

腐食切れの生じたトラス橋斜材の座屈耐荷力

長岡技術科学大学大学院 学生会員 山本寧音
長岡技術科学大学 正会員 岩崎英治

1. まえがき

現在、我が国の橋梁は供用年数が50年を超えるものが急激に増えつつあり、5年に1度の定期点検が定められている。しかし、老朽化した橋梁の急増に対して、それらの補修工事が追いついておらず、補修工事の優先度や緊急性の明確化と、より効果的かつ効率的な維持管理方法の確立が求められている。

鋼トラス橋の主な経年劣化原因として腐食が挙げられる。トラス橋の斜材は鋼板の6mm程度のすみ肉溶接により構成され、腐食が進行すると、写真-1のようにすみ肉溶接が切れる（以下、腐食切れ）ことがある。トラス橋の圧縮部材は、荷重の作用下において、斜材の柱としての部材座屈だけでなく、斜材を構成する板の局部座屈が生じないように設計されている。板の溶接部が腐食切れにより分離すると、溶接切れ部が自由辺となり、板の局部座屈強度は低下すると考えられるが、損傷への対処方法は経験に基づいて行われており、明確な基準が定められていない。

本研究の目的は、トラス橋の腐食切れ長さと斜材の座屈の関係性を有限要素法により明らかにすることである。また、板の座屈応力が斜材の降伏応力や斜材の柱としての座屈応力を下回らない条件についての検討も行う。本稿では、有限要素法を用いたトラス橋の腐食切れ長さと斜材の座屈の関係性を明らかにするための検討方法について報告する。

2. 柱と板の座屈応力

(1) 初期不整や残留応力のない完全系

まず、柱の座屈応力 σ_{cr} は初期不整や残留応力のない理想的な場合には、次式のように表される。

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = \frac{1}{\lambda^2} \quad (\lambda > 1), \quad \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = 1 \quad (\lambda \leq 1),$$



写真-1 すみ肉溶接部の腐食切れの一例

$$\lambda = \frac{l/r}{\pi\sqrt{E/\sigma_y}}. \quad (1)$$

ここで、 λ は細長比パラメータ、 l は有効座屈長、 r は断面の回転半径であり、 $\lambda > 1$ では座屈は生じない。また、 E はヤング係数、 σ_y は降伏応力を表す。

次に、板の座屈応力 σ_{cr} は初期不整や残留応力のない理想的な場合には、次式のように表される。

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = \frac{1}{R^2} \quad (R > 1), \quad \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = 1 \quad (R \leq 1),$$
$$R = \frac{b/t}{\pi\sqrt{E/\sigma_y}} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k}}. \quad (2)$$

ここで、 R は幅厚比パラメータであり、 $R > 1$ では板の座屈は生じない。また、 b は荷重の作用方向に垂直な方向の板幅、 t は板厚、 ν はポアソン比、 k は座屈係数と呼ばれ、板の縦横比(a/b)や支持条件などにより決まる係数である。 a は荷重の作用方向の板の長さであり、本研究では腐食切れ長さを表している。

本研究では、幅厚比パラメータ R を2つのパラメータである Γ_0 と Γ の比を用いて、次式のように表す。

$$R = \frac{\Gamma_0}{\Gamma}, \quad \Gamma_0 = \frac{b/t}{\pi\sqrt{E/\sigma_y}}, \quad \Gamma = \sqrt{\frac{k}{12(1-\nu^2)}}. \quad (3)$$

