腐食減厚した柱部材の耐荷力評価に関する一考察

協和コンサルタンツ　正　員　小栗 友紀
東京都立大学　正　員　野上 邦栄
東京都立大学　正　員　山沢 哲也

1. 背景と目的

近年，社会基盤の成熟化につれて，維持管理システムが注目されてきている．橋梁を例に挙げると，これから 15〜20 年後には，供用期間が 50 年を超える老朽橋の数が急激に増加する [1)]．その際，構造物およびその構成部材のもつ残存耐力を適切に評価することは，維持補修および架替えを検討する上で極めて重要となる．

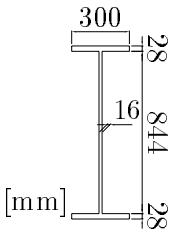
本研究では，鋼構造物の代表的な劣化である腐食に着目し，既設鋼構造物の構成部材である柱部材を対象とした．それらの部材に腐食が生じたときの耐荷性能，耐荷力を把握することにより，耐力の低下に影響を及ぼすパラメータ因子を解析的に明らかにする．また，耐荷力評価式の提案に向けた検討を行う．

2. 解析方法

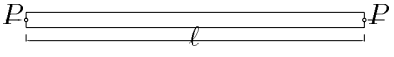
解析モデルは，図–1 の I 形断面を有する図–2 に示す部材長 $\ell = 20m$ の柱部材であり, 荷重 P を両端に載荷した．境界条件は両端単純支持とした．また，面外方向の変位は拘束し，弱軸方向の座屈及び横倒れ座屈を考慮しない面内挙動を取り扱う．さらに，初期たわみは部材中央部で最大たわみ $v_0 = \ell/1000$ を持つ半波形状を，残留応力は図–3 の分布形状を考慮した．

腐食は，下フランジに図–4 のような①全面均一腐食 (co00)，②全面不均一 (va43,va85)，③中央部局部腐食 (lc11)，④縁端部局部腐食 (le12)，⑤1/4 点局部腐食 (lq21) を想定した．また，局部的な腐食として図–5 のように孔径 ϕ の孔食を持つ孔食モデルについて解析を行う．これらの腐食形状において体積欠損率 α 及び孔径 ϕ を変化させた．α は平均的な腐食の進行を表す体積欠損率であり式 (1) で定義される．式中，V_0^{lf} は基本モデルの下フランジの体積，V^{lf} は腐食モデルの下フランジの体積である．一方，局部的な腐食の進行を表す最大断面欠損率 β_{max} を基本モデルの下フランジの断面積 A_0^{lf}，下フランジの最小断面積 A_{min}^{lf} を用い式 (2) で定義した．また，β_max を全断面積 A_0 で表したものが式 (3) である．

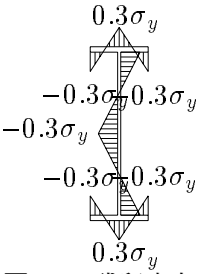
数値計算には，汎用有限要素法解析ソフトウェア MARC K7.3 を使用した．数値解析は弧長増分法を用い，鋼部材の降伏条件は von Mises，硬化則は等方硬化，ひずみ硬化係数は 1/100 とした．また，腐食形態を的確に表現するために 8 節点ソリッド要素を用いた．要素分割は 1 正弦波形に対し，5 点以上の節点を持つように十分な数を取った．



