

中心軸圧縮力を受ける腐食減肉した形鋼部材の座屈耐力評価

日本製鉄(株) 正会員 ○久積 和正 菅野 良一 富永 知徳

1. 背景と目的

鋼構造物の構造性能を低下させる損傷原因の一つとして腐食が挙げられる。近年、構造物の腐食劣化に伴う事故や損傷事例が多く報告されており、構造物の適切な維持管理のためにはその健全性を定量的に把握することが重要な課題となっている。しかしながら、産業用鋼構造物に多用される溝形鋼や山形鋼が腐食減肉した場合の部材性能に関する研究例は少なく、鋼構造物の健全性評価に向けた知見は十分ではない。このような背景の下、筆者らは、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と FEM 解析を通じて、全体座屈耐力式や局部座屈耐力式を提案したが、実際の腐食部材は全体座屈や局部座屈が複雑に連成した座屈挙動を生じることが多い。そこで本論文では、これまでの知見を踏まえ、全体座屈と局部座屈の連成座屈耐力式を提案すると共に、その適用性を検証する。

2. 腐食した形鋼部材の連成座屈耐力式の提案

筆者らは既報^[1]において、腐食部材の全体座屈に着目した耐力 P_{cr} を、Johnson 放物線式を基本とした評価式(1)として提案した。

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

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

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

$$\sigma_{cr0} = \begin{cases} (1 - 0.24 \lambda_n^2) \sigma_y & \lambda_n < 1.3 \\ \frac{1}{\lambda_n^2} \sigma_y & \lambda_n \geq 1.3 \end{cases} \quad (4)$$

$$\lambda_n = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{L_k}{i} \quad (5)$$

ここで、 φ' は補正係数、 R_{max} は最大腐食率、 A_0 は腐食前の断面積、 A_{min} は腐食後の最小断面積、 σ_{cr0} は腐食前の座屈応力度、 σ_y は降伏応力度、 E はヤング係数、 λ_n は細長比パラメータ、 L_k は有効座屈長、 i は腐食前の断面二次半径である。 φ' は腐食の増加と共に顕著化する局部座屈や局部変形の影響を反映したものであるが、最大腐食率 40%以上

では式(1)の精度が低下した。そこで、腐食部材の局部座屈に関する力学挙動を改めて分析し、有効幅理論に基づく有効断面積を用いた局部座屈耐力式(6)を提案した。

$$P_e = \sigma_y A_e^{min} \quad (6)$$

$$A_e^{min} = \min(A_e^1, A_e^2, A_e^3, \dots, A_e^n) \quad (7)$$

$$A_e = \sum \rho A \quad (8)$$

$$A = b t_{ave} \quad (9)$$

$$\rho = \begin{cases} 1 & \lambda_p < 0.673 \\ \frac{1 - 0.22 / \lambda_p}{\lambda_p} & \lambda_p \geq 0.673 \end{cases} \quad (10)$$

$$\lambda_p = \frac{1}{\pi} \frac{b}{t_{ave}} \sqrt{\frac{12(1 - \nu^2)\sigma_y}{kE}} \quad (11)$$

ここで、 P_e は有効断面耐力、 A_e は部材軸方向で変化する各断面内における板要素毎の有効断面積の合計値、 A_e^{min} は有効断面積の最小値、 A は断面内の各板要素の断面積、 b は板要素の幅、 t_{ave} は板要素の平均板厚、 ρ は有効断面率、 λ_p は腐食後の幅厚比パラメータ、 k は座屈係数である。局部座屈が支配的となる腐食した短柱部材の挙動を解析的に検討した結果、その最大耐力は有効断面積を用いた式(6)によって精度良く評価できることが分かった。一方、式(1)の補正係数 φ' 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、式(1)の $\varphi' A_{min}$ は式(6)の A_e^{min} と同義と理解できる。そこで、腐食前の λ_n から得られる全体座屈応力度 σ_{cr0} と腐食後の λ_p から得られる最小有効断面積 A_e^{min} との積からなる連成座屈耐力式(12)を提案する。

$$P_{cr} = \sigma_{cr0} A_e^{min} \quad (12)$$

ここで、全体座屈と局部座屈の連成座屈では板要素の端部が σ_y に到達しないため、式(11)での A_e^{min} は AISI 基準を参考に、 σ_y に代えて σ_{cr0} を適用している。図 1 に、腐食部材の実験値 P_{exp} の評価精度を示す。図中の○印は耐力式(1)の結果であり、 φ' によって全般的に安全側評価となり、特に腐食の程度が大きい領域では過度に安全側になっている。一方、■印は評価式(12)である。式(12)は断面減少と局部座屈の両方の影響を直接考慮しているため、腐食の程度によらず概ね一様な精度を与えており、 P_{exp}/P_{cr} の平均値は 1.06、変動係数は 12.2 %であった。

キーワード: 腐食, 鋼部材, 連成座屈, 細長比, 有効断面積

連絡先: 〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1 日本製鉄(株)

TEL.: 080-4602-1349 FAX: 0439-80-2745

3. パラメトリック解析による耐力評価式の適用性検討

提案した耐力評価式(12)は限られたデータに基づくものであり、実験や解析で確認できなかった腐食領域や座屈長さが部材耐力の評価に及ぼす影響については更なる検討が必要である。ここでは、腐食領域を単純にパターン化したモデルを用いて中心軸圧縮耐力を評価するためのパラメトリック解析を実施し、耐力評価式の適用性を検討する。

