

# 学 位 論 文 要 旨

中心軸圧縮力を受ける腐食した溝形鋼および山形鋼  
の座屈挙動と耐力評価

Buckling behavior and strength evaluation of corroded steel  
channel and angle shapes under compressive force

金沢大学大学院自然科学研究科

環境デザイン学専攻

久積 和正

## Abstract

In recent years, as serious damage to aging steel structures and the related accidents have often been reported, it is imperative to assess the structural health conditions and take necessary measures to sustain the functions of the structures. However, there are few methodologies for quantitatively evaluating the corroded steel shapes that is frequently used for industrial infrastructures. So, it is necessary to clarify the fundamental structural behavior of them. In this research, in order to examine the compressive strength of corroded steel members, a total of 27 test specimens were cut from a corroded belt conveyor frame that was in operation for roughly 40 years, including 10 channel shapes from the upper and lower chords and 17 angle shapes from the struts and braces. The buckling behavior and ultimate strength of the corroded steel shapes were studied by both uniaxial compression tests and FEM analyses. FEM analyses were conducted in this research directly using the geometric information obtained by 3D laser displacement meter. Through the detailed analyses, the global buckling and local buckling behavior of the corroded steel shapes were clarified, and then the buckling strength evaluation formula for corroded steel shapes was proposed. It was concluded that the ultimate strengths of corroded steel shapes are reasonably evaluated by using the global buckling stress of the original non-corroded shape and the minimum effective area of the corroded shape obtained based on traditional effective width theory.

# 論文要旨

## 1. 研究の背景と目的

長年にわたる供用に伴ってインフラの老朽化が顕在化してきており、腐食・劣化に起因する深刻な問題が発生している。特に構造的な冗長性が低く、崩壊リスクの高い産業インフラを対象として、腐食劣化に伴って低下する構造健全性を定量的かつ正しく把握することが合理的な維持管理を行う上での重要課題である。一般的な維持管理では、構造物に生じた変状やその原因を点検によつて的確に把握し、対象物の現有性能や健全性を定量的に評価することで、補修・補強ならびに更新の必要性の判断や具体的な対応策などの検討が可能となる。さらに将来の劣化予測や異常事態のモニタリングなどを実施することにより、不慮の設備事故を未然に防ぐと共に、操業損失のミニマム化や設備の長寿命化を実現することができる。このような維持管理プロセスの中でも、最も重要となる作業は健全性評価であるが、その多くは目視検査により行われているのが実態である。よつて、最適な維持管理計画の策定を目指す現場からは、より客観的かつ定量的な評価方法を望む声が強ひ。

本研究は、腐食した鋼構造物の健全性評価において基本となる部材耐力評価に焦点を当て、腐食に伴う形状変化が大きな影響を及ぼす圧縮挙動に着目した実験ならびに数値解析を通じ、産業用鋼構造物で多用される溝形鋼や山形鋼が腐食した場合の座屈挙動を解明すると共に、その耐力評価法を提案することを目的とする。

## 2. 研究対象とした腐食部材の特徴

本研究では、代表的な産業インフラとして、約40年間屋外で供用されたベルトコンベア鋼製架構から溝形鋼10本および山形鋼17本を切り出して研究対象とした。図1に示すように、典型的なトラス構造であるベルトコンベア鋼製架構は、その下面側に位置する下弦材や水平斜材に落下し堆積した粉塵によつて湿潤状態が続き、また、腐食状況の確認が遅れることで腐食が進行する。加えて、産業プラントの多くが海浜地域に隣接して厳しい腐食環境下に晒されるために腐食の進行が助長される。

切り出した合計27体の腐食部材について、その腐食形状を3次元レーザー変位計によつて計測して得られた幾何データを基に残存板厚や残存断面積の特徴を整理・分析した。対象とした腐食部材は、その最大腐食率が8%~74%、平均腐食率で6%~51%の領域にある。図2に示す板厚コンターと断面積分布からも、部材軸方向にも幅方向にも広範囲に渡つて複雑に腐食減肉している多様な腐食性状を持つことが明らかになった。

