

外力作用下における鋼板への補剛材のすみ肉溶接で生じる 残留応力に関する解析的研究

Numerical Study on Residual Stress Generated by Fillet Welding of Stiffener to Loaded Steel Plate

廣畑幹人*・伊藤義人**

Mikihito HIROHATA* and Yoshito ITOH**

*博士(工学) 名古屋大学大学院助教, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

**工博 名古屋大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

For examining the characteristics of residual stress generated by fillet welding of a stiffener to a steel plate under tensile or compressive loading, a series of numerical simulation was carried out. In both cases of welding under constant tensile and compressive loading in the welding direction, the residual stress around the weld metal was almost the same as that by welding without external loading. On the other hand, the residual stress in the base metal was variously changed by the difference of the tensile and compressive loading and those magnitudes. It was proposed that the average residual stress in the base metal under the external loading could be predicted by superposing the welding residual stress without loading and the nominal stress due to the external loading.

Key Words: Welding, Residual stress, Repair and reinforcement, Thermo-stress analysis

1. 緒言

既設鋼構造物の老朽化に伴う損傷事例が多数報告されている。鋼構造物の損傷の主たる要因は疲労および腐食であり、疲労き裂や腐食減厚の補修は、鋼構造物の維持管理における重要な課題として認識されている。

疲労き裂については、ストップホール穿孔とボルト締めや、ボルト接合によるあて板補修が主として適用される¹⁾。一方、ボルト孔を設ける必要がなく、ボルトによる重量増加が抑制できることから、ガウジングによるき裂の除去と埋戻しやあて板の接合など、溶接によるき裂の補修が採用される場合もある²⁾。また、腐食による鋼部材の減厚部に対するあて板補修についても、ボルト接合に限らず、溶接接合が用いられる事例がある³⁾。接合部に高い水密性が要求される港湾鋼構造物では、腐食減厚部への溶接によるあて板補修は一般的に実施されている⁴⁾。

ところで、橋梁などの既設構造物の補修補強において、活荷重、死荷重を取り除いた状態で施工するには交通(活荷重)を遮断し、ベント等で構造物を仮受けする必要がある。物流の遮断は経済活動に多大な影響を及ぼすと共に、ベントによる仮受けにもコストを要する。このため、死活荷重が作用する供用下における補修補強技術に関する種々の研究が実施されてきた^{1,3,5~18)}。

供用下の鋼構造物に対する溶接による補修補強につい

ては、交通や風による振動荷重が溶接品質に影響を及ぼすことや、外力によって開先に生じる開口変位に起因して溶接割れ発生の危険性が高まること懸念される。これに対し、供用下の鋼構造物に対する溶接割れに関する実験^{5~9)}が実施され、その成果が取りまとめられている^{10, 11)}。さらに近年では、上述の実験が実施された当時に比べ新しい半自動溶接による実験が実施され、その結果が報告されている^{12~14)}。

また、荷重作用下の鋼構造物に対する溶接では、割れの発生だけでなく、溶接時の高温により一時的に部材の剛性、強度が低下することで、変形や座屈が生じることも懸念される。これに対し、荷重作用下で溶接された鋼構造物の耐荷力や変形に関する実験の結果^{15~18)}が報告されている。

一方、溶接割れや過大な変形が生じなくとも、溶接による局部的な加熱と冷却による溶接金属の膨張および収縮を、周辺の母材部が拘束することで残留応力が生じる。残留応力は、溶接後の構造部材の耐荷力や疲労強度に種々の影響を及ぼすため、溶接残留応力の分布や大きさを把握しておくことが重要である。

残留応力を測定するには、非破壊的、破壊的方法のいずれの場合も多大な時間と労力を要する。また、部材全体に生じる残留応力の分布を求めることは困難である。これに対し、有限要素解析によるシミュレーションは、溶接で生じる残留応力の分布や大きさを予測するうえで極めて有効であることが示されている^{19~22)}。

通常の部材製作過程における溶接，すなわち，無荷重状態での溶接で生じる残留応力を実験的に計測した例^{23, 24)}やシミュレーションの例^{19~22)}は多数報告されている。しかし，荷重作用下の溶接で生じる残留応力について検討した例は非常に少ない。荷重作用下の溶接によりどのような残留応力が生じるのか，通常の無荷重状態の溶接の場合と比べて残留応力がどのように，どの程度異なるのかなど，荷重作用下の溶接で生じる残留応力について不明な点が多々ある。荷重作用下の溶接で生じる残留応力の特徴を明らかにすることは，供用下における鋼構造物の溶接による補修補強の可能性を向上させるうえで重要と考える。

このような観点から，著者らは，薄肉鋼板の突合せ溶接継手に生じた疲労き裂除去部の埋戻しを想定し，スリット部の1パス突合せ溶接を対象として熱弾塑性解析によるシミュレーションを行い，鋼板端部の拘束状態や作用外力の大きさを種々変化させた場合に生じる残留応力の特徴を明示した²⁵⁾。

本論文では，既設構造物に補修補強のための新部材を付加する状況を想定し，一連のシミュレーションにより，外力作用下における薄肉鋼板への補剛材のすみ肉溶接で生じる残留応力の特徴を明らかにする。鋼板に作用させる外力の方向（引張，圧縮）および大きさを種々変化させ，外力作用下で溶接した場合と，外力無負荷状態の溶接で生じる残留応力との相違を明確にする。得られた結果に基づき，残留応力の観点から，荷重作用下の鋼構造物に対する溶接による補修補強における留意点を示す。

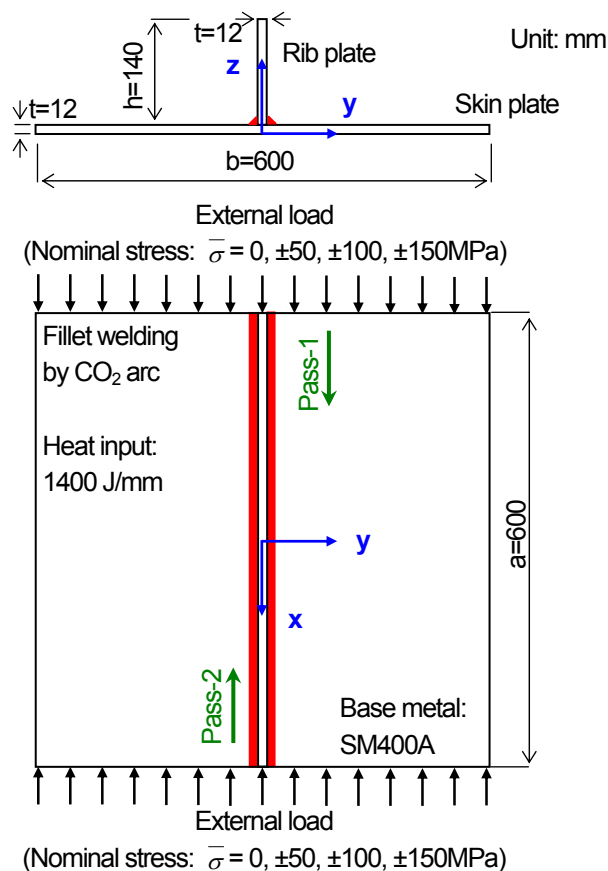


図-1 解析モデル

2. 熱弾塑性解析による溶接のシミュレーション

2.1 解析モデル

解析モデルを図-1に，解析モデルの要素分割を図-2に示す。I桁の垂直補剛材や，箱桁のフランジなど既設構造物に補修補強のための新部材を付加する状況を想定し，外力作用下における薄肉鋼板への補剛材のすみ肉溶接を解析対象とする。鋼板（スキンプレート）の寸法は，板厚12mm，板長600mm，板幅600mmとする。補剛材（リブ）の寸法は，板厚12mm，板長600mm，高さ140mmとする。解析には汎用有限要素解析ソフト ABAQUS Ver.6.10の熱伝導-熱応力解析を用いた。熱応力解析では，材料非線形のみ考慮し，幾何学的非線形は考慮していない。8節点ソリッド要素を用い，熱伝導解析および熱応力解析に共通のメッシュ分割を行った。溶接線(x)方向の要素長さは15mmとした。スキンプレート，リブ共に板厚方向は4分割した。なお，スキンプレートとリブの接合面に隣接する部分では，溶接金属がスキンプレートおよびリブに溶込むこと（溶込み形状）を想定したメッシュ分割を行った²⁰⁾。

