の支柱は腐食が生じている場合があり、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。本研究では、腐食した落石防護柵支柱の耐荷性能を明らかにすることを目的に、断面減少や欠損を模擬した試験体を用いた静的載荷実験や3次元非線形有限要素法によるパラメトリック解析を実施し、腐食が生じた支柱の可能吸収エネルギーの低下程度の定量的な評価を試みた。

キーワード：落石防護柵、斜面防災、維持管理

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形鋼で構成された小規模な落石への対策工のひとつである。供用中の落石防護柵では、写真-1に示すような腐食した部材も散見される。寒地構造チームでは、従来型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、現地採取した金網、ワイヤロープ、支柱の性能確認実験を実施し、腐食によって各部材の諸性能が低下することを確認している¹⁾²⁾。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。一方、落石防護柵は定期点検の対象となっていない場合もあり、日本道路協会の落石対策便覧³⁾に維持管理上の点検項目等は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等が定められていないのが現状である。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、部材の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することが望ましく、そのためには、損傷状態と諸性能の関係を明確にする必要がある。

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る。特に、塑性化することでエネルギーを吸収することが期待される支柱では、靱性も重要な耐荷性能のひとつとなる。本研究では、腐食した落石防護柵支柱の耐荷性能を明らかにすることを目的に、断面減少や欠損を模擬した試験体を用いた静的載荷実験と、3次元非線形有限要素法によるパラメトリック解析を実施し、腐食した支柱の可能吸収エネルギーの低下程度の定量的な評価を試みた。

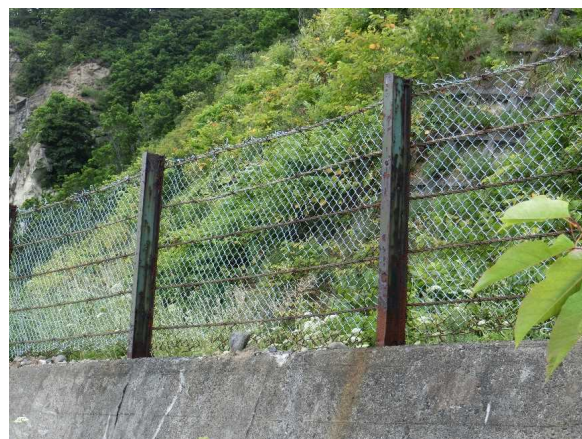


写真-1 各部材に腐食が生じた落石防護柵

2. 従来型落石防護柵の設計の概要

落石対策便覧に示される従来型落石防護柵の慣用設計法では、主たる構成部材である金網、ワイヤロープ、支柱の可能吸収エネルギーの総和を防護柵の可能吸収エネルギーとし、この可能吸収エネルギーが落石の持ち込む運動エネルギーを上回ることを確認することで、防護柵の安全性を照査している。支柱の可能吸収エネルギーは、支柱の下端が塑性ヒンジを形成するのに要する力 F_y を求め、支柱に主たる塑性化を期待する場合には、この F_y が落石作用高さ h に作用して、支柱が許容最大変形角 15° まで変形するモデルを用いて算出される。ただし、 F_y を算出する計算式には塑性断面係数ではなく、断面係数が用いられており、H12年度版の落石対策便覧や国土交通省北海道開発局の道路設計要領⁴⁾に示される計算例においても断面係数が用いられている。

一般的に、荷重が作用する支柱の曲げモーメントは、図-1に示すように、降伏モーメントを経て塑性モーメン

トまで増加し、その後、弱軸方向へのねじれ等によって低下すると考えられる。支柱の可能吸収エネルギーは曲げモーメントと変位角で囲まれる面積あるいは荷重と変位で囲まれる面積となるが、慣用設計法では、支柱に主たる塑性化を期待する場合、支柱に作用する力 F_y と変位 $h_2 \tan 15^\circ$ の積で簡易的に算出されている。実際の設計において塑性モーメントではなく、降伏モーメントが採用されていることは、こうした支柱の変形挙動を考慮した安全側の運用とも考えられる。