また、部材軸方向で得られる1mmピッチの腐食率を分析した結果、溝形鋼の腐食率は平均で26.9%、標準偏差15.1%であり、山形鋼は平均で19.0%、標準偏差13.6%であった。ベルトコンベアの機構上、粉塵が堆積しやすく、また湿潤状態が続きやすい下弦材(溝形鋼)の方が相対的に腐食の程度が大きく、その分布のばらつきも大きい。また、腐食の程度が小さい場合はサンプル数による断面積のばらつきが比較的小さいこと、腐食の程度が進むにつれて断面積のばらつきが大きくなるが確認された。

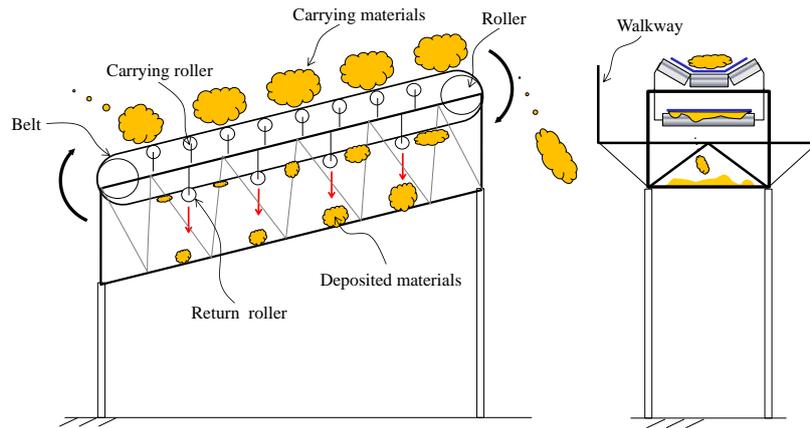
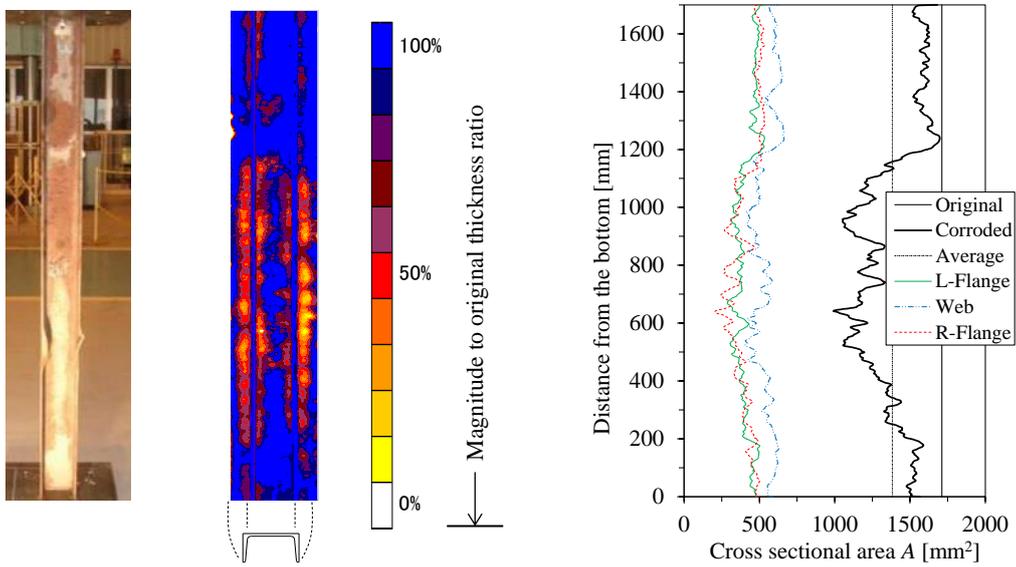
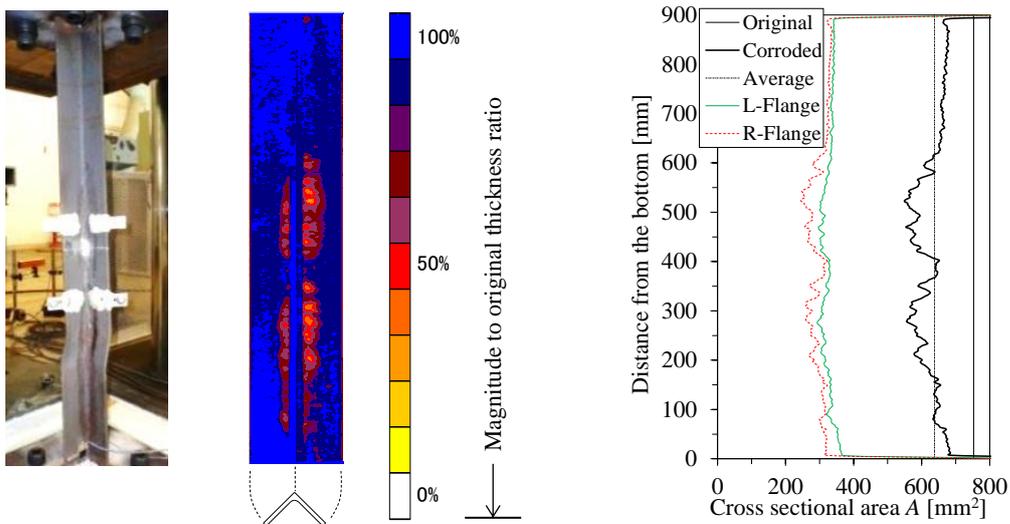


