

溶融, 相変態および有限変形を考慮した溶接の数値解析

Numerical analysis of welding process considering liquid-solid, phase transformation and large deformation

白旗弘実*

Hiromi SHIRAHATA

*正会員 博(工) 武蔵工業大学講師 工学部都市基盤工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

Welded joint is one of the most fundamental parts of steel structures. Residual deformation and stress have an influence on fatigue and ultimate strengths of the structure. A program code of the finite element method which deals with welding process was developed. In addition to the constitutive law which can consider viscoplastic behavior such as liquid-solid transformation, martensite transformation and large deformation could be taken into account. This paper describes the constitutive law and the verification test of the program code was carried out. The result of pad welding of a disk showed relatively good agreement with the previous studies and experiments.

Key Words : weld, finite element method, phase transformation, residual stress

1. はじめに

鋼構造物において、溶接はもっとも基本的な継手である。他の継手形式と比較して、溶接は初期不整と呼ばれる残留応力や残留変位が導入されることが大きな特徴である。残留応力および残留変位が溶接継手の疲労強度や部材の耐荷力に及ぼす影響について多くの研究がなされてきた。残留応力により、疲労き裂進展は初期の段階において特に速められること^{1),2),3),4)}や、残留変位は耐荷力の低下を招くこと^{5),6)}が示されてきた。

座屈設計ガイドライン⁷⁾においても初期不整の考慮は極めて重要と記述されている。残留応力および残留変位は溶接電位、溶接電流、溶接速度の関数である入熱量、さらには溶接順序、予熱、開先形状などの影響を受けるが、同書ではおもに実験結果にもとづいた残留応力分布が模式的に描かれているにすぎない。溶接残留応力の計測は切断によるひずみ解放量から求められる固有ひずみ法^{8),9),10)}、X線や中性子線回折による方法、磁気異方性^{11),12)}を利用する方法などがあるが、時間がかかったり、慎重な作業を必要とする。補剛材などが存在する場合は、その桁の製作順序に応じて残留応力分布が変化することに気をつけなければならない。補剛材のある桁の残留応力測定例もあるが¹³⁾、一般的に計測はきわめて難しいといわれている⁷⁾。

残留応力分布が求められたとしても、数値解析に導入することは難しい。川西ら¹⁴⁾は初期不整導入について詳細に論じており、所望の初期たわみおよび残留応力を解析モデルに導入する方法を提案している。しかしながら提案された方法は試行錯誤により決定される

といった側面もあり、必ずしもあらゆる形状の構造物にあてはまるとは保証されない可能性がある。

残留応力の数値計算は、有限要素法による熱応力・熱伝導解析の応用がはじまった1970年代からである。近藤ら¹⁵⁾はI形断面部材の形状、寸法および入熱量を変化させ、残留応力分布に与える影響を検討している。この中で近藤らは熱伝導解析、弾塑性解析の順で有限要素解析を行い、残留応力分布を求めている。当初の解析は材料特性の温度依存性は考慮されているものの、相変態や冷却速度などの時間依存特性は考慮されていない^{16),17),18)}。Andersson¹⁹⁾は溶接過程における最高温度を4つに分類し、CCT線図を考慮しながらみかけの膨張係数として変化させることで相変態を考慮した解析を行っている。その他にもいくつかの例^{20),21),22)}があるが、材料の温度依存性や相変態のみを考慮したものも多く、相変態に伴う潜熱の発生や、加熱および冷却速度などに依存する材料特性を考慮したものは少ない。王、井上^{23),24),25),26)}はPerzyna形の粘塑性理論を拡張し、溶融状態も考慮できる構成式を導き出し、その構成式にしたがい、溶接過程の解析を行っている。相変態や相変態に伴う潜熱や材料特性の時間依存も考慮されている。

本研究では溶接解析法を拡張することをこころみた。鋼構造物に発生する残留応力分布を求めたい場合、そして、溶接により生じた初期不整を考慮した座屈耐荷力解析などを行うには、溶接の数値解析ができるのであれば、小松¹³⁾、川西¹⁴⁾らが文献で述べている問題は大幅に解消される。特に補剛材などが接合された構造物には数値解析は有効な手段となりうる。初期たわみを正確に考慮するために、既往の研究ではあまり

† Dedicated to the memory of Prof. Michihiro KITAHARA

考慮されていなかった大変形を考慮できるように拡張した。また、近年、疲労き裂の発生と進展を抑制するために、化学成分を調整しマルテンサイト変態温度を変化させた低温相変態溶接^{27),28)}が開発されている。ここではマルテンサイト変態も考慮できる解析に拡張した。本報告では、まず、基本となる王、井上の理論²³⁾を述べる。王らの解析および実験結果と本研究の結果を比較し、プログラムの妥当性を確認した。また、拡張した箇所が解析結果に及ぼす影響を考察した。

2. 熱伝導方程式

溶接過程における鋼をいくつかの相の混合体であるとする。このとき各相の体積分率を ξ_i とすると、次の関係が成り立つ。

$$\sum_i \xi_i = 1 \quad (1)$$

i は相に関する指標で、ここでは液相、オーステナイト、マルテンサイトおよびパーライトを考えている。

相変化による潜熱を考慮した熱伝導方程式は次のようになる²³⁾。

$$\rho c \dot{T} = \dot{q} + \text{div}(k \text{grad } T) - \rho \sum_i l_i \dot{\xi}_i \quad (2)$$

