

腐食などの体積欠損による鋼構造物の残留応力・ 残留たわみの変化の解析と圧縮板の残存耐荷力評価

A numerical method to assess changes of residual stresses and residual deflections due to corrosion loss of material and their effects on ultimate behavior of compression plates

後藤芳顕*, 川西直樹**

Yoshiaki Goto, Naoki Kawanishi

*工博, 名古屋工業大学大学院, 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

**工修, 豊田工業高等専門学校, 環境都市工学科 (〒471-8525 豊田市栄生町 2-1)

The histories of corrosion loss of material have a big influence on the long-term mechanical performance of steel structures. Authors proposed a new FE analysis method that can take into account the histories of geometrical change in structures that is caused by the corrosion loss of material. By the use of this new method, it is expected that the change of residual stresses and residual deflections due to corrosion can be accurately evaluated at an arbitrary point of structural lifetime. Herein, in order to verify the validity of the proposed method, an experiment is carried out to measure the change of residual stresses by cutting a groove into a box column that mimics a local corrosion pattern. From this experiment, it is observed that the change of the residual stresses and residual deflections caused by the groove on the surface of a plate is well predicted by the proposed method if only the residual stresses and residual deflections of the virgin plate without the groove are known in advance. From a numerical example, it is shown that the strength and ductility of corroded compression plates may decrease to some extent due to the increase in the compressive residual stress caused by the corrosion loss of material.

Key Words : corrosion, residual stress, ultimate strength, finite element method

キーワード : 腐食, 残留応力, 耐荷力, 有限要素法

1. はじめに

鋼構造物の長期間の力学性能変化に大きな影響を与えるものとして腐食による体積欠損が挙げられる。腐食による残存耐荷力や疲労強度などの力学性能の変化を把握するため、従来までの多くの研究事例では腐食欠損した部材断面を単に幾何学形状の変化として考慮することにより、力学性能変化の推定を行っている^{1)~6)}。鋼構造物の場合その力学性能には溶接などによる残留応力や残留たわみなどの不整量が影響を与える。この不整量は腐食による体積欠損が生じた場合の力学性能評価においても考慮されるが、腐食前の不整量が便宜的に用いられる場合がほとんどである。しかしながら、腐食による体積欠損で、構造物内には応力の再配分が起こり構造物に内在していた残留応力や残留たわみも変化するのでこれらの変化量が大きいときには力学性能に与える影響は無視できないと考えられる。

この問題についてはわずかに文献 7)において板要素を用いた有限要素解析での簡易な考慮方法が提示されてい

る。詳細が示されていないので明確ではないが、残留応力を初期応力として有限要素に導入するときに算定される等価節点力を腐食による体積欠損部分を除いて積分することにより評価する方法であると考えられる。この手法は腐食欠損の最終状態のみに注目した問題として残留応力や残留たわみの変化を解析しており腐食過程が考慮されていないので腐食過程において残留応力の変化により鋼材の一部に塑性化が生じ非線形挙動を起こす場合には正確な解析ができない。また、本来、各要素の残留応力による等価節点力は自己つり合い状態であるが初期応力についてこのような欠損部を除いた積分を行うことで自己つり合いを満足しない矛盾が生じると考えられる。さらに、腐食欠損による残留応力は腐食欠損の形状などから局所的に大きな変化を示すことが多く板要素ではその変化を表す上で十分ではない。

腐食前の状態での不整量が既知である場合、腐食による断面欠損で生ずる残留応力・残留たわみの変化量を正確に解析するためには、応力やたわみが内在した状態で進行する構造物の幾何形状変化の履歴を考慮しうる構造

解析が必要である。すなわち腐食前の構造物に既知である初期状態での残留応力と残留たわみを導入し、腐食体積欠損による幾何形状の時系列的な変化量を把握して、これを考慮する構造解析を用いれば残留応力・残留たわみの変化量を直接的かつ正確に求めることができる。すでに著者らは従来までの有限要素法解析における荷重や変位などの制御パラメータに新たに要素体積変化を表す制御パラメータを追加することで構造物の幾何形状の変化を時系列的に考慮する独自の構造解析法を開発し^{8)~10)}、死荷重載荷状態での腐食体積欠損の進行による不静定トラス橋の応力の再配分やたわみ状態の変化⁸⁾さらに腐食した構造の死荷重載荷状態での補修（断面復元や補強）やジャッキアップによる補修に起因した残留応力・残留たわみの変化が構造物の耐力や耐震性能に与える影響を検討してきた⁹⁾。本研究で対象としている腐食による体積欠損に起因する残留応力・残留たわみの変化も著者らの解析法によると直接解析できる。

ここでは、著者らの提示した体積変化を考慮した仮想仕事の原理より複合非線形3次元固体要素を誘導する。3次元固体要素を用いる理由は腐食に伴う体積欠損形状やこれによる残留応力分布の変化は局所的な場合が多く、たとえば板要素の腐食においても3次元固体要素を用いなければ正確に解析できないからである。

つぎに本解析法の妥当性を実験により検証する。実験では溶接箱形断面短柱の供試体に局部腐食パターンを模擬した溝を機械切削により人工的に施し、これにより残留応力と残留たわみがどのように変化するかを実測し、解析結果と比較する。実験供試体の溝加工には機械切削を用いるため腐食による体積欠損と異なり表面に切削による塑性ひずみが生じるがこの影響についてはX線応力測定装置を用いて検討する。

さらに、腐食による体積欠損で変化した残留応力・残留たわみの評価法として考え得る近似解法について提示し、その解が持つ誤差の程度を著者らが提示した正確な解析法による解と比較することで検討する。また、この誤差が構造物の力学性能に与える影響を圧縮板の残存耐力の観点から数値計算により評価する。

2. 腐食による鋼材の体積変化を考慮した解析手法

荷重や変位のような従来までの制御変数に加えて新たな制御変数として腐食による構造部材の体積変化を考慮した新しい解析方法^{8)~10)}について概説する。この新たな制御変数の導入により荷重や変位の影響に加えて腐食による部材体積変化の影響を時系列的に考慮した複合非線形解析を実行することが可能となる。

更新ラグランジェの手法によると図-1のように、 $Q^{(N)}$ 状態の物体における更新Lagrange座標 $(X_1^{(N)}, X_2^{(N)}, X_3^{(N)})$ は、初期状態 $Q^{(0)}$ における物体内の位置座標 (x_1, x_2, x_3) とその点における $Q^{(N)}$ 状態における変位 $u_i^{(N)}$ により次式で定義される。

$$X_i^{(N)} = x_i + u_i^{(N)} \quad (1)$$

ここで (x_1, x_2, x_3) は直交デカルト座標であり、 $u_i^{(N)}$ は並進変位の x_i 座標方向成分を表す。

$Q^{(N)}$ 状態において、物体における体積 $V^{(N)}$ 、物体力 $\bar{t}_i^{(N)}$ 、表面力 $\bar{b}_i^{(N)}$ および変位 $u_i^{(N)}$ の微小変化により $Q^{(N+1)}$ 状態に到達したものと考える。 $Q^{(N+1)}$ 状態の体積、物体力、表面力および変位をそれぞれ $V^{(N)} + \Delta V^{(N)}$ 、 $\bar{t}_i^{(N)} + \Delta \bar{t}_i^{(N)}$ 、 $\bar{b}_i^{(N)} + \Delta \bar{b}_i^{(N)}$ 、 $u_i^{(N)} + \Delta u_i^{(N)}$ と表し、体積変化にともなう生じる表面積 $S^{(N)}$ の変化後の値を $S^{(N)} + \Delta S^{(N)}$ と表現すると、 $Q^{(N+1)}$ 状態に関する仮想仕事の原理は次のように表現される。

$$\begin{aligned} & \int_{V^{(N)} + \Delta V^{(N)}} \left(\sigma_{ji}^{(N)} + \Delta \Pi_{ji}^{(N)} \right) \frac{\partial \Delta u_i^{(N)}}{\partial X_j^{(N)}} dV \\ &= \int_{S^{(N)} + \Delta S^{(N)}} (\bar{t}_i^{(N)} + \Delta \bar{t}_i^{(N)}) \Delta u_i^{(N)} dS \\ &+ \int_{V^{(N)} + \Delta V^{(N)}} (\bar{b}_i^{(N)} + \Delta \bar{b}_i^{(N)}) \Delta u_i^{(N)} dV \end{aligned} \quad (2)$$

