

第 部門 鋼構造物の腐食による体積欠損履歴を考慮した有限要素解析法について

大阪大学大学院工学研究科 学生員 玉川 新悟
 大阪大学大学院工学研究科 正会員 三好 崇夫
 大阪大学大学院工学研究科 正会員 奈良 敬

1. はじめに

今後、既設橋梁の補修・補強や架け替えなどは、我が国の社会的資本の減少に伴い、安易に進めることが困難になると予想されるため、腐食損傷の生じた鋼橋の残存耐荷力を正確に評価し、補修・補強、架け替えの要否の判断が重要になると考える。しかし、腐食による体積欠損が生じた鋼部材の残存耐荷力を評価する場合、現場計測のみで正確に評価することは困難であり、板厚などの現場計測結果に基づいて解析的な手法を用いた評価が必要であると考えられる。既往の研究においても、同様の観点から、腐食損傷を有する鋼構造物の残存耐荷力は、解析的手法による評価が試みられているものの、その殆どは腐食後の幾何学形状を初期状態とする耐荷力解析で評価しているため、死荷重下で徐々に体積欠損が進行するという実際の腐食現象を模擬しておらず、体積欠損に伴う残留応力の再分配や、構造物の変形履歴は無視されている。このため、後藤ら^{1),2)}は、体積欠損履歴を考慮した解析手法をはり要素とソリッド要素を用いて考案し、実験を通してその妥当性を検証している。しかし、ソリッド要素を用いて薄板のモデル化するには、板厚方向に多くの要素分割が必要となるため、必ずしも計算効率が良いとはいえない。そこで本研究は、8 節点アイソパラメトリックシェル要素を用いて、腐食損傷を有する既存鋼構造物の残存耐荷力を精度よく予測できる有限要素解析法の開発することを目的とする。本文では、この解析法の概要とその妥当性を検証した結果について報告する。

2. 体積欠損履歴を考慮した解析法

以下に更新 Lagrange 法に基づいて、体積欠損履歴を考慮した有限要素解析法の定式化を説明する。定式化にあたっては、諸量を記述するのに参照する擬似的な時刻を左下符号、その諸量を生ずる時刻を左肩符号に示すこととし、左下符号のみが付される諸量は増分、および参照する時刻とその量を生ずる時刻が同一の諸量は左肩符号のみを付して示す。

いま、既知のつり合い状態を時刻 t 、また時刻 t から部材の体積が変化することによる新たなつり合い状態を時刻 $t + \Delta t$ とする。時刻 t における体積増分を Δv 、表面積増分を Δs としたとき、時刻 t を基準とする時刻 $t + \Delta t$ における仮想仕事の原理式は次式で与えられる。

$$\int_{v+\Delta v} {}^{t+\Delta t} S : \delta {}^{t+\Delta t} E dv = \int_{s+\Delta s} {}^t t \cdot \delta u ds + \int_{v+\Delta v} {}^t \rho^t g \cdot \delta u dv \quad (1)$$

ここに、 S は第 2 Piola-Kirchhoff 応力テンソル、 E は Green-Lagrange ひずみテンソル、 t は表面力ベクトル、 ρg は物体力ベクトル、また δu は仮想変位を表す。

次に、Green-Lagrange ひずみテンソルの線形項を E_L 、非線形項を E_{NL} とし、Cauchy 応力テンソルを T とすると次式が成り立つ。

$$\delta {}^{t+\Delta t} E = \delta {}^t E_L + \delta {}^t E_{NL} \quad (2) \quad {}^{t+\Delta t} S = {}^t S + {}^t S = {}^t T + {}^t S \quad (3)$$

式(2)と(3)を式(1)に代入し、 u に関する 2 次以上の項を省略し整理すると次式を得る。

$$\int_{v+\Delta v} {}^t T : \delta {}^t E_{NL} + {}^t S : \delta {}^t E_L dv = \int_{s+\Delta s} {}^t t \cdot \delta u ds + \int_{v+\Delta v} {}^t \rho^t g \cdot \delta u dv - \int_{v+\Delta v} {}^t T : \delta {}^t E_L dv \quad (4)$$

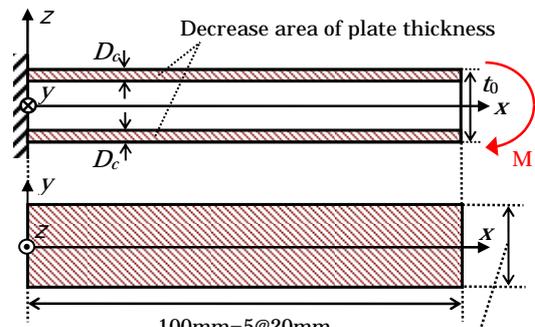
式(4)が体積欠損履歴を考慮した非線形方程式であり、これを離散化することにより誘導した剛性方程式を解くことで、体積欠損が生じた場合の変形を随時計算することが可能となる。

3. 数値計算例と妥当性の検証

考案した解析法の妥当性を検証するため、微小変形理論およびソリッド要素を用いた解体計算コードによる解析結果と比較した。

3.1 等曲げを受ける片持ちはりの全断面欠損解析

Fig.1のような片持ちはり先端の集中モーメント M を一定に保った状態で、板の表裏面から上下対称に板厚減少させる弾性有限変位解析を行った。結果として、荷重と先端のたわみ角の関係を Fig.2、体積欠損率とたわみ角の関係を Fig.3 に示す。なお、これらの図中には、本解析結果 (FEA-1) の他、無載荷状態で体積欠損後、載荷した解析結果 (FEA-2) と両者における微小変形理論解 (Theoretical) も比較して示すが、FEA-2 と理論解は一致しており幾何学的非線形の影響は小さいことがわかる。また、FEA-1 は理論解と良好に一致し、FEA-1 と FEA-2 も最終状態では変形が一致するため、この例題では体積欠損履歴の影響は小さいと考える。