ここに ρ は物体の密度、 c は比熱、 T は温度、 q は入熱量、 k は熱伝達率である。また、 $\dot{\cdot}$ は時間導関数を表している。右辺第3項における l_i は相変化による潜熱である。

混合体の密度、熱伝達率および比熱は各相の体積分率に比例するものとする。

$$\rho = \sum_i \rho_i \xi_i \quad (3)$$

$$k = \sum_i k_i \xi_i \quad (4)$$

$$c = \sum_i c_i \xi_i \quad (5)$$

とおく。

式(2)を有限要素法の離散式で表す。

$$\rho c \int [N]^T [N] dV \{\dot{T}\} + k \int [\bar{N}]^T [\bar{N}] dV + \rho \int \sum_i l_i \dot{\xi}_i [N]^T dV = \int \{\dot{q}\} [N]^T dV \quad (6)$$

が得られる。ここに、 $[N]$ は形状関数、 $[\bar{N}] = [\nabla][N]$ である。 $[\cdot]^T$ は転置行列を表す。

3. 相変化に関する基礎方程式

図-1に考慮した相と温度との関係を示す。図-1(a)は鉄-炭素状態図である。鋼は炭素量が1%に満たない

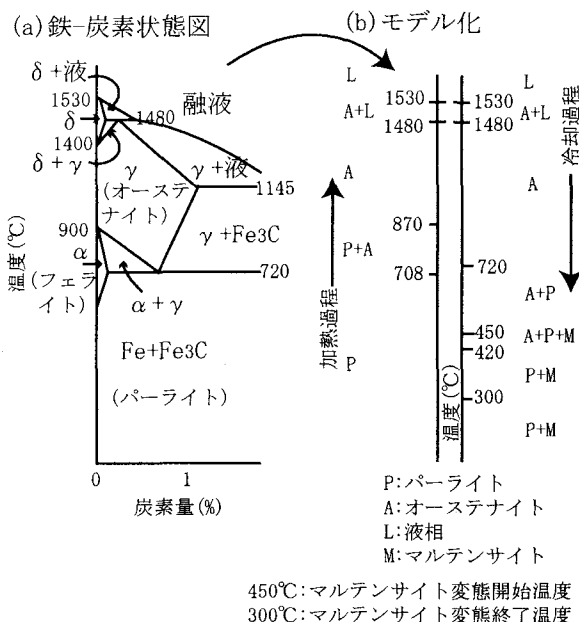


図-1 加熱および冷却過程で考慮した組織と変態温度

が、図-1(b)は図-1(a)から対応箇所を抜き出し、モデル化したものである。加熱過程において、708℃よりパーライトからオーステナイトに変化しはじめ、870℃ではすべてがオーステナイトになる。そのときの分率変化は温度に対して線形に増加することを仮定している。さらに高温となるとオーステナイトから液相に変化する。変化の開始は1480℃からで1530℃ではすべてが液相となる。そのときの体積分率の変化を、この原理^{29),30)}により、次式で表した^{23),24),25)}。

$$\xi_A = \frac{(T_L - T)/m_L}{(T - T_A)/m_A + (T_L - T)/m_L} \quad (7)$$

ここに ξ_A はオーステナイトの体積分率、 $m_L=7200$ ℃/%、 $m_A=18200$ ℃/%としている。 T_L は加熱過程における液相発生開始温度の1480℃、 T_A は冷却過程におけるオーステナイト相発生開始温度の1530℃である。

冷却中の凝固過程においては、加熱時の熔融過程と同様の式(7)に従うものとした。さらに冷却が進展し、温度が720℃に達するとオーステナイトからパーライトへ変化する。パーライト組織とは本来はFe-Fe₃C共析組織であるが、ここではオーステナイト-パーライト変態といってもパーライト、フェライト、ベイナイト変態も含んでいるものとする。パーライト変態は母相内に核が生成、成長していく拡散形変態であり、パーライトの体積分率 ξ_p は次式にしたがうものとする。

$$\xi_p = 1 - \exp \left\{ - \int_0^t f(T, \sigma_m) (t - \tau)^3 d\tau \right\} \quad (8)$$

ここに、 t は反応時間、 σ_m は平均垂直応力である。 $f(T, \sigma_m)$ は王、井上によって提唱されたものであ

る 23),31),32).

$$f(T, \sigma_m) = \sqrt{3} \times e^{0.24\sigma_m} \times \left(\frac{T-380}{145} \right)^{6.80} \times \left(\frac{720-T}{195} \right)^{8.20} \quad (9)$$

温度が 450℃以下になると、マルテンサイト変態がおこるものとした。マルテンサイト変態を誘起する要因としては諸説があるが³⁰⁾、ここでは Magee の式を変形した山口らの式^{31),32)}にしたがうものとした。300℃はマルテンサイト変態が終わる温度である。冷却過程においては、450℃以上 720℃以下ではオーステナイトとパーライトが存在し、450℃以下ではパーライトとマルテンサイトが存在することになる。

$$\xi_m = 1 - \exp \left\{ -0.016 \times (M_s - T) - 0.0204 \times \sigma_m - 0.0354 \times J_2^{1/2} \right\} \quad (10)$$