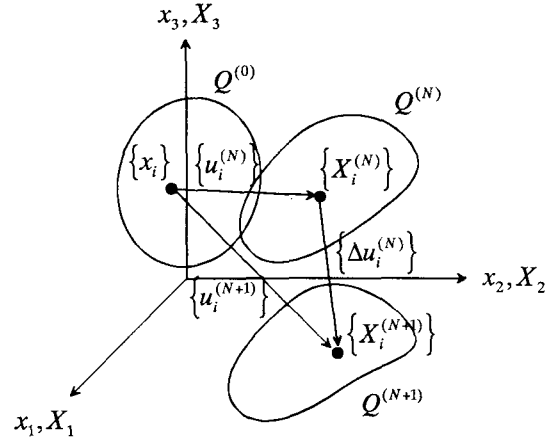
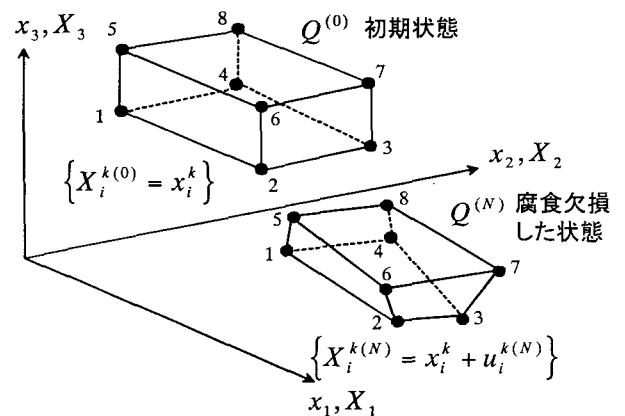


図-1 座標系の定義



*上添字kは要素節点番号

図-2 $Q^{(0)}$ と $Q^{(N)}$ 状態における固体要素の節点座標

ここで、 $\sigma_{ji}^{(N)}$ はコーシー応力であり、 $\Delta\Pi_{ji}^{(N)}$ は更新ラグランジェ座標 ($X_1^{(N)}, X_2^{(N)}, X_3^{(N)}$) を基準とした公称応力増分である。 $S_{\sigma}^{(N)}$ に関する下添字 σ は外力により規定される力学境界表面を示す。

式(2)の仮想仕事の原理に、以下に示す変位関数を用いて3次元連続体を図-2に示すアイソパラメトリック8節点固体要素により離散化を行う。

$$u_i = \frac{1}{8} (1 + \xi \xi^k) (1 + \eta \eta^k) (1 + \zeta \zeta^k) u_i^k \quad (3)$$

ここで、 u_i は並進変位の x_i 成分である。 ξ, η, ζ は要素内において-1から1までの値をとるアイソパラメトリック要素座標による要素内部の位置座標を表し、上添字 k は要素節点番号を表す。この要素は8個の積分点により数値積分がなされているが、せん断ロッキングの問題を回避するために文献 11) で示される手法に基づき、体積分については要素内部の体積平均を用いる選択低減積分を行っている。解析に際して、定式化した要素を汎用構造解析プログラム ABAQUS Ver.5.8¹²⁾ のユーザーエレメントとして導入する。鋼材の構成則は繰返し载荷の影響がないので一軸引張り試験の真応力-対数ひずみ関係をもとにした J2 流れ則、硬化則には等方硬化則を用いる。

3. 実験による解析の検証

コンクリート床版に埋め込まれたワーレントラス橋圧縮斜材の埋め込み部位に局部腐食が生じた場合(図-3)を想定して、鋼溶接箱形断面の短柱供試体に腐食による局部的な体積欠損を模擬した溝を機械切削により人工的に加工する。このときの体積欠損による残留応力および残留たわみの変化を実測し、提示した解析手法に基づく計算値と比較することで解析手法の妥当性を検証する。なお、実験で体積欠損を再現するため機械切削された溝は化学反応である腐食による溝と異なり溝表面には切削による塑性ひずみが生じる。この塑性ひずみが体積欠損による溶接残留応力の変化に与える影響については X 線応力測定と数値解析を用いて検討する。

3. 1 実験供試体

鋼溶接箱形断面短柱供試体の中央部($z=0$)に軸線直角方向に1周する溝を機械切削することで、腐食による体積欠損が生じた状態を再現する。溝加工は、フライス盤に取り付けられた両刃付ドリルカッターを回転および並行運動させることにより、実際の腐食と同様に溝の深さが周方向全体にわたり漸増するように行う。切削時の回転数は 800rpm、並行移動速度は 150mm/min であり、荒引き、中仕上げ、仕上げの三工程に分けて切削する。

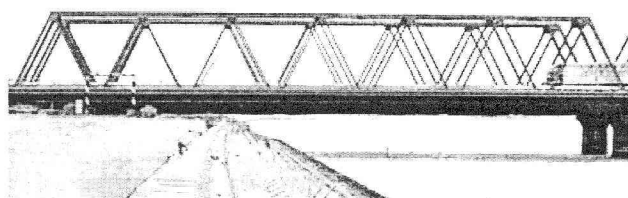


図-3 腐食したワーレントラス橋の斜材

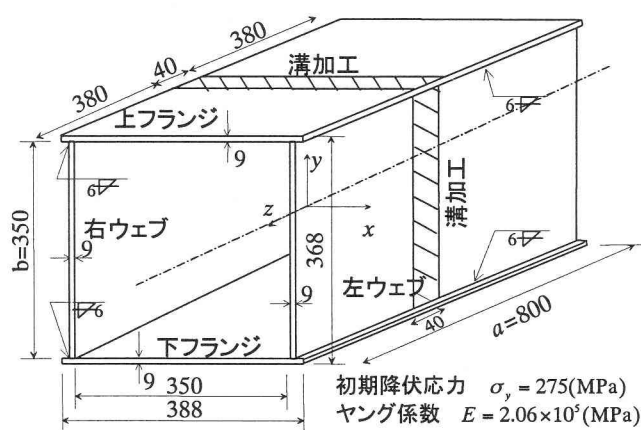


図-4 実験供試体

供試体の寸法諸元を図-4に示す。使用鋼材は板厚 9mm の SM400 材であり、単軸一軸引張り試験による公称応力・工学ひずみ関係を図-5に示す。ここで、初期降伏応力 σ_y は 275MPa、引張強度 σ_u は 445MPa である。

供試体は計3体用意する。1体は溝の切削をしていないもので腐食のない初期状態での残留応力・残留たわみの測定用である。他の2体は、図-6に示すように部材軸直角方向に深さ 3mm および 6mm の溝が部材を1周するように切削しており、体積欠損した場合の残留応力・残留たわみを測定するためのものである。ここでは体積欠損の程度を表すために溝の深さ Δt を初期の板厚 $t_0 = 9(\text{mm})$ で無次元化した下記の欠損率 β_f を用いる。

$$\beta_f = \Delta t / t_0 \quad (4)$$

なお、 $\beta_f = 0$ は体積欠損のない初期状態に相当し、 $\beta_f = 0.33, 0.67$ は溝深さ Δt がそれぞれ 3mm と 6mm の場合に相当する。一つの供試体の長さは 800mm である。

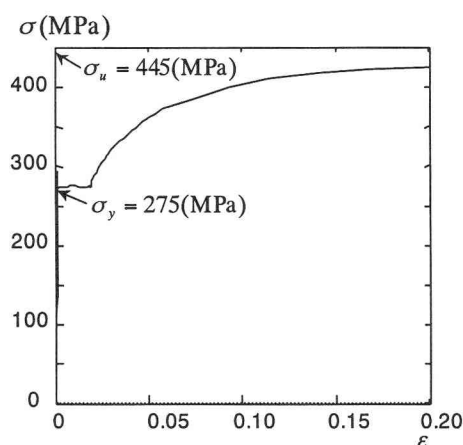
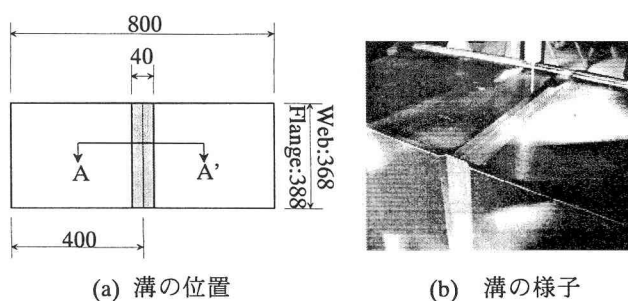
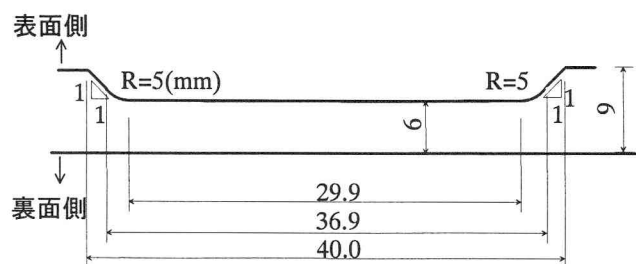


