

# 腐食過程の応力再分配を考慮した鋼板の残存終局強度

明石工業高等専門学校 三好 崇夫

**概要** 鋼構造物の腐食はその架け替えや更新の大きな要因である。架け替え、更新の要否は腐食損傷を有する構造物の残存終局強度に基づいて合理的に行うべきである。有限要素解析法はそのための有力なツールの一つである。著者らは、腐食進行下の鋼板にもたらされる力学挙動とともにその残存終局強度を精度よく把握するため、鋼板に対する新たな有限要素解析法を既に提案している。この手法は腐食進行下の初期不整の変化を考慮できるものである。本研究では同解析法の妥当性を検証するために実施した実験結果と同解析法による数値解析結果を比較することによって、同解析法の妥当性を検証した。また、腐食過程の力学挙動が鋼板の終局強度に与える影響についても明らかとした。

**キーワード**：腐食，残存終局強度，応力再分配，有限要素法

## 1. はじめに

既設鋼橋の主たる劣化要因として腐食損傷が挙げられ、鋼橋の架け替え理由の大きな要因であることが報告されている<sup>1)</sup>。今後、高度経済成長長期に建設された多くの鋼橋が高齢化を迎えるなかで、補修・補強に対する需要が増大することが考えられ、補修・補強の要否を合理的に判断する技術の確立が求められている。

鋼橋をはじめとして、腐食損傷を有する鋼構造物の力学性能の評価において、残存終局強度は客観的かつ有効な指標であり、例えば文献 2)~6)など、これまでに有限要素法を用いて腐食損傷を有する鋼部材の残存終局強度の予測が盛んに行われている。これらの多くは腐食による板厚欠損を単に幾何学的な形状の変化としてとらえ、腐食後の形状を初期状態としてモデル化することによって、残存終局強度の評価を行っている。しかしながら、腐食進行に伴う板厚欠損過程で、鋼部材に内在する応力が開放されることにより、応力の再分配や、それに付随した変形等の力学的変化が生じることになる。これらの変化量が大きい場合、残存終局強度の予測精度を低下させることが懸念される。また、長大橋などの死荷重比率の高い鋼部材に対して、より高精度に腐食鋼板の残存終局強度を評価するためには、板厚欠損過程で生ずる応力再分配に及ぼす死荷重の影響も考慮する必要があると考えられえ。後藤らはこれらの点に着目し、ソリッド要素やはり要素を用いて板厚

欠損過程でもたらされる残留応力の再分配や残留たわみの変化を考慮できる有限要素解析法を提案している<sup>4-6)</sup>。ソリッド要素を用いることにより、複雑な腐食形状を表現できるが、一方で、板厚方向に多くの要素分割が必要となり計算効率の悪化が懸念される。そこで、著者らはこれまでに、シェル要素を用いて板厚欠損過程を考慮できる有限要素解析法を提案している<sup>7,8)</sup>。本論文では、まず、提案した解析法の概要、そして本解析法の妥当性を検証するために実施した溶接製作鋼H形断面短柱試験体を用いた実験の概要と結果について述べる。次に、実験結果とその本解析法による解析結果を比較することにより、本解析法の妥当性を検証する。また、死荷重用下で進行する腐食が、板厚欠損後の残存終局強度や力学的挙動に及ぼす影響を把握するため、死荷重に対応する一定の大きさの圧縮力作用下において板厚欠損が生じる周辺単純支持板を例題として設定し数値解析を行った。(以降、死荷重に相当する圧縮力を「一定圧縮力」と称する。)ここでは、最初にソリッド要素を用いた解体計算手法による解析結果との比較によって本解析法の妥当性を示してから、本解析法により、一定圧縮力下における板厚欠損過程を考慮するケースと、無載荷状態における板厚欠損過程を考慮するケースの数値解析を実施して、一定圧縮力の影響を把握した。さらに、腐食鋼板の残存終局強度の推定に従来から多用されている、板厚欠損過程における応力再分配を無視する有限要素解析法

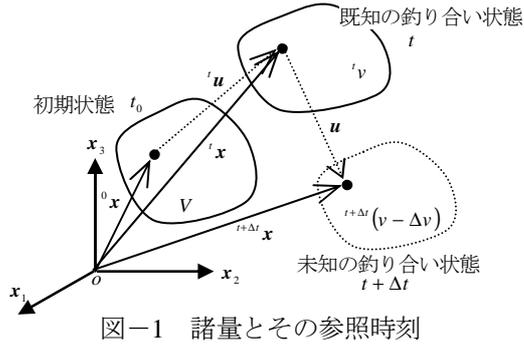


図-1 諸量とその参照時刻

(以下では、従来法と称することにする。)による数値解析を実施し、板厚欠損に伴う力学的挙動が腐食後の圧縮挙動や残存終局強度に及ぼす影響についても示した。

## 2. 数値計算法の概要

本研究では、板厚欠損過程で鋼板にもたらされる応力再分配や変形等の力学的挙動を追跡するため、8節点アイソパラメトリックシェル要素を用いて、腐食に伴う板厚欠損を要素の板厚を減少させることによって表現し、欠損部に内在していた残留応力を開放力として残存部に負荷する解析法を提案している<sup>7),8)</sup>。本章ではその概要の説明にとどめ、詳細については文献7),8)を参照されたい。なお、本有限要素解析法では、幾何学的非線形問題を考慮するため、更新Lagrange法によって定式化し、弾塑性問題に対応するため、Von Misesの降伏条件式、等方硬化則および連合流れ則を用いている。

