

腐食切れの生じた鋼トラス橋斜材の健全性評価に関する数値解析的検討

環境社会基盤工学専攻 18503689 山本 寧音 (指導教員 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加している.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要因の一つに腐食がある.鋼トラス橋の圧縮斜材は鋼板の6mm程度のすみ肉溶接により構成されているが,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.圧縮斜材は,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も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明確な基準が定められていない.

本研究の目的は,腐食切れの生じた圧縮斜材の健全性評価方法の提案である.そのために,腐食切れの生じた圧縮斜材の健全性に関するレベル分けを作成し,有限要素法による弾塑性有限変位解析により実橋の斜材の健全性評価を行った.また,本研究では腐食切れの生じた圧縮斜材に適用可能な座屈応力式を作成し,腐食切れの生じた圧縮斜材の連成座屈応力を簡易的に評価できる計算方法の提案も行った.

2. 腐食切れの生じた圧縮斜材の健全性レベル

図-1に腐食切れが生じた圧縮斜材の概略図を示す. L は有効座屈長, a は腐食切れ長さ, b はウェブ間隔, h はウェブ高さを示す.本研究では,腐食切れの生じた圧縮斜材の座屈応力に着目し,腐食切れのレベルを2つのタイプに分類した.そのレベル分けを表-1に示す.まず,圧縮斜材の全体座屈応力 σ_{cr} が鋼材の降伏応力 σ_y 以上である場合をType Aとする.ここで, σ_{cr} は局部座屈応力, σ_D は死荷重による応力, σ_{Ld} は示方書の活荷重による応力, σ_{Lr} は実活荷重による応力($< \sigma_{Ld}$)を表す.続いて,圧縮斜材の全体座屈応力 σ_{cr} が鋼材の降伏応力 σ_y より小さい場合をType Bとする.Type Bでは,全体座屈応力 σ_{cr} と局部座屈応力 σ_{cr} の両応力が降伏応力 σ_y より小さくなるため,Level 2からLevel 5において,連成座



写真-1 すみ肉溶接部の腐食切れの一例

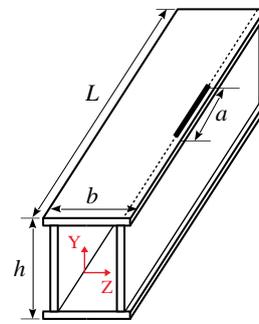


図-1 腐食切れの生じた圧縮斜材

表-1 腐食切れの生じた圧縮斜材の健全性レベル

	Type A ($\sigma_y \leq \sigma_{cr}$)	Type B ($\sigma_{cr} < \sigma_y$)
Level 1	$\sigma_y < \sigma_{cr}$	-
Level 2	$\sigma_D + \sigma_{Ld} \leq \sigma_{cr} < \sigma_y$	$\sigma_D + \sigma_{Ld} \leq \sigma_{cr} < \sigma_{cr}$
Level 3	$\sigma_D + \sigma_{Lr} \leq \sigma_{cr} < \sigma_D + \sigma_{Ld}$	$\sigma_D + \sigma_{Lr} \leq \sigma_{cr} < \sigma_D + \sigma_{Ld}$
Level 4	$\sigma_D \leq \sigma_{cr} < \sigma_D + \sigma_{Lr}$	$\sigma_D \leq \sigma_{cr} < \sigma_D + \sigma_{Lr}$
Level 5	$\sigma_{cr} < \sigma_D$	$\sigma_{cr} < \sigma_D$

表-2 腐食切れの生じた圧縮斜材の補修方針

	補修方針
Level 1	腐食の進行を抑える措置を行う.
Level 2	腐食の進行を抑える措置を行う.
Level 3	早急に補修を行う必要はないが,速やかに計画を立てて,数年以内に補修を行う.
Level 4	予防保全の観点から速やかに補修を行う必要がある.大型車両の通行制限や車線減少を実施する.
Level 5	橋梁構造の安全性の観点から,緊急対応の必要がある.自動車や歩行者の通行を禁止する.

屈応力 σ_{cr} を考慮する.