図-5 公称応力-工学ひずみ関係

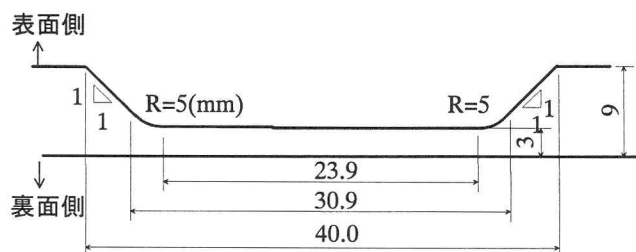


(a) 溝の位置

(b) 溝の様子



(c) A-A'溝断面形状 ($\beta_f = 0.33$)



(d) A-A'溝断面形状 ($\beta_f = 0.67$)

図-6 切削溝の形状詳細

が、製作する3体の供試体に対して製作過程により生ずる初期不整の不均一性をできるだけ排除するため、はじめに長さ 3300mm の1本の部材として製作を行い、この部材の両端を除き中央部から 800mm の供試体を3体切り出す。箱断面の四隅の溶接は脚長 6mm の隅肉溶接であり、CO₂ の半自動溶接により行う。このときの溶接条件

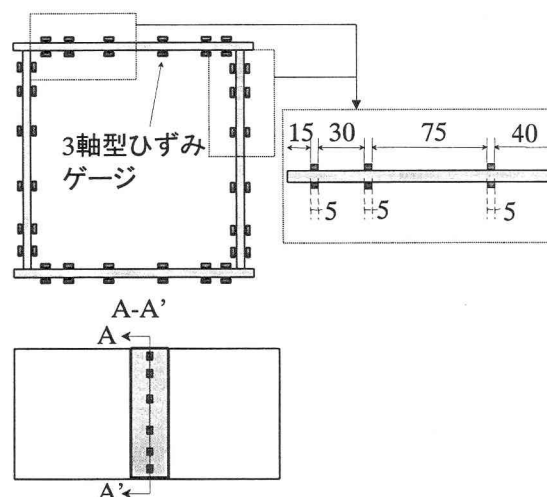


図-7 ひずみゲージの貼り付け位置

は電流 230~240(A)、電圧 35~36(V)、溶接速度 35(cm/min.)、入熱量は 13800~14800 (J/cm)であり、溶材は MX-Z210 (φ1.2) である。

3. 2 残留応力と残留たわみの計測方法

残留応力の計測は面内3成分を対象とするので3軸型ひずみゲージ(ゲージ長さ 1mm)を用いた切断法により行う。すなわち、3種類の供試体について図-7に示すようにひずみゲージをパネル中央の切削溝底中央とその裏面に貼り付け、その後、ひずみゲージを含む図-8のような約 30×30mm で厚さは板厚の直方体小片を供試体より切り出し、このときの残留弾性ひずみの解放量を計測する。残留応力の成分は計測値をもとにロゼット解析¹³⁾により算定する。溝切削による残留応力・残留たわみの変化量は $\beta_f = 0$ の供試体の値と $\beta_f = 0.33, 0.67$ の供試体の値を比較することで評価する。本来は同じ供試体について溝深さを順次増加させ残留応力の変化を計測すべきであるが、切断法を使用するので異なった供試体を使用せざるを得ない。このため、少量ではあるが溝切削前の初期状態での供試体による残留応力のばらつきが溝切削後の変化した残留応力に影響を与える。

残留たわみについては3次元形状計測装置(図-9)を用い、同一供試体に対して溝切削前後の板外面の凹凸形状を計測することで残留たわみ量の変化を評価する。

3. 3 解析手順

2. で述べた腐食による体積欠損過程を考慮した解析手法の妥当性を検証するため、ここでは実験条件をできるだけ忠実に再現した解析を実施する。まず、溝を切削する前の供試体を対象とした離散解析モデルを設定する。この解析モデルには計測された残留応力と残留たわみが導入されている。つぎに、提案した有限要素解析で切削部分をその切削履歴通りに有限要素要素体積を減少させ、目標の溝形状に到達させる。この状態での解析モデルの応力分布と幾何形状から溝を切削した供試体の残

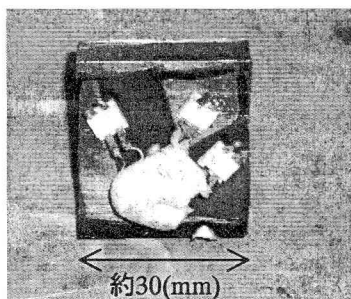


図-8 切断後のひずみゲージ

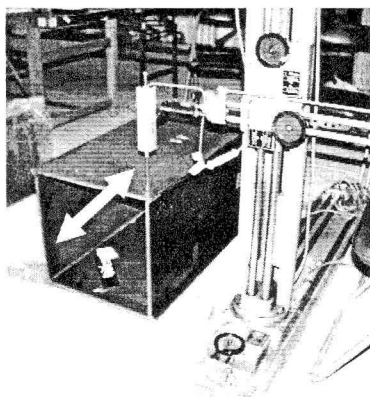


図-9 3次元計測装置

留応力と残留たわみが求められる。

3. 4 解析モデル

解析モデルの要素分割を図-10に、溶接部のモデル化の詳細を図-11に示す。腐食前の供試体($\beta_f = 0$)において体積欠損し溝を生成する中央部とその周囲は体積変化過程と溝部の残留応力分布の局所的な変化を考慮するためにここで開発した体積変化を考慮する8節点固体要素(ユーザーエレメント)を用い、その他の体積欠損しない部分は4節点の厚肉シェル要素(S4R)を用いる。また、脚長6mmの隅肉溶接ビードは3角柱固体要素(C3D6)を用いて表している。溶接ビードの要素分割は図-11のように簡易であり、溶接部の応力に関しては正確に考慮できないが、溶接ビードの断面積は全断面積に比して小さく、着目しているフランジやウェブの残留応力分布に及ぼす影響も小さいので問題はない。なお、モデルは z 軸方向に関する対称性を考慮して1/2モデルとし、腐食欠損部に用いる8節点線形固体要素の板厚方向の要素分割数は4分割とする。鋼材の構成則としては一軸引張試験での公称応力-工学ひずみ関係(図-5)を真応力-対数ひずみに変換し、多直線近似したものを用いる。

3. 5 残留応力・残留たわみの導入方法

腐食欠損のない初期状態 $\beta_f = 0$ の供試体において、実験で観測された残留応力と残留たわみを対応する解析モデルに2段階の手続きにより導入する。

1段階として、残留たわみおよび腐食欠損のないモデル

に初期応力を利用して残留応力を導入する。このとき導入する初期応力分布は腐食欠損のない供試体で観測された残留応力の値と極力一致するように決定する。残留応力は初期応力に対し構造解析を行いその結果として決定される応力分布であり初期応力と残留応力とは必ずしも一致しない¹⁴⁾。実験では計48枚の3軸型ひずみゲージにより供試体のパネル中央部($z=0$)の残留ひずみが切断法により計測されているので、計144成分の残留応力の計測値を参照点にして、著者が文献14)に示した最小二乗法による手法に準じ、最適な初期応力分布を決定する。

2段階として、1段階で決定した初期応力を導入したときに残留応力とともに生じるたわみ形状と、実験において観測された残留たわみ形状との差を解析モデルの節点座標の初期たわみ量(ここで、初期たわみは初期応力を導入して構造解析を行う前のたわみ量で構造解析結果として得られる残留たわみと区別している。)として与えることで、残留たわみ形状を再現する。ここではフランジおよびウェブに導入する初期たわみの分布形状($\Delta y, \Delta x$)を次のような三角関数で近似する。

$$\text{フランジ: } \Delta y = C_y \cos \frac{x}{b} \cos \frac{z}{a} \quad (5)$$

$$\text{ウェブ: } \Delta x = C_x \cos \frac{y}{b} \cos \frac{z}{a} \quad (6)$$

(C_x, C_y)はパネルの縦横の中央部の残留たわみの実測結果を参照点として、次のように決定する。

$$C_y = \begin{cases} -0.7 \text{ (mm)} & \text{(上フランジ)} \\ 0.8 \text{ (mm)} & \text{(下フランジ)} \end{cases} \quad (7a,b)$$

$$C_x = \begin{cases} 0.6 \text{ (mm)} & \text{(左ウェブ)} \\ -0.4 \text{ (mm)} & \text{(右ウェブ)} \end{cases} \quad (8a,b)$$