ここで、パラメータ Γ は腐食切れ長さ a と板幅 b の比

a/b の関数になっていることから、腐食切れパラメータと呼ぶことにする。

(2) 初期不整や残留応力を含んだ不完全系

柱や板の座屈応力 σ_{erg} , σ_{crl} は、初期不整や残留応力により低下するため、各種の設計規準ではこれらの影響を考慮した座屈応力式が用いられている。これらの座屈応力式では、柱の座屈応力 σ_{erg} は細長比パラメータ λ の関数、板の座屈応力 σ_{crl} は幅厚比パラメータ R の関数として表されている。ここでは、これらの座屈応力を以下のように表す。

$$\frac{\sigma_{erg}}{\sigma_y} = \left(\frac{\kappa}{\lambda}\right)^2 \quad (\lambda > \lambda_0), \quad \frac{\sigma_{erg}}{\sigma_y} = 1 \quad (\lambda \leq \lambda_0), \quad (4)$$

$$\frac{\sigma_{crl}}{\sigma_y} = \left(\frac{R_0}{R}\right)^{2\alpha} \quad (R > R_0), \quad \frac{\sigma_{crl}}{\sigma_y} = 1 \quad (R \leq R_0). \quad (5)$$

ここで、パラメータ κ は $\lambda = \lambda_0$ であるとき $\kappa = \lambda$ となり、 $\lambda > \lambda_0$ では $\kappa < \lambda$ となるような細長比パラメータ λ の関数である。

また、日本道路協会の道路橋示方書の柱と自由突出板の座屈応力式において、 κ , λ_0 , R_0 と α は次式で表される^{1,2)}。

$$\kappa = \sqrt{1.059 - 0.258\lambda - 0.190\lambda^2} \quad (\lambda \leq 1.0), \quad (6a)$$

$$\kappa = \sqrt{1.427 - 1.039\lambda - 0.223\lambda^2} \quad (1.0 < \lambda). \quad (6b)$$

$$\lambda_0 = 0.2, \quad R_0 = 0.7, \quad \alpha = 0.595 \quad (7)$$

さらに、土木学会の鋼・合成構造標準示方書の柱の座屈応力式では、

$$\kappa = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\lambda^2}},$$

$$\beta = 1 + 0.089(\lambda - \lambda_0) + \lambda^2, \quad \lambda_0 = 0.2 \quad (8)$$

となり³⁾、片側支持板の座屈応力の R_0 と α は、次式で表される⁴⁾。

$$R_0 = 0.7, \quad \alpha = 0.32 \quad (9)$$

3. 斜材を構成する板の局部座屈が生じない条件

本研究では、荷重作用下において腐食切れの生じた斜材を構成する板の局部座屈が生じない条件として、以下の3つのレベルに分けて検討する。また、道路橋示方書や鋼・合成構造標準示方書において用

いられている座屈応力式を適用することで、検討に用いる斜材は、初期不整や残留応力を含んだ不完全系であるとする。

(1) レベル1：板の局部座屈応力 σ_{crl} は、鋼材の降伏応力 σ_y 以上である ($\sigma_y \leq \sigma_{crl}$)

レベル1の場合は、式(5)より $R \leq R_0$ が成立する。この関係式を腐食切れパラメータ Γ で表すと、次式のようなになる。

$$\Gamma \geq \frac{\Gamma_0}{R_0}. \quad (10)$$

(2) レベル2：板の局部座屈応力 σ_{crl} は、鋼材の降伏応力 σ_y よりも小さいが、斜材の部材座屈応力 σ_{erg} よりも大きい ($\sigma_{erg} < \sigma_{crl} < \sigma_y$)。

レベル2の場合は、式(4)と式(5)より $\lambda > \lambda_0$ かつ $R > R_0$ の場合であり、次式が成立する。

$$\frac{\kappa}{\lambda} < \left(\frac{R_0}{R}\right)^\alpha < 1. \quad (11)$$

これを变形して、次のように表す。

$$\frac{\Gamma_2}{R_0} < \Gamma < \frac{\Gamma_0}{R_0}, \quad \text{ただし, } \Gamma_2 = \Gamma_0 \left(\frac{\kappa}{\lambda}\right)^{1/\alpha}. \quad (12)$$

(3) レベル3：板の局部座屈応力 σ_{crl} は、斜材の部材座屈応力 σ_{erg} よりも小さいが、斜材に作用している応力 σ_s より大きい ($\sigma_s < \sigma_{crl} \leq \sigma_{erg}$)。