また,健全性レベルごとの補修方針の提案を表-2に示す.Level 1からLevel 2の範囲では,斜材の局部座屈や連成座屈が発生する危険性は低いと判断し,大規模な補修はせず,腐食の進行を抑える措置のみを行う.ここで,腐食の進行を抑える措置とは,錆止めのために腐食切れ部の塗装を行うことや止水のためにFRP繊維のシートを貼りつけることなどを指す.また,Level 3からLevel 5では,Bridge-Weigh-In-Motionを用いて測定した実活荷重応力 σ_{Lr} よりも

大きな活荷重が橋梁に作用する可能性を考慮し、当て板などを用いた補修を行う必要がある。

3. 腐食切れの生じた圧縮斜材の健全性評価

2章で作成した健全性レベルを用いて、腐食切れの生じた圧縮斜材の健全性評価を行うためには、圧縮斜材の各座屈応力 (σ_{crg} , σ_{crl} , σ_{cr}) を弾塑性有限変位解析により求める必要がある。そこで、本研究では有限要素法を用いて、腐食切れの生じた圧縮斜材の3次元弾塑性有限変位解析を行った。

(1) 腐食切れの生じた圧縮斜材の3次元弾塑性有限変位解析

本研究では、腐食切れの生じた圧縮斜材の3次元弾塑性有限変位解析を実施するために、4節点シェル要素、ビーム要素および剛体要素を用いて腐食切れの生じた圧縮斜材をモデル化し、端部に圧縮力を作用させることで解析を行った。解析には変位増分法を用いており、作成した解析モデルを図-2に示す。支持条件は両端単純支持とし、斜材のすみ肉溶接部の中央部が腐食により一定の長さ a だけ分離した状態を想定し、腐食切れ部はシェル要素同士を接合せず自由辺とした。解析モデルの作成では、ウェブ間隔 b の8倍の長さのみを4節点シェル要素、それ以外はビーム要素を用いてモデル化し、ビーム要素と4節点シェル要素で作成したモデル同士は、剛体要素を用いて結合させている。

解析モデルに用いた残留応力は、図-2に示す分布¹⁾を設定した。また、初期たわみは3つの座屈変形モード、すなわち、圧縮斜材の弱軸周りの全体座屈モード、図-3に示すウェブとフランジの局部座屈モードを重ね合わせている。中央部の初期たわみの大きさは、それぞれ部材長 L に対する $1/1000$ 倍¹⁾、ウェブ高さ h とウェブ間隔 b に対する $1/108$ 倍²⁾ として設定した。