### 2.1 仮想仕事式の離散化

図-1に示すように、初期状態を時刻 $t_0$ 、既知の釣り合い状態を時刻 $t$ 、また時刻 $t$ から体積が変化することによる新たな釣り合い状態を時刻 $t+\Delta t$ とする。以下では、諸量の左下符号は参照する時刻、左肩符号はその諸量を生じる時刻、右肩()内は反復回数を表すものとする。ここで、時刻 $t$ における板厚欠損量を $\Delta v$ 、板厚欠損領域の表面積を $\Delta s$ としたとき、時刻 $t$ を基準とした時刻 $t+\Delta t$ における一般的な連続体に対する仮想仕事式は次式で与えられる。

$$\int_{(v-\Delta v)}^{t+\Delta t} \mathbf{S} : \delta \mathbf{e}^{t+\Delta t} \mathbf{E} dv \quad (1)$$

$$= \int_{(s-\Delta s)}^{t+\Delta t} \bar{\mathbf{t}} \cdot \delta \mathbf{u} ds + \int_{(v-\Delta v)}^{t+\Delta t} \rho \bar{\mathbf{g}} \cdot \delta \mathbf{u} dv$$

ここに、 $\mathbf{S}$  : 第2種 Piola-Kirchhoff 応力テンソル、 $\mathbf{E}$  : Green-Lagrange ひずみテンソル、 $\bar{\mathbf{t}}$  : 表面力ベクトル、 $\rho \bar{\mathbf{g}}$  : 物体力ベクトル、 $\delta \mathbf{u}$  : 仮想変位ベクトルである。

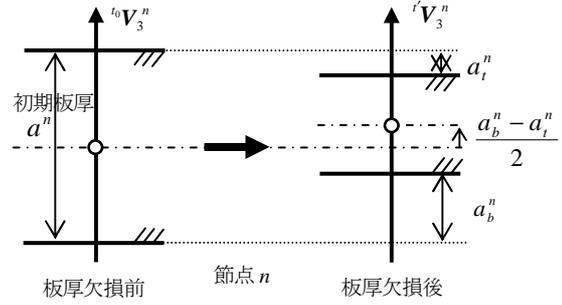


図-2 節点における板厚減少量の定義

式(1)を有限要素式に離散化し、力のつりあいに関する反復計算にNewton-Raphson法を用いると、時刻 $t$ から時刻 $t+\Delta t$ 間の反復 $r$ 回目における各要素に対する接線剛性方程式は以下のように表される。

$$\begin{cases} {}^{t+\Delta t} \mathbf{R}^{(r-1)} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{F} - {}^{t+\Delta t} \mathbf{H}^{(r-1)} \\ {}^{t+\Delta t} \mathbf{K}^{(r-1)} \Delta \mathbf{U}^{(r)} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{R}^{(r-1)} \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 $\mathbf{R}$  : 不平衡力ベクトル、 $\mathbf{F}$  : 外力ベクトル、 $\mathbf{H}$  : 内力ベクトル、 $\mathbf{K}$  : 要素接線剛性マトリクス、 $\Delta \mathbf{U}^{(r)}$  : 反復計算過程の増分変位ベクトルである。

### 2.2 板厚欠損パラメータ

本解析法では各要素の板厚欠損量を制御するパラメータを用いて、板厚欠損過程を考慮する。図-2に示すように、節点 $n$ におけるシェル要素の板厚方向上下面での板厚減少量 $a_t^n$ 、 $a_b^n$ を用いて、板厚欠損パラメータとして次式を定義した。

$$\lambda_A = \frac{a_b^n + a_t^n}{a^n} \quad (0 \leq \lambda_A < 1) \quad (3)$$

$$\lambda_B = \frac{a_b^n - a_t^n}{a^n} \quad (-\lambda_A \leq \lambda_B \leq \lambda_A) \quad (4)$$

ここに、 $\lambda_A$  : 板厚欠損率、 $\lambda_B$  : 板厚減少量の上下面非対称率である。即ち、 $\lambda_B$ は上下面からの板厚欠損量を制御するパラメータであり、各節点の板厚が上下非対称に減厚した場合、シェル要素では節点在中立面に位置する必要があることから、各節点は板厚方向に移動し、図-3に示すように隣接要素と共有する同一節間にずれが生じるが、全体構造系からみた場合、隣接要素が共有する節点の座標値は同値でなければならない。そこで、以下に示すように、増分変位ベクトルと不平衡力ベクトルについて、移動後の要素節点から基準とする全体構造節点への変換関係式を導き、要素節点に関する要素接線剛性方程式を基準とする全体構造節点に関する要素接線剛性方程式に変換することによって、この影響を考慮する。なお、板厚方向への移動前後の節点 $n$ を区別するため、以下では、要素節点の増分変位ベクトル、