補剛材は，左右両側をそれぞれ1パスですみ肉溶接する。なお，1パス目終了後，溶接終端部の温度が50℃以下になった状態から，2パス目の溶接を開始する。CO₂ガスアーク溶接による溶接条件は，電流300A，電圧35V，速度7.5mm/secである。この溶接条件は金らの実験および数値シミュレーション^{20, 21)}で用いられたものであり，本解析モデルは，これと同鋼種，同寸法および同形状のすみ肉溶接継手を想定したものである。母材（スキンプレートおよびリブ）はSM400A（降伏応力：254.8MPa）であり，溶接金属はJIS Z3312 YGW11（降伏応力：509.6MPa）である。用いた材料の物理定数および機械的諸性質の温度依存性は文献²⁰⁾を参照した。外部温度は実験時の気温である23.2℃とした。

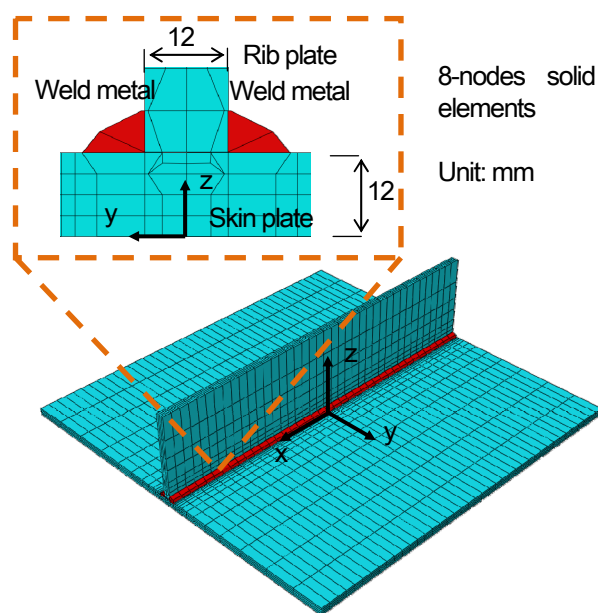


図-2 解析モデルの要素分割

上述の溶接を、スキンプレートに何ら外力を負荷しない状態で実施する。その他、スキンプレートに対し、溶接線方向に一定外力を荷重制御により負荷した状態で溶接する2ケースをモデル化する。本研究で対象とするモデルでは、溶接残留応力のうち、溶接線方向の直応力成分が最も大きくなる。このため、外力の方向は溶接線方向のみとし、着目する残留応力の成分は溶接線方向の直応力成分のみとする。外力の大きさは、スキンプレートに作用する公称応力が±50MPa, ±100MPa, ±150MPa となるように決定した。

なお、外力無負荷、外力作用下のいずれの場合も、力学的境界条件としてスキンプレートの溶接線直交方向の一端 (x=300) の面内変位を拘束するものとする。

溶接熱源の移動は、要素生成機能を用いて溶接金属部の要素を入熱ステップ毎に逐一構築することで考慮している。また、各ステップで溶接金属部に投与する入熱量 Q は、上述の溶接条件と式 (1) から決定した。

一方、モデル外周の自然冷却は、物体表面からの熱伝達として表現している。

$$Q = \eta \frac{EI}{v} \quad (1)$$

ここに、 η : 熱効率 (アーク溶接の場合、65~80%²⁶⁾、本モデルの場合、70%)

E : 電圧 (V)

I : 電流 (A)

v : 速度 (mm/s)

2.2 解析手法の精度検証

本研究で実施する溶接現象の解析手法の精度を検証するため、既往の研究^{20,21)}で実施されたすみ肉溶接実験をシミュレーションした。これは、本研究における解析モデルのうち、外力無負荷状態で溶接するものに相当する。

実験では、溶接線方向中央 (x=0)、スキンプレート下表面 (z=0) において、リップの直下 (y=0) およびそこから幅方向に16, 31, 56mm (y=16, 31, 56) 離れた位置に熱電対を取付け、溶接時の温度を計測している。また、溶接終了後、溶接線方向中央 (x=0) においてスキンプレート上下面にひずみゲージを貼付し、応力弛緩法により残留応力を測定している。

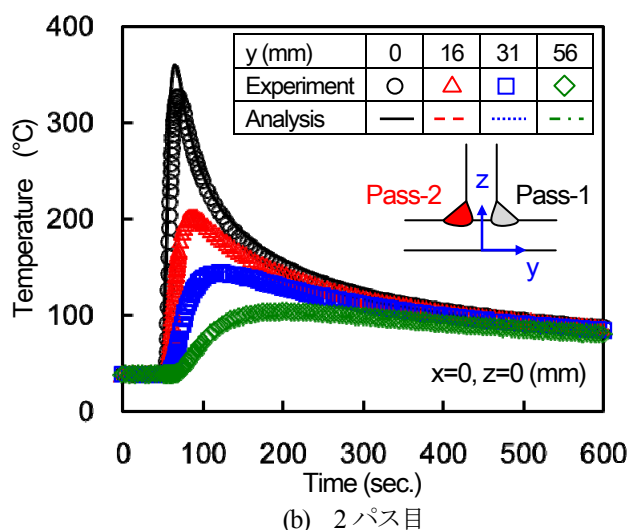
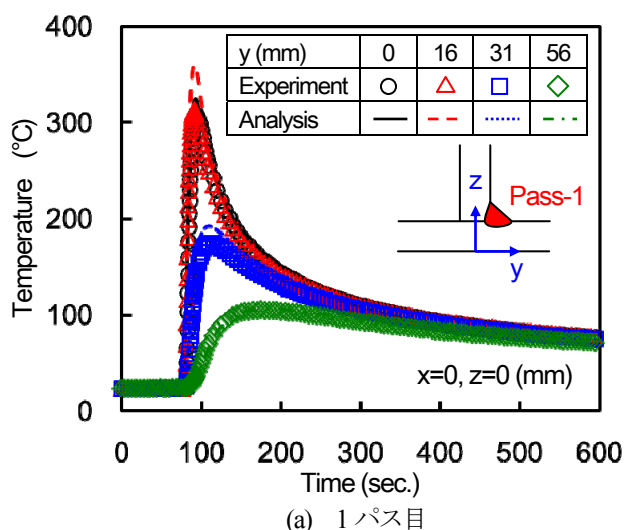