なお、本稿ではワイヤロープに主たる塑性化を期待する場合や、金網、ワイヤロープの可能吸収エネルギーの算定方法、端末支柱の設計、構造細目等については詳述しない。従来型落石防護柵の設計法の詳細については、落石対策便覧を参照されたい。

3. 静的载荷による実験的検討

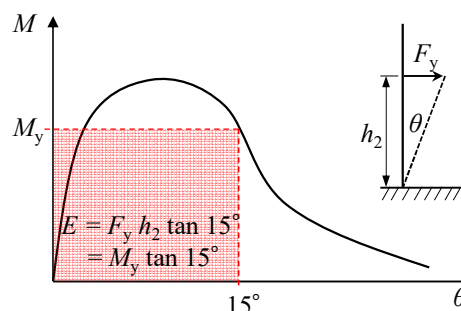
(1) 実験概要

腐食による支柱の耐荷性能の変化に関する実験的検討として、人工的に断面減少や欠損を再現した試験体を用いた静的载荷実験を実施した。試験体は、柵高さ2mの従来型落石防護柵の1本の支柱を模擬した実寸模型とした。落石防護柵の支柱を再現するために、H形鋼には吊り線やワイヤロープを支柱に固定するためのUボルト孔も設けている。なお、従来型落石防護柵の寸法・部材配置等の仕様については標準設計図集⁹⁾を参照されたい。

支柱の気中部とコンクリート基礎中の根入れ部の長さは、それぞれ2,000mm、500mmとした。根入れ部では、厚さ9mmで1辺が300mm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た。支柱はH-200×100×5.5×8のH形鋼であり、鋼材検査証明書に示される降伏点は339N/mm²、引張強さは446N/mm²である。また、载荷試験時の材齢における値入れ部のコンクリートの圧縮強度とヤング係数は、それぞれ24.9N/mm²、22.5kN/mm²である。

実験ケース一覧を表-1に示す。実験ケースは、健全な状態の試験体RHを含めた5ケースであり、腐食を模擬した試験体は、圧縮側フランジ厚さを2mm減厚させたFC2、引張側フランジ厚さを2mm減厚させたFT2、圧縮側ウェブを欠損させたWCA、引張側ウェブを欠損させたWTAとした。また、腐食を模擬した断面加工の範囲は、落石防護柵では基礎コンクリート近傍で腐食が発生しやすいことを想定して、基礎コンクリート上面から高さ250mmまでの範囲とした（写真-2）。

载荷実験の概要図を図-2に示す。载荷は静的な一方向の引張とし、基礎コンクリート上面から1,400mmの高さのウェブ中央に直径28mmの孔を設け、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



※ 赤四角面積が慣用設計法で求められる可能吸収エネルギー

図-1 支柱の可能吸収エネルギー

表-1 実験ケース一覧

試験体	支柱断面	基部の断面加工等
RH	H200×100×5.5×8	基準
FC2		圧縮側フランジ2mm減厚
FT2	※健全部の フランジ厚：8mm	引張側フランジ2mm減厚
WCA	ウェブ幅：5.5mm	圧縮側ウェブ欠損
WTA		引張側ウェブ欠損



(a)引張側フランジ2mm減厚(FT2) (b)引張側ウェブ欠損(WTA)

写真-2 引張側を加工した場合の支柱基部

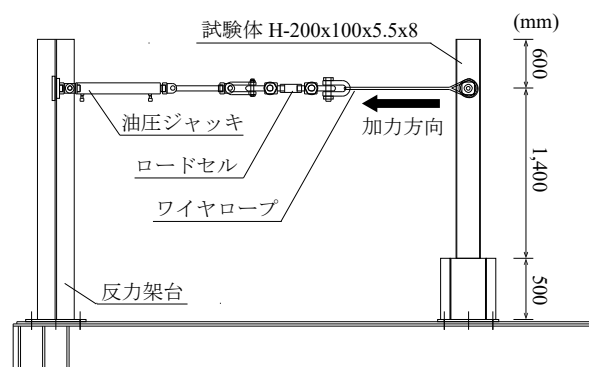


図-2 载荷実験の概要図



写真-3 载荷終了後の試験体 (RH)