なお、実測による残留たわみはもともと小さいので、このような三角関数で初期たわみを近似することが残留応力の解析に与えるの影響は十分小さい。

第2段階で初期たわみを導入した構造に第1段階で求めた初期応力を導入することで初期状態での供試体の不整を再現する。このような残留応力と残留たわみの導入方法は文献14)の手法に比べ近似的な手法であり、1段階で導入した残留応力の値は2段階により若干変化するが、このときの応力の変化量は最大でも約0.5MPaであり、十分小さく無視できる。

上記の手順により導入した残留応力と残留たわみを有する初期状態のモデルに対して、溝切削による体積欠損過程を再現するため、溝部の有限要素体積を単調に減じる解析を行う。この解析結果から得られる残留応力および残留たわみの変化量を実験結果と比較することにより

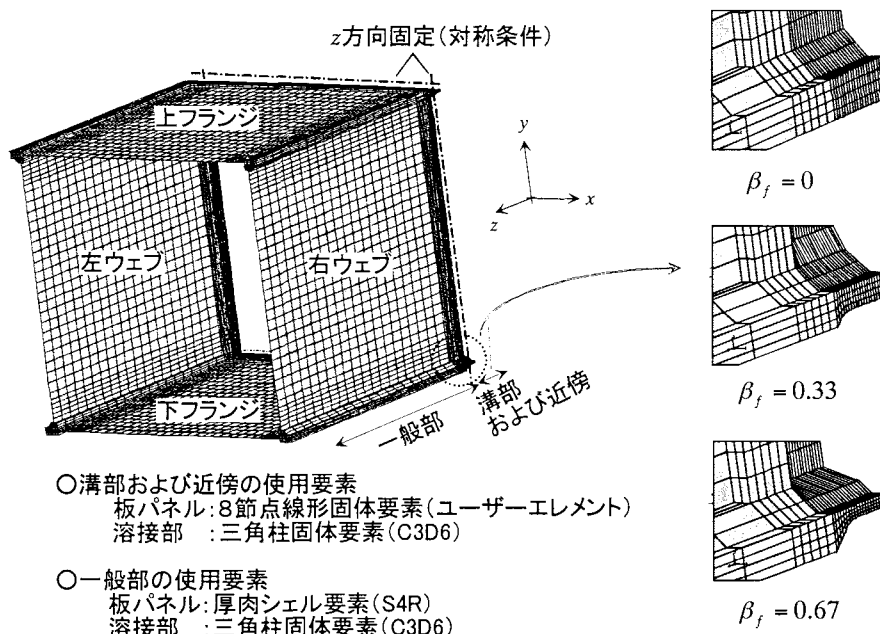


図-10 要素分割および境界条件

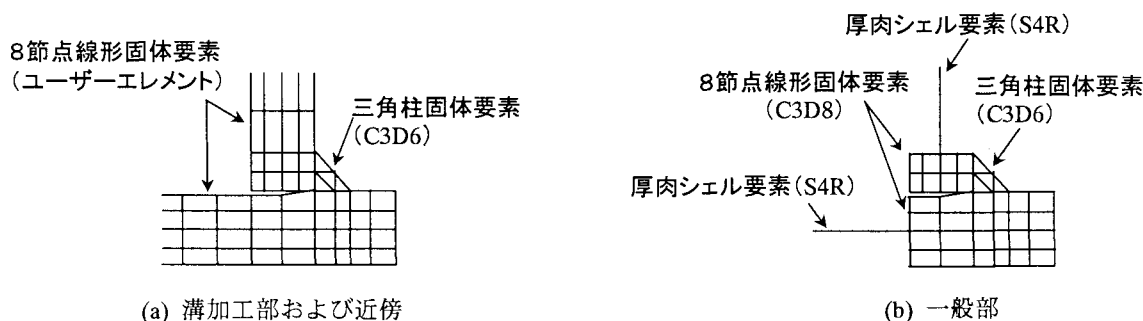


図-11 溶接ビードおよびフランジとウェブの交差部のモデル化

提案した解析手法の妥当性について検証する。

3. 6 実験結果と解析結果の比較

(1) 体積欠損による残留応力の変化

溝切削による体積欠損の程度と残留応力の再配分の状況について実験結果を図-12に解析結果を図-13に比較して示す。これらの図の(a), (b)にはそれぞれパネル中央 ($z=0$) におけるフランジおよびウェブの z 軸方向の残留直応力成分 (σ_{zz}^R) の分布を溝底面中央とその裏面に分けて示している。残留応力の符号は箱断面の内側を圧縮、外側を引張りとして、またその大きさは四隅に描かれた矢線の長さを降伏応力 σ_y として表現している。

溝のない初期状態の実験供試体 ($\beta_f = 0$) において計測された残留応力 σ_{zz}^R は、図-12(a), (b)より、上下フランジおよび左右ウェブの溝底面とその裏面のどちらにおいてもパネル中央部の広い範囲において圧縮、溶接位置に近いパネル端部において大きな引張りの値を示す。この初期状態の残留応力分布はいままでに同種の構造について報告されている分布傾向¹⁵⁾と一致する。これらの残留応力と残留たわみの計測結果を、3. 5で述べた体積

欠損のない初期状態の解析モデルに対する残留応力・残留たわみの導入目標値とする。図-13(a), (b)より、体積欠損のない初期状態 $\beta_f = 0$ に対応する解析モデルに導入された残留応力分布は、実験結果と比較すると若干の誤差は認められるがほぼ実験値と合致している。このような誤差の原因としては導入目標値となる残留応力と残留たわみの実測値に計測誤差が含まれるので整合性のある関係となっていないこと、さらに、たとえ計測値に誤差がない場合も鋼部材を有限要素近似したことによる離散誤差のために有限要素モデルでの残留応力と残留たわみの整合性が崩れることが考えられる。

鋼箱形断面短柱供試体に溝状の体積欠損が生じたことによる残留応力の変化を溝深さの異なる2種類の供試体 $\beta_f = 0.33, 0.67$ に関する実測残留応力 σ_{zz}^R の分布を初期状態 $\beta_f = 0$ の分布と比較することにより検討する。腐食欠損率 β_f の増加にともない、溝底面の残留応力 σ_{zz}^R は顕著に変化しており、初期状態 $\beta_f = 0$ で圧縮および引張り状態にあった残留応力はどちらも増加している。特にフランジおよびウェブパネル中央部における圧縮の残留応力は大きく変化している。また、溶接部付近の引張残留

応力の一部には降伏応力を超えている箇所があり，塑性化が生じている。

一方，図-12(b)における溝底の裏面における残留応力の変化量は溝底面のそれに比べ全体的に小さく，腐食欠損率 β_f の増加にともない，パネル全域において引張側に残留応力が変化しているといえる。これは短柱供試体中央断面全体に関する自己つり合いの条件から分かるように，溝底面の圧縮残留応力の増加分を裏側全体で受け持ったためと考えられる。

図-12 に示す溝状体積欠損の進展に伴う残留応力測定値の変化を，図-13 の解析結果と比較する。なお，解析結果における残留応力の値は1要素の8積分点のうち，溝底面またはその裏面上の4積分点の平均値を表してい

る。提案した解析手法により予測される残留応力の変化量は，実験で測定された値とほぼ一致している。実験で用いた3種類の供試体は溝切削前の初期状態において，できるだけ残留応力が等しくなるように製作したが局部的な溶接条件に大きく影響を受ける残留応力の性質上ある程度のばらつきは避けられない。この供試体の初期状態における残留応力のばらつきは溝切削後の残留応力にも影響するので，実験における測定値と解析値との差が図-12 と図-13 程度であれば定性的および定量的にもよく一致しているといえよう。すなわち，提案した計算手法の精度が確認されたものと判断してよいと考える。