図1 ベルトコンベア鋼製架構の腐食発生メカニズム



(a) 溝形鋼の例



(b) 山形鋼の例

図2 部材軸方向における板厚および断面積の分布

### 3. 腐食部材の圧縮試験を通じた座屈挙動分析と全体座屈耐力評価

本章では、腐食した溝形鋼および山形鋼を対象とした中心軸圧縮試験を行い、その座屈挙動を観察・分析すると共に、3次元レーザー変位計を用いて得られた表面形状データに基づくFEM解析を通じて、腐食の程度による終局モードの相違や最大耐力に至るまでの挙動を考察した。健全時に同一断面諸元を有する部材であっても、腐食の程度により、断面降伏するモード、断面降伏に至る前に全体座屈が生じるモード、局部座屈後に全体座屈が連成するモードの3つのパターンが確認された。局部座屈後に全体座屈が連成するモードにより支配される部材が多く、その傾向は部材の腐食の程度が増すほど強くなることが分かった。また、腐食部材の最大耐力は部材の平均断面積よりも最小断面積との相関が強い。

これらの挙動分析を基に、座屈耐力評価式の提案を行った。最大腐食率40%以下の腐食部材の最大耐力は、健全部材の全体座屈耐力評価に用いられるJohnson放物線式に最小断面積位置での断面定数を適用することによって安全側に評価可能であった。ただし、最大腐食率が40%を超えると、局部座屈や局部変形の影響が強まるため、Johnson放物線式を用いた耐力評価は非安全側の評価を与えた。そのため、最大腐食率を基本変数とした補正係数 $\varphi'$ を提案すると共に、腐食部材の最小断面位置での断面二次半径と健全断面の断面二次半径に一定の関係があることに着目し、健全部材の座屈応力 $\sigma_{cr0}$ と腐食部材の最小断面積 $A_{min}$ を用いて、実験での最大耐力の下限值相当を概ね良好に評価できる次式を得た(図3参照)。

$$P_{cra}'' = \varphi' A_{min} \sigma_{cr0} \quad (1)$$

$$\varphi' = \frac{6.6}{\exp\{0.058 (R_{max} - 40)\} + 5.7} - 0.25 \quad (2)$$

$$R_{max} = \frac{A_0 - A_{min}}{A_0} \quad (3)$$

ここで、 $\varphi'$ は遷移温度曲線に基づく評価式の補正係数、 $A_{min}$ は腐食部材の部材軸方向の最小断面積(mm<sup>2</sup>)、 $R_{max}$ は最大腐食率、 $\sigma_{cr0}$ は健全部材の全体座屈応力である。