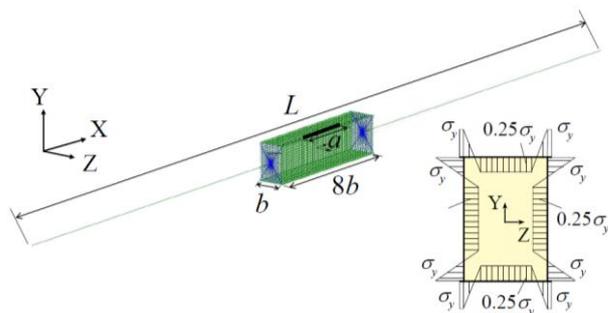


図-2 腐食切れの生じた圧縮斜材の数値解析モデルと残留応力分布¹⁾

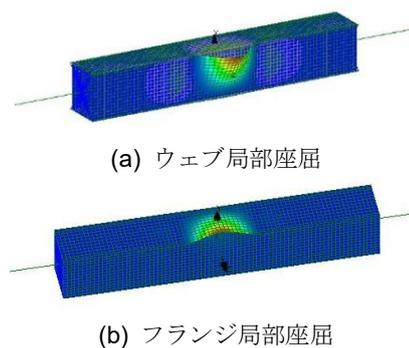


図-3 腐食切れの生じた圧縮斜材の初期たわみ：局部座屈モード

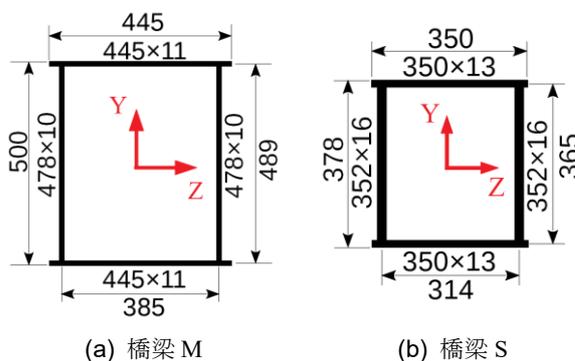
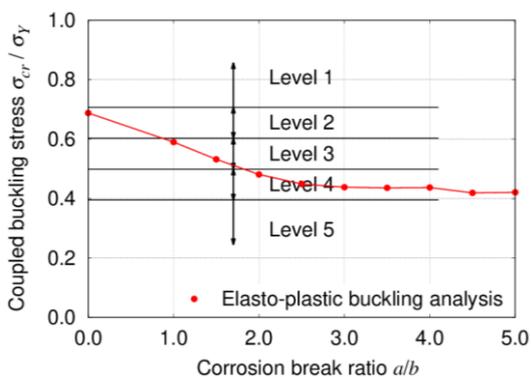
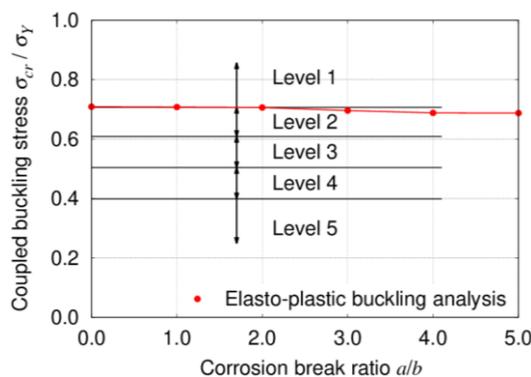


図-4 対象圧縮斜材の断面諸量



(a) 橋梁 M



(b) 橋梁 S

図-5 腐食切れ比 a/b と連成座屈応力 σ_{cr} の関係

(2) 腐食切れの生じた圧縮斜材の健全性評価

断面諸量が図-4 となる実橋の斜材を対象とし、種々の腐食切れ長さ a において弾塑性有限変位解析を実施した結果を図-5 に示す。橋梁 M は一般道路、橋梁 S は高速道路として供用されており、橋梁 M は橋梁 S に比べて小さい荷重を対象としている。同図には表-1 の腐食切れレベル (Type B) も併記する。また、実荷重による応力 σ_r は、設計活荷重 σ_{Ld} の 50% としており、腐食切れ比 $a/b < 0.7$ では、腐食切れ部の板の局部座屈が生じないため、 $a/b \geq 0.7$ をレベル境界の有効範囲とする。

図-5 より、橋梁 M は腐食切れ比 a/b の増加に伴って、連成座屈応力 σ_{cr} が徐々に小さくなり、健全性レベルは 2 から 4 へと変化する。それに対して、橋梁 S は腐食切れ比 a/b の増加に係わらず、連成座屈応力 σ_{cr} がほぼ変化しない。これより、腐食切れ比 a/b と連成座屈応力 σ_{cr} の関係は、橋梁ごとにその傾向が大きく異なるため、腐食切れの生じた圧縮斜材の健全性評価を行うには、腐食切れ比 a/b と連成座屈応力 σ_{cr} の関係を橋梁ごとに事前に明らかにしておく必要がある。

また、斜材の健全性評価の例として、橋梁 M と橋梁 S に $a/b = 2.0$ の腐食切れが生じていた場合を想定すると、図-5 より橋梁 M の健全性レベルは 4、橋梁 S の健全性レベルは 2 であることがわかる。これより、本研究で提案した健全性評価方法は、技術者の経験に頼ることなく斜材の健全性を確認でき、斜材に対する補修工事の優先度や緊急性の明確化に繋がる。

4. 腐食切れの生じた圧縮斜材の座屈応力式

3 章では、圧縮斜材の各座屈応力 (σ_{crg} , σ_{crl} , σ_{cr}) を、弾塑性有限変位解析により求めた。しかし、弾塑性有限変位解析は計算が完了するまでに多くの時間を要し、扱いが非常に煩雑である。そこで、本研究では、腐食切れの生じた圧縮斜材に適用可能な座屈応力式を用いて、座屈応力を求めることとした。我が国で規定されている座屈応力式が腐食切れの生じた圧縮斜材に適用可能であるか確認するために、圧縮斜材と腐食切れの生じた板の弾塑性有限変位解析を行い、道路橋示方書 (JRA) と鋼・合成構造標準示方書 (JSCE) の座屈応力式との比較を行った。