(2) 体積欠損による残留たわみの変化

同じ供試体について溝切削の前後二度にわたって残留

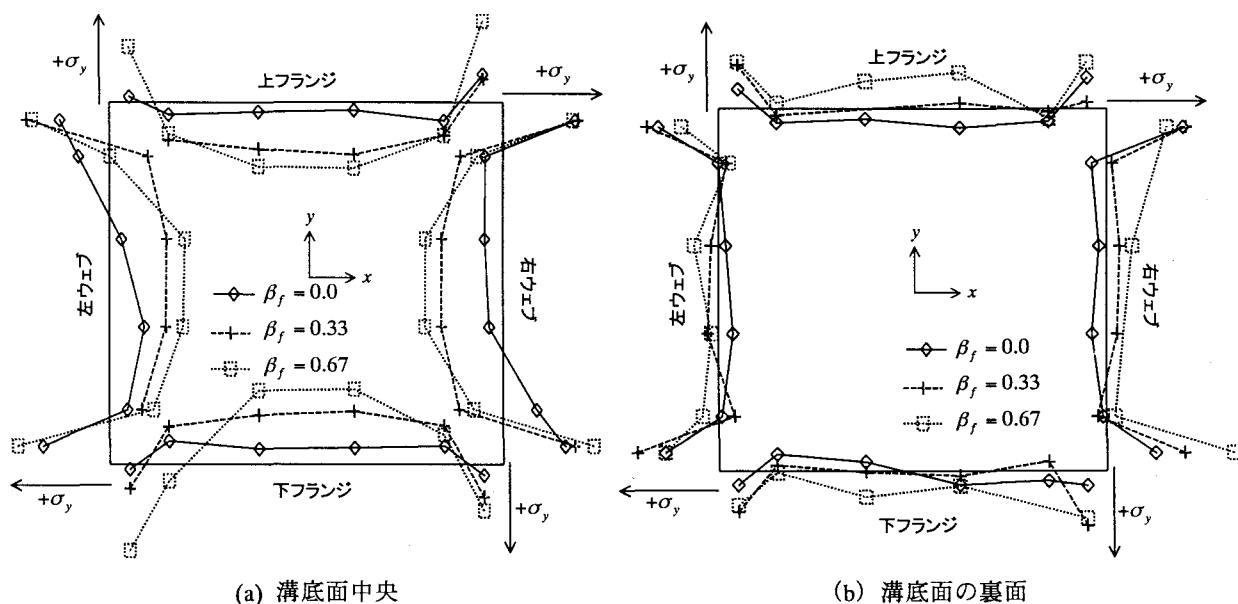


図-12 実験による溝位置($z=0$)における z 軸方向残留応力 σ_z^R の分布

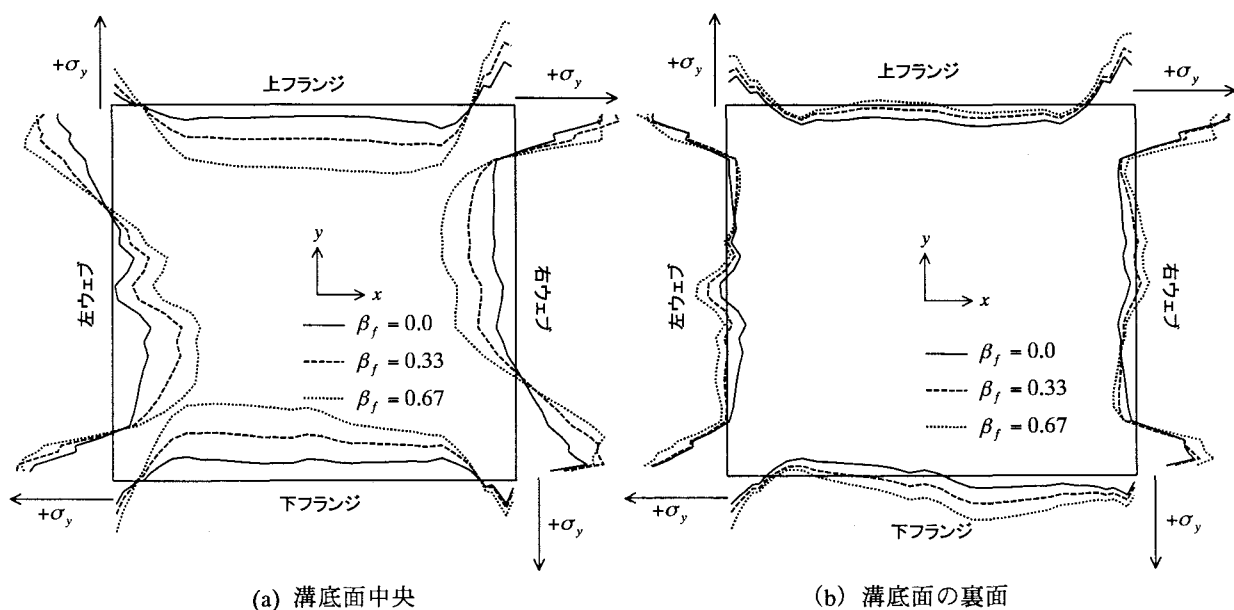


図-13 解析による溝位置($z=0$)における z 軸方向残留応力 σ_z^R の分布

たわみの形状計測を行い、溝切削による残留たわみの変化を調べる。図-14(a)には $\beta_f = 0.67$ の供試体のパネル中央($z=0$)における残留たわみ形状の計測結果を示す。この結果より、切削前の初期状態における残留たわみの絶対値は最大でも下フランジの中央部($x=0$)付近で約0.8mmであり、一般的な製作基準¹⁸⁾($<b/150=2.53\text{mm}$)に比べ十分に小さいといえる。また、残留たわみにより箱断面は内側に少し凹んだ状態となっている。このような供試体に溝切削による体積欠損が生じると、断面全体の残留たわみは増加する。とくに下フランジの最大たわみは約1.0mmとなり、20%程度残留たわみが増加している。なお、変化した残留たわみも製作基準と比較して小さいため、体積欠損による残留たわみの変化が短柱供試体の耐荷力特性に及ぼす影響は小さいものと予想される。図-14(b)には解析による数値計算結果を示す。これらの結果より、溝切削による体積欠損後の残留たわみ形状は実験結果とよく一致しており、残留たわみの変化予測についても提示した解析手法の妥当性が確認される。

以上より、腐食による体積欠損量と腐食前の初期状態での残留応力・残留たわみが既知であれば提示した手法により体積欠損時の残留応力や残留たわみの変化量を予測することが可能であることが判明した。一般に腐食前の初期不整量については計測例も多く、代表的な構造要素については残留応力や残留たわみの分布モデルも示されているので¹⁵⁾、これを利用し本手法を用いると体積欠損量のみでの測定によって初期不整量の変化の影響を力学性能評価に反映しうる。

3. 7 機械切削による溝加工が残留応力に与える影響

強制的に鋼材の体積欠損状況を作り出す機械切削は、化学変化により徐々に体積欠損していく鋼材の腐食現象

とは同一条件にはならない。すなわち、溝の機械切削過程では切削面境界近傍における塑性変形の影響により残留応力が新たに導入される。しかし、機械切削により生じる塑性領域は、文献 16)によると切削面から深さ約0.2mm 程度範囲の非常に狭い領域にほぼ一様な層(加工硬化層)として存在する。したがって、切削に伴う塑性化により生ずる残留応力も切削面の近傍に限り一様に分布するものと予測される。ここで用いる切断法での小片の分割形状では各小片の1面に必ず切削による加工硬化層が残存するため加工硬化層における残留ひずみは解放されず、今回の溶接残留応力の計測結果に影響を与えないと考えられるが、ここでは確実を期すため検証する。

まず、3. 1で述べた残留ひずみ計測のため実験供試体から切断した $30 \times 30(\text{mm})$ の薄片を用いて、X 線応力測定装置により切削面近傍の残留応力を計測する。X 線による応力測定方法は $\text{Sin}^2\phi$ 法¹⁷⁾であり、板表面の応力を非破壊により測定することができる。ここではさらに電解研磨(特殊な電解液で鋼板の表面を溶解する研磨)により板表面を0.05,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5mm と段階的に研磨してそれぞれの状態において残留応力を計測し、板厚方向の残留応力分布を調べる。