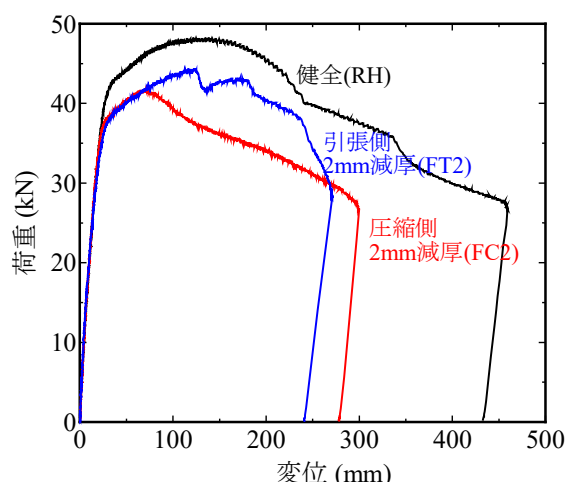


図-3 荷重－変位関係（フランジ減厚の影響）

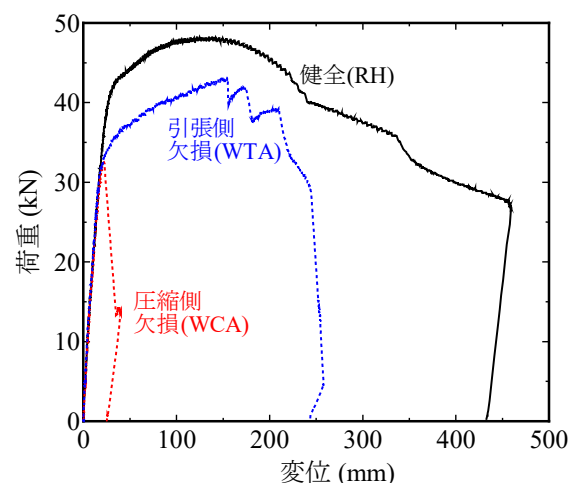


図-4 荷重－変位関係（ウェブ欠損の影響）

位、支柱基部のひずみとした。変位は、写真-3に示すように、載荷中に支柱が弱軸方向にねじれることが想定されたため、高さ1,300mmおよび1,500mmの断面に対して、それぞれ左右2方向からワイ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。支柱基部には、支柱の降伏を確認することを目的に、圧縮側、引張側フランジの外縁近傍に、吊り線用の孔と同じ高さとなる基礎コンクリートから15mmの高さの位置にひずみゲージを貼り付けた。

(2) 実験結果

各試験体の荷重－変位関係を図-3および図-4に、載荷実験後の基部の損傷状況を写真-4に示す。なお、ここでの変位は載荷点変位であり、変位計の計測値から算出した強軸方向と弱軸方向の平面の斜距離である。

健全な状態を模擬した試験体RHでは、直線的に荷重が増加し、部材の降伏、最大荷重を経て、弱軸方向へねじれるような変形をするとともに荷重が低下した。また、基部の損傷状況としては、引張側フランジにある基礎コンクリート付近の吊り線固定用の孔の近傍に亀裂が発生し、圧縮側フランジは座屈した。

腐食を模擬した4ケースでは、載荷初期における剛性には試験体RHと明確な違いが認められなかったものの、降伏荷重や最大荷重、ポストピーク領域での挙動が試験体毎に異なる結果となった。各試験体の挙動を下記に詳述する。なお、いずれの試験体においても弱軸方向へねじれるような変形をともなって荷重が低下している。

a) フランジの減厚の影響

図-3に示すように、フランジを減厚した試験体FC2、FT2では、健全な状態を模擬した試験体RHに比べて部材の降伏荷重および最大荷重が小さくなった。写真-4(b)(c)に示す基部の損傷状況に着目すると、FC2では、圧縮側フランジが大きく座屈しており、引張側フランジでは、吊り線固定用の孔近傍の板厚が薄く延びていた。一方、