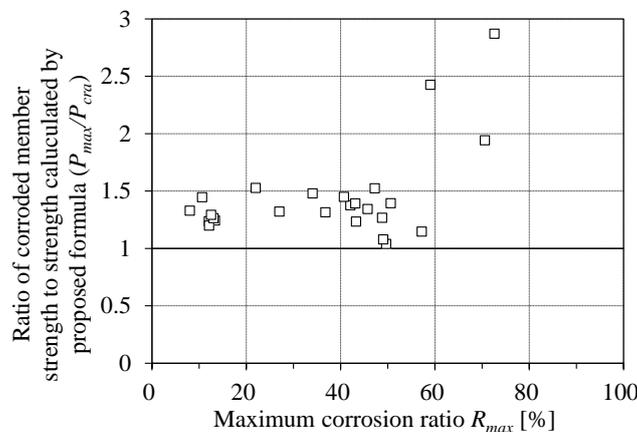


図3 実験値と評価値の耐力比  $P_{max}/P_{cra}$  と最大腐食率  $R_{max}$  との関係

#### 4. 腐食部材の形状再現解析による局部座屈挙動分析と連成座屈耐力評価

3章において、Johnson 放物線式から求めた健全部材の全体座屈応力に、腐食部材の最小断面積を乗ずることで腐食部材の最大耐力を概ね評価できることが分かったが、最大腐食率が40%を超えると局部座屈ならびに局部変形の影響が強くなり、非安全側の評価を与えることも併せて確認された。そこで、腐食部材の表面形状データを反映した再現解析モデルの一部を切り出して、中心軸圧縮試験では把握できなかった局部座屈が卓越する短柱部材の挙動に焦点を当てた解析的検討を試みた。

図4には解析結果から代表的な3ケースについての荷重-変位関係と、最初に剛性が大きく変化した点と最大耐力時での変形性状(倍率10倍)を応力コンターと併せて示す。荷重-変位関係には、全荷重 $P$ を降伏耐力 $P_y (= \sigma_y \times A_{min})$ で除した $P/P_y$ と鉛直変位 $\delta$ を軸降伏変位 $\delta_y (= \sigma_y \times L/E)$ で除した $\delta/\delta_y$ との関係に併せて、最小断面位置における断面を構成する板要素の負担荷重を示している。ここで、 $\sigma_y$ は降伏応力、 $L$ は部材長、 $E$ はヤング係数である。

図4より、腐食した短柱部材の座屈挙動は、比較的腐食率が小さい場合においては最小断面位置において断面降伏後に局部座屈を生じること、腐食率が増加するに従って断面内の一部の板要素が先行して局部座屈が発生するものの、応力の再配分によって最終的に全板要素が最大耐力を発揮することが分かった。そこで、有効幅理論に基づいて、有効断面積の最小値を用いることで最大耐力の評価を試みた。その結果、腐食部材の局部座屈耐力は有効幅理論により推定可能であることが明らかとなった。また、腐食部材の有効断面積の最小値 $A_e^{min}$ は部材軸方向の最小断面位置における有効断面積と強い相関を持ち、最小断面積の位置とその断面の幾何情報が把握できれば、部材軸方向にわたって有効断面を計算せずとも、腐食部材の局部座屈耐力を精度良く評価できることを示した。

以上の知見を踏まえると、3章で提案した座屈耐力式(1)の補正係数 $\phi'$ は、最大腐食率 $R_{max}$ の増加と共に低下する断面積の有効率に他ならず、 $\phi' A_{min}$ は本章で提案した有効断面積 $A_e^{min}$ と同義と理解できる。そこで、 $\phi' A_{min}$ の代わりに $A_e^{min}$ を適用することによって、腐食前部材の細長比パラメータ $\lambda_{n0}$ から得られる全体座屈応力度 $\sigma_{cr0}$ と腐食後部材の幅厚比パラメータから得られる最小有効断面積 $A_e^{min}$ との積からなる全体座屈と局部座屈の連成座屈耐力式 $P_{cr}$ を提案する。

$$P_{cr} = \sigma_{cr0} A_e^{min} \quad (4)$$

$$\sigma_{cr0} = \begin{cases} (1 - 0.24 \lambda_{n0}^2) \sigma_y & \lambda_{n0} < 1.3 \\ \frac{1}{\lambda_{n0}^2} \sigma_y & \lambda_{n0} \geq 1.3 \end{cases} \quad (5)$$

$$\lambda_{n0} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{L_k}{i_0} \quad (6)$$

