

腐食切れが二辺に生じたトラス橋圧縮斜材の座屈強度式に関する検討

鋼構造研究室 中島慧士
指導教員 岩崎英治

1. 研究背景

我が国では共用年数 50 年を超えて老朽化した橋梁が増加しており，補修が追い付かない状況にある．そこで，補修の緊急性や優先度を効率的に判断するために，構造物の健全性を簡易的に評価する手法の確立が求められる．また，鋼トラス橋の劣化パターンは腐食や疲労など多様であり，劣化状況に応じた評価方法の確立が必要となる．

鋼トラス橋の腐食パターンとして，圧縮斜材の箱型断面において，腐食が進行しすみ肉溶接の一部が分離する腐食切れ(写真-1)がある．この腐食切れが生じると，局部座屈強度が低下し圧縮斜材の健全性に影響を及ぼすことが明らかにされている．

腐食切れに関する既往研究¹⁾では，斜材中央部に単一の腐食切れが存在した場合に，FEA を用いずに座屈強度を算出することができる座屈強度式および座屈強度に応じた健全性の評価指標が提案されている．

2. 研究目的

既往研究¹⁾は，単一の腐食切れが存在した場合を対象として座屈強度式を提案しているため，複数の腐食切れが生じた場合の座屈強度式については明らかにされていない．

そこで，本研究では二辺に腐食切れが生じた斜材(図-1)の座屈強度の評価を可能にする式の提案を目的とする．既往の斜材の連成座屈強度式は，斜材を構成する4枚の板の局部座屈強度をもとに算出するものが提案されているため，斜材を構成する板の座屈強度式を含めて，以下の2つの座屈強度式の検討を行う

- 1) 腐食切れが二辺に生じた板の局部座屈強度式
- 2) 腐食切れが二辺に生じた斜材の連成座屈強度式

3. 腐食切れが二辺に生じた板の局部座屈強度式

図 2 に示す板について，腐食切れ長さ比 a/b を 0~5，腐食切れ中心間距離比 d/a を 0~2，幅厚比パラメータ R_s を 0.3~1.1 の範囲で変化させて弾塑性有限変位解析を行った．ここでは，2つの腐食切れの長さが同一の場合を対象とする．

$a/b=2.0$ および 4.0 の場合の解析結果を図 3，図 4 に示す．図 3，図 4 より， $d/a < 1.0$ では座屈強度が徐々に低下し， $d/a \geq 1.0$ の領域では座屈強度が変わらず一定

となることが分かる．一定のとき，単一の腐食切れの場合の座屈強度と同等であることを確認している．ここで，図 2 の板の局部座屈強度 σ_{lu} を FEA を用いることなく算出する手法として，式(1)を提案する．

$$\frac{\sigma_{lu}}{\sigma_Y} = \frac{\sigma_{lu(d/a=0)}}{\sigma_Y} \cdot \alpha \quad (1)$$

$\sigma_{lu(d/a=0)}$ は $d/a=0$ のときの座屈強度， α は σ_{lu} の $\sigma_{lu(d/a=0)}$ に対する倍率である．

$\sigma_{lu(d/a=0)}$ を求める式は，解析結果について回帰分析を行い， a/b と R_s の関数として式(2)を作成した．

$$\frac{\sigma_{lu(d/a=0)}}{\sigma_Y} = \begin{cases} 1 & (R_s \leq R_{s1}) \\ \frac{1}{1 + a_1(R_s - R_{s1})^2} & (R_{s1} < R_s) \end{cases} \quad (2a)$$

$$a_1 = 0.063 \left(\left(\frac{a}{b} \right) + 2.028 \right)^{3.303} \quad (2b)$$

$$R_{s1} = 0.763 \cdot e^{-1.416 \left(\frac{a}{b} \right)} + 0.057 \quad (2c)$$

倍率 α は $\sigma_{lu}/\sigma_{lu(d/a=0)}$ の回帰分析を行い， a/b の増大に対しては非線形的に増加し， d/a および R_s の増大に対しては線形的に増大するような式(3)を作成した．

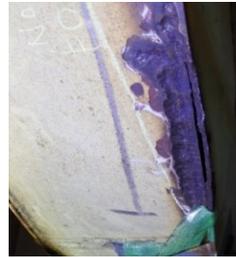


写真1 腐食切れ

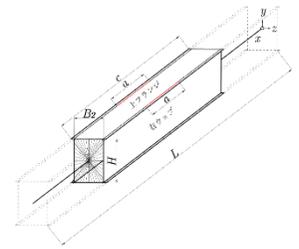


図1 斜材のモデル

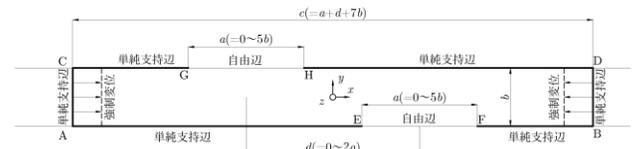


図2 腐食切れが二辺に生じた板のモデル

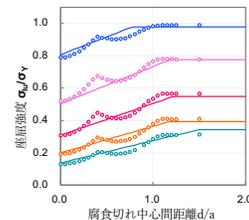


図3 $a/b=2.0$ の σ_{lu}

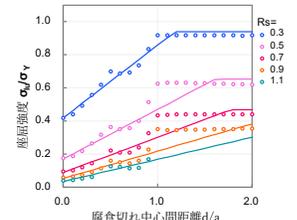


図4 $a/b=4.0$ の σ_{lu}

$$\alpha = 0.517 \left(\left(\frac{a}{b} \right) - 0.558 \right)^{1.550} \cdot \left(\frac{d}{a} \right) \cdot R_s + 1.0 \quad (3)$$