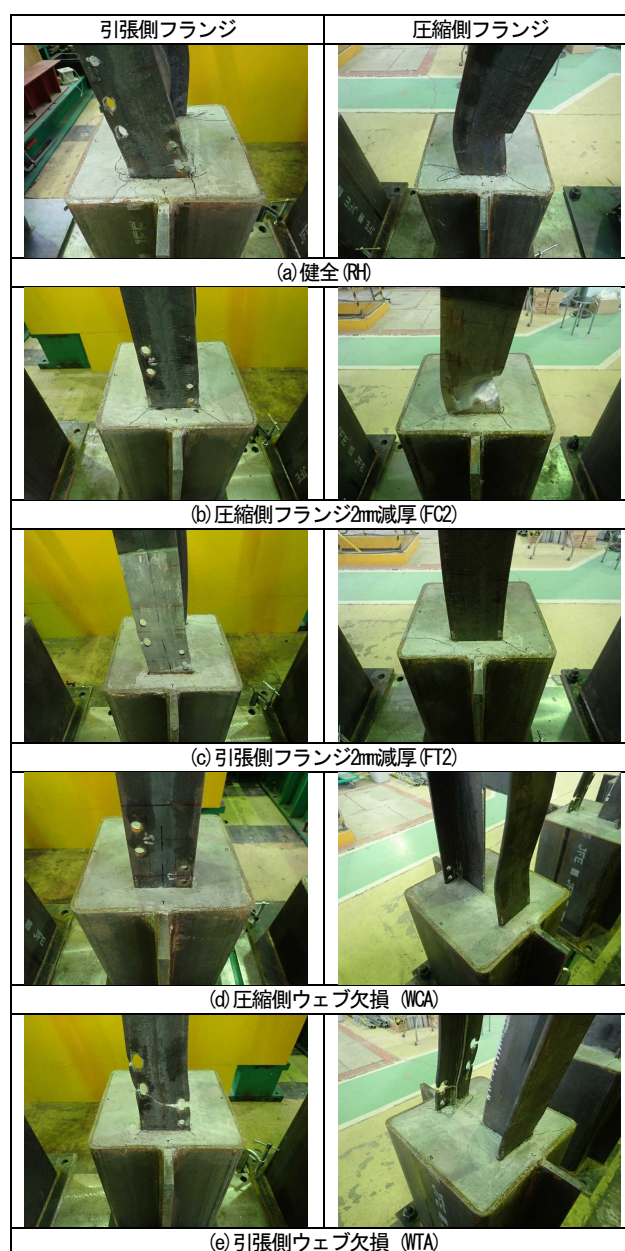


写真-4 基部の損傷状況

FT2では、引張側フランジの吊り線固定用の孔、ワイヤロープ固定用の孔近傍に亀裂が発生し、亀裂はウェブにまで達した。また、FT2では、ポストピーク領域において一時的な荷重の低下が認められており、これは局所的に亀裂が発生したことに起因すると考えられる。なお、圧縮側フランジにはFC2のような大きな変形は認められなかったものの、支柱基部は降伏ひずみに達していた。引張側を減厚したFT2に比べて圧縮側を減厚したFC2の方が最大荷重が小さく、荷重も大きく低下していることから、引張側フランジの局所的な亀裂よりも圧縮側フランジの座屈が靱性に及ぼす影響が大きいことが示唆された。

b) ウェブの欠損の影響

図4に示すように、ウェブを欠損させた試験体WCA、WTAにおいても、健全な状態を模擬した試験体RHに比べて部材の最大荷重は小さくなった。ウェブの圧縮側を欠損させたWCAでは、引張側を欠損させたWTAの降伏荷重と同程度の荷重に達した後、写真4(d)に示すように圧縮側フランジが大きく変形するとともに急激に荷重が低下した。一方、ウェブの引張側を欠損させたWTAでは、部材降伏後も荷重は増加し、吊り線固定用の孔、ワイヤロープ固定用の孔近傍に亀裂が発生し、その後、それらが連結するように亀裂が拡大し、写真4(e)に示すように、引張側フランジの破断とともに荷重が急激に低下した。ポストピーク領域に着目すると、圧縮側フランジに座屈が生じなければ、引張側フランジに亀裂が発生した後も、フランジの破断に至るまでは、ある程度の荷重を保持できる可能性があることを確認した。