(1) 腐食切れの生じた圧縮斜材の全体座屈応力式の適用性

本研究では、腐食切れの発生が圧縮斜材の全体座屈応力 σ_{crg} に影響のない範囲の腐食切れ長さ a を対象としているため、ビーム要素を用いて圧縮斜材を

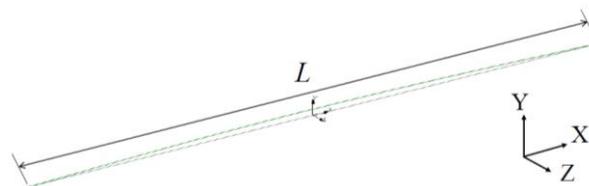


図-6 圧縮斜材の数値解析モデル

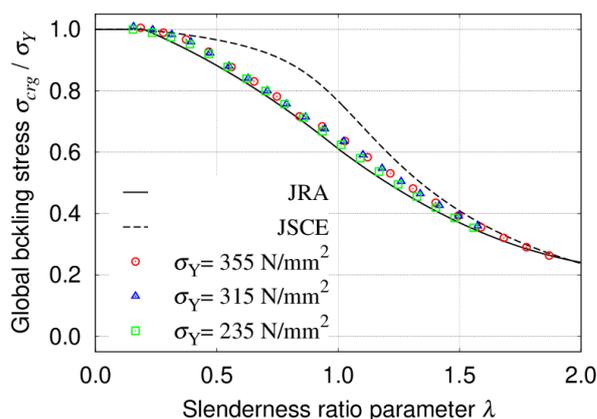


図-7 箱型断面部材の座屈応力式の適用性

モデル化し、種々の部材長 L において端部に圧縮力を作用させ、3 次元弾塑性有限変位解析を行った。作成した解析モデルを図-6 に示す。また、解析に用いた断面諸量を図-4 (b)、残留応力分布を図-2 に示す。初期たわみは、斜材の中央部に $L/1000$ の鉛直変位を与える正弦半波として考慮しており¹⁾、支持条件は両端単純支持である。

図-7 に箱型断面部材の座屈応力式の適用性を示す。ここで、降伏応力は 235 N/mm^2 , 315 N/mm^2 , 355 N/mm^2 の 3 種類を設定している。また、道路橋示方書と鋼・合成構造標準示方書の箱型断面部材の全体座屈応力式を以下に示す。

道路橋示方書³⁾ :

$$\frac{\sigma_{crg}}{\sigma_Y} = \begin{cases} 1.0 & (\lambda \leq 0.2) \\ 1.059 - 0.258\lambda - 0.190\lambda^2 & (0.2 < \lambda \leq 1.0) \\ 1.427 - 1.039\lambda + 0.223\lambda^2 & (1.0 < \lambda) \end{cases} \quad (1)$$

鋼・合成構造標準示方書⁴⁾ :

$$\frac{\sigma_{crg}}{\sigma_Y} = \frac{(\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\lambda^2})}{2\lambda^2} \quad (\lambda > \lambda_0), \quad (2)$$

$$\beta = 1 + \alpha(\lambda - \lambda_0) + \lambda^2.$$

ここで、 α と λ_0 はそれぞれ $0.089, 0.2$ とし、細長比パラメータ λ は以下の式で表され、 r は着目する部材軸に関する総断面積の断面 2 次半径である。

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_Y L}{E r}} \quad (3)$$

図-7より、降伏応力 σ_Y の値の違いに係わらず、箱型断面部材の全体座屈応力 σ_{cr} の値は、道路橋示方書より計算された全体座屈応力 σ_{cr} 値とほぼ一致している。よって、本論文では、腐食切れの生じた圧縮斜材の全体座屈応力 σ_{cr} を計算するために、式(1)に示す道路橋示方書の座屈応力式³⁾を用いることとした。