3.1 解析モデルの概要と解析ケース

本解析では、実験条件に合わせて、両端固定支持の下、中心軸圧縮状態で弾塑性大変形解析(MARC2014)を行った。解析モデルには、全体座屈と局部座屈の連成を評価できるように、部材の製作精度を参考に、柱全体としては部材長 L の $1/1000$ 、板要素としては板幅 b の $1/200$ とする正弦波の両方を初期たわみとして導入し、シェル要素でモデル化した。また、降伏応力度を 235N/mm^2 とし、応力-ひずみ関係は初期勾配をヤング係数 $E(=205000\text{N/mm}^2)$ 、降伏後の二次勾配を $E/100$ とした弾塑性モデルを仮定し、残留応力は考慮していない。この条件において以下の4つの解析変数について全96ケースの解析を行った。

- (a) 断面形状: 溝形鋼(125-65-6-8)および山形鋼(75-9)
- (b) 部材長 L : 一般的なトラス架構の格点間距離を参考に、1000mm, 2000mm, 4000mm ($\lambda_n=0.28\sim1.49$)とした。
- (c) 腐食領域: 部材軸方向に全長に渡って腐食したケース、部材の中央部あるいは端部が部分腐食しているケースを考慮した。腐食長さは部材長 L の $L/2$ と $L/5$ の2パターンを考え、図2に示す5つの解析ケースを設定した。
- (d) 腐食率 R : 断面が表裏から均一に60%, 40%, 20%減肉

3.2 解析結果の考察と耐力評価式の適用性

図3は、横軸に図2の解析ケースを、縦軸に全長腐食Case1の最大耐力で各ケースの最大耐力を基準化した値を取り、部材長と腐食率を溝形鋼について示したものである。図3より、全長腐食Case1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、部材長が短い場合は塑性化に支配されるため腐食率の影響が大きく、部材長が長い場合は曲げ剛性に支配されるため腐食位置の影響が大きくなると考えられる。

図4には、細長比パラメータ λ_n と解析値/推定値 (P_{cal}/P_{cr}) の関係をプロットし、Case1を代表例として耐力評価式の適用性を示す。図4より、腐食部材の耐力評価式は $\lambda_n \leq 1$ かつ $R \leq 40\%$ の領域において $P_{cal}/P_{cr} = 0.95 \sim 1.15$ と精度良く評価できており、腐食部材の耐力評価の必要性が想定される実用上重要な範囲に対して一定の適用性を持つといえる。

4. まとめ

- (1) 腐食前の細長比パラメータから得られる全体座屈応力度と腐食後の幅厚比パラメータから得られる最小有効断面積に基づく耐力式によって、全体座屈と局部座屈とが連成する場合の耐力を概ね妥当な精度で評価できる。
- (2) 腐食領域を単純にパターン化したモデルによるパラメトリック解析を実施し、提案した耐力評価式が実用上重要な範囲に対して一定の適用性を持つことが検証された。

参考文献

- [1] 久積, 菅野, 富永: 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.

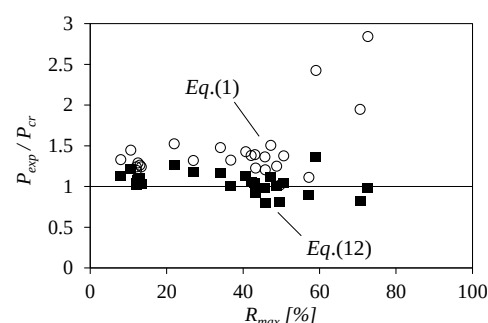


図1 耐力評価式の評価精度

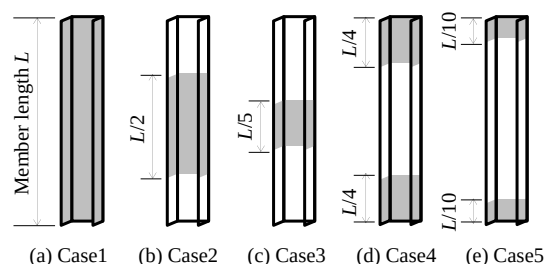


図2 解析ケースの基準モデル(■部が腐食領域)

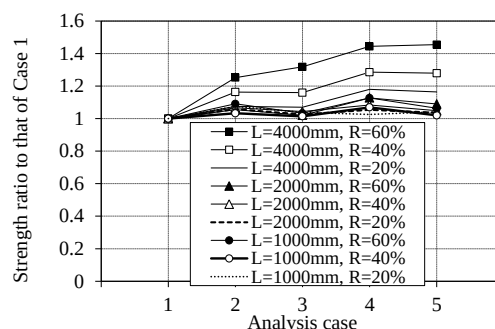


図3 全長腐食 Case1 に対する耐力比(溝形鋼)

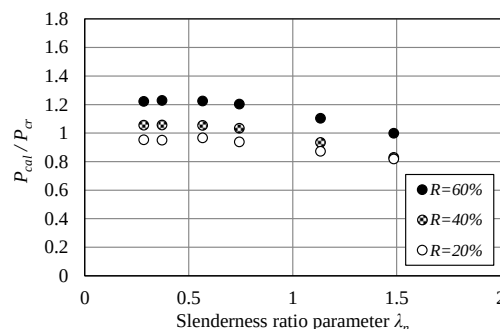


図4 耐力評価式の適用性(Case1)