図-3 温度履歴

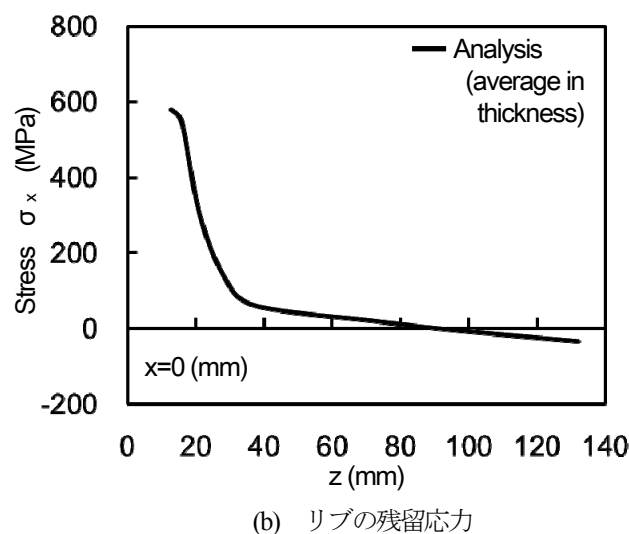
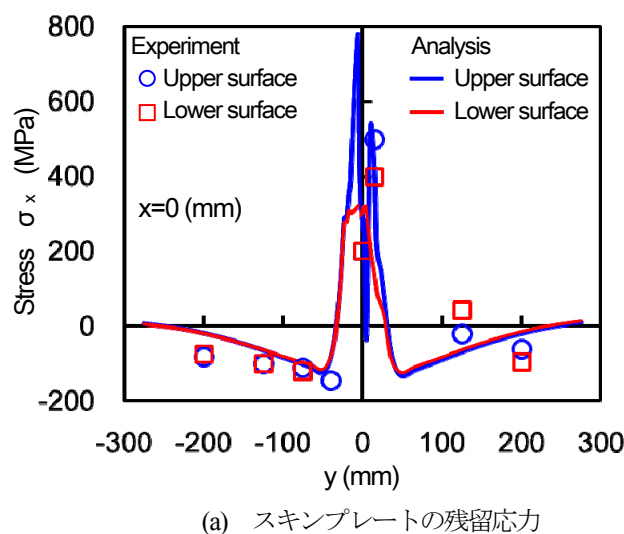


図-4 外力無負荷状態の溶接で生じる残留応力の分布 (溶接線方向の成分)

温度履歴を図-3に、残留応力の分布を図-4に示す。スキンプレーットの残留応力（図-4(a)）については板上下面の値を示している。実験ではリブの残留応力を計測しておらず、図-4(b)には解析結果（板厚方向の平均値）のみを示している。

温度履歴（図-3）については解析により実験結果を精度良く再現できている。スキンプレーットの残留応力（図-4(a)）について、パス1側（ $y>0$ ）の母材部では実験結果と解析結果の差異が見られるが、パス2側（ $y<0$ ）の母材部では両者は良く一致している。一般的なすみ肉溶接の残留応力は図-4(a)のパス2側のような分布になる。また、溶接の順序や方向に関係なく、残留応力の分布はリブを中心としてほぼ左右対称になる²⁷⁾ことや、実験結果が応力弛緩法により得られたものであることを考えれば、解析結果はすみ肉溶接で生じる残留応力を概ね再現していると判断できる。

3. 外力作用下の溶接で生じる残留応力

3.1 溶接中の温度分布

外力作用下の溶接では、溶接中に高温に達することで剛性が低下し、過度の変形や圧縮外力作用下では座屈が発生する可能性がある。溶接中の温度状態について検討するため、熱源が溶接線方向中央（ $x=0$ ）の断面を通過したときの温度分布と、溶接全履歴におけるスキンプレーット内（溶接線方向中央（ $x=0$ ）の断面の最高到達温度の分布を図-5に示す。

溶接金属部の最高温度は、鋼の溶融点（1480℃）を越えている。溶接金属部から離れるに従い、最高到達温度は低くなるが、板幅方向中央（ $y=0$ ）を中心とした幅40mm（ $|y|\leq 20$ ）の領域では、最高到達温度は400℃を越えている。

鋼の降伏点および弾性係数は、温度の上昇と共に低下する。特に、400℃以上では低下の度合いが大きく、約700℃ではほぼゼロになる²⁶⁾（700℃を力学的溶融点と呼ぶ）。す

なわち、外力作用下の溶接では、高温に達し剛性および強度が低下する領域を把握しておくことが重要となる。

Adamsらは、一枚の鋼板に熱源が置かれるとき、式（2）に示す熱源端部からの距離と最高到達温度の関係を提示している^{26,28,29)}。

$$\frac{1}{\theta_{\max} - \theta_0} = \frac{1}{\theta_M - \theta_0} + \frac{y_1}{0.242 Q_{\text{net}} / c \rho h} \quad (2)$$

ここに、 θ_{\max} ：最高到達温度（℃）

θ_0 ：鋼板の初期温度（℃）

θ_M ：鋼板の溶融温度（℃）

y_1 ：熱源端部からの距離（mm）

Q_{net} ：溶接入熱（J/mm）

c ：比熱（J/g・K）

ρ ：密度（g/mm³）

h ：板厚（mm）

式（2）中の溶接入熱 Q_{net} を、式（3）に示すすみ肉溶接のスキンプレーットに投与される等価入熱量： Q_{eq} ³⁰⁾に置き換える。

$$Q_{\text{eq}} = Q_{\text{net}} \frac{2t_s}{t_r + 2t_s} \quad (3)$$

ここに、 t_s および t_r はそれぞれスキンプレーットおよびリブの板厚である。

式（2）および式（3）を本モデルに適用した場合、溶接止端部からの距離が約5mm以内の領域で、最高温度が400℃以上に達することになる。本モデルの場合、溶接止端部の y 座標が $y=\pm 15$ であり、およそ $|y|\leq 20$ の領域が400℃以上に達する。これは、上述の解析結果とほぼ一致している。

鈴木らの実施した検討¹⁷⁾では、長さ1200mm、幅150mm、板厚6mmのSM41鋼板の中央に、瞬間的に長さ600mmの熱源が投与されるケースを想定し、溶接線方向に140MPaの応力が作用した状態で溶接した場合、幅方向の80～90%の領域が溶接中に降伏すると報告している。このケースは、本研究で対象とするモデルや実構造の場合と比べて板幅が狭いうえに、瞬間的に入熱される極めて厳しい

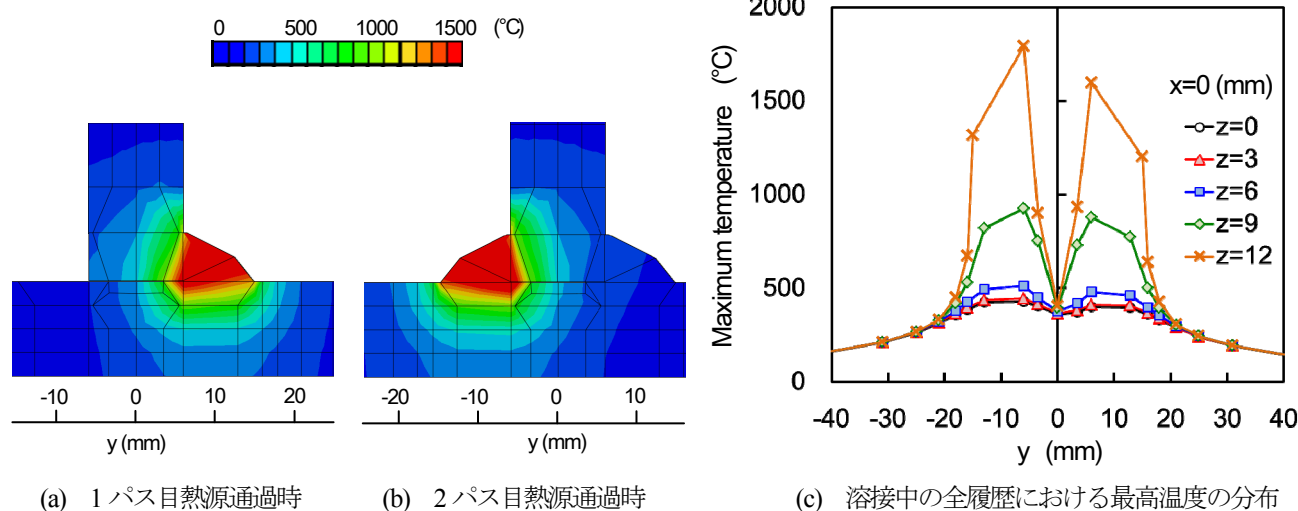


図-5 溶接線方向中央断面（ $x=0$ ）の温度分布

条件によるものである。

式 (2) から分かるように、溶接による最高到達温度と熱源からの距離は反比例の関係にあり、板幅が大きくなるほど、溶接により高温に達する領域が板幅に対し相対的に狭くなる。本モデルの場合、溶接により剛性および強度が低下する領域 (40mm) は、板幅 (600mm) の約 7% である。さらに寸法が大きい実構造物では、高温域の剛性および降伏強度の低下による塑性変形、座屈発生の危険性はより低くなるものと予測される。