図– 1 断面諸元



図– 2 柱モデル

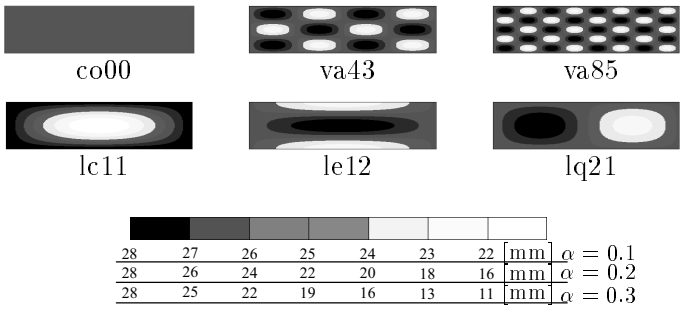


図– 3 残留応力分布

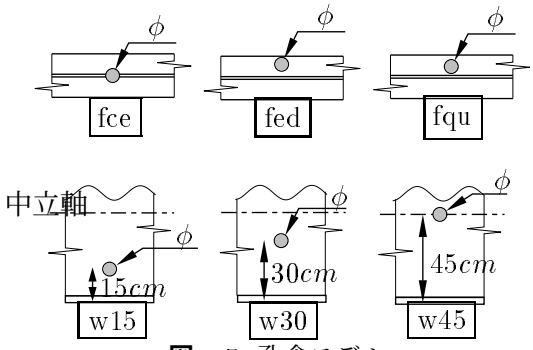
$$\alpha = (V_0^{lf} - V_0^{lf})/V_0^{lf} \quad (1)$$

$$\beta_{max} = (A_0^{lf} - A_{min}^{lf})/A_0^{lf} \quad (2)$$

$$\gamma_{max} = (A_0 - A_{min})/A_0 \quad (3)$$



図– 4 腐食モデルの下フランジ板厚分布

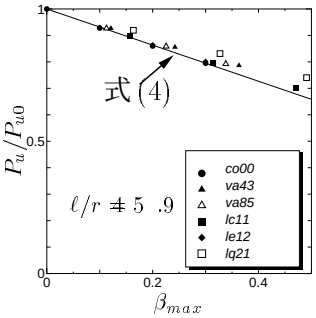


図– 5 孔食モデル

キーワード: 腐食, 耐荷力, 弾塑性有限変位解析，柱部材
連絡先: 〒 192-0397 東京都八王子市南大沢 1–1　TEL. (0426)77–1111　FAX. (0426)77–2772

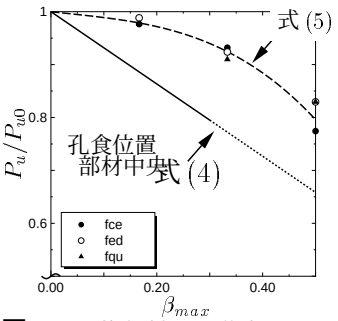
3. 解析結果

図–4 の腐食形状において，腐食量と耐荷力の関係をまとめたのが図–6 である．横軸は最大断面欠損率 β_{max}，縦軸は腐食した柱部材の耐荷力 P_u を基本モデルの耐荷力 P_{u0} で無次元化した P_u/P_{u0} を意味する．腐食量 β_{max} と耐荷力はすべての腐食形状で線形関係を保っており，腐食量が増加するほど耐力は低下する．また，平均的な腐食量を示す体積欠損率 α よりも最大断面欠損率 β_{max} の方が耐荷力と強い相関関係になる [3]．このとき，腐食した柱の耐荷力は基本モデルの耐荷力 P_{u0} と腐食量 β_{max} を用いて，式 (4) の線形式で与えられる．