レベル3の場合は、式(4)と式(5)より $\lambda > \lambda_0$ かつ $R > R_0$ の場合であるため、次式が成立する。

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_y} < \left(\frac{R_0}{R}\right)^{2\alpha} < \left(\frac{\kappa}{\lambda}\right)^2. \quad (13)$$

これを变形すると、

$${}^{2\alpha}\sqrt{\gamma} \frac{\Gamma_0}{R_0} < \Gamma < \frac{\Gamma_2}{R_0}, \quad \text{ただし, } \gamma = \frac{\sigma_s}{\sigma_y}. \quad (14)$$

ここで、 γ は作用応力 σ_s と降伏応力 σ_y の比として表しているが、適宜、安全率や作用係数、抵抗係数などを含める必要がある。

4. トラス橋の腐食切れ長さ と 斜材の座屈の関係の検討方法

3章では、 Γ_0/R_0 と Γ_2/R_0 を計算すると、斜材を構成

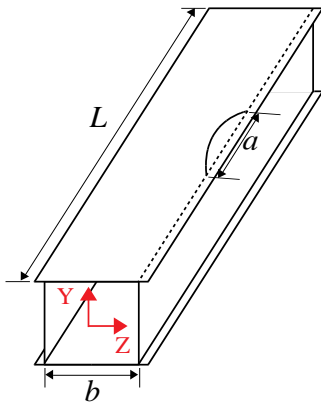


図-1 斜材1の概略図

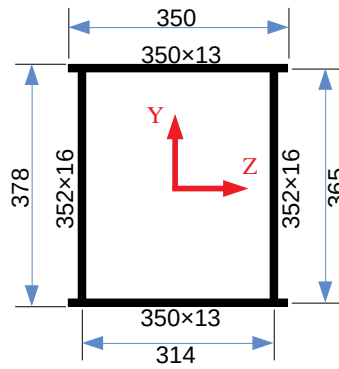


図-2 斜材1の断面諸元

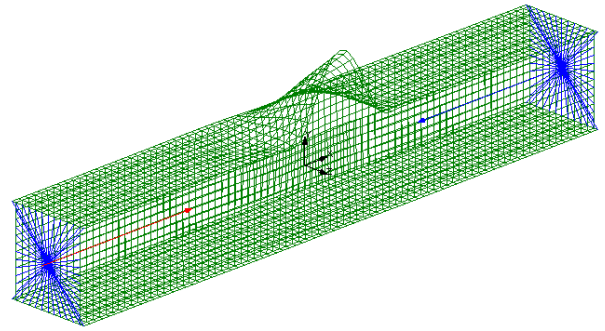


図-3 腐食切れによる板の局部座屈モード

する板の局部座屈が生じない条件を把握できることがわかった。次は、 Γ_0/R_0 と Γ_2/R_0 の値となる腐食切れ長さ a を把握する必要がある。よって、腐食切れ長さ a と腐食切れパラメータ Γ の関係を明らかにする。しかし、式(3)に示した腐食切れパラメータ Γ に含まれる座屈係数 k は、支持条件や幅厚比 a/b により変化するため、腐食切れパラメータ Γ の値を得るには、対象とする斜材の諸元を用いて、種々の腐食切れ長さ a に対する座屈解析を行う必要がある。本研究では、座屈解析に有限要素法を用いる。

有限要素法による座屈解析により得られた座屈応力 σ_{cr} から、座屈係数 k や腐食切れパラメータ Γ は次式により求められる。

$$k = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_e}, \quad \Gamma = \frac{b/t}{\pi \sqrt{E/\sigma_{cr}}},$$

