

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

Numerical study on residual stress generated in slit welded joints under restraint/loading

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 in slit welded joints under restraint or loading, a series of numerical simulation was carried out. The residual stress in weld metal in the cross direction to the weld line under the condition that the in-plane displacement at the plate edge was fixed (i.e., the external restraint condition) was larger than that when the displacement was not fixed. However, the residual stress under the constant tensile loading on the plate edge was almost the same as that under the external restraint condition. The degree of the restraint in the slit under the various boundary conditions could be relatively evaluated by the restraint intensity. Although the slit length was the same, the welding residual stress varied from 20 to 80% of the yield stress due to the difference of the degree of the restraint.

Key Words: *Welding, Residual stress, Thermo-stress analysis, Restraint intensity*

1. 緒言

近年, 既設鋼構造物の溶接部における疲労き裂の発生事例が多数報告されており, 疲労き裂の補修は鋼構造物の維持管理における重要課題のひとつとなっている。

疲労き裂の補修には, ストップホール穿孔とボルト締めや, ボルト接合による当て板補修が主として適用される¹⁾。一方, 作業空間の確保が困難な狭隘部や, 部材裏側へのアクセスが不可能な箇所が生じた疲労き裂のように, ボルト接合による補修が適用できない場合, 溶接によるき裂補修が採用されることがある²⁾。溶接により疲労き裂を補修する場合, グラインダーやガウジングによりき裂を除去した後, 新たに溶接によりき裂除去部を埋戻す手法が一般的である。また, 疲労き裂の補修に限らず, 腐食した鋼部材の取替えや, 補強部材の取り付けにも溶接が用いられる場合がある³⁾。

上述のように既設鋼構造物の補修に現場溶接を適用する際, 気象条件や溶接姿勢の制限など, 施工環境が工場での溶接と比べて厳しくなるために, 溶接割れ発生の可能性が高くなることが注意点として挙げられる。そのため, 現場溶接に先立ち, 実環境を考慮した施工試験を実施すると共に, 溶接後に割れなど欠陥の発生有無を検査することが不可欠である。特に, 疲労き裂の溶接補修において溶接割

れやブローホールなどの溶接欠陥が生じた場合, それらが補修後における新たなき裂の発生源となる危険性が高い。疲労き裂の溶接補修部から比較的短期間でき裂が再発生した事例も報告されている⁴⁾。

一方, 溶接補修において割れや欠陥が検出されなかった場合でも, 補修後の溶接部から疲労き裂が再発生する危険性は高い。その理由のひとつとして, 溶接部に生じる残留応力が挙げられる。溶接では, 局所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(いわゆる自拘束)で残留応力が生じる。特に溶接部には高い引張残留応力が生じるために, 溶接部の応力集中と相俟って疲労き裂の発生, 進展を助長する。

溶接残留応力が鋼構造物の各種強度に及ぼす影響について, 新設のI形断面, 箱形断面部材等の溶接残留応力の測定実験と, 実験結果を用いた弾塑性有限要素解析が既往の研究により積極的に実施され, その成果が体系化されてきた^{5~10)}。部材の組立てで生じる溶接残留応力の特徴については明らかにされている部分が多いが, これは, 残留応力のうち, 耐力に影響を及ぼす溶接線方向の応力成分, 特に圧縮応力に注目したものである。疲労き裂の発生・進展に影響を及ぼすのは溶接線直角方向の引張残留応力であるが, 既往の研究ではその特徴について検討した例はほとんどない。

一方, 既設鋼構造物に対する補修溶接と新設の鋼構造部

材の作製における溶接とを比較すると、補修溶接される部材は周辺の部材によって拘束されると共に、死荷重作用下での溶接となる場合が多い。拘束や外力作用下での溶接では、まず、溶接割れの発生を抑制することが最優先課題である。このため、既往の研究では継手の拘束状態と溶接割れ感受性に関する実験的、解析的検討が数多くなされ、その結果が体系化されてきた¹¹⁻¹⁵⁾。しかし、既往の研究では溶接割れの発生の有無に主に焦点が当てられ、割れが発生することなく溶接された継手に生じる残留応力についてはあまり関心が払われてこなかった。既設鋼構造物に対する溶接補修では、溶接割れを発生させないことは当然であるが、割れが発生しなくとも、拘束や外力作用下における溶接により、どの程度の残留応力がどのように分布するのか、無拘束、外力無負荷の場合の溶接で生じる残留応力とどのように異なるのかを把握しておくことは、耐荷力や疲労強度など、補修後の部材の力学的性能を担保するうえで重要と考える。