外力作用下の溶接では、高温に達し剛性および強度が低下する領域を事前に予測することが重要である。本モデルのように単純な構造の場合は、上述のように熱伝導理論による簡易な推定を行うことが可能である。実構造物の場合は、非定常熱伝導解析により把握した溶接による温度分布を施工可否判定の一助とすべきと考える。

3.2 溶接中の過渡応力および過渡変位

(1) 溶接金属部の応力

溶接中の過渡的な応力の挙動に及ぼす外力の影響について検討するため、溶接線方向の中央断面 ($x=0$) における溶接金属部 (図-2 に示す赤色の要素) の応力の履歴を図-6 に示す。応力は溶接金属部二要素の平均値である。また、図には同じ要素の温度履歴も点線で示している。

外力無負荷状態 ($\sigma = 0$) の溶接で生じる応力を黒色の実線で、引張外力 $\sigma = +50\text{MPa}$, $+100\text{MPa}$, $+150\text{MPa}$ 作用下の溶接で生じる応力をそれぞれ赤、青、緑色の実線で示している。また、圧縮外力 $\sigma = -50\text{MPa}$, -100MPa , -150MPa 作用下の溶接で生じる応力をそれぞれ赤、青、緑色の破線で示しているが、1 パス側、2 パス側共に、外力の有無、方向および大きさに関係なく、生成される応力の挙動はほぼ同じである。溶接金属部は高温に達し剛性を失うため、外力による荷重を負担しない。つまり、溶接金属部の応力に及ぼす外力の影響が小さいことを結果は示唆している。

外力の影響を考慮せず、溶接金属部の応力の生成履歴について述べる。まず、1 パス目の溶接金属部に注目する (図

—6(a))。1 パス目の熱源が溶接線方向中央を通過する時 (時刻 40 秒)、溶接金属部の温度が溶融点 (1480°C) から冷却を開始し、これに伴い高い引張応力が生じている。1 パス目終了後、2 パス目の熱源が溶接線方向中央を通過する時 (時刻 840 秒)、2 パス側の入熱の影響により溶接金属周辺の剛性が低下することで、1 パス側の溶接金属の引張応力が弛緩される。その後、剛性の回復と共に再び引張応力が生じる。2 パス目の溶接金属部 (図-6(b)) については、1 パス目溶接中はまだ要素自身が存在していないが、2 パス目溶接中の挙動は、1 パス目溶接中の 1 パス側の溶接金属部の挙動と同様である。

(2) スキンプレート母材部の応力

次に、スキンプレート母材部の代表として、重心の y 座標が $\pm 100\text{mm}$ に位置する要素の応力の生成履歴を図-7 に示す。応力は板厚方向の平均値である。溶接金属部の場合と違って、母材部の応力は作用外力の影響を受ける。

外力無負荷状態 ($\sigma = 0$) の溶接で母材部に生じる応力 (黒色実線) は、1 パス目 (図-7(a))、2 パス目 (図-7(b)) 共に、注目する $x=0$ の断面を熱源が通過する時に引張となり、熱源通過後に圧縮に転じている。

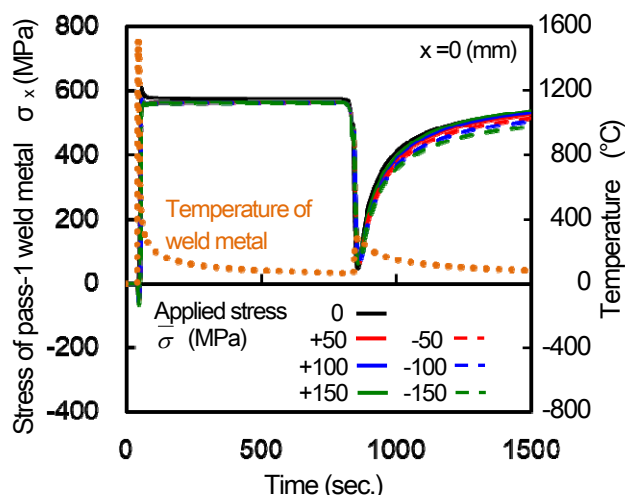
外力作用下の溶接では、溶接開始時に外力の方向および大きさに応じた応力が既に母材部に生じており、それに溶接で生じる応力 (黒色実線) が付加される形になっている。作用外力 $\sigma = -150$ の場合 (緑色の点線)、最終的な応力が母材の降伏応力 (254.8MPa) に達していることがわかる。

(3) スキンプレートの面内変位

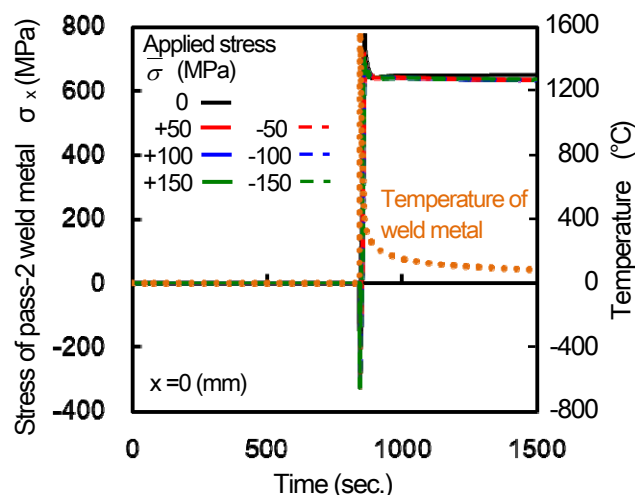
スキンプレートの面内変位の挙動を図-8 に示す。図の縦軸は、スキンプレート端部の面内方向変位の平均値 (u) をスキンプレートの長さ ($a=600$) で除し、百分率で示した値である。

外力無負荷状態の溶接 ($\sigma = 0$: 黒色実線) では、1 パス目の入熱中 ($0 \sim 80$ 秒) に膨張し、入熱後の冷却過程で収縮している。2 パス目も同じく入熱中 ($800 \sim 880$ 秒) に膨張し、その後収縮している。

