鋼構造物の腐食による残留応力変化の解析

豊田工業高等専門学校 正員 川西直樹 名古屋工業大学 正員 後藤芳顯

1.はじめに

長期間における鋼構造物の供用を考えた場合,腐食 により力学性能の劣化がどの程度進行したかを調査す ることは維持管理上重要な問題と考えられる.鋼構造 物はその製作過程により不可避的な残留応力が内在し これが耐荷力や疲労強度に影響を与えることは周知の 事実である.ここでは,腐食の進行により構造物の初 期に発生している残留応力がどのように変化するかに ついて有限要素法により追跡する手法を検討した結果 について報告する.具体的には,著者らが文献1)で 示した腐食による体積変化過程を正確に考慮しうる解 析手法を固体要素にまで拡張した.さらに,例として 本解析法を用いて残留応力を有する鋼板が腐食した場 合における残留応力の変化とこのときの圧縮耐荷力を 予測した.

2.固体要素による腐食による体積変化過程の追跡

ここでは幾何学および材料的非線形性を考慮した固体要素による定式化を行うためUpdated Lagrangeの手法に基づいて体積変化過程について考える.既知の状態 $Q^{(N)}$ から増分変形した次ステップを $Q^{(N+1)}$ とする.初期の直交座標系において表現される点を x_i , $Q^{(N)}$ において更新された座標を $X_i^{(N)}$ とし,その点の変位を $u_i^{(N)}$ とすると,

$$X_{i}^{(N)} = x_{i} + u_{i}^{(N)}$$
(1)

となる.今 $Q^{(N)}$ における体積,物体力,表面力,変位 をそれぞれ $V^{(N)}$, $\overline{b}_i^{(N)}$, $u_i^{(N)}$ とし $Q^{(N)}$ から $Q^{(N+1)}$ に 変化するときのそれぞれの増分量を により表現する と,体積変化を考慮した仮想仕事の原理は以下のよう に表現される.

$$\int_{V^{(N)} + \Delta V^{(N)}} \rho^{(N)} \partial^{2} \left(u_{i}^{(N)} + \Delta u_{i}^{(N)} \right) / \partial t^{2} \, \delta \Delta u_{i}^{(N)} dV + \int_{V^{(N)} + \Delta V^{(N)}} \left(\sigma_{ji}^{(N)} + \Delta \Pi_{ji}^{(N)} \right) \partial \delta \Delta u_{i}^{(N)} / \partial X_{j}^{(N)} dV = \int_{S_{\sigma}^{(N)} + \Delta S_{\sigma}^{(N)}} \left(\overline{t}_{i}^{(N)} + \Delta \overline{t}_{i}^{(N)} \right) \delta \Delta u_{i}^{(N)} dS + \int_{V^{(N)} + \Delta V^{(N)}} \left(\overline{b}_{i}^{(N)} + \Delta \overline{b}_{i}^{(N)} \right) \delta \Delta u_{i}^{(N)} dV$$
⁽²⁾

ここで $\sigma_{ji}^{(N)}$ はコーシーの応力であり , $\Delta \Pi_{ji}^{(N)}$ は公称応力の増分を示す . また , $\rho^{(N)}$ は $Q^{(N)}$ における密度

であり, $S_{\sigma}^{(N)}$ は力学的境界を示す.式(1)を有限要素法の形式に離散化するため,初期状態における時間 パラメータを $t^{(a)}$,その状態を $Q^{(a)}$ とし,腐食した状態における時間パラメータを $t^{(b)}$,その状態を $Q^{(b)}$ と表現する. $t^{(a)}$, $t^{(b)}$ 間における任意時刻を $t^{(N)}$ とし, このときの節点座標を次のように補間する.

$$x_i^{k(N)} = (1 - \frac{t^{(N)} - t^{(a)}}{t^{(b)} - t^{(a)}})x_i^{k(a)} + \frac{t^{(N)} - t^{(a)}}{t^{(b)} - t^{(a)}}x_i^{k(b)}$$
(3)