溶接割れや欠陥と違って、現場における溶接残留応力の非破壊的な測定は実質的に不可能である。非破壊的、破壊的方法のいずれの場合も、残留応力の測定は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を極める。これに対し、種々の条件が設定可能であると共に、任意の位置の各応力成分を知ることができる有限要素法によるシミュレーションは、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¹⁶⁾。

本研究では、拘束や外力作用下の部材に対する溶接補修で生じる残留応力の特徴を明らかにするための基礎的検討を目的として、熱応力解析による溶接のシミュレーションを実施する。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パス突合せ溶接を解析対象とする。鋼板端部の拘束状態や作用外力の大きさ、すなわち境界条件を種々変化させて生じる残留応力、特に、疲労強度に多大な影響を及ぼす溶接線直角方向成分の特徴を明示すると共に、端部の拘束の度合いや外力の大きさと、生じる残留応力との関係を明らかにする。

2. 熱応力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に示す。

薄肉鋼板の突合せ溶接継手に生じた疲労き裂の除去部に対する埋戻し溶接を想定し、スリット部の1パス突合せ溶接を解析対象とする。

寸法は、板厚 $t=6$ 、板長 $a=300$ 、板幅 $b=500$ (mm) とし、板中央部に、疲労き裂除去部を想定した開先を有する長さ l のスリットを設ける。

鋼板の寸法 (a , b および t) は、後述する既往の研究¹⁷⁾における実験および解析との整合を考慮して設定した。

鋼板内の自拘束の程度を種々変化させるため、スリット長 l を 60, 120, 180, 240 (mm) と変化させる。また、板端部 ($y=\pm 250$ mm) において溶接線直角 (y) 方向の変位を拘束する、あるいは一定強制変位を与え、外的拘束および外力を付与する。

溶接線直角方向の拘束に注目する理由であるが、直線状の溶接部では止端に沿って溶接線方向に疲労き裂が発生・進展する。残留応力の各成分の中でも、き裂に直交する方向 (溶接線直角方向) の応力成分がき裂の発生を誘起し、進展を助長する。溶接線直角方向の拘束がこの応力成分に大きな影響を及ぼすためである。

ところで、実構造物に用いられる一般的な鋼板に比べ、本モデルの板厚 (6mm) は比較的薄い。これは、本研究では最も基本的な1パス溶接を対象としているためであり、後述する実際の溶接条件で6mmの鋼板に対する1パス溶接が可能であることを確認している。また、道路橋鋼床版に用いられるトラフリブ (Uリブ) の板厚は5~6mmのものも多くあり、この種のトラフリブの突合せ溶接部においても疲労き裂の発生事例^{18,19)}が報告されている。