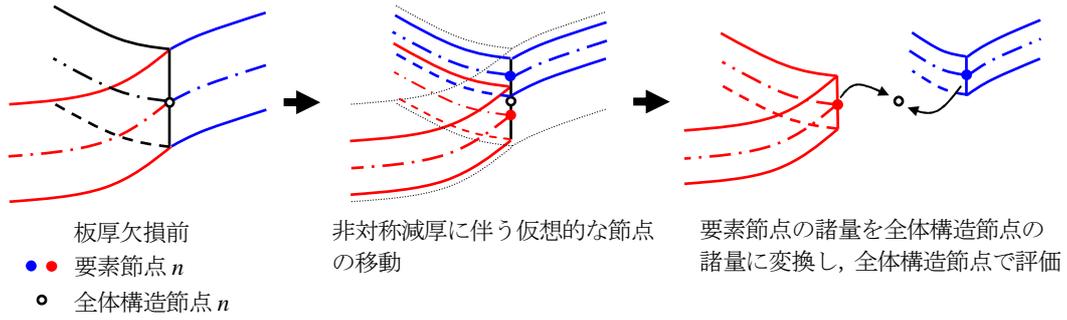


図-3 非対称減厚による節点間のずれ

不平衡力ベクトルには『 $\hat{\cdot}$ 』を付して表す。

反復  $r$  回目における直前の反復点を基準とした全体構造節点  $n$  の増分変位ベクトル  $\Delta \mathbf{U}^{n(r)}$  と要素節点  $n$  の増分変位ベクトル  $\Delta \hat{\mathbf{U}}^{n(r)}$  の間には変換マトリクス  ${}^{t+\Delta} \mathbf{L}_U^{n(r-1)}$  を用いて、以下の関係が成り立つ。

$$\Delta \mathbf{U}^{n(r)} = {}^{t+\Delta} \mathbf{L}_U^{n(r-1)} \Delta \hat{\mathbf{U}}^{n(r)} \quad (5)$$

さらに、反復  $(r-1)$  回目の全体構造節点の不平衡力ベクトル  ${}^{t+\Delta} \mathbf{R}^{n(r-1)}$  と要素節点の不平衡力ベクトル  ${}^{t+\Delta} \hat{\mathbf{R}}^{n(r-1)}$  の間には変換マトリクス  ${}^{t+\Delta} \mathbf{L}_F^{n(r-1)}$  を用いて以下の関係が成り立つ。

$${}^{t+\Delta} \mathbf{R}^{n(r-1)} = {}^{t+\Delta} \mathbf{L}_F^{n(r-1)} {}^{t+\Delta} \hat{\mathbf{R}}^{n(r-1)} \quad (6)$$

なお、式(5)の  ${}^{t+\Delta} \mathbf{L}_U^{n(r-1)}$  と式(6)の  ${}^{t+\Delta} \mathbf{L}_F^{n(r-1)}$  の間には次のような関係がある。

$$\left( {}^{t+\Delta} \mathbf{L}_U^{n(r-1)} \right)^T = \left( {}^{t+\Delta} \mathbf{L}_F^{n(r-1)} \right)^{-1} \quad (7)$$

要素節点で記述した要素接線剛性方程式は以下のように表される。

$${}^{t+\Delta} \hat{\mathbf{K}}^{n(r-1)} \Delta \hat{\mathbf{U}}^{n(r)} = {}^{t+\Delta} \hat{\mathbf{R}}^{n(r-1)} \quad (8)$$

式(8)に式(5)、(6)を代入すると、全体構造節点における要素接線剛性方程式は次のように表わせる。

$${}^{t+\Delta} \mathbf{L}_F^{n(r-1)} {}^{t+\Delta} \hat{\mathbf{K}}^{n(r-1)} {}^{t+\Delta} \mathbf{L}_U^{n(r-1)} \Delta \mathbf{U}^{n(r)} = {}^{t+\Delta} \mathbf{R}^{n(r-1)} \quad (9)$$

以上のように、非対称減厚により同一節点にずれが生じる場合は、式(9)のように要素に対する接線剛性方程式を立て、これを全体系にアセンブリすることで、要素節点における増分変位ベクトルが求められる。

### 2. 3 内力の算定

図-4に板厚欠損過程での Newton-Raphson 法による収束計算の概念図を示す。本解析法では、板厚欠損前の状態である既知のつりあい状態  $t$  から、板厚欠損により欠損部に作用していた応力による内力、

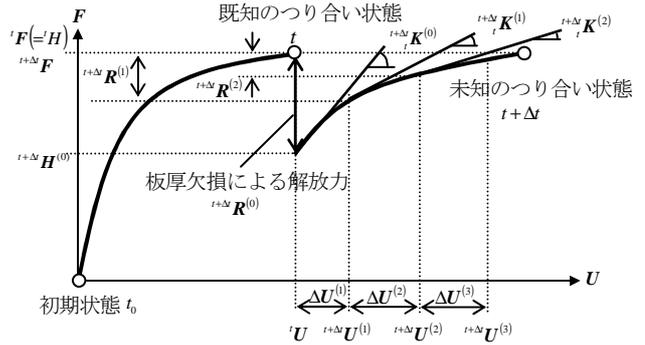


図-4 Newton-Raphson 法による収束計算

すなわち開放力を残存部に負荷し、不平衡力がある許容値以内に収まるまで収束計算を繰り返す。以下では、その不平衡力の算出に必要な板厚欠損後の内力の算定方法について述べる。

内力  ${}^{t+\Delta} \mathbf{H}^{(r-1)}$  は直前の収束点における Cauchy 応力テンソルをベクトル表示した  $\mathbf{T}$  と、変位とひずみを関係づけるマトリクス  $\mathbf{B}_L$  を用いて、次式で表すことができる。

$${}^{t+\Delta} \mathbf{H}^{(r-1)} = \int_{[{}^{t+\Delta} V_c^{(r-1)} - {}^{t+\Delta} V_e^{(r-1)}]} {}^{t+\Delta} \mathbf{B}_L^{(r-1)T} {}^{t+\Delta} \mathbf{T}^{(r-1)} dV \quad (10)_1$$

反復  $r=1$  回目と、反復  $r=2$  回目以降では式(10)の第 1 式で示した内力  ${}^{t+\Delta} \mathbf{H}^{(r-1)}$  の算定方法が異なるため、以下では各反復回数での計算方法を示す。