4. 有限要素法による数値解析的検討

(1) 解析概要

フランジやウェブの断面減少が可能吸収エネルギーに及ぼす影響について、3次元非線形有限要素法（以下、FEM）を用いた数値解析的検討を実施した。まず、本項で前述の静的載荷実験における破壊挙動の再現性を確認することで、解析モデルの妥当性を検証する。次項では、フランジやウェブの厚さをパラメータとするパラメトリック解析を実施することで、断面減少が支柱の吸収エネルギーに及ぼす影響について定量的な評価を試みる。

a) 解析モデルの概要

数値解析には、汎用非線形構造解析システムDIANA（Release 10.6または10.7）を用いた。解析モデルの要素分割図を図5に示す。鋼材およびコンクリートには構造ソリッド要素を、鋼材とコンクリートの界面にはインターフェイス要素を使用し、約7万要素で試験体をモデル化した。支柱のH形鋼の断面寸法には実測値を反映させており、吊り線およびワイヤロープ固定用の孔も設けている。荷重は0.5mm/ステップで単調増加の強制変位を載荷点に与え、底板を完全固定とした。求解法はNewton-Raphson法とし、収束判定基準はエネルギーノル

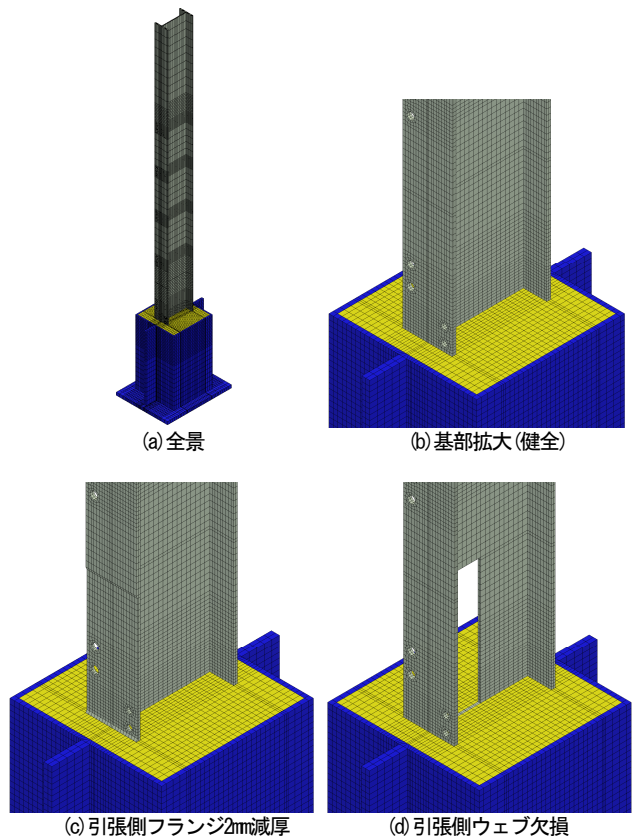


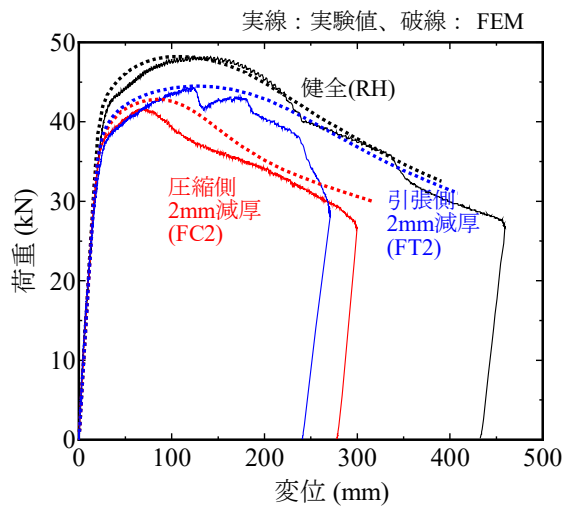
図5 要素分割図

ム比で許容値 1.0×10^{-4} とした。

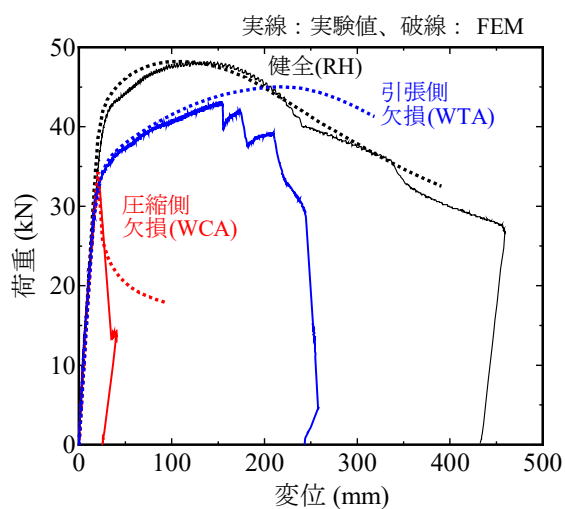
支柱のH形鋼の応力-ひずみ関係はトリリニアモデルとし、ヤング係数およびポアソン比は、それぞれ200GPa、0.3とした。降伏後のヤング係数は1/100とし、引張強度に到達後は応力を保持するモデルとした。なお、降伏点および引張強さの入力値は、別途実施した予備解析の結果を踏まえ、前述の鋼材検査証明書に記載された数値の95%としている。コンクリートのひび割れモデルは直交固定ひび割れモデルとし、コンクリートの引張挙動にはHordijkモデル、圧縮挙動には放物線モデルを用いた。