本モデルを用いた解析結果の一般性は薄板の1パス突合せ溶接に限定されるが、現実的に適用される一条件であると考え採用した。

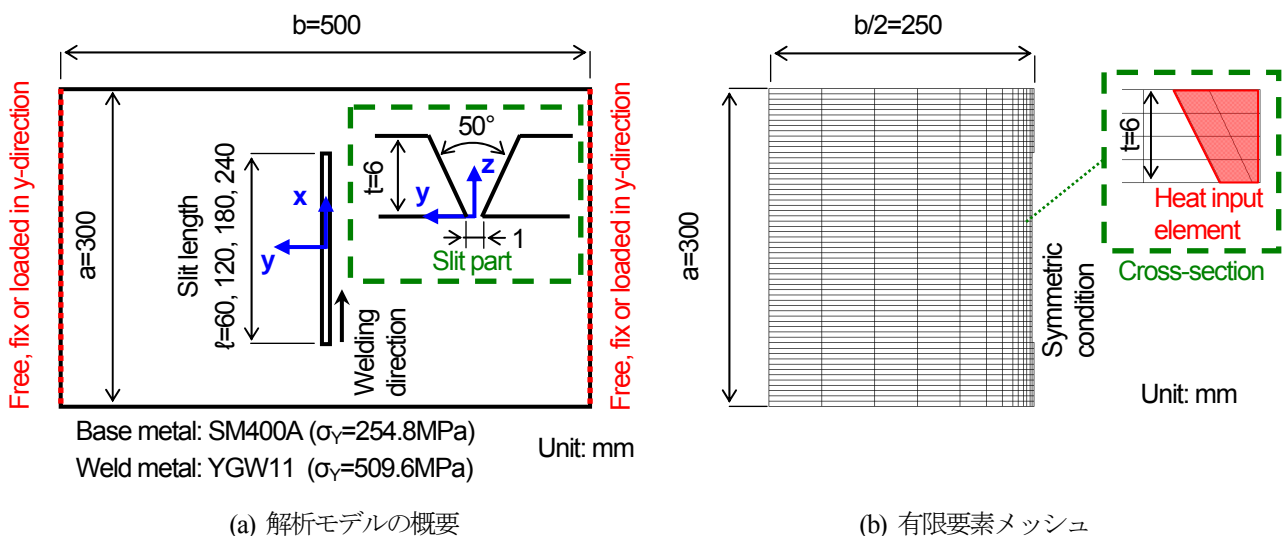


図-1 解析モデル

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。

解析の手順であるが、まず、溶接で生じる温度変化を非定常熱伝導解析により再現する。得られた温度履歴を、熱弾塑性応力解析のインプットデータとして使い、溶接に伴う熱膨張・収縮による残留応力を求める。溶接過程で生じる応力は温度場に影響を与えないものとする。

対称性を考慮し、**図-1(b)**に示すように 1/2 モデルを採用した。また、8 節点ソリッド要素を用い、開先形状を考慮すると共に、板厚方向は4分割した。

母材は SM400A であり、溶接金属は JIS Z3312 YGW11 (引張強度 490MPa 級, 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。

CO₂ ガスアーク溶接による溶接条件は、電流 240A, 電圧 28V, 速度 30cm/min 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¹⁷⁾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突合せ溶接継手を想定したものである。

解析では、溶接金属部に相当する要素に溶接進行方向に順次入熱することで、熱源の移動を考慮している。溶接金属部の各要素は、入熱ステップ毎にモデル内に逐一構築した。入熱は、式(1)で求められる入熱量 q を物体熱流束として与えた。

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

ここに、 η : 熱効率 (アーク溶接の場合、65~80%¹⁵⁾)

E : 電圧(V)

I : 電流(A)

v : 速度 (mm/s)

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。

なお、本解析では、全てのモデルにおいて溶接割れは発生しないものとし、溶接で生じる残留応力にのみ注目する。

2.2 解析プログラムの妥当性検証

熱加工問題では、温度履歴が一般構造力学問題における外力に相当する。非定常熱伝導解析により温度履歴を忠実に再現し、これを用いた熱応力解析を実施することで、残留応力が精度良く求められることが金らの研究により明らかになっている^{17,20)}。

本研究で用いる解析プログラムおよび溶接現象のモデル化の妥当性を検証するため、既往の研究で実施された通常の2枚の板の1パス突合せ溶接実験¹⁷⁾をシミュレーションした。

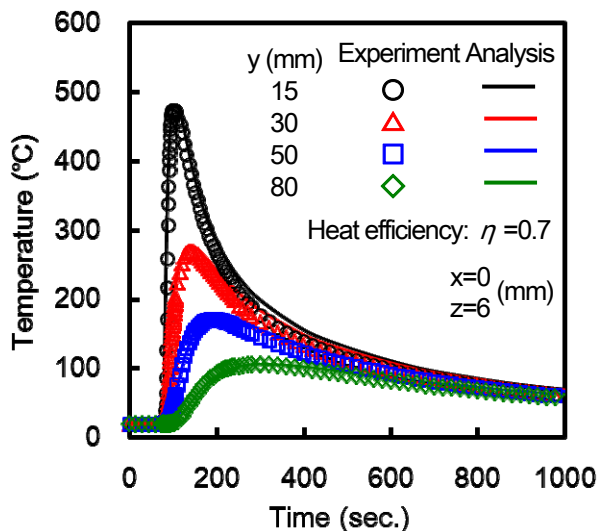
これは、本研究における解析モデルのうち、スリットがなく(スリット長と板長が等しい: $l=a=300$ (mm)), 境界条件が端部無拘束および外力無負荷(自拘束状態)のものに相当する。