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b/t)^2}. \quad (15)$$

ここで、 σ_e は基準座屈応力と呼ばれる。

(1) 対象橋梁と対象部材

本研究では、上路トラス橋である既設橋梁 S の斜材を研究対象とした。本研究での対象部材は、トラス橋の斜材のうち、圧縮応力が作用する箱型部材である。

図-1 に対象部材である斜材 1 の概略図を示す。 L は部材長、 a は腐食切れ長さ、 b は斜材のウェブ間隔を表す。また、斜材 1 の断面諸元を図-2 に示しており、 Z 軸方向はトラスの主構面内、 Y 軸方向はトラス主構面外である。

(2) 対象部材のモデル化

本研究では、三次元の弾性座屈解析により計算を行

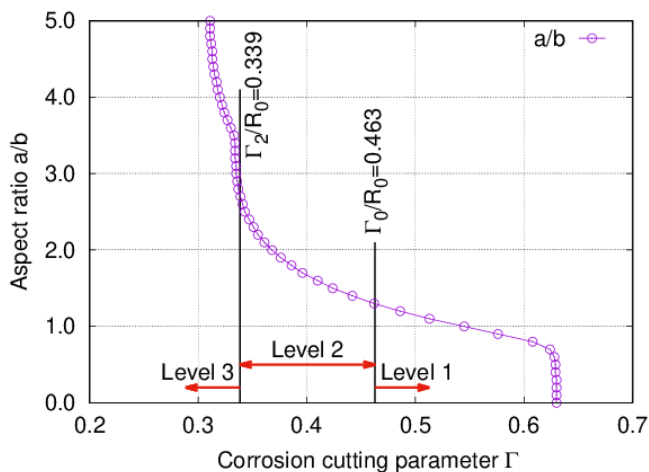
表-1 腐食切れに関するパラメータ

	ウェブ	フランジ
Γ_0	0.306	0.324
Γ_0/R_0	0.437	0.463
道路橋示方書 Γ_2/R_0	0.320	0.339
鋼・合成構造標準示方書 Γ_2/R_0	0.342	0.362

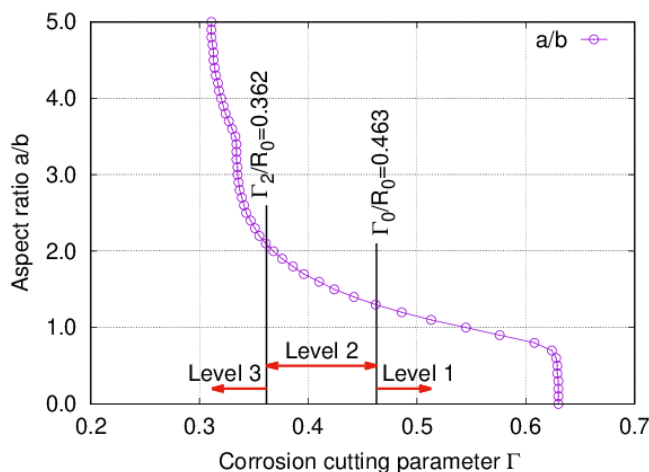
う。図-3 に有限要素解析によって得られた腐食切れによる板の局部座屈モードを示す。対象部材は箱型断面であり、4 節点シェル要素により要素分割を行う。部材長 L は約 9m であるが、腐食切れ部の局部座屈への影響が少ないことを予備解析により確認して、ウェブ間隔 b の 8 倍の長さのみをモデル化の対象とした。また、モデルの両端に配置される節点を剛体要素で結合させることで、一端のヒンジ支持、他端のローラー支持を再現して圧縮力を作用させた。さらに、腐食により対象部材の上フランジ一辺のすみ肉溶接が、一定の長さだけ切断された状態を想定し、上フランジとウェブの節点同士が接合されていない自由辺を腐食切れ長さ a とする。腐食切れ長さ a は腐食切れが生じても、斜材の柱としての座屈荷重は変化しない程度の長さを対象とし、最小で 0mm、最大でウェブ間隔 b の 5 倍である。なお、ヤング係数、ポアソン比と降伏応力は、 $E = 200 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 、 $\nu = 0.3$ 、 $\sigma_y = 355 \text{ N/mm}^2$ とする。