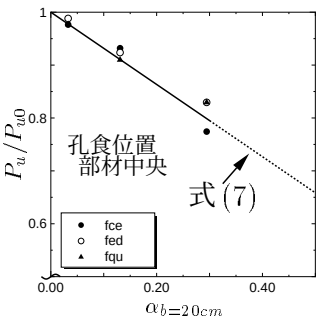


図– 6 柱部材の耐荷力-β_{max} 関係

一方，極めて局部的な腐食形状として図–5 の孔食モデルにおいて孔径 ϕ を 5，10，15cm に変化させた．下フランジに孔食を想定した fce，fed，fqu モデルの耐荷力 P_u と腐食量 β_{max} との関係を図–7 に示した．ここで，部材軸方向の孔食位置は部材中央とした．孔食を有する柱の耐荷力は，最大断面欠損率 β_{max}(孔径 ϕ) が増えるにつれて非線形的に耐力が低下し，式 (5) の近似曲線で与えられる．この耐力低下の非線形性の原因は，孔径 ϕ が増大することによって最大断面欠損率 β_{max} が増加するだけではなく，腐食領域も増加するからである．また，孔食を有する柱の耐荷力は，式 (4) で得られた耐力評価式よりも大きな値を示している．この原因も図–4 の腐食形状に対して図–5 の孔食モデルは狭い領域にしか腐食が存在しないからである．従って，耐力の低下には最小断面積のみではなく，腐食の拡がりも大きく影響する．ここで，腐食量パラメータ α_b を式 (6) で定義した．式中，$A^{lf}(x)$ は腐食モデルの部材軸位置 x での断面積，b_f はフランジ幅を意味する．α_b は，部材中央部 $(x = \ell/2)$ から $\pm b/2$ の領域の体積減少量によって与えられる．図–8 はその α_b を用い図–7 をまとめ直したものである．b を変化させた結果，孔食モデルは式 (4) の β_{max} を $\alpha_{b=20cm}$ に置き換えた式 (7) と同等の耐力低下となる．

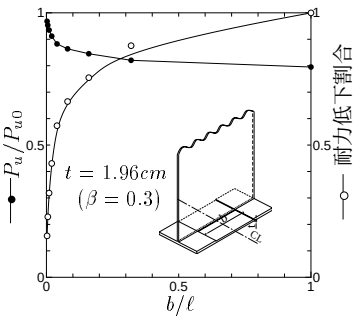


図– 7 柱部材の耐荷力-β_{max} 関係



図– 8 柱部材の耐荷力-α_b 関係

また，図–9 は，部材中央部の板厚を 3 割減らしたモデルにおいて部材中央部から部材両端部へ腐食領域を増加した際，耐荷力と腐食の拡がりとの関係をまとめたものである．横軸は腐食の拡がり b を部材長 ℓ で無次元化した b/ℓ，左の縦軸は耐荷力 P_u/P_u0，右の縦軸は耐力低下割合であり，$(P_u0 - P_u)/(P_u0 - P_{u(b=\ell)})$ により算出している．本解析モデルにおいて最も応力の卓越する部材中央部から腐食領域 b を増加すると，$b/\ell = 0.16$ 程度まで耐力は急激に減少する．さらに腐食領域 b を増加すると緩やかではあるが耐力は低下し続ける．図–8 において腐食領域は $b \fallingdotseq 2\ cm(b/\ell = 0.01)$ を考えれば十分であったが，腐食領域大きい場合 $b \fallingdotseq 2\ cm$ では十分とはいえない．図–9 では $b/\ell = 0.16$ の腐食領域によって耐力低下割合は 76%程度あることから，腐食領域が大きい場合でも $b/\ell = 0.16$ の腐食領域を測定することによって耐力の推定が可能である．



図– 9 中央部均一腐食

$$P_u/P_{u0} = 1 - 0.683\ \beta_{max} \tag{4}$$

$$P_u/P_{u0} = -1.48\beta_{max}^3 + 0.15\beta_{max}^2 - 0.10\beta_{max} + 1 \tag{5}$$

$$\alpha_b = \left(A_0^{lf} \cdot b - \int_{\ell/2-b/2}^{\ell/2+b/2} A^{lf}(x)dx \right) / \left(A_0^{lf} \cdot b \right) \tag{6}$$

$$P_u/P_{u0} = 1 - 0.683\ \alpha_{b=20cm} \tag{7}$$

4. 結論

孔食のような局部的な腐食形状の場合，応力の卓越する断面から $b/\ell = 0.01$ の領域で耐力を評価できる．また，拡がりを有する腐食の場合，応力の卓越する断面から $b/\ell = 0.16$ の領域で耐力を評価できる．

参考文献

1) 西川和廣：道路橋示方書照査規定化とこれからの橋－耐久性・維持管理関連規定を中心として－, 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集,1999.
2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, I 共通編, II 鋼橋編, 1996.
3) 野上邦栄・山沢哲也・小栗友紀・加藤美幸：腐食減厚に伴う合成 I 桁及び I 断面柱の残存耐力評価に関する一考察, 構造工学論文集，Vol.47A，pp.93-102，2001.