実験¹⁷⁾では、溶接線方向中央 ($x=0$ (mm)), 鋼板上表面 ($z=6$ (mm)) において、溶接線から直角方向に 15, 30, 50, 80mm ($y=15, 30, 50, 80$ (mm)) 離れた位置に熱電対を取付け、溶接時の温度を計測した。また、溶接終了後、溶接線方向中央 ($x=0$ (mm)) において鋼板上下面に二軸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た。

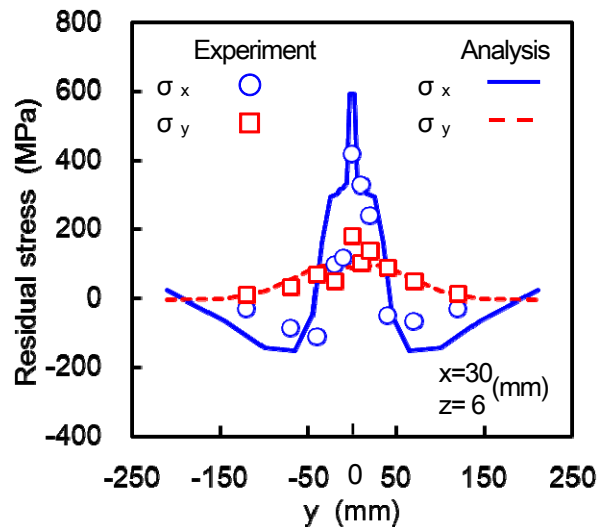
温度計測結果と非定常熱伝導解析により得られた温度履歴を**図-2(a)**に、残留応力測定結果と、熱応力解析により得られた残留応力の分布を**図-2(b)**に示す。残留応力については、上面の計測結果および解析結果を示している。

本解析では熱効率 $\eta=0.7$ としたが、この場合、温度計測結果と非定常熱伝導解析結果は精度良く一致している。また、それを用いて実施した熱応力解析により、溶接残留応力の分布を比較的精度良く再現できることがわかる。

なお、母材に対し強度の高い溶接金属を用いているため、溶接部の引張残留応力が突出していることに注意されたい(室温における母材の降伏応力: 254.8MPa, 溶接金属の降伏応力: 509.6MPa)。また、この応力値は降伏応力の大きさを越えているが、相当応力と降伏応力の大きさは一致



(a) 温度履歴



(b) 残留応力分布

図-2 突合せ溶接継手に対する実験結果¹⁷⁾および解析結果

していることを確認している。以上より、本研究で用いる解析プログラムと溶接のシミュレーション手法は妥当であることが検証できた。

3. 自拘束状態の溶接で生じる残留応力

3.1 解析条件

板端部の変位を拘束しない場合でも、スリット継手の溶接金属の膨張・収縮は周囲の母材に拘束される。その拘束の程度はスリットの長さによって変わり、板長に対するスリットの長さが短くなるほど、溶接線直角方向の拘束の度合いは大きくなる。

ここでは、図-1に示すモデルに対し、板端部の変位は拘束せず、剛体変位のみ拘束した状態（自拘束状態）の溶接で生じる残留応力の分布を明らかにする。このため、板長に対するスリットの長さ (l/a) を種々変化させ、溶接線

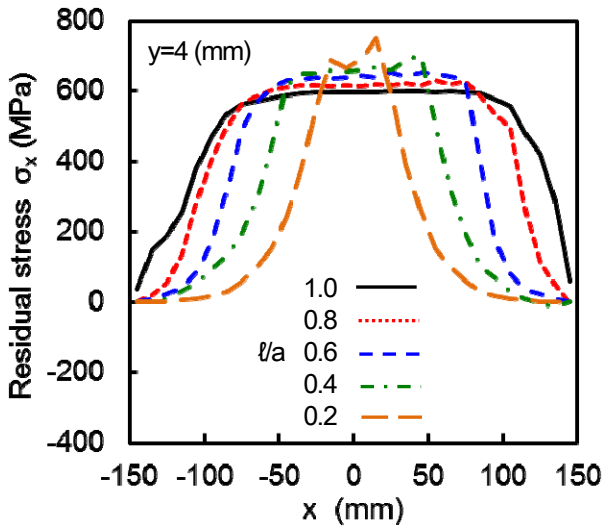
直角方向の拘束（自拘束）の度合いが溶接残留応力の分布に及ぼす影響について検討する。