反復  $r=1$  回目において式(10)の第 1 式より内力  ${}^{t+\Delta} \mathbf{H}^{(0)}$  は次式から求められる。

$${}^{t+\Delta} \mathbf{H}^{(0)} = \int_{[{}^{t+\Delta} V_c^{(0)} - {}^{t+\Delta} V_e^{(0)}]} ({}^t \mathbf{B}_L^T {}^t \mathbf{T}) dV \quad (10)_2$$

ただし、 ${}^{t+\Delta} \mathbf{B}_L^{(0)} = {}^t \mathbf{B}_L$ 、 ${}^{t+\Delta} \mathbf{T}^{(0)} = {}^t \mathbf{T}$  である。

ここで、 ${}^t \mathbf{T}$ 、 ${}^t \mathbf{B}_L$  はいずれも板厚欠損後の積分点の位置における値として評価するが、板厚欠損前後で積分点位置が変化するため、既知である板厚欠損前の  ${}^t \mathbf{T}$ 、 ${}^t \mathbf{B}_L$  を用いて、これらを板厚欠損後の積分点位置での値に計算し直す。板厚欠損後の積分点位置における  ${}^t \mathbf{B}_L$  は容易に求めることができるが、非線形解析において、任意点における Cauchy 応力を厳密

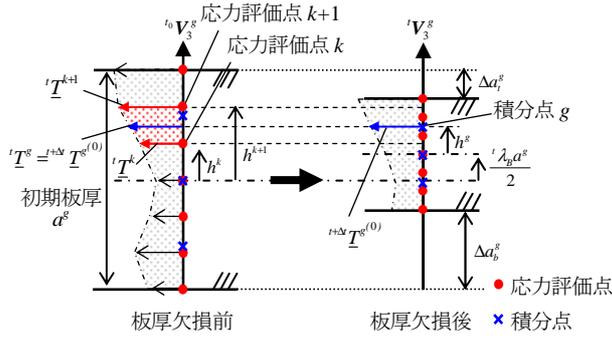


図-5 板厚欠損に伴う応力の補間方法

に求めることは困難であるため、板厚欠損後の積分点位置の Cauchy 応力を板厚欠損前に既知であった Cauchy 応力成分から線形補間により内挿する。この際、補間の精度を上げるため、積分点とは別に応力評価点を設け、板厚欠損前の応力評価点における Cauchy 応力の値を用いることで、板厚欠損後の積分点と応力評価点での Cauchy 応力を求める。なお、応力評価点は、面内方向に積分点と同じ座標値を有し、面外方向には任意の座標値を有する。応力の補間方法を概略的に図-5 に示す。板厚欠損後のシェル中央面から積分点  $g$  までの距離  $h^g$  は、式(3)の体積欠損パラメータ  $\lambda_a$  を用いて次のように表わされる。

$$h^g = \frac{r_3^g}{2} (1 - \lambda_a) a^g \quad (11)$$

ここに、 $r_3^g$  : 積分点  $g$  の板厚方向の座標値、 $a^g$  : 積分点位置における初期板厚である。

板厚欠損前の応力評価点  $k, k+1$  における Cauchy 応力をそれぞれ  $\mathbf{T}^k, \mathbf{T}^{k+1}$  とすると、板厚欠損後の積分点  $g$  における Cauchy 応力  $\mathbf{T}^g$  は、式(11)で求めた中立面から積分点までの距離  $h^g$  を用いて、次式の線形補間式で求めることができる。

$$\mathbf{T}^g = \mathbf{T}^k + \frac{\mathbf{T}^{k+1} - \mathbf{T}^k}{h^{k+1} - h^k} \cdot \left( h^k + \frac{\lambda_B a^g}{2} - h^g \right) \quad (12)$$

ここに、それぞれ  $h^k, h^{k+1}$  は板厚欠損前のシェル中央面から応力評価点  $k, k+1$  までの距離であり、次式で表わされる。

$$h^k = \frac{r_3^k}{2} a^g, \quad h^{k+1} = \frac{r_3^{k+1}}{2} a^g \quad (13)$$

また、 $r_3^k, r_3^{k+1}$  : 応力評価点  $k, k+1$  の板厚方向の座標値である。なお、 $\frac{\lambda_B a^g}{2}$  は上下面非対称に伴うシェル中立面の板厚方向の移動量を表わしている。

同様に、板厚欠損後の応力評価点における

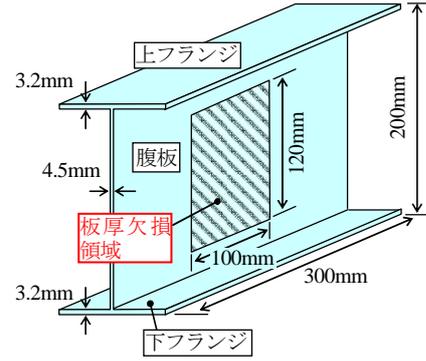


図-6 試験体の形状と板厚欠損導入領域

Cauchy 応力も欠損前の応力評価点における Cauchy 応力から線形補間によって求めることができる。

式(12)より求めた Cauchy 応力を式(10)の第 2 式に用いることで、板厚欠損直後の反復  $r=1$  回目内力  ${}^{r+\Delta r} \mathbf{H}^{(0)}$ 、反復  $r-1$  回目で求めた Cauchy 応力  ${}^{r+\Delta r} \mathbf{T}^{(r-1)}$  を直接用いることで、反復回数  $r=2$  回目以降の内力  ${}^{r+\Delta r} \mathbf{H}^{(r-1)}$  が算出できる。