つぎに、この残留応力分布が切断法で小片に分割する前の残留応力とほとんど変化しないことを解析的に確認する。すなわち、3. 2で示した切断前の解析モデルの切削溝底面直下に薄く層状に塑性ひずみに相当する熱ひずみを与えることでX 線応力測定結果に近似した残留応力を導入する。そして、ABAQUS の要素休止機能¹²⁾を利用して残留応力計測のための切断作業を再現し、 $30 \times 30(\text{mm})$ の薄片の残留応力分布を解析する。

解析により得られた小片への切断前後における溝底表面から板厚方向の残留応力分布をX 線応力測定による結

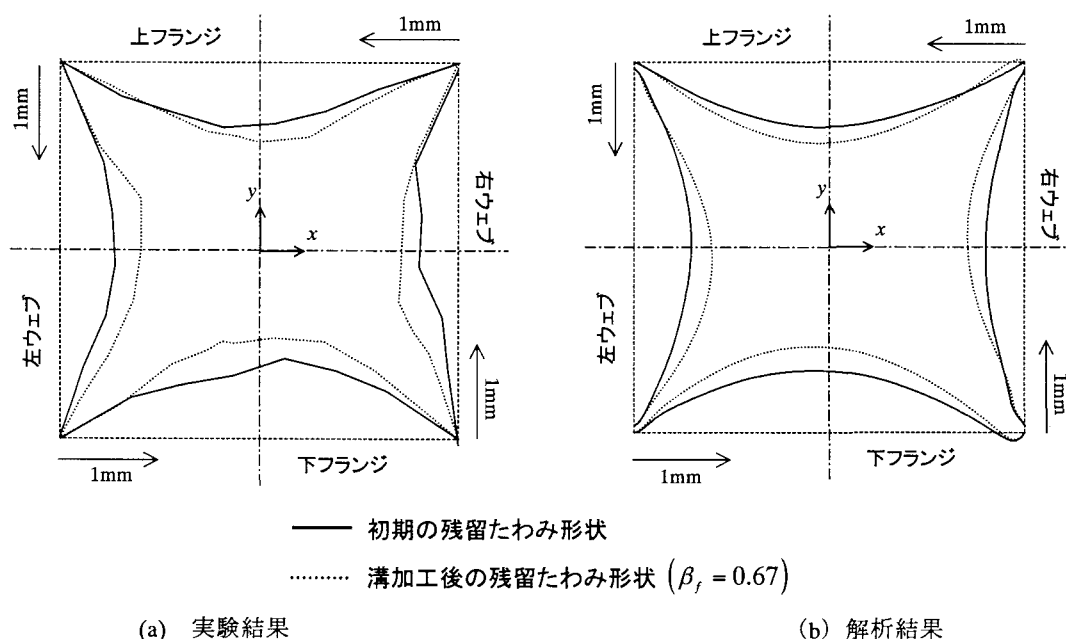


図-14 溝位置($z=0$)における残留たわみ形状

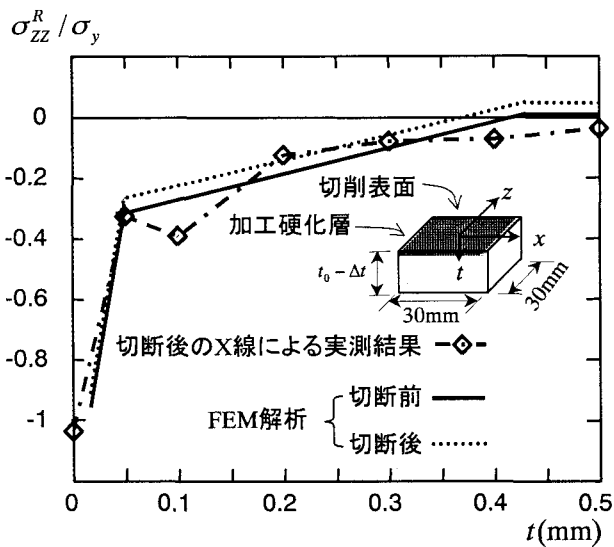


図-15 機械切削面近傍の残留応力分布

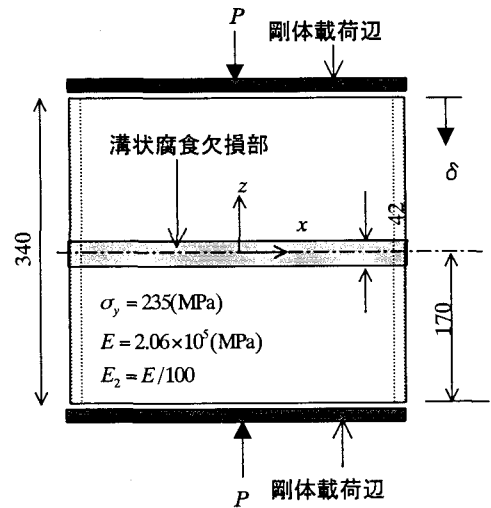
果と比較する形で図-15に示す。この図より、残留応力計測のために切断された小片には切削溝底面およびその近傍には高い圧縮の残留応力が存在しているが、深さ方向には急激に減少し、予測したとおり約0.2mm付近で残留応力は $-0.1\sigma_y$ 程度となりほぼ消散していることが分かる。また、小片への切断前後の応力分布は最大でも約10MPa程度しか変化しておらず、機械切削にともなう残留応力は切断法により計測される溶接残留応力の測定時にはほとんど開放されない。このことから、切断法による溶接残留応力の計測結果への機械切削の影響は小さいことが確認される。

4. 腐食体積欠損による残留応力の変化が耐荷力特性に及ぼす影響

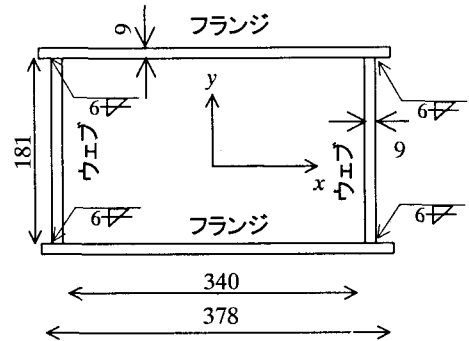
3.の実験結果と解析結果の比較より、提示した解析手法を用いると体積欠損で変化する残留応力や残留たわみを精度よく評価しうることが判明したので、ここでは提示した解析法を用いて、実験と同様な溶接箱形断面短柱を対象に腐食体積欠損による残留応力・残留たわみの変化が耐荷力特性に及ぼす影響を検討する。さらに、腐食欠損による残留応力や残留たわみの変化を予測するための他の近似的で実用的な解析法も提示しその適用性についても調べる。

4.1 解析モデル

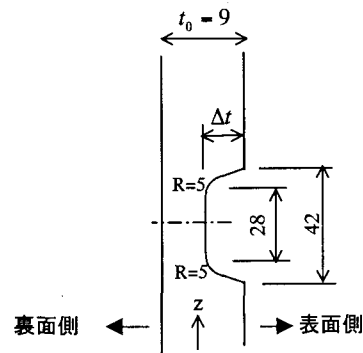
解析対象とした箱形断面短柱の諸元を図-16に示す。解析モデルは3.4で記した図-11(a)と同様に8節点固体要素と三角柱固体要素を用いて離散化モデルを構築する。残留応力・残留たわみの x - y 平面および y - z 平面に関する対称性を仮定して1/8モデルで解析する。ここで考慮する腐食欠損は、パネル中央部($z=0$)に幅42(mm)の溝状の体積欠損(図-16(c))が断面を1周するように生じ



(a) 寸法諸元および荷重方法



(b) 断面形状



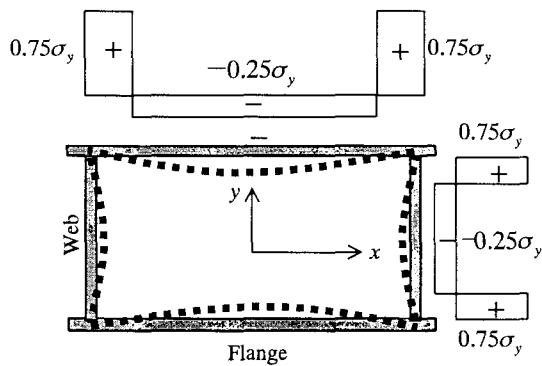
(c) 溝状体積欠損の形状詳細

図-16 解析対象(鋼箱形断面柱)