外力作用下の溶接では、溶接開始時に外力に応じた変位



(a) 1 パス側溶接金属部



(b) 2 パス側溶接金属部

図-6 溶接金属部 ($x=0$) の応力履歴

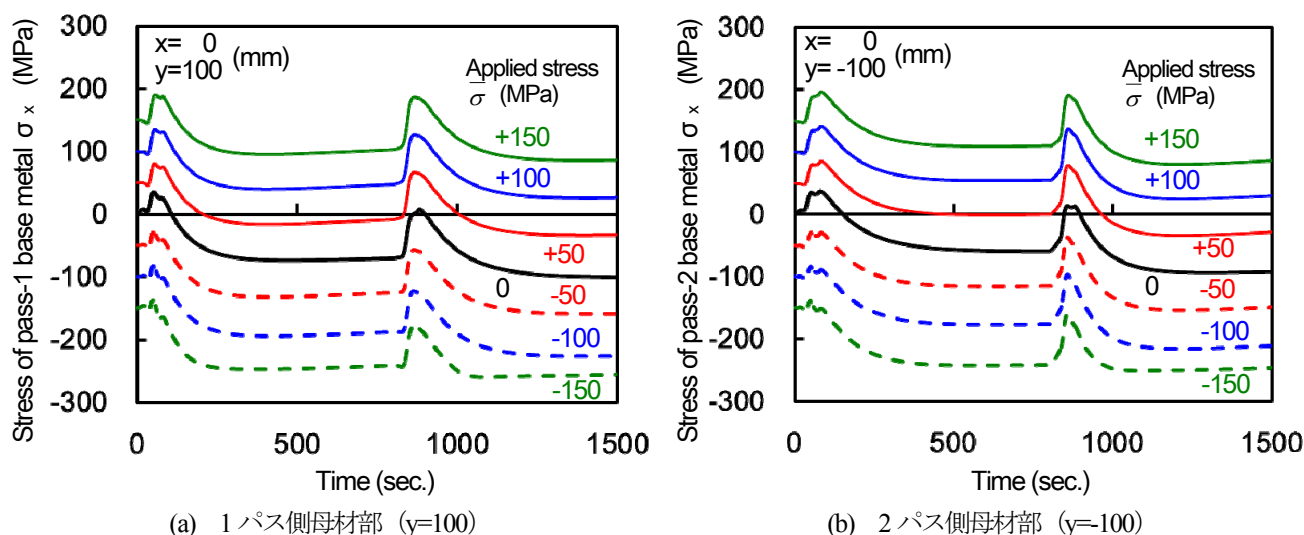


図-7 母材部 (y=±100) の応力履歴

が生じており、それに溶接による変位が付加される。本モデルでは、外力が±150MPa 作用した状態で溶接しても、溶接中および溶接終了後の面内変位は板長の 0.15%以下であり、スキンプレート全体が降伏するほどの変位は生じなかった。

3.3 溶接後の応力分布

外力作用下の溶接後に生じた応力の分布 (板長方向中央 (x=0) の断面) を図-9 (引張外力作用下) および図-10 (圧縮外力作用下) に示す。この応力分布は、溶接後、板全体の温度が室温まで冷却しているが、外力は除荷していない状態のものである。図中央の斜線部は、溶接時に最高温度が 400°C を越える領域 ($|y| \leq 20$) である。

まず、各モデルについて、引張外力作用下における溶接後の応力と、外力無負荷状態における溶接残留応力を比較する。スキンプレートの溶接部の応力 (図-9(a)) は、外力無負荷状態における溶接残留応力とほぼ同じとなっている。母材部では、外力無負荷状態における溶接で生じる圧縮応力が引張側に推移したような分布となっている。リブの応力分布 (図-9(b)) は、作用させた外力の大きさに関係なく、外力無負荷状態の溶接残留応力の分布とほぼ同じである。

次に、圧縮荷重下における溶接後の応力と、外力無負荷状態における溶接残留応力を比較する。引張外力作用下の場合と同様、スキンプレートの溶接金属周辺の応力は、外力無負荷状態における溶接残留応力とほぼ同じである。母材部では、外力無負荷状態における溶接で生じる圧縮応力がさらに圧縮側に推移している。-150MPa の外力を負荷した場合は、母材部の一部が降伏応力 (254.8MPa) に達している (図-10(a))。リブの応力分布も、引張外力作用下の場合と同じで、外力の大きさに関係なく外力無負荷状態の溶接残留応力の分布とほとんど変わらない (図-10(b))。

引張、圧縮のいずれの方向の外力が作用する場合も、溶接部周辺の応力は外力無負荷状態における溶接残留応力とほぼ同じ分布になり、作用外力の影響をあまり受けない。

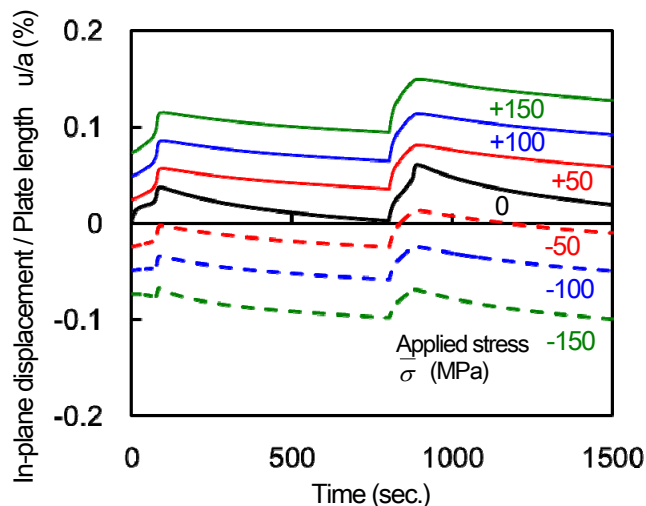


図-8 スキンプレートの面内方向変位の履歴

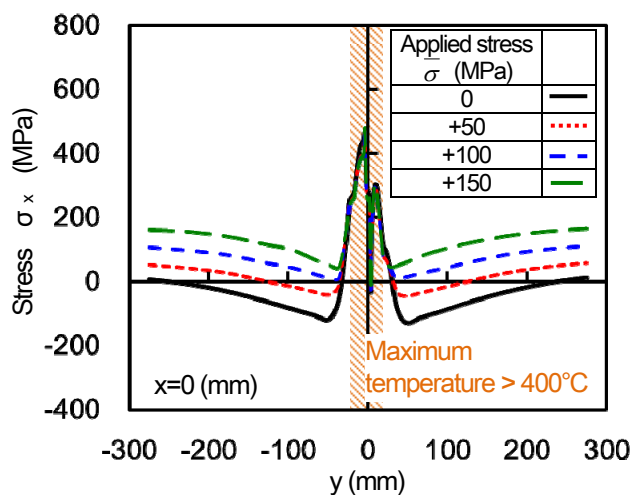
一方、母材部の応力分布は作用外力の影響を受けて種々変化することがわかった。

3.4 除荷後の応力分布

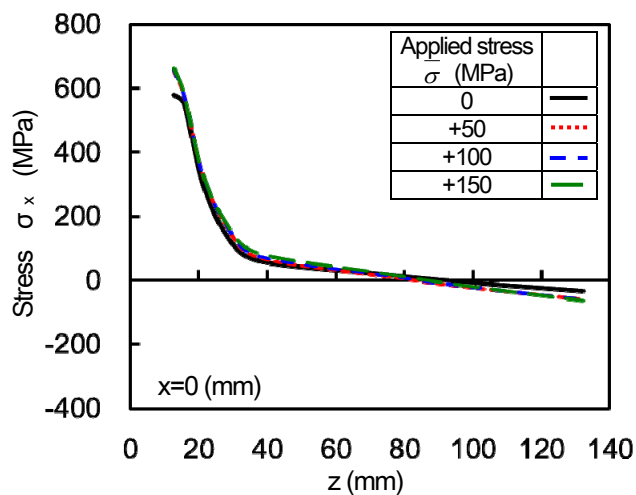
溶接終了後、さらに除荷した後の応力分布を図-11 および図-12 に示す。

外力作用下における溶接で生じた応力分布は、溶接部周辺では除荷してもほとんど変わらなかった。母材部では、除荷すると弾性変形が解放される。引張外力作用下の溶接後、除荷するとスキンプレートの母材部には外力無負荷状態の溶接残留応力よりも小さな圧縮応力が残った。リブには、引張外力を除荷することで圧縮力が作用し、応力分布はわずかに圧縮側に推移した。一方、圧縮外力作用下の溶接後、除荷すると、スキンプレートの溶接部に隣接する母材部 (およそ $30 \leq |y| \leq 90$ の領域) の応力が大きく引張側に推移した。この影響で、リブの応力分布も引張側に推移したと考えられる。