(2) 腐食切れの生じた板要素の局部座屈応力式の適用性

図-8に腐食切れの生じた板のシェル要素を用いた解析モデルを示す。ここで、 a は腐食切れ長さ、 b は314mmの板幅とし、腐食切れ長さ a は板幅 b の1.0から5.0倍を対象としている。また、解析に用いた残留応力分布¹⁾を図-9に示す。初期たわみは、板要素の中央部に板幅 b の108倍の鉛直変位を与える正弦半波として考慮しており²⁾、支持条件は腐食切れ部を自由辺、それ以外を単純支持としている。本研究では、種々の板厚 t において解析モデルの短辺に強制変位を与えることで3次元弾塑性有限変位解析を行った。

図-10に腐食切れの生じた板の座屈応力式の適用性を示す。ここで、降伏応力は355 N/mm²を設定している。また、道路橋示方書と鋼・合成構造標準示方書の自由突出板の局部座屈応力式を以下に示す。

道路橋示方書⁵⁾：

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = \begin{cases} 1.00 & (R \leq 0.7) \\ \left(\frac{0.7}{R}\right)^{1.19} & (0.7 > R) \end{cases} \quad (4)$$

鋼・合成構造標準示方書⁶⁾：

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = \begin{cases} 1.00 & (R \leq 0.7) \\ \left(\frac{0.7}{R}\right)^{0.64} & (0.7 > R) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、幅厚比パラメータ R は以下の式で表され、 t は板厚、 k は座屈係数である。

$$R = \frac{b}{\pi t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k}} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \quad (6)$$

図-10より、腐食切れの生じた板の局部座屈応力 σ_{cr} は、腐食切れ比 a/b の値により、幅厚比パラメータ R と局部座屈応力 σ_{cr} の関係が変化し、既往の座屈応力式を適用できないことがわかった。そこで、本研究では、腐食切れの生じた板の弾塑性有限変位

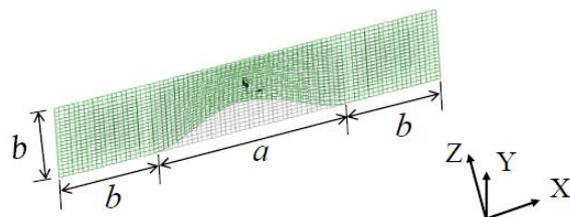


図-8 腐食切れの生じた板要素の数値解析モデル

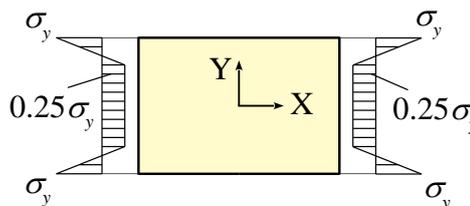


図-9 腐食切れの生じた板要素の残留応力分布¹⁾

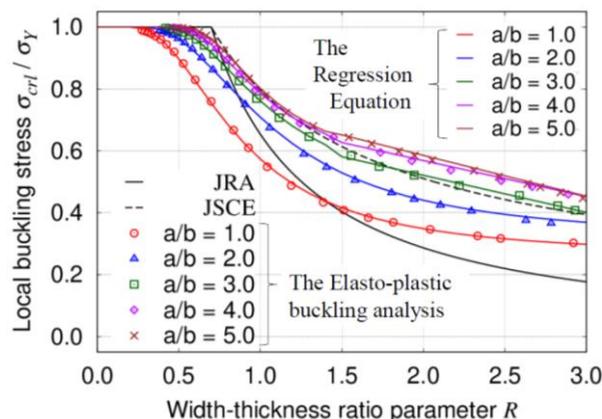


図-10 腐食切れの生じた板の座屈応力式の適用性

解析の結果を回帰分析し、式(7)に示す腐食切れ比 a/b と幅厚比パラメータ R の関数となる板の座屈応力式を新たに作成することとした。

$$\sigma_{cr} / \sigma_Y = f(R, a/b) \quad (7)$$

本研究で用いた回帰式を以下に示す。

$$\sigma_{cr} / \sigma_Y = \begin{cases} 1.00 & \left(R \leq \frac{c_2}{2c_3}\right) \\ c_0 + \frac{c_1}{1 - c_2 R + c_3 R^2} & \left(\frac{c_2}{2c_3} < R\right) \end{cases} \quad (8)$$