た局部腐食を想定する。溝の欠損率 β_f は0,0.25,0.50,0.75の4ケースについて計算を行い、欠損深さの影響を調べる。腐食欠損前の初期状態において存在する残留応力と残留たわみには図-17に示すものを z 軸方向の初期垂直応力および初期たわみ量として与え、一度つり合い計算を行って得られる応力およびたわみ分布を用いる。鋼材の材料構成則は図-18に示すようにBi-Linear型とし、塑性域における2次勾配はヤング係数 E の1/100とする。

4.2 腐食欠損により変化した残留応力と残留たわみ

腐食欠損により変化した軸方向残留応力 σ_{zz}^R と残留た



初期たわみ

$$\text{Flange: } \Delta y = \mp \frac{340}{150} \cos\left(\frac{\pi x}{340}\right) \cos\left(\frac{\pi z}{340}\right)$$

$$\text{Web: } \Delta x = \pm \frac{181}{150} \cos\left(\frac{\pi y}{181}\right) \cos\left(\frac{\pi z}{340}\right)$$

図-17 初期応力と初期たわみ

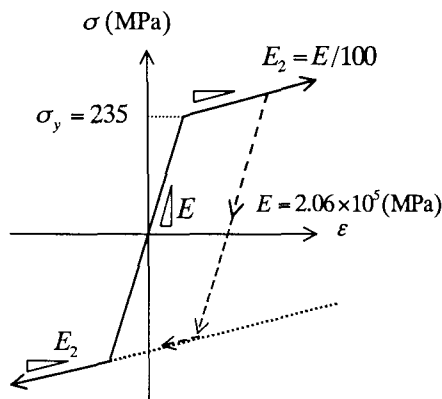


図-18 一軸真応力-対数ひずみ関係

わみをフランジパネル中央($z=0$)の欠損溝底面について図-19, 20 に示している. 図-19 より, 欠損率 β_f の増加にともない, 圧縮および引張りの残留応力は増加しており, 引張残留応力領域の一部には塑性化が生じていることが分かる. また, 図-20 より, 残留たわみも腐食欠損率の増加にともない大きくなるが, その変化量は腐食前 ($\beta_f = 0$) の状態における残留たわみの値に比べて小さい. 以上の傾向は前章の実験結果と類似している.

4. 3 耐力解析

腐食欠損過程を考慮した解析により残留応力と残留たわみの変化を $\beta_f = 0.0, 0.25, 0.50, 0.75$ の 4 ケースについて計算した後に, 箱形断面柱に軸圧縮力が作用した場合の耐力解析を実施する. 軸圧縮力の載荷方法は図-16 に示すように端部に剛体載荷辺を設け, この載荷辺の z 方向変位 δ を変位制御するものである. 剛体載荷辺の反力を軸圧縮力 P として評価する. なお, この剛体載荷辺では板中心の x および y 軸方向の並進変位成分とフランジ端部の y, z 軸周りの回転成分およびウェブ端部の x, z 軸周りの回転成分を拘束している.

ここでは提案した厳密な解析法以外に 2 種類の近似的

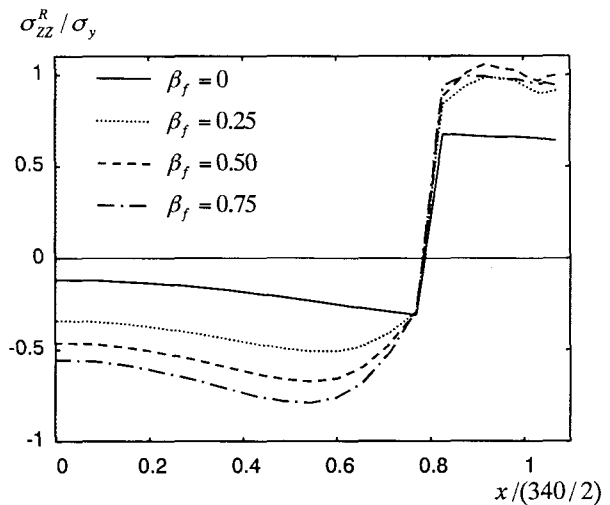


図-19 $z=0$ におけるフランジの z 軸方向残留応力 σ_{zz}^R 分布

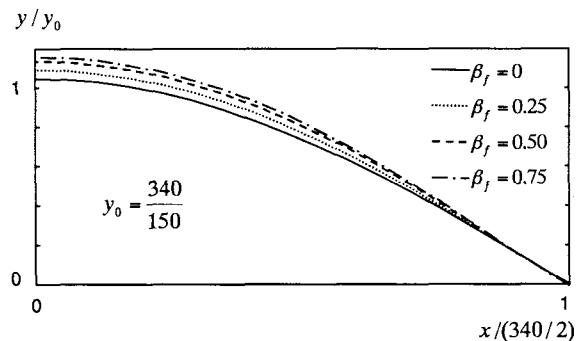


図-20 $z=0$ におけるフランジの残留たわみ

な解析法を用い, 体積欠損による残留応力・残留たわみの変化予測の差異が残存耐力の解析結果に与える影響を検討する. 用いた解析法を以下に示す.

- ① “厳密法”: 腐食による体積欠損過程を正確に考慮し, 厳密に残留応力・残留たわみの変化を計算する提案した解析法
- ② “体積欠損履歴を無視した近似手法”: 厳密法で腐食前の初期状態に用いる初期応力, 初期たわみと同じものを体積欠損したモデルに用い, 体積欠損の履歴を無視して 1 度のつり合い計算で残留応力・残留たわみを求める近似手法
- ③ “初期不整の変化を無視した手法”: 体積欠損による残留応力・残留たわみの変化を無視し腐食前の値を体積欠損したモデルに仮想外力法¹⁹⁾で導入する方法

② “体積欠損履歴を無視した近似手法”, ③ “初期不整の変化を無視した手法”では① “厳密法”と同じレベルでの比較を行うため一貫して 8 節点線形アイソパラメトリック固体要素を用いた非線形解析を ABAQUS により実施する. なお, ②, ③の解析法では①の解析法のような独自の要素を用いる必要がないので一般の汎用プログラムでも計算が可能である.

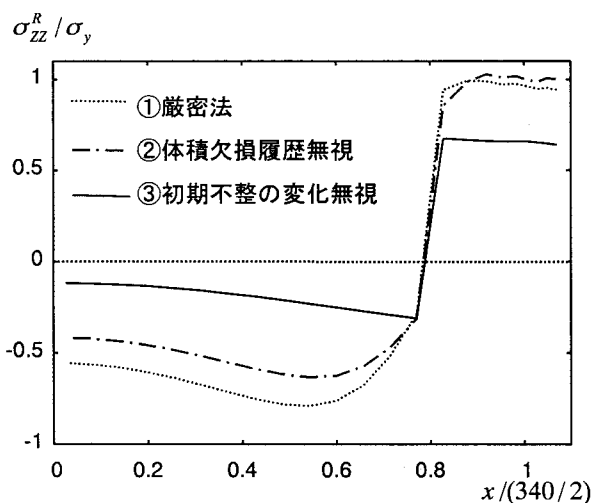


図-21 $z=0$ におけるフランジの z 軸方向残留応力 σ_{zz}^R 分布 ($\beta_f = 0.75$)

3種類の解析結果を比較する形で図-21には $\beta_f = 0.75$ の場合のフランジパネル中央($z=0$)外面における z 軸方向残留応力分布を示す。①“厳密法”と③“初期不整の変化を無視した手法”の結果を比較すると厳密法では残留応力の圧縮部分ならびに引張り部分はいずれも大きく増加しており、引張り部分では塑性化が生じている。一方、②“体積欠損履歴を無視した近似手法”による結果は①“厳密法”と比較して残留応力の引張り部分はほぼ同等で塑性化が生じているが圧縮部分ではやや低く評価される。腐食欠損過程において材料学的非線形性や幾何学非線形性の影響がなければ、①“厳密法”と②“体積欠損履歴を無視した近似手法”の結果は一致する。しかしながら、本モデルでは腐食による体積欠損過程において引張残留応力が作用している箇所の一部が降伏し、残留応力の再配分過程に経路依存性が生じたため、両者の結果に差が生じたものと考えられる。なお、残留たわみは図-20に示すように腐食欠損による変化量自体が小さく、さらに3種類の解析法による残留たわみの差も小さかったため、ここでは残留たわみの結果については省略する。