### 3. 実験結果による数値計算法の検証

溶接製作鋼 H 形短柱の腹板に腐食を模擬した板厚欠損を導入し、その過程で試験体にもたらされる残留応力の分配挙動を把握する。また板厚欠損後の試験体を用いて圧縮載荷試験を行い、圧縮挙動や残存終局強度を把握する。本章では実験の概要と結果および実験による解析法の検証について述べる。

#### 3.1 実験の概要

試験体の選定に当たり、極力少ない板厚の減少量を導入して、板厚欠損に伴う影響が現れるようにするため、図-6 に示す寸法緒元を有する薄肉 H 形鋼短柱試験体を用いた。本試験体の腹板とフランジは抵抗溶接により接合されている。また、試験体の両端には圧縮載荷のため、載荷板を脚長 4mm のすみ肉溶接で接合した。材料試験は腹板、上下フランジそれぞれ 3 体ずつ引張試験片を採取して実施した。材料試験結果の平均値を表-1 に示す。表-1 からこの試験体は SM400 相当の機械的性質を有するものであることが分かる。本研究では板厚欠損過程の残留応力の分配挙動と、その後の圧縮挙動や残存終局強度を把握するため、表-2 に示す 4 つの実験ケースを設定した。このうち、腐食前の健全な鋼部材を想定した Type-ARN と、腐食後の鋼部材を想定した Type-AR0 の残留応力の計測結果を比較することにより、板厚欠損過程での残留応力の分配挙動を把握できる。なお、残留応力は切断法によって計測する

表-1 材料試験結果

	弾性係数 $E$ (GPa)	降伏応力 $\sigma_y$ (MPa)	引張強度 $\sigma_T$ (MPa)
上フランジ	208	279	428
下フランジ	201	274	419
腹板	202	317	465

表-2 実験ケース

実験ケース名	板厚欠損	試験項目
Type-AN	なし	圧縮載荷
Type-A0	あり	圧縮載荷
Type-ARN	なし	残留応力
Type-AR0	あり	残留応力

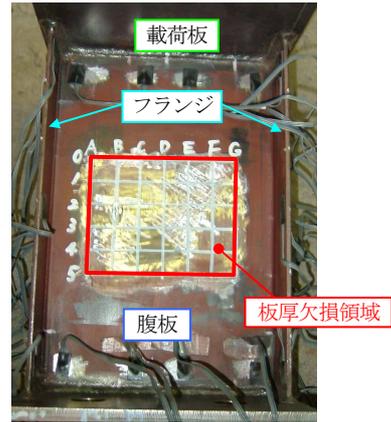


写真-1 板厚欠損の導入状況

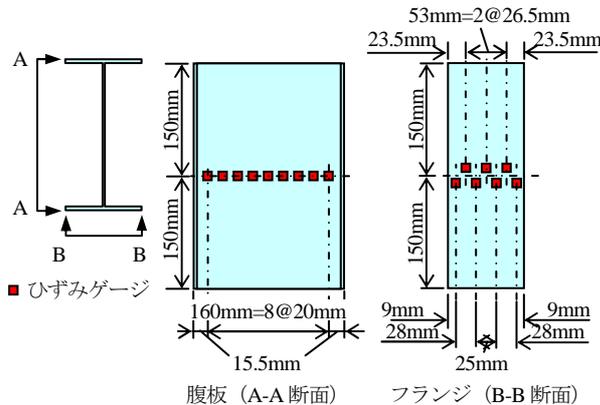


図-7 Type-ARNの残留応力計測箇所

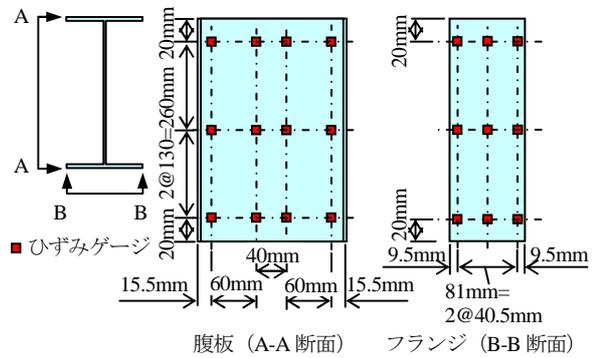


図-8 Type-AR0の残留応力計測箇所

ため、Type-AR0の初期状態の残留応力分布はType-ARNで計測した残留応力分布と同じであるものと仮定する。また、腐食前を想定したType-ANと、腐食後を想定したType-A0を比較することで、板厚欠損が残存終局強度や圧縮挙動に及ぼす影響を把握できる。

板厚欠損は図-6に示した領域の板厚が初期板厚の1/2に達するまで研削加工によって片面から導入した。なお、板厚欠損は無載荷状態で導入した。板厚欠損の導入状況を写真-1に示す。また、板厚欠損導入量は超音波厚さ計を用いて、板厚欠損領域内の板厚を20mm間隔で計測することで管理した。

Type-ANとType-A0の圧縮載荷試験は、200tf万能試験機を使用して中心圧縮の平押しにより実施した。残留応力はType-ARN、Type-AR0のそれぞれ図-7、図-8に示す位置の両面にひずみゲージを貼付して計測した。圧縮載荷試験では変位計を図-9に示す位置に設置して、軸方向変位、面外変位を計測した。