横方向ひび割れによる圧縮強度低減にはVecchio & Collinsモデルを、せん断伝達特性にはAl-Mahaidiのせん断伝達モデルを適用した。各モデルへの入力値として、コンクリートの圧縮強度およびヤング係数は前述した実験値とし、引張強度、引張破壊エネルギーには土木学会のコンクリート標準示方書の各式を、圧縮破壊エネルギーにはNakamura and Higaiの提案式による算定値を用いた。根入れ部の支柱を除く各鋼材は弾性要素とし、ヤング係数を200GPa、ポアソン比を0.3とした。鋼材とコンクリートの界面におけるインターフェイス要素にはクーロン摩擦モデルを適用している。

b) FEMによる実験結果の再現性

実験およびFEMにおける荷重-変位関係を図6に示す。部材の降伏、最大荷重の実験とFEMによる解析値は概ね一致している。また、ポストピーク領域に着目すると、本解析における支柱の材料モデルでは破断をモデル化し



(a) フランジ減厚の影響



(b) ウェブ欠損の影響

図-6 FEMによる荷重－変位関係の再現性

ていないため、引張側フランジに亀裂の発生が要因と考えられる一時的な荷重の低下は再現できていない。この傾向は引張フランジが破断したWTAで顕著となっている。一方、WTAを除いた極端な鋼材破断が生じなかったケースについては、局所的な亀裂が生じた場合であっても弱軸方向にねじれたことによる荷重低下と変位の関係を概ね再現できている。以上のことから、本解析モデルは、極端な鋼材破断が生じる場合の再現性に課題が残るものの、局所的に軽微な亀裂が発生する場合であっても可能吸収エネルギーを評価できると判断し、次項では本解析モデルを基本としたパラメトリック解析を行うこととした。

(2) 損傷部位の影響に関するパラメトリック解析

a) 解析モデルと解析ケース

H形鋼の解析モデルおよび材料の物性値は、前述の再現解析を踏襲した。なお、根入れ部を含めたフルスケールの解析には1ケース当たりの解析時間が膨大になることから、パラメトリック解析では、支柱の気中部のみの