(3) 数値解析結果

まず、斜材の腐食切れに関するパラメータを表-1 に示す。道路橋示方書より、 Y 軸に関する曲げ座屈の有効座屈長は $l_y = 0.9L$ 、 Z 軸に関する曲げ座屈の有効座屈長は $l_z = L$ とした⁵⁾。また、今回の解析に用いた斜材



(a) 道路橋示方書



(b) 鋼・合成構造標準示方書

図-4 腐食切れ長さ a と腐食切れパラメータ Γ の関係

は腐食切れ長さ a を増加させていくと、ウェブより先にフランジでの局部座屈が生じたため、フランジの腐食切れに関するパラメータを採用する。

これより、道路橋示方書によるレベル境界は、レベル1のとき $\Gamma \geq 0.463$ 、レベル2のとき $0.339 < \Gamma < 0.463$ 、レベル3のとき $\Gamma \geq 0.339$ となる。また、鋼・合成構造標準示方書によるレベル境界は、レベル1のとき $\Gamma \geq 0.463$ 、レベル2のとき $0.362 < \Gamma < 0.463$ 、レベル3のとき $\Gamma \geq 0.362$ となる。道路橋示方書の Γ_2/R_0 の値に比べて、鋼・合成構造標準示方書の Γ_2/R_0 の値が大きくなっており、鋼・合成構造標準示方書の方が道路橋示方書に比べてレベル2の範囲が狭まっている。

次に、それぞれのレベル境界と有限要素解析によって得られた腐食切れ長さ a と腐食切れパラメータ Γ の関係を比較したものを図-4 に示す。

これより、図-4 を用いると、斜材の板としての座屈が生じる恐れのある腐食切れ長さ a を把握することができる。例えば、道路橋示方書では縦横比 a/b が 2.7、鋼・合成構造標準示方書では縦横比 a/b が 約 2.1 を超えると、レベル3の状態となる。

実橋の点検により得られた斜材の腐食切れ長さ a を、図-4 と照らし合わせることで、現状の斜材の状態を確認することができる。また、縦横比 a/b ごとの座屈モードを確認すると、縦横比 a/b が 0.0 から 0.8 の場合は斜材全体としての座屈、 a/b が 0.9 から 3.5 の場合は板の 1st モードの局部座屈、 a/b が 3.6 から 5.0 の場合は板の 2nd モードの局部座屈が生じ

ており、図-4 で確認できる変曲点と対応していることがわかる。

5. まとめと今後の課題

本稿では、斜材を構成する板の局部座屈が生じない条件を示し、有限要素法を用いてトラス橋の腐食切れ長さ a と斜材の座屈の関係を明らかにするための検討方法を確立した。今後は、より多くの斜材をモデルとして座屈解析を行い、斜材の断面諸量の変化に影響されない a/b と Γ の関係を表す簡易評価式の提案を行う。また、道路橋示方書や鋼・合成構造標準示方書に記載されている板の座屈応力式は縦横比 a/b が十分に大きい場合を想定しているため、腐食切れによる板の局部座屈部の長さ a が板幅 b に対して、十分に大きくない現実の腐食切れ部に適用する場合の妥当性を確認する必要がある。そのため、今後は残留応力や初期不整を考慮した弾塑性座屈解析も行う必要がある。

参考文献

- 1) 公益社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (II 鋼橋・鋼部材編), 丸善, pp. 110-115, 2017.
- 2) 公益社団法人 日本道路協会: 同上, 丸善, pp. 99-101, 2017.
- 3) 公益社団法人 土木学会: 鋼・合成構造標準示方書 総則編・構造計画編・設計編, 丸善, pp.60-63, 2007.
- 4) 公益社団法人 土木学会: 同上, 丸善, pp.71-78, 2007.
- 5) 公益社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (II 鋼橋・鋼部材編), 丸善, pp. 404-407, 2017.