3種類の解析法で評価された体積欠損により変化した残留応力と残留たわみをもつ箱形断面短柱の耐力解析結果として図-22に荷重-変位曲線を示す。この図における P_y および δ_y はそれぞれ $\beta_f = 0$ の場合の初期降伏軸力、初期降伏軸方向変位を表す。この図より、③“初期不整の変化を無視した手法”の場合、いずれの腐食欠損率においても①“厳密法”の最大荷重よりも高くなり、 $\beta_f = 0.75$ の場合には、約5%程度の差が生じている。また、荷重上昇域における軸方向剛性が高いことも分かる。さらに、 $\beta_f = 0.25$ の場合には、後座屈領域において①“厳密法”と異なっており、荷重の低下傾向が少ない。この差が生じる原因は次のように説明できる。③“初期不整の変化を無視した手法”では、図-21に示したよ

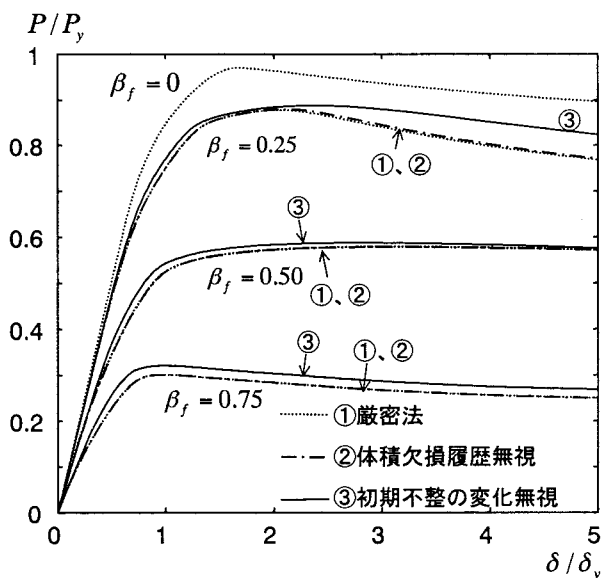


図-22 軸圧縮荷重-軸圧縮方向変位の関係

うな腐食欠損に特有の現象である腐食部分近傍の圧縮残留応力の上昇を無視しているため、圧縮力を受けたときの塑性化の進展が“厳密法”と異なる。その結果、①“厳密法”では座屈モードがフランジでは外側に凸、ウェブでは内側に凹となるのに対し、③“初期不整の変化を無視した手法”ではフランジ、ウェブともに内側に凹となることによる。なお、 $\beta_f = 0$ の場合には、フランジでは外側に凸、ウェブでは内側に凹の座屈モードとなる。また、 $\beta_f = 0.50, 0.75$ の場合には、いずれの解析手法によってもフランジ、ウェブともに内側に凹の座屈モードとなり、後座屈領域における荷重-変位曲線の差は $\beta_f = 0.25$ の場合よりも小さくなる。以上のように局部腐食欠損による幾何形状の変化のみを考慮し残留応力や残留たわみの変化を無視すると溶接鋼箱型断面短柱の終局性能を危険側に評価する可能性がある。

一方、②“体積欠損履歴を無視した近似手法”による結果は腐食欠損率の大小にかかわらず、①“厳密法”と荷重-変位曲線の差はほとんどなく、耐力特性はほぼ一致している。これより、②“体積欠損履歴を無視した近似手法”は腐食による残留応力の変化自体を正確に捉えるには必ずしも十分な手法ではないが、耐力解析において用いる体積欠損による初期不整の変化を予測する手法としては実用的で有効な手法であると考えられる。

5. まとめ

鋼の腐食などによる体積欠損では構造物の幾何形状が変化するが、これにより構造物内に内在している溶接などによる残留応力や残留たわみの値も変化し構造物の力学性能に影響を与える。本論文では、このような現象を定量的に評価するために、まず、これまでに著者らが提示した体積欠損過程を正確に考慮しうる構造解析手法の

適用性を実験により検証した。実験では溶接鋼箱型断面短柱の表面に局部腐食欠損を模擬した溝を機械切削して残留応力および残留たわみの変化を実測するとともに解析法の妥当性について検証した。つぎに、提案した解析手法を用いて腐食による初期不整の変化が溶接鋼箱型断面短柱の耐荷特性に与える影響について検討した。ここでは、体積欠損による残留応力や残留たわみの変化を予測するための他の近似手法も提示しその適用性についても調べた。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 溶接鋼箱型断面部材の軸直角方向に溝状の局部体積欠損が生じた場合、溝底において圧縮残留応力ならびに引張り残留応力はいずれも増加し、大きく変化することが実験により観察された。
- (2) 提示した体積欠損による幾何形状変化を時系列的に考慮する構造解析法を用いれば体積欠損により変化した残留応力や残留たわみを直接的かつ正確に求めることができることが実験により確認された。
- (3) 腐食による体積欠損量と腐食前の初期状態での残留応力・残留たわみが既知であれば本解析法により体積欠損時の残留応力・残留たわみの変化量を予測することが可能である。一般に腐食前の初期不整量については計測例も多く、代表的な構造要素については残留応力や残留たわみの分布モデルも示されているので、体積欠損量のみ測定によって初期不整量の変化の影響を力学性能評価に容易に反映しうる。
- (4) 溶接鋼箱型断面短柱の検討例から局部腐食欠損による残留応力・残留たわみの変化はこれを無視した場合に比べ、その耐力の低下やピーク以降の耐力劣化をもたらす可能性がある。
- (5) 腐食欠損過程において残留応力による塑性化が生じ経路依存性の問題があれば著者らの提示した“厳密法”を用いる必要がある。塑性化が生じなければ、“厳密法”で腐食前の初期状態で用いる初期応力、初期たわみと同じものを体積欠損したモデルに導入し、体積欠損の履歴を無視して1度のつり合い計算で残留応力・残留たわみを求める“体積欠損履歴を無視した近似手法”で残留応力の変化を評価できる。
- (6) 溶接箱形短柱の計算例より、体積欠損により残留応力で塑性化が生じる場合においても、体積欠損履歴を無視した“近似手法”で予測された残留応力を用いる耐荷力解析結果は“厳密法”による結果とほぼ一致する。

本研究の一部は科学研究費補助金・萌芽研究（課題番号 16656136 代表：後藤芳顕）の補助を受けたこと、X線応力測定についてはトピー工業の藤原英之氏の協力を得たことを記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Vo Thanh Hung, 永澤洋, 佐々木栄一, 市川篤司, 名

取暢：腐食が原因で取り替えられた実鋼橋支点部の載荷実験および解析, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.141-151, 2002.

- 2) 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.
- 3) 海田辰将, 藤井堅, 原考志, 中村秀治, 上野谷実：腐食鋼板のせん断耐力とその評価法, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.121-130, 2004.
- 4) 森猛, 渡邊一, 花井資之：腐食した鋼板の表面形状シミュレーションと腐食鋼桁の曲げ耐力, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.675-686, 2003.
- 5) 日本鋼構造協会：既設鋼橋部材の耐力・耐久性診断と補修・補強に関する資料集, JSSC テクニカルレポート, No.51, 2002.
- 6) Jack, R. Kayser and Andrej S. Nowak : Capacity loss due to corrosion in steel-girder bridges, *Journal of Structural Engineering*, Vol.115, No.6, June 1989.
- 7) 村上茂之, 西村宣男, 亀井義典：腐食被害を受けた周辺支持板および自由突出板の圧縮耐荷力特性, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, I-61, 1992.
- 8) 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, 2001.
- 9) 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.
- 10) Yoshiaki Goto and Naoki Kawanishi : Analysis to predict long-term mechanical performance of steel structures with histories of corrosion and repair, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.130, No.3, pp.1578-1585, 2004.
- 11) ABAQUS Theory Manual Ver.5.8, HKS, 1998.
- 12) ABAQUS/Standard User's Manual Ver.5.8, HKS, 1998.
- 13) 渡辺理：ひずみゲージとその応用, 日刊工業新聞社, 1977.
- 14) 川西直樹, 後藤芳顕：鋼構造物の有限要素法解析における残留応力と初期たわみの導入方法について, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.137-148, 1999.
- 15) 土木学会：座屈設計ガイドライン, 1987.
- 16) 新井実：切りくず処理の基礎と応用, 日刊工業新聞社, 1990.
- 17) 須藤一：残留応力とゆがみ, 内田老鶴圃, 1994.
- 18) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, I 共通編, II 鋼橋編, 1996.
- 19) 小松定夫, 北田俊行, 宮崎清司：残留応力および初期たわみを有する圧縮板の弾塑性解析, 土木学会論文報告集, No.244, pp.1-14, 1975.

(2004年9月17日受付)