### 3. 2 実験結果

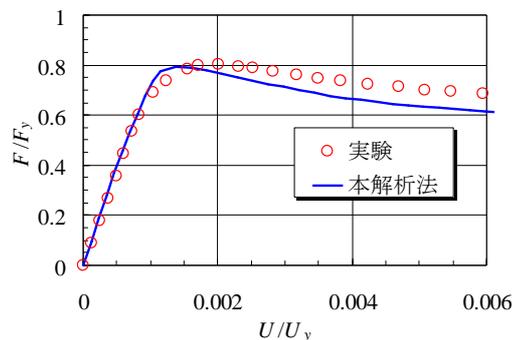
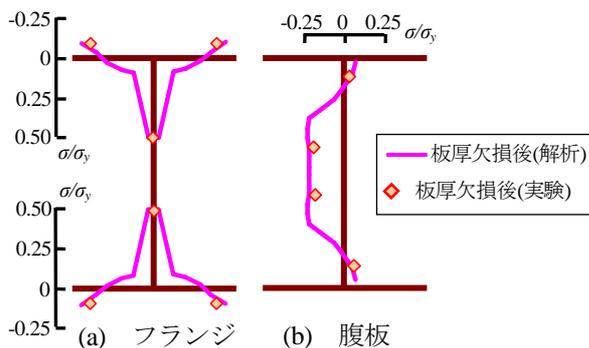
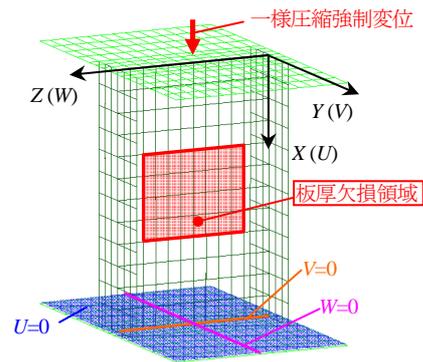
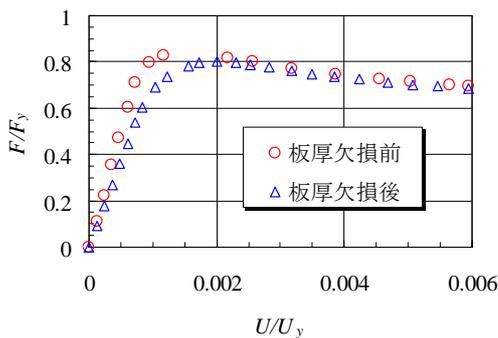
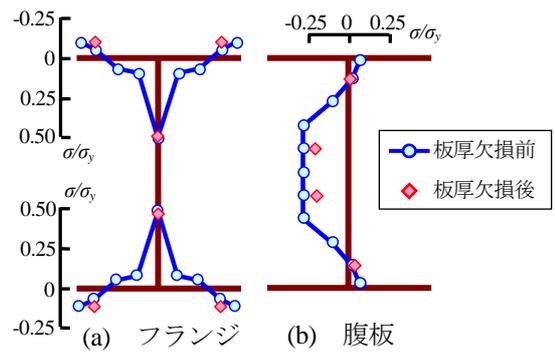
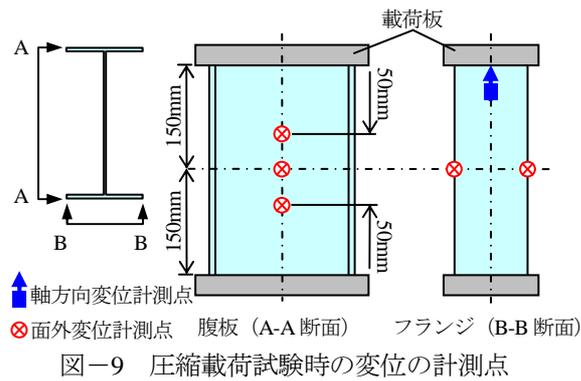
#### 3. 2. 1 板厚欠損による残留応力の分配挙動

板厚欠損前後の試験体軸方向端部における残留応

力分布を図-10に示す。同図中の板厚欠損前がType-ARN、板厚欠損後がType-AR0の計測値を示している。なお、目盛の $\sigma$ は軸方向の残留応力であり、降伏応力 $\sigma_y$ で無次元化している。図-10(a)より、板厚欠損による残留応力の変化は僅かであるが、フランジの残留応力分布は圧縮側へ変化し、図-10(b)の腹板の残留応力分布は、逆に、引張側へと推移することが分かる。これは本実験では、圧縮残留応力が分布する領域を欠損させ、欠損部の圧縮残留応力が残存断面に分配されることにより、試験体が板厚欠損領域を中心に軸方向に収縮したことに伴い、フランジの残留応力分布が圧縮側へ推移したためと考えられる。一方で腹板は、試験体両端の載荷板がこの収縮変形を拘束する影響を強く受け、軸方向に引張られたため、残留応力分布が引張側に推移したものと考えられる。

#### 3. 2. 2 圧縮挙動と残存終局強度

圧縮載荷試験の結果として、荷重と軸方向変位の関係を図-11に示す。同図中、縦軸は荷重 $F$ を健全状態における降伏荷重 $F_y$ で無次元化し、横軸は変位 $U$ を降伏変位 $U_y$ で無次元化している。図-11より、