$$\sigma_{cr} / \sigma_Y = d_0 R + d_1 \quad (9)$$

ここで、幅厚比パラメータ R と局部座屈応力の関係は、腐食切れ比 a/b ごとに曲線の形状が異なるため、 $1.0 \leq a/b < 3.0$ の場合と $3.0 \leq a/b \leq 5.0$ かつ $R < 1.5$ の場合は式(1)、 $3.0 \leq a/b \leq 5.0$ かつ $1.5 \leq R \leq 3.0$ の場合は式(2)を回帰式とした。また、式(8)と式(9)に含

まれるパラメータ ($c_0 \sim c_3, d_0, d_1$) は、腐食切れ比 a/b の関数となり、 a/b ごとに値が変化する。

腐食切れの生じた板の弾塑性有限変位解析の結果と回帰分析を用いて作成した座屈応力式の比較を図-10に示す。これより、新たに作成した板の座屈応力式は、局部座屈応力 σ_{cr} を精度よく計算できている。

5. 腐食切れの生じた圧縮斜材の連成座屈応力の簡易的な評価方法

ここでは、弾塑性有限変位解析を実施せずに腐食切れの生じた圧縮斜材の連成座屈応力 σ_{cr} を求めるために、座屈応力式と線形座屈解析を用いた連成座屈応力 σ_{cr} の簡易的な評価方法について述べる。

(1) 腐食切れの生じた圧縮斜材の線形座屈解析

回帰分析により作成した板の局部座屈応力式を用いるには、対象斜材の幅厚比パラメータ R を事前に把握しておく必要がある。しかし、幅厚比パラメータ R に含まれる座屈係数 k は、腐食切れ比 a/b の関数となるため、容易に導出することができない。そこで、本研究では以下の手順により、幅厚比パラメータ R を導出した。

まず、腐食切れ部を自由辺とした4辺単純支持された板を対象として、有限要素法による線形座屈解析を実施し、種々の腐食切れ長さ a における板の局部座屈応力 σ_{cr} を求める。続いて、求めた局部座屈応力 σ_{cr} を初期不整のない完全系の板の局部座屈応力式である式(10)に代入することで、幅厚比パラメータ R を得る。

$$\sigma_{cr} / \sigma_Y = 1/R^2, \quad R = \sqrt{\sigma_Y / \sigma_{cr}^{FEA}}. \quad (10)$$

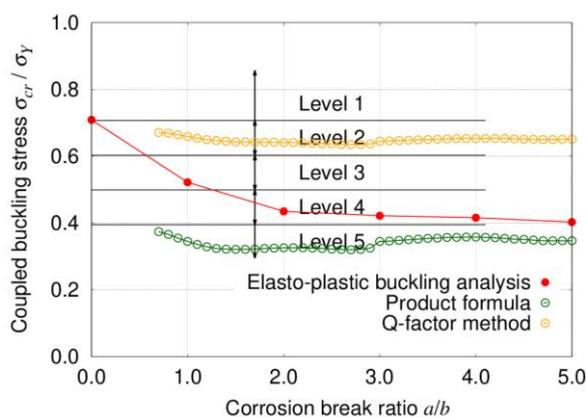
式(10)より求めた幅厚比パラメータ R と腐食切れ長さ a/b の関係を式(8), (9)に代入することで、腐食切れの生じた板の局部座屈応力 σ_{cr} を求めることができる。

(2) 線形座屈解析と局部座屈応力式を用いた連成座屈応力の簡易的な導出方法

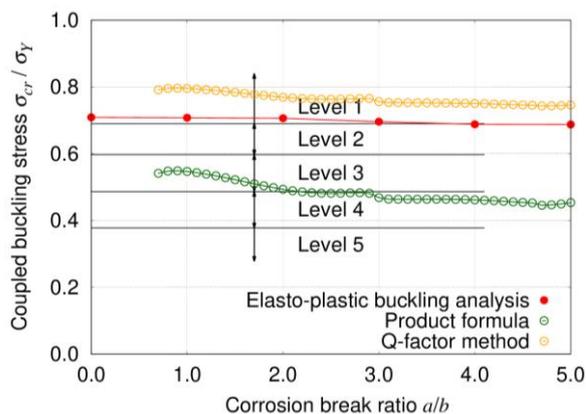
本研究では、線形座屈解析と局部座屈応力式を用いた連成座屈応力 σ_{cr} の簡易的な導出方法として、積公式³⁾とQ-factor法⁴⁾を用いた。