表-2 パラメトリック解析における断面減少の組合せ

圧縮側・引張側フランジ	ウェブ
0mm (健全)	0mm (健全)
1mm減厚 (JIS許容差)	0.7mm減厚 (JIS許容差)
2mm 減厚 (25%減)	1.4mm 減厚 (25%減)
4mm 減厚 (50%減)	2.75mm 減厚 (50%減)

表-3 可能吸収エネルギーの低下率(ウェブ健全)

ウェブ 健全		引張側 (mm)			
圧縮側 (mm)		0	1	2	4
	0	100.0%	98.5%	96.8%	89.2%
	1	100.0%	98.2%	95.2%	87.5%
	2	95.0%	92.4%	89.6%	83.3%
	4	77.9%	75.4%	72.9%	66.8%

表-4 可能吸収エネルギーの低下率(ウェブ0.7mm減厚)

ウェブ0.7mm減厚		引張側 (mm)			
圧縮側 (mm)		0	1	2	4
	0	99.5%	97.9%	95.8%	88.3%
	1	98.0%	95.4%	92.7%	85.5%
	2	90.4%	88.1%	85.5%	79.2%
	4	72.9%	70.6%	68.3%	62.9%

表-5 可能吸収エネルギーの低下率(ウェブ1.4mm減厚)

ウェブ1.4mm減厚		引張側 (mm)			
圧縮側 (mm)		0	1	2	4
	0	99.0%	97.4%	94.8%	87.8%
	1	93.9%	91.7%	89.5%	82.1%
	2	85.4%	83.4%	81.1%	75.1%
	4	67.6%	65.7%	63.7%	58.8%

表-6 可能吸収エネルギーの低下率(ウェブ2.75mm減厚)

ウェブ厚 半分		引張側 (mm)			
圧縮側 (mm)		0	1	2	4
	0	93.8%	93.0%	90.2%	83.7%
	1	85.0%	83.7%	83.0%	76.4%
	2	75.4%	74.2%	72.9%	68.5%
	4	56.9%	55.9%	54.7%	51.4%

解析モデルによって検討することとした。荷重は0.5mm/ステップで単調増加の強制変位を載荷点に与え、強制変位は慣用設計法での許容最大変位角における変位を参考に加力方向の変位を375mmまでとした。

パラメトリック解析における断面減少の組合せを表-2に示す。解析パラメータは、圧縮側と引張側のフランジ、ウェブの厚さであり、それぞれを健全な状態、JIS G 3192に規定されている寸法の許容差、25%減厚、50%減厚の4水準とした。断面減少の影響を確認するための解析ケースは、支柱高さ方向の断面減少範囲を250mmとして断面を表-2の全組合せとした64ケースとした。また、支

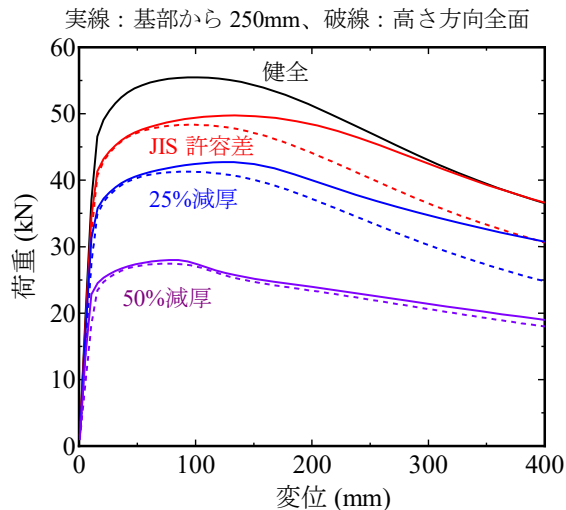


図-7 支柱高さ方向の断面減少範囲の影響

柱の高さ方向の断面減少の影響を確認するために、断面減少範囲を基部から支柱天端までとし、フランジ厚とウェブ厚をJISの許容差、25%減厚、50%減厚とした3ケースを行った。