ここに、 ξ_m はマルテンサイトの体積分率、 M_s はマルテンサイト変態開始温度、 J_2 は応力第二不変量である。

4. 材料構成則

材料の構成式としては王、井上が提唱するものを用いている。全ひずみ速度は式-(11)で表されるものとする²³⁾。

$$\{\dot{\epsilon}\} = \{\dot{\epsilon}^e\} + \{\dot{\epsilon}^v\} + \{\dot{\epsilon}^m\} \quad (11)$$

ここで $\{\dot{\epsilon}^e\}$ は弾性ひずみ速度、 $\{\dot{\epsilon}^v\}$ は粘塑性ひずみ速度、 $\{\dot{\epsilon}^m\}$ は相変態に伴うひずみ速度である。 $\{\dot{\epsilon}^m\}$ は式-(12)で表される。

$$\{\dot{\epsilon}^m\} = \sum_i \beta_i \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \end{Bmatrix} \dot{\xi}_i \quad (12)$$

粘塑性ひずみ速度 $\{\dot{\epsilon}^v\}$ は関連流れ則によるものとする。降伏関数を F 、 λ を定数として、

$$\{\dot{\epsilon}^v\} = \lambda \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\} \quad (13)$$

を得る。温度変化と相変態を考慮したものを式-(14)に示す。

$$\{\dot{\epsilon}^v\} = \frac{1}{H' + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [D^e] \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}} \left(\{s^*\}^T \{\dot{\sigma}\} - \frac{\partial F}{\partial T} \dot{T} - \sum_i \frac{\partial F}{\partial \xi_i} \dot{\xi}_i \right) \{s^*\} \quad (14)$$

ここに H' は加工硬化係数、 $[D^e]$ は弾性体の応力ひずみ構成テンソル、 $\{s^*\}$ は偏差応力である。式-(14)右辺第2項および第3項は粘塑性ひずみのそれぞれ温度依存性および組織依存性を示す。高温になるにつれて粘

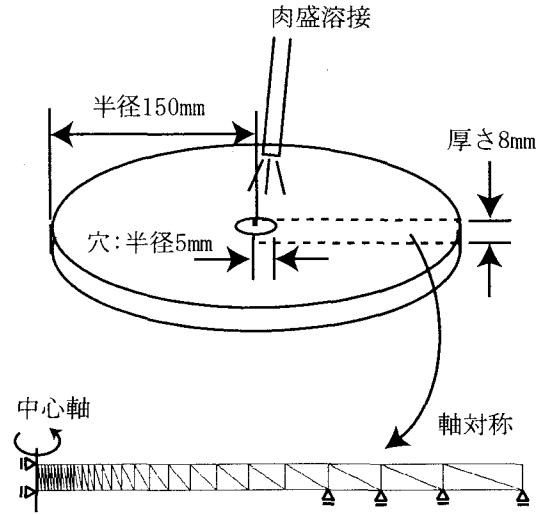


図-2 円板状の解析モデル

性効果が無視できなくなるが、その場合は粘塑性ひずみを以下の式-(15)で表す。

$$\{\dot{\epsilon}^v\} = \frac{1}{2\mu} \left(1 - \frac{F}{\sqrt{3J_2^*}} \right) \{s^*\} \quad (15)$$

ここに μ は粘性係数である。 J_2^* は偏差応力により計算した応力の第二不変量である。物体が液相に変化していくにつれて、降伏関数 F は 0 に近くなる。この際、

$$\{\dot{\epsilon}^v\} = \frac{1}{2\mu} \{s^*\} \quad (16)$$

となる。変形すると、次式を得る。

$$\begin{aligned} \{s^*\} &= \{\sigma\} - \sigma_m \{I\} \\ &= 2\mu \{\dot{\epsilon}^v\} \end{aligned} \quad (17)$$

ここに $\{\sigma\}$ は応力、 $\{I\}$ は単位テンソルである。さらに変形する。

$$\{\sigma\} = 2\mu \{\dot{\epsilon}\} + \sigma_m \{I\} \quad (18)$$

この形は、ニュートン流体の構成式となる。式-(15)を考慮するのは、液相が生じ始める 1480℃からとした。

式-(11)より、ひずみ増分を求め、応力増分を計算する。

$$\{\dot{\sigma}\} = [C^{ep}] \{\dot{\epsilon}\} \quad (19)$$

有限要素法の定式化による離散式は以下のようになる。

$$\begin{aligned} & \int [B]^T [D^{ep}] [B] dV \{u\} \\ &= \int [B]^T [D^{ep}] \{\alpha\} \dot{T} dV + \int [B]^T [D^{ep}] \{\dot{\epsilon}^v\} dV \\ &+ \int [B]^T [D^{ep}] \sum_i \{\beta_i\} \dot{\xi}_i dV \end{aligned} \quad (20)$$