境界条件であるが、 $x=150, z=0$ (mm) において x 方向変位を、 $x=\pm 150, z=0$ (mm) において z 方向変位を拘束した。また対称条件のために、 $y=0$ (mm) の面で y 方向変位を拘束した。

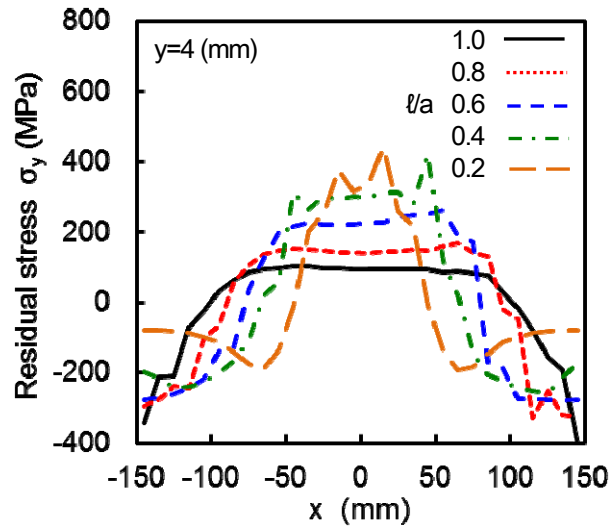
3.2 解析結果および考察

解析結果として、溶接金属部 ($y=4$ (mm)) の残留応力の溶接線 (x) 方向の分布を図-3に示す。なお、板厚が薄くほぼ平面応力状態となっていることを確認したため、残留応力は板厚方向の平均値を示している。

残留応力の溶接線方向成分 σ_x (図-3(a))、溶接線直角方向成分 σ_y (図-3(b)) とともに、スリット部には高い引張応力が生じている。 $l/a=0.2$ および 0.4 の場合、溶接線方向中央 ($x=0$ (mm)) に比べ、溶接終端部 ($x=l/2$) の応力が高くなっている。

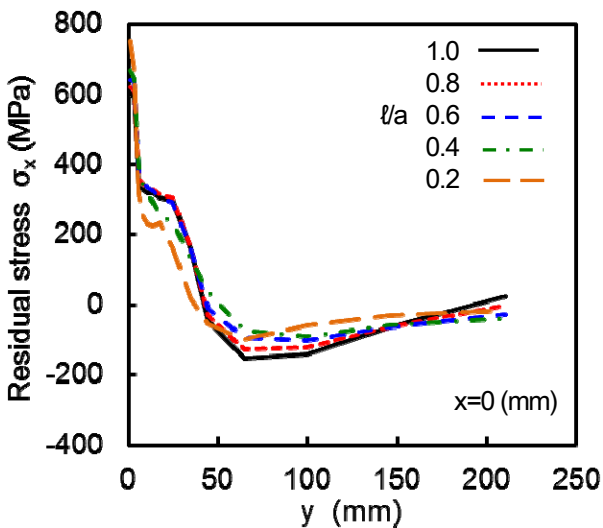


(a) 溶接線方向成分 σ_x

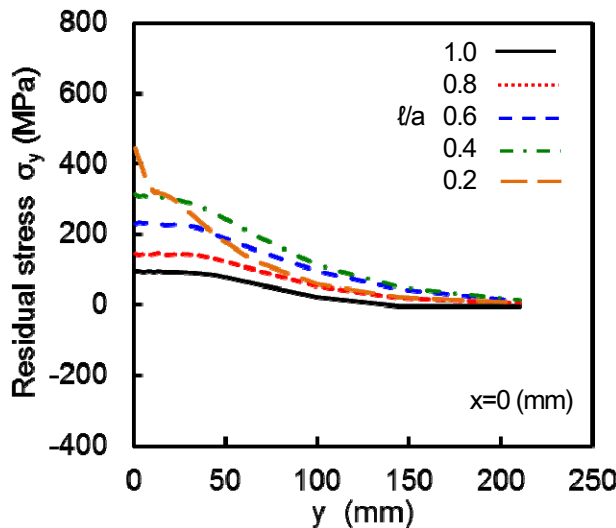


(b) 溶接線直角方向成分 σ_y

図-3 自拘束状態の溶接で生じる残留応力の溶接線方向の分布



(a) 溶接線方向成分 σ_x



(b) 溶接線直角方向成分 σ_y

図-4 自拘束状態の溶接で生じる残留応力の溶接線直角方向の分布

熱源の移動により残留応力は溶接始終端の影響を受けるが、溶接線方向中央 ($x=0$ (mm)) 近傍の残留応力分布はほぼ一様となっている。このため、代表的な断面として、溶接線方向中央 ($x=0$ (mm)) に注目し、残留応力の溶接線直角 (y) 方向の分布を図-4に示す。