積公式³⁾とは、柱部材としての全体座屈応力 σ_{crg} と、柱断面を構成する板の局部座屈応力 σ_{cr} の積により連成座屈応力 σ_{cr} を求める方法で、式(11)にて表される。

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = \frac{\sigma_{crg}}{\sigma_Y} \cdot \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y}. \quad (11)$$



(a) 橋梁 M



(b) 橋梁 S

図-11 線形座屈解析と弾塑性有限変位解析の比較

ここで、全体座屈応力 σ_{crg} は式(1)、局部座屈応力 σ_{cr} は式(8), (9)の回帰分析により求めた局部座屈応力式を用いて計算する。また、積公式³⁾の局部座屈応力 σ_{cr} に適用する板要素は、4枚の板要素の中で最初に局部座屈が発生する板を対象としている。

Q-factor法⁴⁾とは、局部座屈が生じるような薄肉の柱と同断面の短柱強度 $Q\sigma_Y$ を事前に求め、これをその柱の仮定の低減された降伏応力と考えると、鋼・合成構造標準示方書に規定されている全体座屈応力式⁴⁾の降伏応力 σ_Y を $Q\sigma_Y$ に置き換えて設計式として用いるものであり、次式で表される。

$$\frac{\sigma_{crg}}{\sigma_Y} = \frac{(\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\lambda^2}) \cdot Q}{2\lambda^2} \quad (\lambda > \lambda_0), \quad (12)$$

$$\beta = 1 + \alpha(\lambda - \lambda_0) + \lambda^2.$$

また、 Q は局部座屈を生じる短柱の無次元耐力であり、以下の式で表される。

$$Q = \frac{\sum(\sigma_{cr} A_{fc})}{A_g \sigma_Y}. \quad (13)$$

ここで、局部座屈応力 σ_{cr} は斜材の板要素ごとの局部

座屈応力, A_{fc} は局部座屈応力 σ_{cl} を計算した板要素の断面積, A_g は照査する断面の総断面積, Σ は断面積を構成する板要素の総和である. Q を求めるために必要な各板要素の局部座屈応力 σ_{cl} は, 腐食切れが生じている板要素 (上フランジ, 右ウェブ) は式(8), (9), 腐食切れが生じていない板要素 (下フランジ, 左ウェブ) は以下に示す両縁支持板の局部座屈応力式⁴⁾を用いて求める.

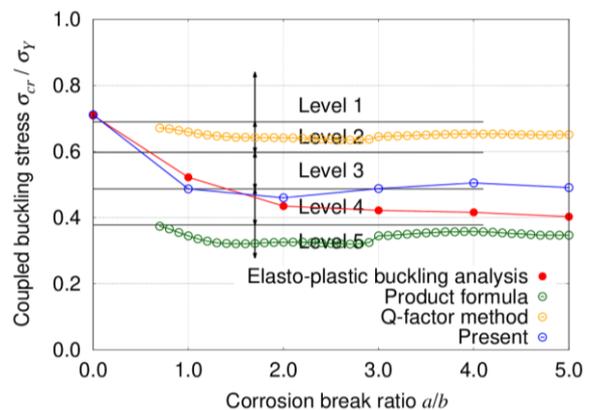
$$\frac{\sigma_{cl}}{\sigma_y} = \begin{cases} 1.00 & (0.7 > R) \\ \left(\frac{0.7}{R}\right)^{0.86} & (R \leq 0.7) \end{cases} \quad (14)$$

積公式³⁾と Q-factor 法⁴⁾を用いて計算した連成座屈応力と弾塑性有限変位解析結果を比較したものを図-11 に示す. 図-11 より, 積公式³⁾を用いて計算した連成座屈応力 σ_{cr} は, 弾塑性有限変位解析結果より過度に安全側の値として求められている. それに対して, Q-factor 法⁴⁾を用いて計算した連成座屈応力 σ_{cr} は, 弾塑性有限変位解析結果より危険側の値として求められている. 以上より, 方法の違いに係わらず, 腐食切れの生じた圧縮斜材の連成座屈応力 σ_{cr} の導出に線形座屈解析を用いると, その値を精度よく計算できないことがわかる.