$[D^{ep}]$ は塑性を考慮した応力ひずみ構成テンソルである。 $[B]$ は変位ひずみ関係、 u は節点変位、 α は線膨張

係数である。[D^{ep}] はヤング率 E の関数であり、組織依存性がある。また α にも組織依存性があり、混合体の特性として体積分率に応じた値をとるものとする。

$$E = \frac{1}{\sum_i \xi_i / E_i}$$

$$\alpha = \sum_i \alpha_i \xi_i \quad (21)$$

解析に際しては、はじめに式-(6) を解き、温度を求めたあと、式-(7)、式-(8) および式-(10) など解き各組織の体積分率を求める。そののち、式-(20) を解き応力分布を得ることになる。

5. 数値解析結果

前節までの基礎方程式を有限要素法で定式化し、解析を行った。モデルを図-2 に示す。モデルは厚さ 8mm、半径 150mm であるが、中心から半径 5mm は肉盛溶接するための穴がもうけられている。要素分割は王ら²³⁾と同じものとした。これを軸対称問題として扱った。

表-1 に各相の密度および線膨張係数、相変態の際の潜熱および体積膨張率を示す。これらの定数にも温度依存性があるといわれているが、温度の関数形として示されている適当な資料がなかったために、相ごとで一定の値と仮定した。図-3 に温度依存性のある材料特性を示す。これらの材料特性は王らの研究やその他の文献より得たものである^{23),29),31),32)}。液体のヤング率は 100MPa、降伏応力は 0MPa、ひずみ硬化係数は 0MPa とした。ポアソン比はすべての相で 0.3 とした。想定している鋼は SM400 とした。常温での降伏応力を 220MPa、ひずみ硬化係数を弾性係数の約 2% である 5000MPa としている。

外気と固体の熱伝達量 $q_{\text{rad,sol-air}}$ は熱放射の式を用いた。

$$q_{\text{rad,sol-air}} = rG(T^2 + T_r^2)(T + T_r)(T - T_r) \quad (22)$$

ここに r は放射率で 0.4、 G はステファン・ボルツマン定数である。 T_r は外気の温度であり絶対温度で与えるが、ここでは 293K (20℃) とした。外気と液体の熱伝達係数は $2.9 \times 10^{-5} \text{ J/mm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ とした。外気と液体との伝達熱量 $q_{\text{rad,liq-air}}$ は次式で表される。

$$\dot{q}_{\text{rad,liq-air}} = 2.9 \times 10^{-5} \times A \times (T - T_r) \quad (23)$$

ここに A は外気と接触している箇所の面積である。

溶接熱量は 58.8kJ とした。溶接時間は 20 秒とした。これは毎秒 700 カロリー与えたことに相当し、モデルの中心に位置する要素に与えた。式-(2) における入熱量は溶接による入熱と式-(22) および式-(23) における放射熱である。

図-4 に各節点の温度履歴を示す。入熱開始直後より中心部分の温度が急激に上がっていくことがわかる。溶

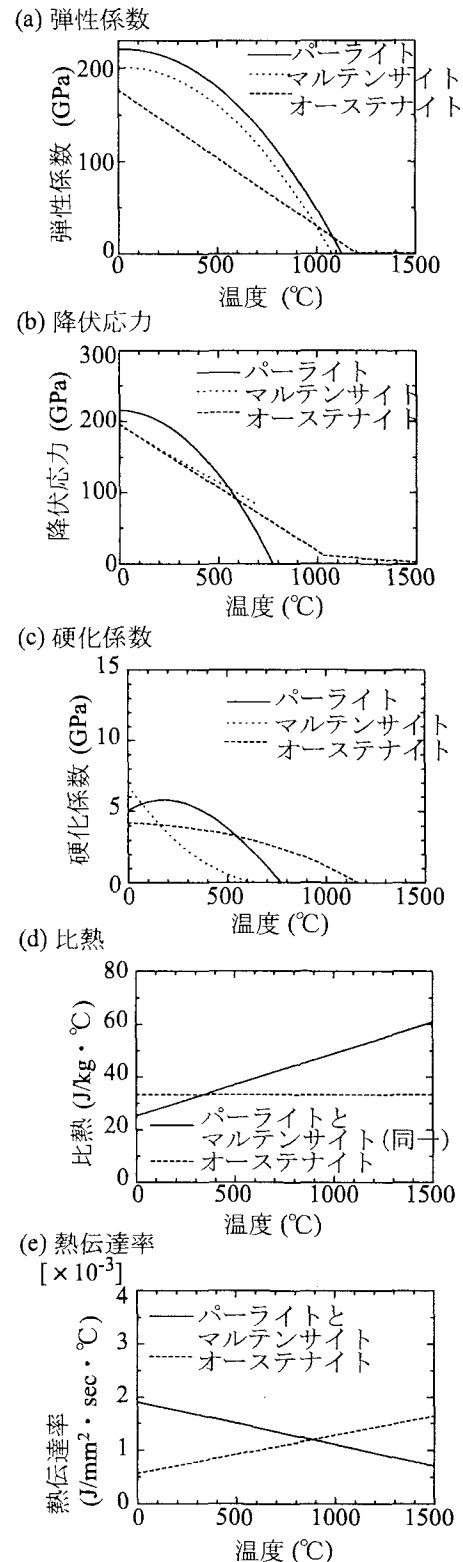


図-3 材料特性の温度依存

接終了の 20 秒経過後は急激に温度が下がっていくことがわかる。王らの結果²³⁾も図-4 に示しているが、両者はよく一致している。王らはモデルと同様の溶接を実際に行っており、熱電対で温度を計測しているが、実