なお、ここで示す溶接終了後に除荷した後の応力が、本来の残留応力であるが、本研究では、外力は構造物におけ

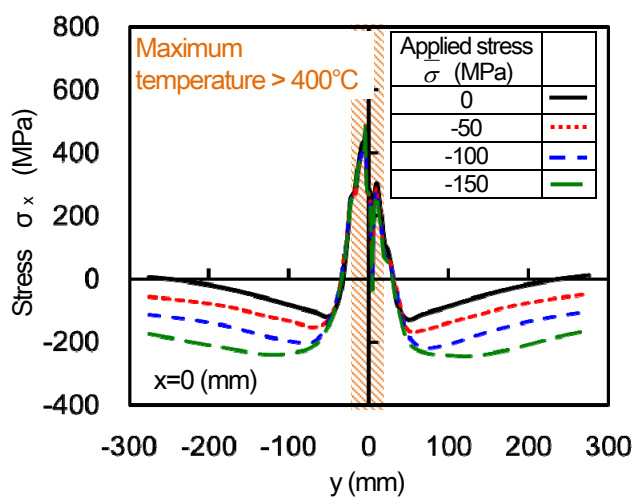


(a) スキンプレートの応力分布

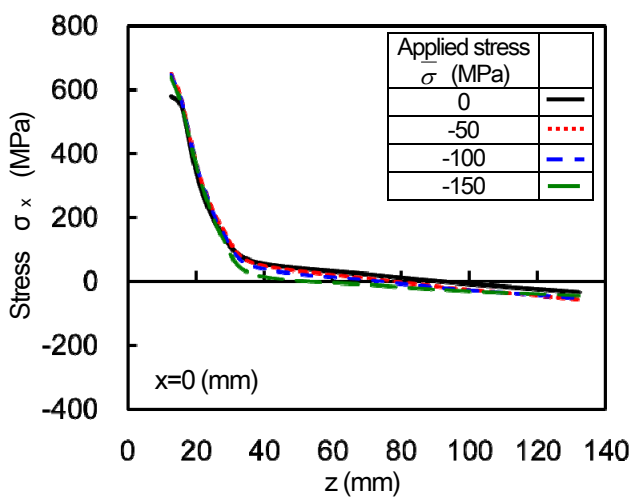


(b) リブの応力分布

図-9 引張外力作用下の溶接で生じる応力の分布（溶接線方向の成分）

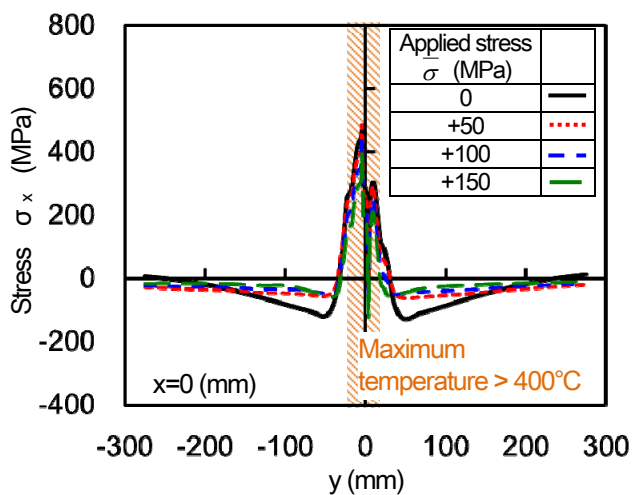


(a) スキンプレートの応力分布

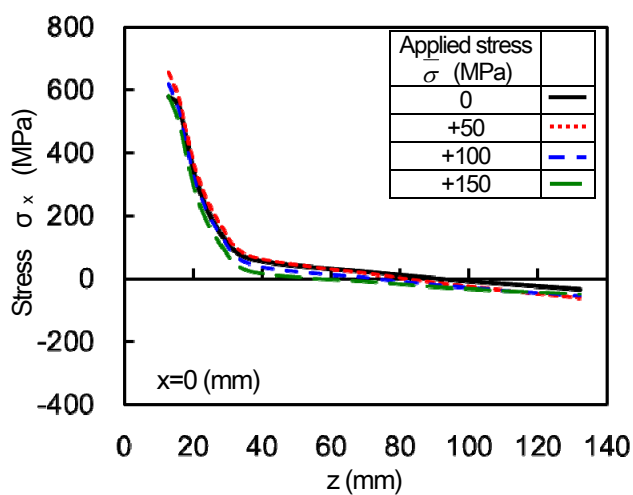


(b) リブの応力分布

図-10 圧縮外力作用下の溶接で生じる応力の分布（溶接線方向の成分）



(a) スキンプレートの応力分布



(b) リブの応力分布

図-11 引張外力作用下の溶接および除荷後の応力分布（溶接線方向の成分）

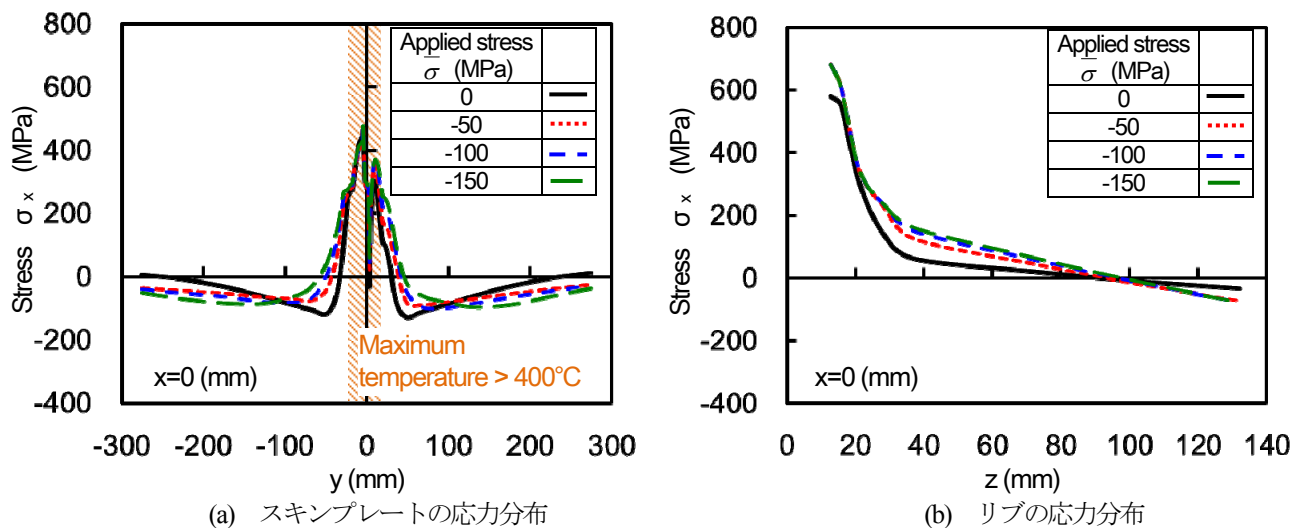


図-12 圧縮外力作用下の溶接および除荷後の応力分布（溶接線方向の成分）

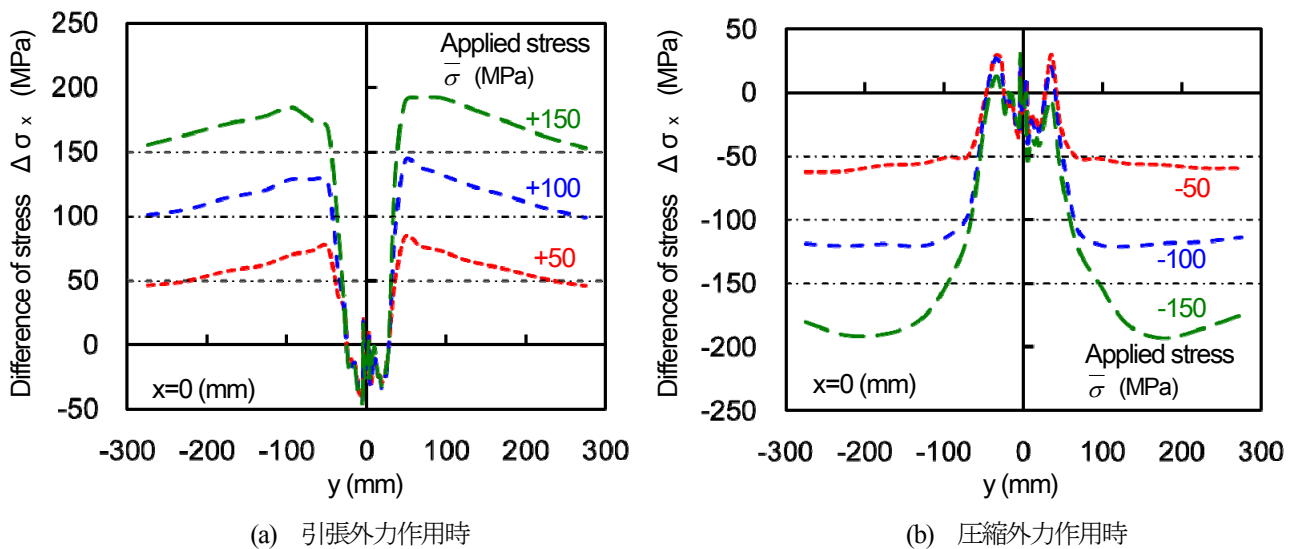


図-13 外力作用下の溶接残留応力と外力無負荷時の溶接残留応力の差の分布

る死荷重に相当するものと考えており、溶接後も除荷されることを想定していない。よって、溶接後、外力を除荷しない状態の応力（図-9 および図-10）を本研究における残留応力と呼ぶことにする。

4. 溶接残留応力に及ぼす外力の影響

4.1 溶接部および母材部の残留応力分布に及ぼす外力の影響

外力作用下で溶接した場合、溶接部周辺の領域は高温に達するため剛性が低下し、外力による荷重を負担しない。よって、外力作用下で溶接した場合も、溶接部周辺の応力は外力無負荷状態の溶接で生じる残留応力と同じような分布になる。一方、溶接部周辺が負担するべき荷重は、母材部に配分される。すなわち、母材部には、外力による公称応力 $\bar{\sigma}$ よりも大きい応力が作用することになる。

外力作用下の溶接でスキンプレートに生じる残留応力

と外力無負荷状態の溶接残留応力の差、すなわち、図-9 および図-10 におけるそれぞれの点線と実線との差（以降、 $\Delta\sigma_x$ と称す）の分布を図-13 に示す。溶接部周辺、すなわち板幅方向中央部の約 70mm の領域（ $|y| \leq 35$ ）では、外力（ $\bar{\sigma}$ ）の大きさに関係なく $\Delta\sigma_x$ の分布がほぼ同じとなっている。この領域の応力分布は、外力の大きさによらず外力の影響を受けないものと推察される。一方、 $|y| \geq 35$ の領域では、 $\Delta\sigma_x$ は $\bar{\sigma}$ よりも大きく、 $\Delta\sigma_x$ が $\bar{\sigma}$ の約 1.67 倍に達する部分（ $\bar{\sigma}=50$ における $y=50$ の部分）も存在し、母材部への荷重の配分の影響が見受けられる。また、 $\bar{\sigma}$ の絶対値が大きいほど、 $\bar{\sigma}$ と $\Delta\sigma_x$ との差が大きくなっている。