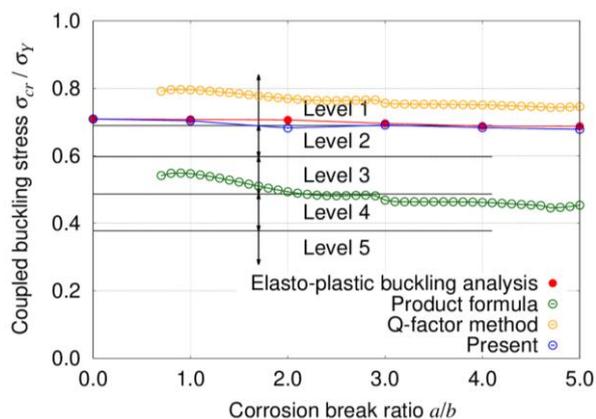
そこで, 本研究では, 腐食切れの生じた圧縮斜材の連成座屈応力 σ_{cr} の簡易的な評価方法を新たに提案することとし, その方法を以下に示す.

- 1) まず, 圧縮斜材を構成する 4 枚の板要素の中で, 腐食切れが生じている板要素 (上フランジ, 右ウェブ) は式(8), (9), 腐食切れが生じていない板要素 (下フランジ, 左ウェブ) は式(14)⁶⁾を用いて, 板要素ごとの局部座屈応力 σ_{cl} を計算する.
- 2) 計算した局部座屈応力の最小値 σ_{cl}^{min} と式(1)より求めた斜材の全体座屈応力 σ_{cr} の比較を行う. 全体座屈応力 $\sigma_{cr} \leq \sigma_{cl}^{min}$ の場合, 連成座屈応力 $\sigma_{cr} = \sigma_{cr}$ とし, 最小局部座屈応力 $\sigma_{cl}^{min} < \sigma_{cr}$ の場合, 連成座屈応力 $\sigma_{cr} = \sigma_{cl}^{min}$ とする.

本手法を用いて計算した連成座屈応力と弾塑性有限変位解析結果を比較したものを図-12 に示す. ここで, 積公式³⁾, Q-factor 法⁴⁾を用いた結果も示している. 図-12 より, 全ての腐食切れ長さ a において, 積公式³⁾及び Q-factor 法⁴⁾よりも, 本手法では精度よく連成座屈応力 σ_{cr} を計算することができている. 橋梁 M では, 腐食切れ長さ a が増加すると, 本手法を用いて計算した連成座屈応力 σ_{cr} の値が弾塑性有限変位解析の結果を上回っているが, 五年に一度の橋梁の定期点検を行った結果, $a/b=2.0$ 以上の腐食切れが突然生じる可能性は低いため, 本手法は他の手法と比べて実用的に使用できる.



(a) 橋梁 M



(b) 橋梁 S

図-12 本手法と弾塑性有限変位解析結果の比較

6. まとめ

本研究で得られた結果は, 次のとおりである.

- [1] 腐食切れの生じた圧縮斜材の座屈応力に着目した健全性に関するレベル分けを作成し, その健全性評価方法の提案を行った.
- [2] 弾塑性有限変位解析の結果を回帰分析することで, 腐食切れの生じた板要素に適用可能な局部座屈応力式を作成した.
- [3] 腐食切れの生じた圧縮斜材の連成座屈応力を簡易的に評価できる方法の提案を行った.

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. 117, 2017.
- 2) 社団法人 土木学会: 座屈設計ガイドライン, 技報堂, pp. 44-46, 1987.
- 3) 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.
- 4) 土木学会: 鋼・合成構造構造標準示方書 総則編・構造計画編・設計編, 丸善, pp. 68-74, 2016.
- 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. 99-102, 2017.1
- 6) 公益社団法人 土木学会: 鋼・合成構造構造標準示方書 総則編・構造計画編・設計編, 丸善, pp.71-75, 2007.