表-1 材料特性

	パーライト	マルテンサイト	オーステナイト	液相
密度 ρ_i (g/mm ³)	7.85×10^{-3}	7.80×10^{-3}	8.15×10^{-3}	7.00×10^{-3}
線膨張係数 α_i (1/°C)	15×10^{-6}	11×10^{-6}	20×10^{-6}	26×10^{-6}

	オーステナイト -パーライト	液相 -オーステナイト	オーステナイト -マルテンサイト
潜熱 l_i (J/g)	4.3	14.8	4.8
変態による体積膨張率 β_i	1.63×10^{-3}	12.6×10^{-3}	-9.8×10^{-3}

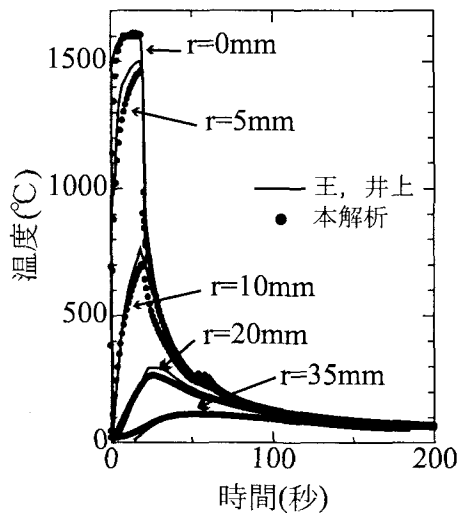


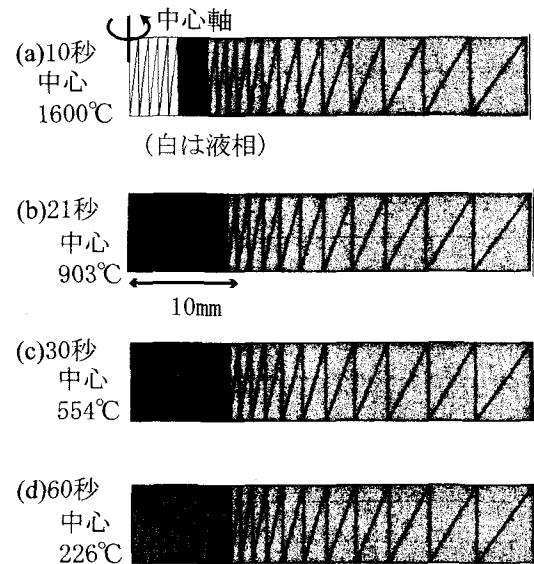
図-4 温度履歴

験と解析値は一致していることが示されている。

オーステナイト変態温度である 870°C に達した部分は中心より 10mm の範囲である。また、液相温度まで上がった部分は中心より 5mm で母材のごく一部分が溶けたことになる。

図-5 に各相の時間変化を示す。図-5(a)(b)(c) および (d) はそれぞれ 10, 21, 30 および 60 秒後である。各相を色相環で示しており、液相は白で示している。図-5(a) より、中心から半径 10mm の部分でパーライトがオーステナイトに変化したことがわかる。図-5(b) は加熱が終わった時点であるが、溶接部分すべてがオーステナイトに変化していることがわかる。冷却され、温度がさらに低くなっていくとマルテンサイトが発生し始める。オーステナイトはほとんど残っておらず、マルテンサイトとパーライトがそれぞれ約 50% となっている。

図-6 に応力の時間変化を示す。図-6(a),(b),(c) および (d) はそれぞれ加熱開始から 1, 10, 21, 30 秒が経過したものである。図-6(e) は十分長い時間が経過して温度や応力がそれほど変化しなくなったとき (250 秒後) のものである。応力は半径方向のものと円周方向のものを示している。図-6(a) に示すように、溶融部分では加



パーライト:マルテンサイト:オーステナイト 比
による色相環 0:0:1 (オーステナイト100%)

1:0:0 (パーライト100%) 0:1:0 (マルテンサイト100%)

図-5 組織の変化

熱につれて膨張していく。しかしながら、周囲の温度はそれほど高くないために、溶融部分は拘束されるように圧縮力が作用する。半径 0mm 近辺の溶融部分は降伏応力や弾性係数がほぼ 0 となるために応力は作用しない。図-6(b) に示すように、加熱がすすむにつれて、圧縮力は大きくなっていく。図-6(c) においては、加熱が終了し円板全体が冷却過程に入った直後であるが、溶融部分が特に冷却され収縮を始める。また、冷却および凝固の際に弾性係数や降伏応力が増加していくため応力値が増加していく。図-6(d) および (e) に示すように、冷却過程の進行に伴い、溶接部分の応力が増加していく。図-6(e) は残留応力分布であるが、王らの解析結果および実験結果も示している²³⁾。本解析と両者は定性的に一致している。王らの実験による応力測定は X 線を用いたものである。図-6(e) に示した解