弾性係数 $E=200GPa$, ポアソン比 $\nu=0.0$
 降伏応力 $\sigma_Y=1.0 \times 10^{10}$, 初期板厚 $t_0=2mm$
 集中モーメント $M=10N \cdot mm$, 体積欠損率 $\beta = \frac{2D_c}{t_0}$

Fig.1 等曲げを受ける片持ちはりの解析モデル

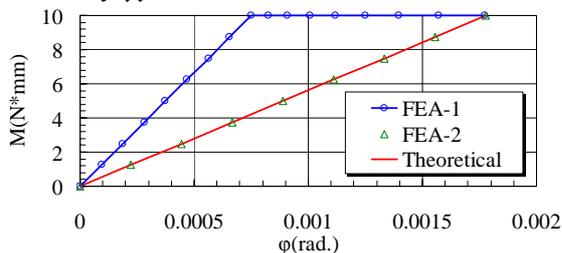


Fig.2 荷重とたわみ角の関係

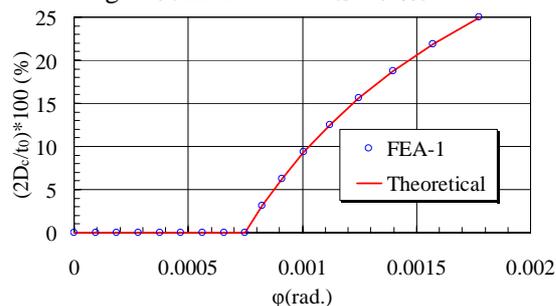
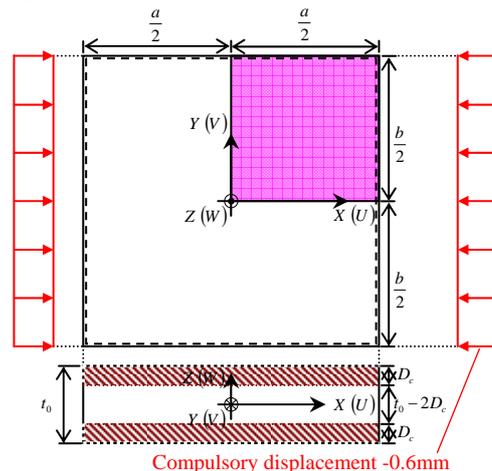


Fig.3 体積欠損率とたわみ角の関係

3.2 周辺単純支持一様圧縮板の断面欠損解析

周辺単純支持板に一樣な圧縮荷重を載荷後、荷重を一定に保った状態で Fig.4のように板厚減少させる解析を実施した。解析結果として、平均応力と板中央のたわみの関係を Fig.5、体積欠損率と板中央のたわみの関係を Fig.6 に示す。なお、これらの図中には、ソリッド要素を用いた解体計算による解析結果も比較して示している。これより、本解析法はソリッド要素を用いた解体計算結果に比べて体積欠損過程の剛性を若干低く見積もるものの概ね一致することが分かる。



弾性係数 $E=205.8 GPa$, ポアソン比 $\nu=0.316$
 降伏応力 $\sigma_Y=1.0 \times 10^{15}$
 板の長さ $a=480 mm$, 板幅 $b=480 mm$,
 初期板厚 $t_0=10mm$, アスペクト比 $\alpha=1.0$
 体積欠損率 $\beta = \frac{2D_c}{t_0}$

Fig.4 一様圧縮を受ける周辺単純支持板の解析モデル

4. まとめ

本文は、腐食による体積欠損過程が考慮できる有限要素解析法の概要を述べるとともに、その妥当性検証の一部を示したが、提案した解析法による解析結果は、参照解と必ずしも一致しない場合があるため、今後、この原因を究明するとともに、体積欠損履歴が耐荷力に及ぼす影響について、この解析法や実験を通して明らかにする予定である。

【参考文献】1) 後藤 芳顕, 川西 直樹: 腐食や補修の影響を考慮した長期間の力学性能評価のための構造解析法の開発: 土木学会論文集, No.689, I-57, pp.85-100, 2000. 2) 後藤 芳顕, 川西 直樹: 腐食と補修履歴を考慮した鋼構造物の耐震性能評価のための解析手法: 土木学会論文集, No.738, I-64, pp.233-244, 2003.

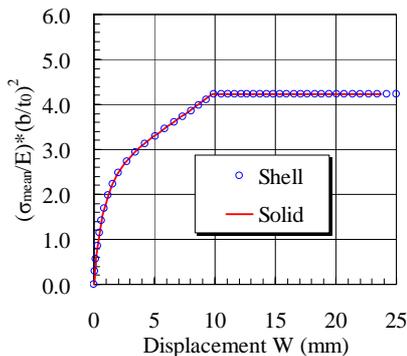


Fig.5 平均応力と板中央のたわみの関係

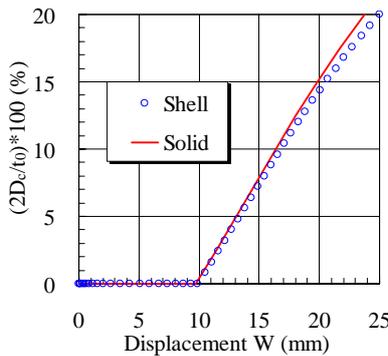


Fig.6 体積欠損率とたわみの関係