外力作用下の溶接でスキンプレートの母材部に生じる残留応力は、外力無負荷状態の溶接残留応力の分布に作用外力による公称応力を一様に足合せた分布形状にはならないことを結果は示唆している。

一方、本モデルでは、溶接時にはリブに外力を作用させていない。スキンプレートにリブを溶接することで、スキンプレートに作用する外力が一部リブにも分担されると

推測されるが、その程度は小さいことが結果から推察される。ただし、図-11、図-12 に示すように、外力を除荷した場合はスキンプレーットの弾性変形をリブが拘束するため、リブの応力分布が変化することに注意が必要である。

4.2 溶接部および母材部の平均残留応力と外力の関係

作用外力による公称応力 ($\bar{\sigma}$) の大きさと、溶接部および母材部の残留応力の平均値の関係を図-14 に示す。なお、ここでの溶接部はスキンプレーットの幅方向中央の70mmの領域 ($|y| \leq 35$) とし、母材部は、スキンプレーットのうち中央の幅70mmを除いた領域 ($|y| \geq 35$) とする。

本解析手法の精度の範囲内であるが、外力作用下の溶接で溶接部に生じる残留応力の平均値 (□印) は、外力の大きさおよび方向に無関係であり、外力無負荷状態 ($\bar{\sigma} = 0$) の溶接残留応力とほぼ同じである。母材部に生じる残留応力の平均値 (○印) は、外力無負荷状態における母材部の残留応力の平均値 ($\sigma_{x0} = -60$) に、作用外力による公称応力 $\bar{\sigma}$ を加えた応力の大きさ ($\sigma_{x0} + \bar{\sigma}$: 点線) とほぼ一致している。両者 (○印と点線) の差は、最大で約 17MPa であった。

外力作用下の溶接では、溶接部周辺から母材部に荷重が配分され、局所的には外力による公称応力よりも大きな応力が作用する。板幅に対する溶接部の幅の割合が大きいほど、溶接部から母材部に配分される荷重が大きくなると考えられる。本モデルでは板幅 ($b=600$) に対する溶接部 ($|y| \leq 35$) の割合は約 12% であるが、この程度の寸法であれば、母材部の平均応力は外力無負荷時の残留応力に外力による公称応力を足合せることで概ね推定できるといえる。さらに、実構造物では板幅に対する溶接部の割合が小さくなるので、溶接部から母材部への荷重の配分の影響はより小さくなると考えられる。

5. 結言

既設構造物に補修補強のための新部材を付加する状況を想定し、面内方向に一定の引張荷重あるいは圧縮荷重を受ける薄肉鋼板に対する補剛材のすみ肉溶接を有限要素解析によりシミュレーションした。外力無負荷状態およびスキンプレーットに対し溶接線方向の一定引張・圧縮外力を負荷した状態で生じる残留応力を求め、その特徴について種々検討した。

得られた主たる知見を以下に示す。

- (1) 非定常熱伝導解析および熱伝導理論により、本モデルにおいて溶接中に高温に達し、剛性および降伏強度が低下する領域を明確にした。
- (2) 本モデルでは、溶接中に剛性および強度が低下する領域がスキンプレーットの全幅に比べて狭いため、外力が作用した状態で溶接しても、溶接中および溶接終了後にスキンプレーット全体が降伏するほどの変位は生じなかった。
- (3) 引張、圧縮のいずれの方向の外力が作用する場合も、