ここで、 $\sigma_{cr0}$ は細長比パラメータ $\lambda_{n0}$ と降伏応力 $\sigma_y$ をJohnson放物線式に代入して得られる腐食前部材の全体座屈応力、 $A_e^{min}$ は $\sigma_{cr0}$ を用いて次式により算出した幅厚比パラメータ $\lambda_{p0}$

に基づく有効断面積の最小値,  $i_0$ は健全断面の断面二次半径である.

$$\lambda_{p0} = \frac{1}{\pi} \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_{cr0}}{kE}} \quad (7)$$

ここで,  $b$ は板要素の幅,  $t$ は板要素の板厚,  $\nu$ はポアソン比,  $k$ は座屈係数,  $E$ はヤング係数である. 図5に評価式の精度を示すが, 全体座屈と局部座屈が連成する複雑な挙動を示す場合においても概ね妥当な精度で耐力評価が可能であることを明らかにした.

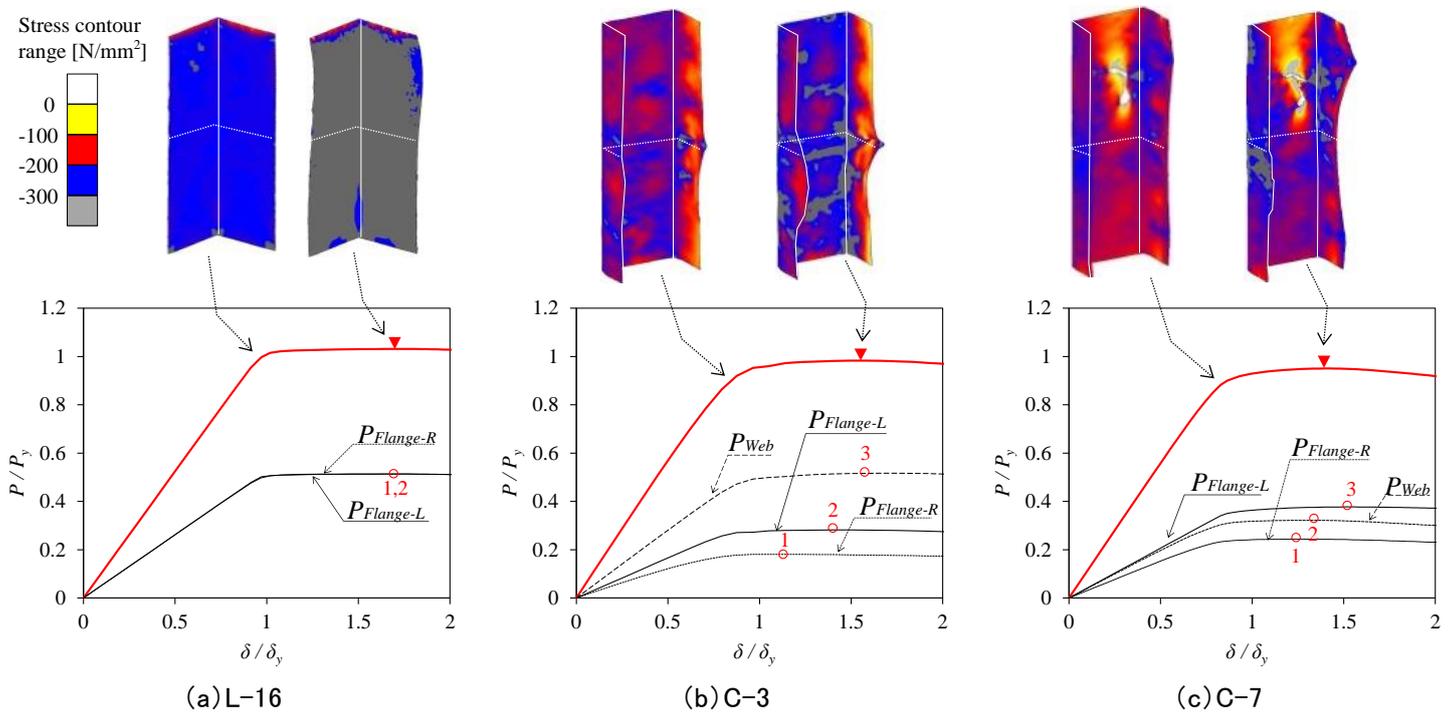


図4 代表的なケースの荷重( $P/P_y$ )と変位( $\delta/\delta_y$ )の関係と変形状況

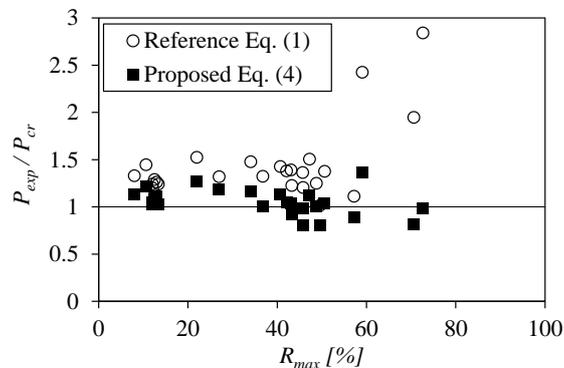


図5 耐力評価式の評価精度