しかしながら,直接観測できる値は上式中の $x_i^{k(a)}, x_i^{k(b)}$ ではなく,体積変化や外荷重による変位を含んだ $X_i^{k(a)}, X_i^{k(b)}$ である.このため,上式を式(1)を考慮して次のように表現する.

$$X_{i}^{k(N)} - u_{i}^{k(N)} = (1 - \frac{t^{(N)} - t^{(a)}}{t^{(b)} - t^{(a)}})(X_{i}^{k(a)} - u_{i}^{k(a)}) + \frac{t^{(N)} - t^{(a)}}{t^{(b)} - t^{(a)}}(X_{i}^{k(b)} - u_{i}^{k(b)})$$

$$(4)$$

ここで $X_i^{k(a)}, X_i^{k(b)}$ は観測できるが節点変位 $u_i^{k(N)}, u_i^{k(b)}$ は観測することができない.そこで,これ らの値は近似的に $Q^{(N-1)}$ の値を用いることでこれを 対処する.このため, $t^{(a)}, t^{(b)}$ 間における増分間隔は





+分小さくする必要がある.そして,上記の手法を20 節点のアイソパラメトリック固体要素を対象に定式化 を行い,これを汎用構造解析プログラム ABAQUS の ユーザーサブルーチンに組み込むことで利用する.

3.数値計算モデル

床板に埋め込まれた下路式ワーレントラス橋圧縮斜 材の舗装面における腐食部分をモデル化した残留応力 を有する周辺単純支持された単一圧縮パネルについて 腐食時の残留応力について検討を行う.図-1 にその 形状および諸元を示す.初期状態における残留応力分 布は図 - 2(a)に示すように圧縮載荷方向(y方向)に引 張り0.75 σ_y , 圧縮 $-0.25\sigma_y$ を矩形分布として導入す る.腐食範囲に関しては,斜材が道路床版に沿って腐 食した事例を参考にして載荷辺に対して傾き 27.5°, 幅 30mm とする.材料構成則に関しては Bi-Linear 型の 移動硬化則とし,2次勾配はヤング係数 E の 1/100 と し,要素分割は 32×32×4 とする.またここでは,腐 食速度は一般に非常に遅いため,式(2)における慣性 項は無視している.

4.解析結果

図 - 2(b),(c)にそれぞれ腐食後における腐食面と健 全な裏面における残留応力分布を示す.これより,腐 食面(図 - 2(b))における腐食範囲に沿って初期の残 留応力が大きく変化しており,特に腐食範囲内の領域 では圧縮,引張り領域ともその絶対値は大きくなって いる.また,引張り領域の一部においては塑性化も認 められており,疲労を配慮しなければならい部位にこ の構造を用いた場合には問題となる可能性もある.逆 に,腐食範囲からy方向に少し離れた領域では残留応 力の絶対値は若干低下している.また,健全な裏面(図 - 2(b))においては腐食部の一部に引張り残留応力の 増加が認められるが,その他の部分には大きな残留応



力の変化は認められない.

図 - 3 には腐食したパネルの圧縮載荷時における荷 重 - 変位曲線を示す.この図における実線は本解析手 法によるものを示し,破線は,圧縮パネルに腐食形状 を与え,残留応力分布については腐食前の分布を強制 外力により再現したモデル(腐食による残留応力の再 配分を無視した従来から用いられているモデル)に圧 縮載荷したときの様子を示している.両者を比較する と本解析法によるものが腐食領域における残留応力の 上昇で塑性化が早期に始まり,剛性も早く低下してい る.一方,最大荷重は腐食による残留応力の変化を考 慮したものの方が若干高くなっている.この原因とし て,圧縮残留応力は腐食範囲内では上昇しているが, その周辺ではかなり広範囲にわたり減少していること が考えられる.

参考文献: 1)後藤芳顯,川西直樹:腐食や補修の影響を考慮した構造物の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.pp.85 - 100.2001.10