

神戸大学理学部数学科	学生員	○上杉直寛
高知工業高等専門学校	正会員	勇 秀憲
愛媛大学大学院	正会員	海田辰将
広島大学大学院	正会員	藤井 堅

1. はじめに

近年、鋼橋梁の維持管理に対して鋼材の腐食による影響は深刻な問題となっている。こうした問題の中でいくつかの腐食した鋼材の耐荷力評価する研究がなされてきた。その一つとして、地域社会学で用いられてきた空間的自己相関 (SAC¹⁾) を用いて腐食表面の凹凸をモデル化する方法が提案された。本研究もその一環として、腐食した鋼正方形板の圧縮耐荷力をいくつかの腐食パラメータによって評価し、さらにこの腐食パラメータを初期不整と見なした耐荷力の敏感性曲線を提案する。

2. 解析条件

2. 1 解析手法

正方形鋼板モデル(0.400m×0.400m)に対してSACによって初期板厚 t_0 から平均板厚 t_{ave} となるような同程度の両面腐食を生じさせる。材料特性として、降伏応力 $\sigma_y = 235.2\text{MPa}$, ヤング率 $E=205.8\text{GPa}$, ポアソン比 $\nu=0.3$ とし、完全弾塑性体, von-Mises の相当応力, Plandtl-Reuss の流れ則, 等方硬化を仮定する。鋼板要素の弾塑性大変形挙動の解析は、汎用 FEM 解析ソフト MSC.Marc を用い、境界条件として周辺単純支持を仮定した上で、面内変位による一様圧縮から載荷辺の反力を求め耐荷力を算定する。

2. 2 空間的自己相関(SAC)による腐食面の生成と腐食パラメータ

空間的自己相関による腐食面の生成は、ポアソン乱数を用いた独立腐食深に対し距離減衰を施し、空間的に互いの腐食深を影響させることで各点の腐食深が決定される。本研究では独立腐食深間隔を 5mm とし、距離減衰に関するパラメータ β は既往の実験¹⁾から $0.4[\text{mm}]$ とした。

ここで、両面腐食板モデルの腐食前の初期板厚 t_0 、腐食後の平均板厚 t_{ave} 、および材料特性値を用いて、幅厚比パラメータ R_{ave} 、および腐食板厚比 r_c 次のように定義する。

$$R_{ave} = \frac{b}{t_{ave}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}}, r_c = \frac{t_0 - t_{ave}}{t_0} \quad (1)$$

ここで、幅厚 $b=0.400[\text{m}]$ および座屈係数 $k=4$ である。本研究においては、これらのパラメータと耐荷力の関係を見いだすため、あらかじめ R_{ave} および r_c を決定したのちそれに一意的に対応する平均板厚 t_{ave} と初期板厚 t_0 を求める。この時、ポアソン乱数の平均値 m に対して腐食後の平均板厚 t_{ave} は一様乱数が先に選ばれた上では単調減少の関係がある。そのため、 t_{ave} は縮小閉区間法により求められる。本研究では、 $R_{ave}=0.8, 1.0, 1.1, 1.3, 1.5$ および $r_c=0, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5$ の組合せに対して耐荷力を求める。

2. 3 耐荷力の算定

有限要素解析による耐荷力 σ_u の算定は、図1に示す荷重-面内変位曲線および荷重-面外たわみ曲線を求め、その最大値として得ることができる。この時、およそ1/3の割合で、腐食板モデルに対して高次座屈モードが終局強度付近まで影響し、耐荷力が3～5%高くなるものが現れた。これらは設計・補修に対し安全側の結果であるため、本研究では、1次座屈モードのみを対象とした。

その結果、腐食板の弾塑性挙動および圧縮耐荷力は、弾性座屈、弾塑性座屈、塑性座屈に対応する式(1)の幅厚比パラメータ R_{ave} によってほぼ決定された。これは、塑性座屈を呈する鋼板であっても、腐食後に弾塑性あるいは弾性座屈を起こす可能性があることを示している。

3. 解析結果と考察

3. 1 耐力力曲線および感敏性曲線

耐力力を各 r_c に対して R_{ave} と関係づけると図2の耐力力曲線が得られる。ここで、 $r_c=0$ に対しては腐食前の完全板の耐力力を与えている。また、各 R_{ave} に対する耐力力を r_c に対する感敏性曲線としてまとめたものが図3である。 r_c に対する耐力力の低下は、 r_c を初期不整パラメータとして見なし得ることを示す。腐食板厚比 r_c は特に弾塑性域 ($R_{ave}=1.0\sim 1.3$) において耐力力に対して鋭敏に影響することがわかる。また、弾塑性域における初期たわみの感敏性曲線は、上に凸 (2/3 乗則や 1/2 乗則) であるのに対し、本研究で提案する r_c に対する感敏性曲線は $R_{ave}=1.1$ の弾塑性域では上に凸、塑性域および弾性域では下に凸 (2 乗則) で近似された。これは、弾性域および塑性域においては微小な腐食に対しては急激な耐力力低下の危険性小さく、弾塑性域においては微小な腐食に対しても耐力力は低下するということが分かった。