## 5. 腐食分布分析に基づく最小断面積の簡易推定

腐食劣化した鋼構造物の残存性能を評価するためには、腐食による鋼部材の断面積変化を正しく把握し、その部材耐力を評価することが基本となる。腐食した鋼構造物の性能評価に不可欠な鋼部材の最小断面積を簡易に推定する方法を検討した。

自然腐食した溝形鋼と山形鋼の3次元幾何情報をベースとして、部材軸方向の限られた箇所から直接的にサンプリングした断面積情報を基に、正規分布を仮定し、部材軸方向に等間隔で4箇所以上サンプリングした断面積の平均値とその標準偏差を用いた最小断面積の推定基本式を提案した。このとき、平均値から差し引くために標準偏差に乗じる係数を2.3程度とすれば、一定の精度で最小断面積を簡易に推定できることを示した。

一方で、断面積を正確に把握するためには除錆が必要となるが、現場でのケレン作業は相当な労力を要する上、対象物に近接することすら難しい場合も多い。そこで、部材の振動特性変化と腐食減肉量との関係を調査し、遠隔振動計測を利用することによる最小断面積の同定可能性について検討を加えた。実構造物を対象とした振動計測実験と解析を通じた分析により、得られた振動データに補正関数を適用することによって、**図8**に示す減肉に敏感な断面回転モードを抽出できることを確認した。しかしながら、この断面回転モードの振動数と減肉量との間に一定の関係を見出したものの、振動数を評価する位置が推定精度に大きな影響を与えることも分かり、今回検討だけでは遠隔振動計測を利用した最小断面積の同定は難しく、振動計測方法の改善やデータ分析方法の確立が課題として残った。