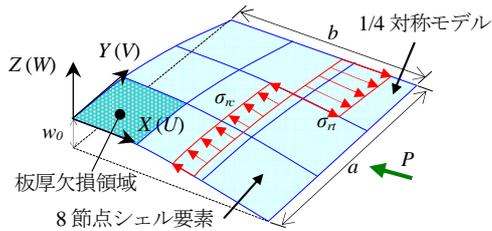
板厚欠損によって剛性が低下すること、僅かに残存終局強度が低下することが分かる。また、図-10 に示したように、板厚欠損に伴う残留応力の変化は極めて小さいため、板厚欠損後の残存終局強度に及ぼす影響は極僅かであると考えられる。

### 3.3 数値計算法の検証

実験結果を通じて提案した解析法の妥当性を検証するため、図-12 に示すように載荷板を含めて試験体をモデル化し、板厚欠損過程の残留応力分配挙動と圧縮試験を解析によって追跡した。板厚欠損は、図-12 に示すように実験と同様の領域を、要素の板厚を減少させる過程を設けて表現した。また、圧縮荷重は載荷板に一樣な圧縮変位を与えて考慮した。

応力-ひずみ関係は腹板、フランジそれぞれに対して材料試験より得られた応力-ひずみ曲線をマルチリニア型構成式でモデル化した。残留応力は Type-ARN の計測値を用い、初期たわみは各実験ケースの計測値を導入した。

試験体軸方向端部における板厚欠損前後の残留応力分布の実験結果を解析結果と比較して図-13 に示すが、両者は良好に一致していることが分かる。次に、板厚欠損後の試験体に対する荷重-軸方向変位の関係の実験結果を解析結果と比較して図-14 に示す。図-14 から、荷重-変位関係は、終局点直前までは、実験と解析とで概ね一致するものの、その後、実験は本解析結果に比べて剛性が低下して緩やかに



$a=b=240\text{mm}$ , 初期板厚  $t_0=10\text{mm}$ , 圧縮力  $P=280\text{kN}$   
 弾性係数  $E=200580\text{MPa}$ , ポアソン比  $\nu=0.316$ ,  
 初期降伏応力  $\sigma_{y0}=588\text{MPa}$ , ひずみ硬化係数  $H=0\text{GPa}$ ,  
 引張残留応力  $\sigma_n=396\text{MPa}$ , 圧縮残留応力  $\sigma_c=-192\text{MPa}$ ,  
 最大初期たわみ  $w_0=1.0\text{mm}$

図-15 周辺単純支持板の解析モデル

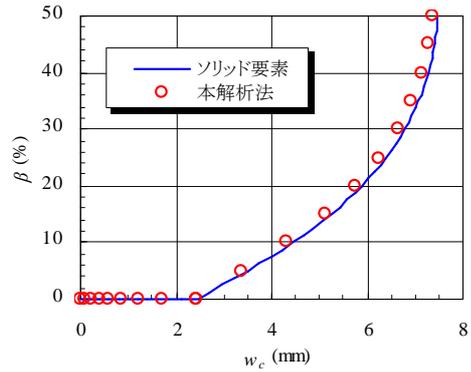


図-16 板厚減少率と板中央部の面外変位の関係

終局点に到達している。これは、解析に用いた構成式が必ずしも試験体の応力-ひずみ関係を厳密に表現できていないことに起因すると考えられる。しかしながら、両者間の差は僅かであり、本解析法の妥当性が示せたと考える。

#### 4. 解析法の相違が残存終局強度に及ぼす影響

長大橋梁などの死荷重比率の高い鋼部材に、死荷重作用下で板厚欠損が生じた後の残存終局強度に及ぼす死荷重の影響は明確にされていない。そこで、本研究では、一定圧縮力を受ける周辺単純支持板を取り上げ、まず考案した解析法の妥当性について、ソリッド要素を用いた解体計算の手法による解析結果と比較して示す。次に、本解析法を用いて一定圧縮力下で板厚欠損過程を考慮するケースと、無載荷状態で板厚欠損過程を考慮するケースの数値解析を実施し、両者の比較から、腐食進行下で作用する一定圧縮力が残存終局強度に及ぼす影響について示す。さらに、板厚欠損過程を無視する従来法による数値解析を実施し、板厚欠損過程の応力再分配を考慮する意義を明確にする。

##### 4.1 解析モデル

面内方向に降伏軸力  $P_Y$  の 2 割の一定圧縮力  $P_0$  の作用する周辺単純支持板を例として取り上げ、その 1/4 対称性を考慮して図-15 に示す解析モデルを設定した。ソリッド要素を用いた解析モデルも図-15 と同様に設定するが、板厚方向の要素分割数は 80 分割とした。また、著者らが提案した解析法では、板厚欠損は図-15 に示した領域の板厚を-Z軸側から初期板厚の半分になるまで一様に減厚させ、ソリッド要素を用いた解析では要素を消去して板厚欠損を表現する。初期たわみ形状は正弦半波形で導入した。以下の解析では板厚欠損率  $\beta$  を次式で定義する。

表-3 解析ケース

Case	解析法	板厚欠損	残留応力	一定圧縮力
1	本解析法	片側から $t/2$ だけ一定圧縮力下で徐々に進行	有	有 ( $P_0/P_Y=0.2$ )
2	本解析法	無載荷状態で $t/2$ だけ徐々に進行	有	無 ( $P_0/P_Y=0$ )
3	従来法	当初より片側から $t/2$ だけ欠損したモデルを使用	無	無 ( $P_0/P_Y=0$ )

$$\beta = \frac{t_0 - t}{t_0} \times 100 \quad (\%) \quad (14)$$

図-15 に示す周辺単純支持板の板厚欠損領域の板厚欠損率  $\beta$  と、板中央部の面外変位  $w_c$  の関係について、本解析法による解析結果とソリッド要素による解析結果を比較して図-16 に示す。図-16 より、両要素の定式化の本質的な相違による僅差は見られるが、本解析結果はソリッド要素による解析結果と良好に一致していることが示された。