3. 2 腐食パラメータ

既往の研究¹⁾では耐力力は腐食後の平均板厚と板厚の標準偏差を用いて評価できるとされてきた。ここで、式(1)の腐食板厚比 r_c 、幅厚比パラメータ R_{ave} と腐食後の板厚の標準偏差 t_{stdev} [m] には図4に示すように強い相関が見られたため、回帰解析により非常によい近似式 (相関係数 $r=0.9996$) を導くことができた。

$$t_{stdev} = (0.0024/R_{ave} + 0.001) \cdot r_c \quad (2)$$

すなわち、耐力力を腐食後の平均板厚 t_{ave} と板厚の標準偏差 t_{stdev} で評価することは、平均板厚によって支配される幅厚比パラメータ R_{ave} と腐食板厚比 r_c によって評価することと本質的に同義であり、既往の実験結果に帰着することができた。さらに与えられた材料特性や板幅 b に対して、 R_{ave} と r_c は、腐食前の完全板の板厚 t_0 と腐食後の平均板厚 t_{ave} に対して一意的に対応することから、耐力力は腐食前の板厚 t_0 と腐食後の板厚 t_{ave} によって評価できる。

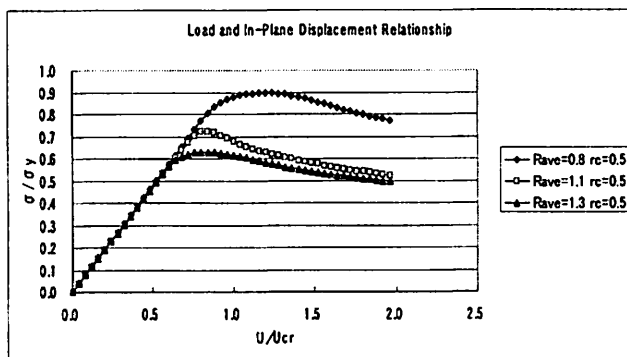


図1 荷重一面内変位曲線例

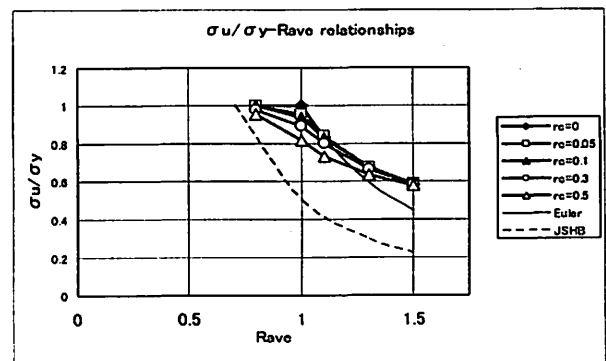


図2 耐力力曲線²⁾

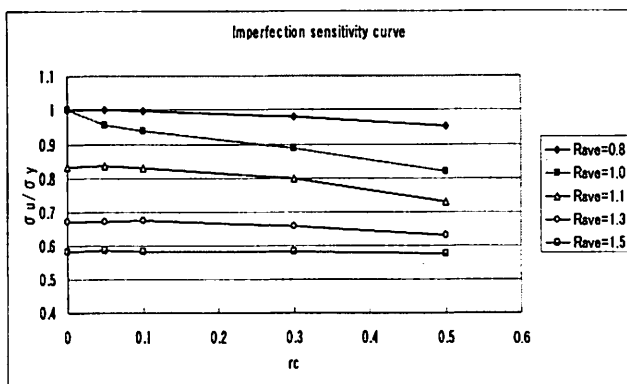


図3 初期不整の感敏性曲線

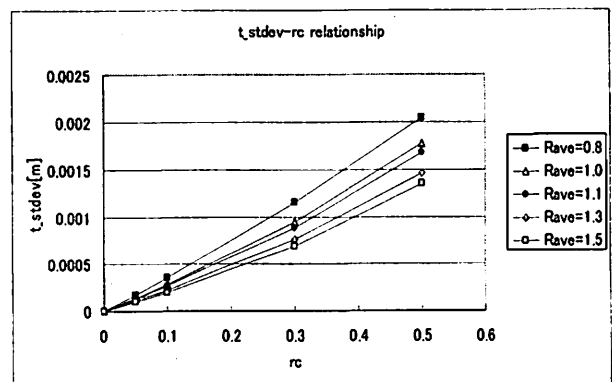


図4 板厚標準偏差一腐食板厚比関係