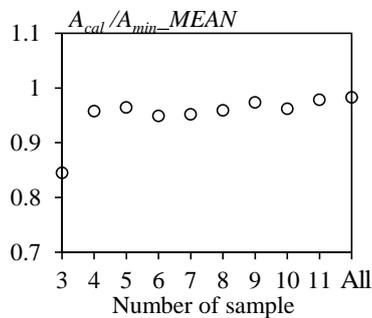


図6 最小断面積の推定精度の平均値

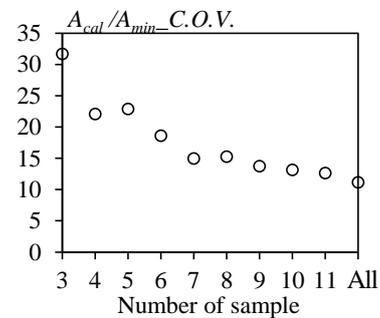


図7 最小断面積の推定精度の変動係数

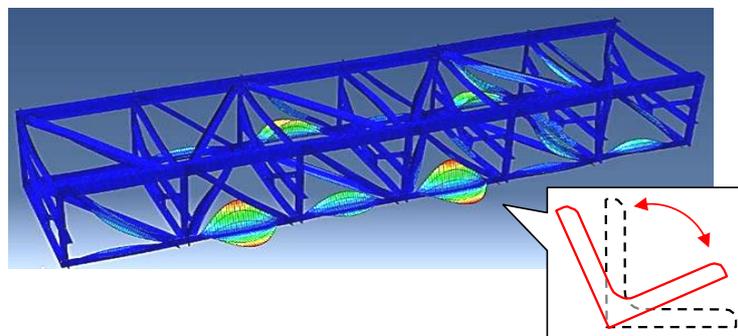


図8 断面回転モード

## 6. 腐食部材の座屈耐力算定フローの提案と耐力評価式の一般性検証

本論文で提案した腐食部材の耐力評価に関する検討内容を整理して、座屈耐力算定フローとして次頁の図9にまとめた。本フローは、部材の最小断面情報のみを把握できれば座屈耐力を評価できるという点で実用的に高い価値を持つものであるが、限られたデータに基づいて提案したものである。特に、腐食領域の大きさやその位置、座屈長さが及ぼす影響についての検討は十分とは言い難く、更なる検証が必要と考えられる。そこで、腐食領域を単純にパターン化した簡易な解析モデルを基本として、中心軸圧縮耐力を評価するためのパラメトリックなFEM解析を実施し、提案した耐力評価式の一般性について検証を加えた。パラメトリック解析の結果、全長腐食ケースの耐力が最小値を示し、部材長と腐食率の増大に伴って部分腐食ケースの耐力が大きくなる。これは、塑性化に支配される部材長が短い場合には腐食の程度の影響が大きく、曲げ剛性に支配される部材長が長い場合には腐食する位置の影響が大きいためであると考えられる。また、各解析変数に対して分析した結果、本論文で提案した耐力評価式は、現実の腐食部材で現れることが極めて稀な全長に渡って均一に腐食し続ける腐食状態を除けば、一定の適用性を持つと考えられる。

## 7. 結論

本研究は、鋼構造物の健全性評価において基本となる部材耐力に焦点を当て、中心軸圧縮力を受ける腐食した溝形鋼および山形鋼の圧縮挙動を実験ならびに数値解析により分析し、耐力評価式を提案した。本評価式は、腐食前部材の全体座屈応力度と有効幅理論に基づく腐食後の最小有効断面積との積によって評価可能であること、またその最小有効断面積は元断面情報と腐食後部材の最小断面積を用いて簡易に推定可能であることを示した。

## 参考論文

- 1) Kazumasa Hisazumi, Ryoichi Kanno, Tomonori Tominaga and Kenichiro Imafuku: AXIAL COMPRESSIVE STRENGTH OF SEVERELY CORRODED CHANNEL AND ANGLE MEMBERS USED IN TRUSS STRUCTURES, The 7th European Conference on Steel and Composite Structures, EUROSTEEL'2014, Naples, Italy, Vol.A, pp.393-398, 2014.9.
- 2) 久積和正, 菅野良一, 富永知徳, 今福健一郎, 藤井堅: 自然腐食した溝形鋼および山形鋼の中心軸圧縮挙動とその強度評価, 鋼構造論文集, 第23巻, 第91号, pp.1-15, 2016.9.
- 3) 久積和正, 菅野良一, 富永知徳: 腐食した形鋼の局部座屈挙動と耐力評価, 鋼構造論文集, 第25巻, 第99号, pp.67-76, 2018.9.
- 4) 久積和正, 菅野良一, 富永知徳: 腐食鋼部材の最小断面積の簡易推定, 鋼構造年次論文報告集, 第26巻, pp.744-750, 2018.11.
- 5) Kazumasa Hisazumi, Ryoichi Kanno and Tomonori Tominaga: LOCAL BUCKLING STRENGTH OF CORRODED ANGLE AND CHANNEL STEEL SHAPES AND ITS EVALUATION USING EFFECTIVE WIDTH THEORY, The Ninth International Conference on Advances in Steel Structures, ICASS2018, Hong Kong, China, 2018.12.