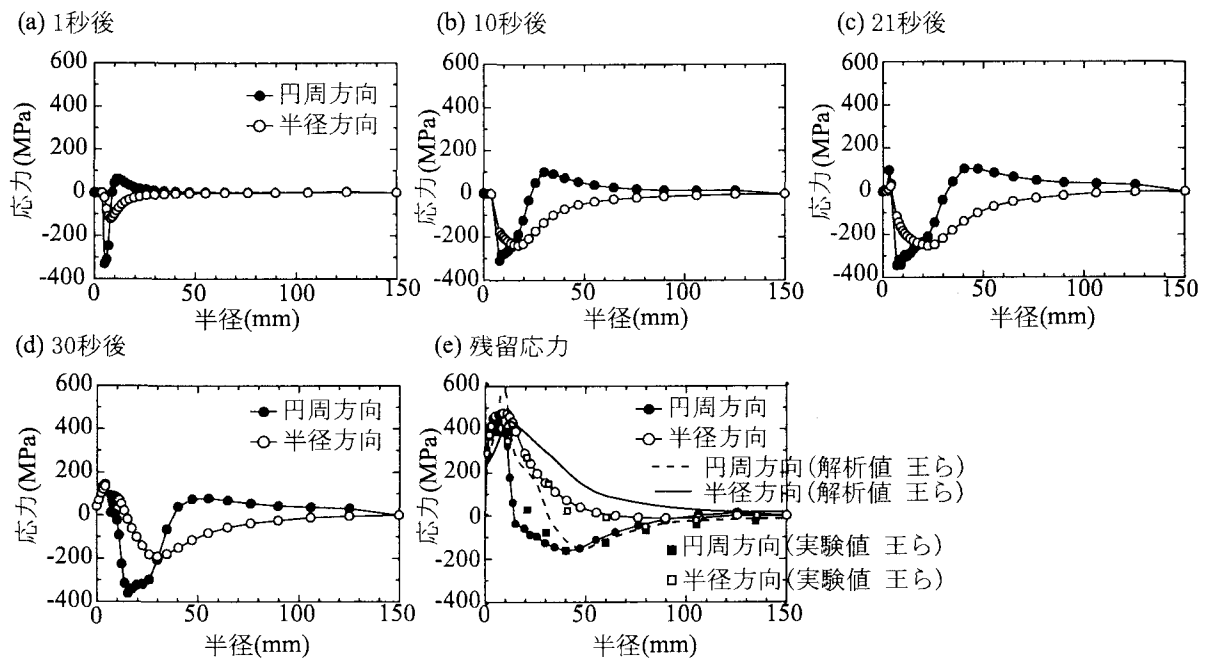


図-6 各時間の応力分布

析および王らの実験により得られた残留応力値は降伏応力と比較しても大きい値となっている。

図-7に各時刻の変形を示す。図において、実線は変形後、破線は変形前の形状を示しており、変形は2倍に拡大している。図-7(a)および(b)はそれぞれ溶接開始後1および21秒後である。図-7(c)は溶接後十分に長い時間が経過したあとである。図-7(a)において、加熱開始による温度上昇により、溶融部は膨張していく。また、溶融部近傍の母材も膨張していく。膨張は図-7(b)の加熱終了まで続いていく。図-7(c)に示すように、冷却中は溶融部分が収縮していく。また、半径方向に関して、中心に向かって収縮がおこっていくことがわかる。図-7(a)から(c)に示すように、変形は溶融部分で特に大きく、板厚方向に膨張している。ここでは三角形要素を用いており、要素重心位置の半径方向座標はすべての要素で異なった値をとる。このため、変形が板の上下面で対称とはなっていない。

計算値が実験値より高い理由として、クリープのような準動的作用を考慮していないことが考えられる。その他に、完全塑性とはしなかったことも考えられる。特に溶融部分ではひずみが大きく 10^{-2} オーダーにもなるために、応力増加の影響が無視できないものであったことがあげられる。また、剛体変形を考慮していないことも考えられる。溶接においては溶融部分や母材の溶接部分近傍のみが収縮することで変形し、それ以外の場所は剛体的な変形をする。溶接過程において変化する温度領域はきわめて広範であり、熱による膨張も大きいものとなる。微小変形理論では変形前の節点位置を参照しひずみや応力を評価するため、剛体変形