式(2)および既往の単一腐食切れの場合の座屈強度式により算出した座屈強度を、図3、図4に実線で併記している。座屈強度が変化する $d/a < 1.0$ の範囲では誤差 $-0.10 \sigma_Y \sim -0.05 \sigma_Y$ に収まるが、座屈強度が変化しない $d/a \geq 1.0$ の範囲で誤差が大きくなる場合がある。

4. 腐食切れが二辺に生じた斜材の連成座屈強度式

図1に示す腐食切れが二辺に生じた斜材について、以下の方針で弾塑性座屈解析を実施する。

- 1) 座屈強度が最も低下する $d=0$ を対象とする
- 2) 実トラス橋3橋6部材の諸元を用いる
- 3) 上フランジの二辺に腐食切れが生じた場合と右ウェブの二辺に腐食切れが生じた場合の2パターンについて解析を行う

解析結果を図5に示す。ここで、式(4)に示される、既往研究¹⁾で提案された連成座屈強度式で算出した座屈強度 σ_u / σ_Y を図中に赤い点線で示している。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_Y} = \frac{\sigma_{gu}}{\sigma_Y} \cdot Q \quad (4)$$

σ_{gu} は腐食を考慮しない斜材全体の座屈強度で、道路橋示方書²⁾に示される式で算出する。Qは斜材を構成する4枚の板の局部座屈強度の断面積を重み係数とした平均値である。

式(4)では、図5のように過大評価もしくは過小評価となるケースがあり、評価できないことが確認された。このような評価となるのは、全体座屈に伴う偏心による荷重の不均一化が、既往の式では考慮されていないことが原因と考えられる。そこで、偏心の影響の受けやすさを考慮して、次の2ケースに分類し、補正式の作成を行った。

- I. 全体座屈方向と直角な板の二辺に腐食切れが発生
- II. 全体座屈方向と平行な板の二辺に腐食切れが発生

図6に、ケースIとケースIIについて、 $\sigma_u / \sigma_{gu} - Q$ の関係を示す。図中の黒線は式(4)を示す。ここで、式(5)に示す式で回帰分析を行い、補正係数 Q' を導出した。ケースIでは $F_1=1.266$, $F_2=32.42$, $F_3=5.036$ ケースIIでは $F_1=0.954$, $F_2=2116$, $F_3=15.72$ となった。

$$Q' = \frac{F_1}{1 + F_2 \cdot e^{-F_3 \cdot Q}} \quad (5)$$

式(5)の補正係数 Q' を用いて、偏心を考慮した連成座屈強度式として式(6)を導出した。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_Y} = \frac{\sigma_{gu}}{\sigma_Y} \cdot Q' \quad (6)$$

式(6)により算出した斜材の座屈強度を、図5に青線で併記している。解析を行った全ての部材について誤差を集計したところ、式(4)ではケースIで誤差が $-0.10 \sigma_Y \sim -0.15 \sigma_Y$ 、ケースIIで $-0.20 \sigma_Y \sim -0.20 \sigma_Y$ であったのに対し、式(6)ではケースIで誤差が $-0.10 \sigma_Y \sim -0.10 \sigma_Y$ 、ケースIIで $-0.10 \sigma_Y \sim -0.10 \sigma_Y$ となり、全体的

に誤差が改善されていることを確認した。

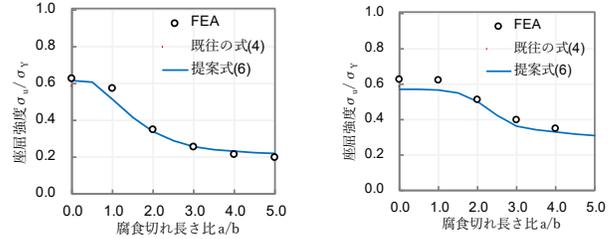


図5 斜材の座屈強度 左:ケースI 右:ケースII

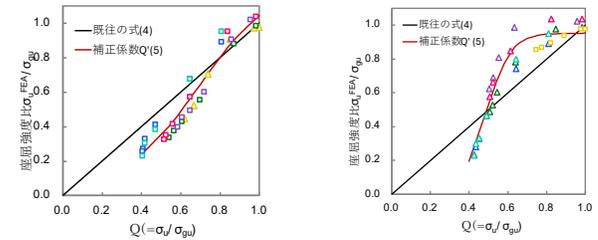


図6 $\sigma_u / \sigma_{gu} - Q$ 左:ケースI 右:ケースII

5. 実務での座屈強度式の適用方法

本研究で提案した二辺に腐食切れが生じた板の局部座屈強度式(2)は、2つの腐食切れの長さが同一の場合を対象として作成している。実際は、腐食切れの長さが異なるケースが考えられるが、その場合は、腐食切れ長さの大きい方に合わせて同一の長さとして計算することで、安全側の評価を行うこととする。片方の腐食切れ長さがある程度小さい場合は、無視して単一腐食切れとして扱える可能性があるが、無視が可能となる基準に関しては検討が必要である。

また、斜材の連成座屈強度式(6)は、Q値が最も低下する $d=0$ の座屈強度をもとに作成したが、 $d=0$ でない斜材についても、式(6)を適用することとする。

6. 結論

本研究では、腐食切れが二辺に生じたトラス橋圧縮斜材の座屈強度を評価する手法として、斜材を構成する板の局部座屈強度式および斜材の連成座屈強度式を提案した。

参考文献

- 1) 岩崎英治, 仲井大樹, 山本寧々: 腐食切れの生じた鋼トラス橋圧縮斜材の座屈強度と健全性評価, 土木学会論文集, Vol.79, No8, 23-00035, 2023.
- 2) 土木学会 鋼構造委員会, 鋼・合成構造標準示方書 2016年制定, 2016