本論文で提案する腐食部材の座屈耐力算定フローを以下に示す。数式番号は、学位論文の本文内に記した各章の数式番号に一致する。

対象部材の設計情報を基に、腐食前部材の全体座屈応力  $\sigma_{cr0}$  を算出する。

$$\sigma_{cr0} = \begin{cases} (1 - 0.24 \lambda_{n0}^2) \sigma_y & \lambda_{n0} < 1.3 \\ \frac{1}{\lambda_{n0}^2} \sigma_y & \lambda_{n0} \geq 1.3 \end{cases} \quad (4.15)$$

$$\lambda_{n0} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{L_k}{i_0} \quad (4.16)$$

$\lambda_{n0}$ : 腐食前部材の細長比パラメータ,  $\sigma_y$ : 降伏応力 (N/mm<sup>2</sup>),  $E$ : ヤング係数 (= 205,000 N/mm<sup>2</sup>),  $L_k$ : 有効座屈長さ (mm),  $i_0$ : 腐食前部材の断面二次半径 (mm)

↓

対象部材の断面積  $A_i$  を部材軸方向に等分割した位置で 4 箇所以上計測し、最小断面積  $A_{min}$  を推定する。

$$A_{min} = \bar{x} - 2.3 \cdot s \quad (5.1)$$

$$\bar{x} = \Sigma A_i / n \quad (5.2)$$

$$s = \frac{\sqrt{\Sigma (A_i - \bar{x})^2}}{n - 1} \quad (5.3)$$

$\bar{x}$ : 測定断面積の平均値 (mm<sup>2</sup>),  $s$ : 測定断面積の標準偏差 (mm<sup>2</sup>),  $n$ : 測定断面数 ( $n \geq 4$ )

↓

腐食前の最大幅厚比パラメータ  $\lambda_{p0}$  から腐食後の最大幅厚比パラメータ  $\lambda_{pc}$  を求め、対象部材の最小断面位置での有効断面積  $A_e @ A_{min}$  を推定する。

$$A_e @ A_{min} = \left\{ \frac{1 - 0.22 / \lambda_{pc}}{\lambda_{pc}} \right\}^{0.4} A_{min} \quad (4.26)$$

$$\lambda_{pc} = 0.8 \left( \frac{A_0}{A_{min}} \right)^{1.8} \lambda_{p0} \quad (4.27)$$

$$\lambda_{p0} = \frac{1}{\pi} \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1 - \nu^2) \sigma_{cr0}}{kE}} \quad (4.17)$$

$\lambda_{p0}$ : 腐食前部材の断面を構成する複数の板要素の幅厚比パラメータのうち最大値,  
 $b$ : 板要素の幅 (mm),  $t$ : 板要素の板厚 (mm),  $\nu$ : ポアソン比 (= 0.3),  $k$ : 座屈係数

↓

対象部材の有効断面積の最小値  $A_e^{min}$  を  $A_e @ A_{min}$  として、腐食部材の座屈耐力  $P_{cr}$  を次式で算定する。

$$P_{cr} = \sigma_{cr0} A_e^{min} \quad (4.14)$$

$\sigma_{cr0}$ : 腐食前部材の全体座屈応力 (N/mm<sup>2</sup>),  $A_e^{min} = A_e @ A_{min}$  (mm<sup>2</sup>)

図 9 腐食部材の座屈耐力算定フロー