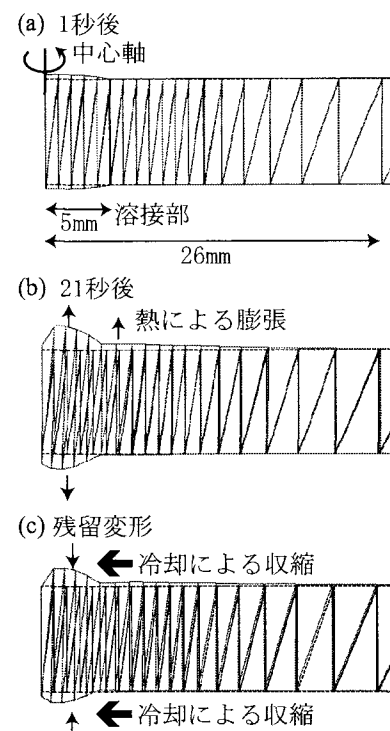


図-7 変形履歴

を考慮しなければ、剛体変形部分にも過大な応力がかかることになる。

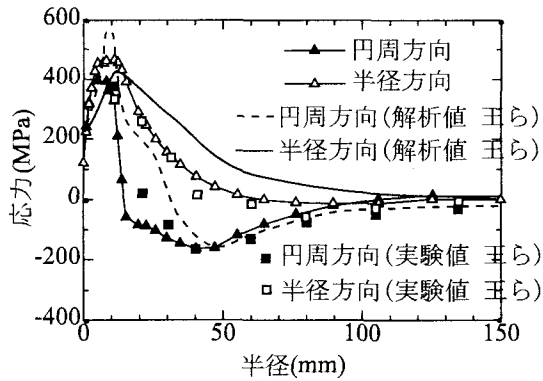


図-8 有限変位を考慮した解析

6. 剛体変形を考慮した有限要素定式化

剛体変形を考慮できるように計算コードを拡張した。客観速度として Jaumann 速度を考慮した³³⁾。

$$\dot{\sigma} = \dot{\sigma} - W \cdot \sigma + \sigma \cdot W \quad (24)$$

ここに、 W はスピントルである。すると、式(20)は以下のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} & \int \{ [B]^T ([D^{ep}] + [D^*]) [B] + [B^*]^T [D^{**}] [B^*] \} dV \{ \dot{u} \} \\ &= \int [B]^T [D^{ep}] \{ \alpha \} \dot{T} dV + \int [B]^T [D^{ep}] \{ \epsilon^v \} dV \\ &+ \int [B]^T [D^{ep}] \sum_i \{ \beta_i \} \dot{\xi}_i dV \end{aligned} \quad (25)$$

ここに、 $[D^*]$ および $[D^{**}]$ は応力の関数であり、 $[B^*]$ は変形増分勾配-変位関係を表すテンソルである。各時間ステップにおいては更新ラグランジュ法を採用した。

大変形を考慮した定式化で図-6と同様の解析を行った。図-8は十分時間が経過したあとの残留応力分布である。大変形を考慮した場合と考慮していない場合の最大の応力を比較すると、大変形を考慮したほうが円周方向で10%、半径方向で5%低下している。それでも計算による応力値は降伏応力をこえるものであるが、クリープなどの準動的な影響を考慮できれば値は下がるものと考えられる²³⁾。大変形を考慮した場合、残留変形は図-7に示した値とほぼ同じであった。

7. おわりに

王、井上の構築した溶融を考慮した構成式を適用し、円板の肉盛溶接のシミュレーションを行った。溶接中の温度分布、オーステナイト変態領域、溶融領域を示した。溶接中の応力およびたわみの変化を示した。本研究で作成した計算コードによる結果は、王らの結果とよく一致した。

さらに、有限変形を考慮できるように計算コードを拡張した。有限変形を考慮することにより、高めに見積もられていた応力値を下げる事ができた。

今後はプログラムを拡張し、熱源が移動する場合も考慮できるようにしたいと考えている。著者は初期不整を有する鋼橋主桁腹板の耐荷力に関する研究を行っているが³⁴⁾、水平および垂直補剛材のある場合の残留応力分布が未解明であるという問題をかかえていた。本研究により、今後、補剛材を有する桁の残留応力分布も詳細に検討できるようになると考えている。疲労強度改善に関しても、ピーニング処理、TIG処理、低温相変態溶接処理などの方法が検討されている^{27),28),35),36)}。これらの処理の数値解析をしていきたいと考えている。

本研究により、溶接による初期不整の導入をより定量的に評価できるようになること、また疲労き裂進展抑止のための処理方法も定量的に評価できるようになることが期待される。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、(社)日本鋼構造協会 鋼橋の高性能化部会(主査 中村俊一 東海大教授)および文部科学省科学研究費補助金(代表者 三木千壽 東工大教授)の補助を受けました。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) Miki, C., Mori, T. and Tajima, J.: Effect of stress ratio and tensile residual stress on near threshold fatigue crack growth, *Structural Engineering/Earthquake Engineering (Proc. of JSCE No.368/I-5)*, pp.175s-182s, 1986.
- 2) Nishino, F., Tall, L and Okumura, T.: Residual stress and torsional buckling strength of H and cruciform columns, *Transactions of JSCE*, No.160, pp.75-87, 1968.
- 3) Miki, C., Nishino, F., Hirabayashi, Y. and Takena, K.: Influence of residual welding stress on fatigue crack growth rate, *Proc. of JSCE*, No.330, pp.161-168, 1983.
- 4) 轟章, 小林英男: 残留応力場の疲労き裂進展速度の予測(重ね合わせの原理の適用), 日本機械学会論文集 A 編, Vol.54, No.497, pp.30-36, 1988.
- 5) 青木徹彦, 福本 秀士: 鋼柱の座屈強度のばらつきにおよぼす残留応力分布の影響について, 土木学会論文報告集, No.201, pp.31-41, 1972.
- 6) 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.
- 7) 福本 秀士編: 座屈設計ガイドライン, 土木学会, 1987.
- 8) 望月正人, 林眞琴, 服部敏雄: 多層溶接周継手における溶接順序が残留応力に及ぼす影響, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.62, No.604, pp.2719-2725, 1996.
- 9) 望月正人, 齊藤直人, 榎本邦夫, 坂田信二, 齊藤英世: 固有ひずみ法による平板多層溶接突合せ継手の部材内部での残留応力の検討, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.61, No.587, pp.1568-1573, 1995.
- 10) Mochizuki, M., Hayashi, M. and Hattori, T.: Numerical analysis of welding residual stress and its verifica-