b) 解析結果

ウェブの減厚量毎の可能吸収エネルギーの低下率を表-3～表-6にまとめる。可能吸収エネルギーは荷重と変位で囲まれた領域の面積とし、健全な断面を基準とした低下率として整理した。なお、表中は低下率の参考として100%を無色、50%を赤とした図中の2色のグラデーションで着色している。前述の載荷実験の結果と同様に、断面が減少するほど、可能吸収エネルギーは低下する傾向が認められる。また、フランジの減厚に着目すると、引張側よりも圧縮側の減厚量が大きいほど、可能吸収エネルギーは小さくなっている。この傾向は、ウェブの減厚が大きいほど顕著となり、ウェブが50%まで減厚している場合には、引張側のフランジの減厚量が小さい場合であっても40%以上の低下となっている。圧縮側フランジが減厚した部材は弱軸方向へ横倒れしやすくなる傾向は前述の実験的検討の結果と一致する。

断面減少範囲を基礎コンクリート上面から250mm、支柱天端までとした場合の荷重と変位の関係を図-7に示す。いずれの減厚量においても、初期剛性、降伏荷重に顕著な違いは認められなかった。一方、ポストピーク領域では、断面減少の範囲が支柱天端までとした解析ケースの方が、早期に荷重が低下する傾向を示しており、可能吸収エネルギーがやや小さくなっている。

5. おわりに

本研究では、腐食した落石防護柵支柱の耐荷性能と可能吸収エネルギーの低下を確認することを目的に、断面欠損を模擬した試験体を用いた静的載荷実験と、3次元

非線形有限要素法によるパラメトリック解析を実施した。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 断面減少や欠損が生じた支柱では、降伏荷重や最大荷重といった耐荷性能の低下が認められ、断面減少した部位が異なると、ポストピーク領域での変形性能も異なることを明らかにした。
- (2) ポストピーク領域における靱性は弱軸方向へのねじれに関連しており、引張側フランジの破断や圧縮側フランジが大きく座屈するような場合には、靱性が急激に失われ、可能吸収エネルギーも大きく低下することを確認した。
- (3) 有限要素法によるパラメトリック解析の結果、断面が減少するほど可能吸収エネルギーは低下し、引張側よりも圧縮側のフランジの減厚量が多いほど、可能吸収エネルギーは小さくなった。また、損傷範囲の高さ方向の違いが耐荷性能に及ぼす影響は少ないものの、損傷範囲が広がるほど可能吸収エネルギーが低下することを示した。

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ることから、1本の支柱の可能吸収エネルギーが低下した場合であっても、他の部材がエネルギーを分担することで落石を補足できる可能性は否定できない。また、落石エネルギーは、設計時に対象とする石や斜面毎に異なるため、施設毎に設計時の余裕度も異なる。さらに、実環境下で腐食した支柱の断面状態は様ではなく、調査対象となる支柱本数も少なくないことから、現場ですべての支柱を精緻に計測することは現実的ではない。このような理由から、現時点での既設の落石防護柵の措置は、道路管理者の総合的な判断に頼らざるをえない。本研究では、限られた条件・範囲ではあるものの、断面減少した支柱の耐荷性能や可能吸収エネルギーの低下程度について、断面減少が生じる部位や程度別に定量的に示すことができた。支柱基部に腐食が認められ、特に圧縮側フランジの腐食が著しいような場合には、吸収エネルギーが大幅に低下していることが疑われるなど、本稿が点検調査等において措置の必要性を検討する際の判断材料のひとつとなれば幸いである。

参考文献

- 1) 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
- 2) 中村拓郎、山澤文雄、仁平陽一郎、畠山乃：腐食した落石防護柵用支柱の静的載荷実験、令和4年土木学会北海道支部年次技術研究発表会、A-32、2023.1
- 3) 日本道路協会：落石対策便覧、2017.12
- 4) 国土交通省北海道開発局：令和5年度北海道開発局道路設計要領、第2集 道路付帯施設、第6集 標準設計図集、2023.4