##### 4.2 腐食進行下で作用する一定圧縮力の影響

腐食進行下で作用する一定圧縮力が圧縮挙動や残存終局強度に及ぼす影響を把握するため、本解析法を用いて、一定圧縮力 ( $P_0/P_Y=0.2$ ) が作用した状態で板厚欠損過程を追跡する Case1 と、無載荷状態 ( $P_0/P_Y=0$ ) で板厚欠損過程を追跡する Case2 を設定し、板厚欠損過程を追跡した後、載荷時に圧縮強制変位を与える数値解析を実施した。解析モデルは、図-15 に示した周辺単純支持板の幅厚比パラメータが 0.7 となるように板厚を 19mm に設定したものをを用いた。解析結果として、無次元化した圧縮力  $P/P_Y$  と板中央部の面外変位  $w_c$  の関係を図-17 に示す。図-17 より  $P_0/P_Y=0$  と  $P_0/P_Y=0.2$  を比較すると、 $P/P_Y=0.2$  以降の荷重-変位曲線に差異はなく、終局点は  $P/P_Y=0.74$  で一致しており、残存終局強度に及ぼす一定圧縮力の影響は無視できる結果となった。

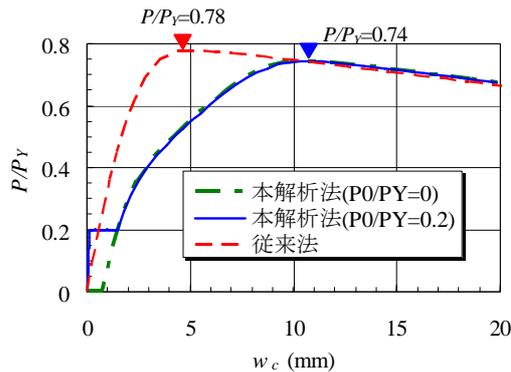


図-17 荷重と板中央部の面外変位の関係

#### 4. 3 板厚欠損過程の応力再分配の影響

板厚欠損過程の応力再分配が、板厚欠損後の残存終局強度に及ぼす影響を把握するため、従来法を用いて板厚欠損過程を無視する Case3 の解析を行い、板厚欠損過程を考慮した 4. 2 節の Case1 ( $P_0/P_Y=0$ ) の解析結果と比較した。従来法による解析では、図-15 の周辺単純支持板に板厚欠損が生じた後の形状を初期状態として与えるのみで、従来法では板厚欠損過程での残留応力の再分配挙動が考慮できないため、残留応力は無視している。図-17 より従来法による解析結果と、本解析法による  $P_0/P_Y=0$  の解析結果を比較すると、無次元終局強度は、本解析法では  $P/P_Y=0.74$  に対し、従来法では  $P/P_Y=0.78$  となり、板厚欠損過程での応力再分配を無視する従来法は本解析に比べて、約 6% 残存終局強度を危険側に見積もることが分かる。両者の差は残留応力を考慮する可否かの影響が大きいと考えられるが、従来法では、上述のように残留応力を考慮することができないため、残存終局強度を精度良く評価するには本解析法のような板厚欠損過程の考慮が必要であると考えられる。

#### 5. 結論

本研究では、板厚欠損過程での残留応力再分配挙動と、板厚欠損後の残存終局強度を実験的に把握し、その結果を用いて著者らが既に提案した解析法の妥当性を検証した。また、周辺単純支持板に一定圧縮力下で板厚欠損が進行する場合を例に、ソリッド要素による解体計算手法を適用した数値解析結果との比較によっても本解析法の妥当性を示した。さらに、同例を対象として、腐食進行下で作用する一定圧縮力が、板厚欠損後の残存終局強度や圧縮挙動に及ぼ

す影響は小さいこと、従来法のように板厚欠損過程での応力再分配を無視すると、板厚欠損後の残存終局強度を危険側に評価する可能性があることを示した。しかし、本論文は限られた数値計算例による結果であるため、今後、現実的な腐食形状を考慮した数値解析を追加するなど、更なる検討が必要と考える。

#### 【参考文献】

- 1) 名取 暢, 西川和廣, 村越 潤, 大野 崇: 鋼橋の腐食事例調査とその分析, 土木学会論文集, No.668/I-54, pp.299-311, 2001.
- 2) 杉浦邦征, 田村 功, 渡邊栄一, 伊藤義人, 藤井 堅, 野上邦栄, 永田和寿: 腐食鋼板の圧縮強度の簡易法に関する検討, 土木学会論文集A, Vol.63, No.1, pp.43-55, 2007.
- 3) 海田辰将, 藤井 堅, 中村秀治: 腐食したフランジの簡易な圧縮強度評価法, 土木学会論文集, No.766/I-68, pp.59-71, 2004.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 後藤芳顕, 川西直樹: 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, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.127-138, 2005.
- 7) 玉川新悟, 三好崇夫, 奈良 敬: シェル要素を用いた鋼板腐食に伴う体積欠損過程の有限要素解析法について, 応用力学論文集第 10 巻, pp.955-962, 2007.
- 8) 玉川新悟, 三好崇夫, 奈良 敬: 鋼板腐食に伴う応力再分配を考慮したシェル要素による解析法の開発と実用問題への適用, 応用力学論文集第 11 巻, pp.979-989, 2008.