- tion using neutron diffraction measurement, *Transactions of ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol.122, pp.98-103, 2000.
- 11) (社) 日本非破壊検査協会編, 新非破壊検査便覧, 1992.
 - 12) 柏谷賢治, 坂本博: 磁気異方性センサを用いた応力測定における出力対応力の線形化法, 非破壊検査 Vol.53, No.2, pp.93-97, 2004.
 - 13) 小松定夫, 半尾正之, 北田俊行: 補剛板の溶接残留応力および初期たわみに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.265, pp.25-35, 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) 近藤明雅, 日浦隆文, 菊池洋一: 溶接 I 形断面部材の残留応力の推定に関する研究, 土木学会論文報告集, No.288, pp.1-11, 1979.
 - 16) 上田幸雄, 福田敬二, 中長啓治: 有限要素法による溶接応力の解析と残留応力の発生機構, 溶接学会誌, Vol.45, No.1, pp.29-35, 1976.
 - 17) 佐藤邦彦, 寺崎俊夫, 田中匡: 溶接継手の残留応力の数値解析, 溶接学会誌, Vol.48, No.8, pp.616-620, 1979.
 - 18) 藤田譲, 野本敏治: 熱加工に伴う変形の弾塑性解析について, 溶接学会誌, Vol.45, No.1, pp.22-28, 1976.
 - 19) Andersson, B.A.B.: Thermal stresses in a submerged-arc welded joint considering phase transformations, *Transactions of ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol.100, pp.356-362, 1978.
 - 20) 望月真人, 三上欣希, 豊田政男: 溶接シミュレーションによる溶接継手部の機械的的特性の評価, 鋼構造年次論文報告集, Vol.10, pp.35-42, 2002.
 - 21) 金裕哲, 朴正雄, 井元泉, 堀川浩甫: 鋼板の初期不整が溶接変形・残留応力に及ぼす影響, 鋼構造年次論文報告集, Vol.4, pp.295-300, 1996.
 - 22) 金裕哲, 朴正雄, 堀川浩甫: 面外変形・残留応力に及ぼす溶接諸条件の影響, 鋼構造年次論文報告集, Vol.5, No.17, pp.85-91, 1998.
 - 23) 王志剛, 井上達雄: 溶融を考慮した粘塑性体の構成式とそれを用いた溶接過程の解析, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.50, No.459, pp.1900-1908, 1984.
 - 24) 日本機械学会編, 相変態と材料挙動の数値シミュレーション, コロナ社, 1991.
 - 25) 井上達雄, 田中喜久昭, 長岐滋: 固体力学と相変態の解析, 大河出版, 1995.
 - 26) Inoue, T., Nagaki, S., Kishino, T. and Monkawa, M.: Description of transformation kinetics, heat conduction and elastic-plastic stress in the course of quenching and tempering of some steels, *Ingenieur-Archiv*, Vol.50, pp.315-327, 1981.
 - 27) Ohta, A., Watanabe, O., Matsuoka, K., Siga, C., and Nishijima, S.: Fatigue strength improvement by using newly developed low transformation temperature welding material, *Welding in the World*, Vol.43, No.6, pp.38-42, 1999.
 - 28) 三木千壽, 穴見健吾, 樋口嘉剛: 低温相変態溶接棒を用いた付加溶接による疲労強度向上の試み, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.311-319, 2002.
 - 29) 大中逸雄: コンピュータ伝熱・凝固解析入門, 丸善, 1980.
 - 30) 須藤一, 田村今男, 西澤泰二: 金属組織学, 丸善, 1999.
 - 31) 山口豪, 王志剛, 井上達雄: 歯車の浸炭焼入過程における炭素濃度依存性を考慮した温度, 組織および応力の解析, 材料, Vol.33, No.375, pp.1470-1476, 1984.
 - 32) 山口豪, 王志剛, 井上達雄: 歯車の焼入過程における温度, 組織および応力の解析, 材料, Vol.33, No.370, pp.814-820, 1984.
 - 33) 久田俊明, 野口裕久: 非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善, 1995.
 - 34) 望月清彦, 松田宏, 和地輝雄, 増田陳紀, 白旗弘実, 細江隆: プレートガーダー橋主桁腹板の初期たわみが座屈耐力に及ぼす影響, 構造工学論文集 Vol.45A, pp.149-156, 1999.
 - 35) Anami, K., Miki, C., Tani, H. and Yamamoto, H.: Improving fatigue strength of welded joints by hammer peening and TIG-dressing, *Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE (Journal of Struc. Mech. Earthquake Eng. JSCE)*, Vol.17, No.1, pp.57s-68s, 2000.
 - 36) 穴見健吾, 三木千壽, 山本晴人, 樋口嘉剛: 高強度鋼溶接継手部の疲労強度と疲労強度向上法, 土木学会論文集 No.675/I-55, pp.251-260, 2001.

(2004 年 4 月 16 日 受付)