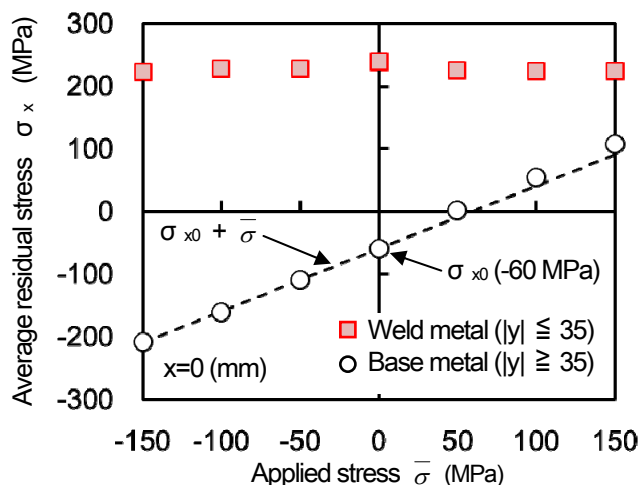


図-14 作用外力と溶接部 ($|y| \leq 35$) および母材部 ($|y| \geq 35$) の平均残留応力の関係

スキンプレーットの溶接部周辺は外力による荷重を負担しない。このため、溶接部周辺の応力は外力無負荷状態における溶接残留応力とほぼ同じ分布になることがわかった。

- (4) スキンプレーットの母材部では、外力による応力に溶接残留応力が加算されるが、溶接部周辺が負担しない荷重が母材部に配分される。このため、スキンプレーット全体の応力分布は外力無負荷状態の溶接残留応力と外力による公称応力を単純に足合せた形状にはならないことがわかった。
- (5) 外力を負荷していないリブの残留応力分布は、外力無負荷状態の溶接残留応力分布とほぼ同じであった。
- (6) 板幅に対する溶接部の幅の割合が大きいほど、溶接部から母材部に配分される荷重が大きくなると推察される。しかし、本モデルの寸法であれば、溶接部から母材部への荷重の配分の影響は小さく、母材部の平均応力は外力無負荷時の残留応力に外力による公称応力を足合せることで概ね推定できることを示した。

以上の結果より、外力作用下の構造物への溶接施工における留意点を挙げる。

- (7) 外力作用下の構造物に溶接を行う場合、溶接中の座屈や塑性変形発生防止の観点から、溶接中に剛性や降伏強度が低下する領域を明確にし、それが構造全体に占める割合を考慮して、溶接施工の可否を判断すべきである。
- (8) 外力作用下の溶接では、外力は溶接部よりもむしろ母材部の応力分布に大きな影響を及ぼす。引張外力作用下の溶接では、母材部に生じる圧縮残留応力と外力による応力が相殺する。しかし、圧縮外力作用下の溶接では、母材部の圧縮残留応力と外力による応力が重畳するため、座屈発生の予測および評価が溶接施工の可否判定において不可欠となる。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：供用下にある鋼構造物の高力ボルトによる補強・補修指針（案），JSSC レポート，1989.
- 2) 日本道路協会：道路橋補修便覧，丸善出版，1989.
- 3) 堀川浩甫，高橋芳樹：供用下における鋼橋の補修・補強溶接，溶接学会誌，第 59 巻第 7 号，pp.46-50，1990.
- 4) 財団法人沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（改訂版），大光社印刷，1997.
- 5) 中西保正，中村義隆，村山武弘，酒井啓一，河野武亮，上条健夫：変動荷重下における溶接割れに対する実験的考察，溶接学会論文集，第 7 巻第 3 号，pp.35-41，1989.
- 6) 井元 泉，中西保正，堀川浩甫：変動荷重下における溶接割れに対する実験的考察，溶接学会論文集，第 7 巻第 3 号，pp.35-41，1989.
- 7) 井元 泉，金 裕哲，中西保正，鈴木博之，堀川浩甫：変動荷重下の凝固割れに対する力学的指標と割れ発生評価式の提案，溶接学会論文集，第 8 巻第 1 号，pp.38-43，1990.
- 8) 井元 泉，金 裕哲，中西保正，鈴木博之，堀川浩甫：変動荷重下の凝固割れに対する力学的検討，溶接学会論文集，第 9 巻第 1 号，pp.43-47，1991.
- 9) 井元 泉，金 裕哲，中西保正，堀川浩甫：変動荷重下における溶接施工可否判定法（第三法），溶接学会論文集，第 9 巻第 2 号，pp.294-298，1991.
- 10) 日本鋼構造協会：供用下にある鋼構造物の溶接による補修・補強指針（案），JSSC レポート，1988.
- 11) 日本鋼構造協会：供用下にある鋼構造物の溶接施工指針（案），JSSC レポート，1993.
- 12) 上野康雄，李 相亨，藤平正一郎，金 裕哲：溶接施工に及ぼす静的荷重の影響，溶接学会論文集，第 28 巻第 4 号，pp.391-394，2010.
- 13) 上野康雄，李 相亨，藤平正一郎，金 裕哲：繰返し荷重下における溶接施工性の検証，溶接学会論文集，第 28 巻第 4 号，pp.436-442，2010.
- 14) 上野康雄，李 相亨，藤平正一郎，金 裕哲：繰返し荷重下における溶接補修法の提案，溶接学会論文集，第 29 巻第 4 号，pp.267-273，2011.
- 15) 鈴木博之，堀川浩甫：応力作用下で溶接された平板の変形挙動，土木学会論文集，No. 350/I-2，pp.237-242，1984.
- 16) 鈴木博之，堀川浩甫：応力作用下にあるパイプ柱への溶接，土木学会論文集，No. 356/I-3，pp.489-497，1985.
- 17) 鈴木博之，堀川浩甫：応力作用下で溶接された継手の機械的性質および残留応力，土木学会論文集，No. 362/I-4，pp.277-283，1985.
- 18) 堀川浩甫，鈴木博之：荷重作用下にあるプレートガーダーへの溶接，土木学会論文集，No. 368/I-5，pp.417-424，1986.
- 19) Y. Fujita, T. Nomoto and H. Hasegawa: Studies on Thermal Elastic-Plastic Problems (1st Report), Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 130, pp.183-191, 1971.
- 20) 金 裕哲，李 在翼，猪瀬幸太郎：すみ肉溶接で生じる面外変形の高精度予測，溶接学会論文集，第 23 巻第 3 号，pp.431-435，2005.
- 21) 李 在翼：溶接面外変形の高精度予測における支配因子の特定とその正当性の検証，大阪大学学位論文，2006.
- 22) 金 裕哲，李 在翼，澤田 守，猪瀬幸太郎：溶接変形の高精度予測における支配因子の正当性と一般性の検証，溶接学会論文集，第 25 巻第 3 号，pp.450-454，2007.
- 23) 小松定夫，牛尾正之，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，第 265 号，pp.25-35，1977.
- 24) 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，第 288 号，pp.1-11，1979.
- 25) 廣畑幹人，伊藤義人：拘束および外力作用下のスリット溶接継手に生じる残留応力に関する解析的研究，土木学会論文集 A2 (応用力学)，Vol. 68, No. 2, I-673-I-682，2012.
- 26) 溶接学会：第 2 版 溶接接合便覧，丸善出版，2003.
- 27) 金 裕哲，張 景皓，堀川浩甫：すみ肉溶接で生じる面外変形・残留応力に及ぼす溶接諸条件の影響，鋼構造論文集第 6 巻第 21 号，pp.77-82，1998.
- 28) C. M. Adams : Cooling Rates and Peak Temperatures in Fusion Welding, Welding Journals, Vol. 37, pp.210s-215s, 1958.
- 29) Z. Paley, J. N. Lynch and C. M. Adams : Heat Flow in Welding Heavy Steel Plates, Welding Journals, Vol. 43, pp. 71s-79s, 1964.
- 30) 佐藤邦彦，寺崎俊夫，吹田義一，田中正文：基本溶接継手の残留応力分布と溶接諸条件の関係，溶接学会誌，第 48 巻第 9 号，pp. 52-57，1979.

(2013 年 3 月 18 日 受付)