まず、残留応力の溶接線方向成分 σ_x (図-4(a)) に注目する。溶接金属部 ($y=0$ (mm)) 近傍では、板長に対するスリットの長さ (l/a) が変化しても残留応力の大きさはほとんど変わらず、高い引張応力となっている。溶接金属部に隣接する母材部の引張応力は、板長に対するスリットの長さ (l/a) が短くなるにつれ、やや小さくなっている。これは、スリットが短くなるために板全体に投与される熱量が減少するためと考えられる。また、この引張応力に釣合う形で生じる圧縮残留応力の分布もやや変化している。

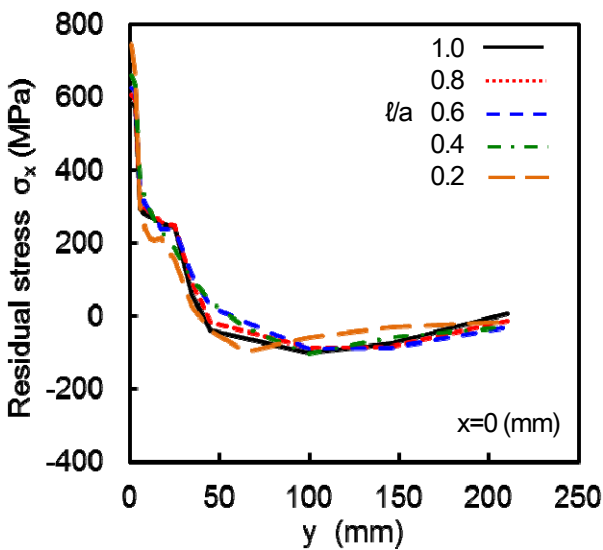
一方、残留応力の溶接線直角方向成分 σ_y (図-4(b)) に注目する。通常の2枚の板の突合せ溶接 ($l/a=1.0$) では、溶接金属部 ($y=0\sim4$ (mm)) 近傍に生じる引張残留応力は100MPa程度であり、板端部に向かって漸減し、ゼロになる。板長に対するスリットの長さ (l/a) が短くなるほど、溶接線直角方向の拘束の度合いが大きくなるため、溶接金属部に生じる引張残留応力は大きくなる。 $l/a=0.2$ の場合、溶接金属部に約440MPaの引張残留応力が生じている。

以上のように、板長に対するスリットの長さに応じて変化する自拘束の度合いによって、残留応力の溶接線直角方向成分の大きさが変化することが確認できた。

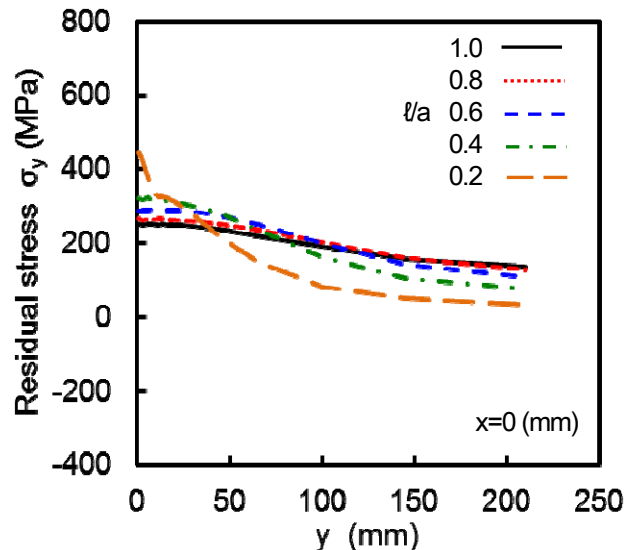
4. 外的拘束状態の溶接で生じる残留応力

4.1 解析条件

ここでは、図-1に示すモデルに対し、板端部の面内変位を拘束した状態(外的拘束状態)で生じる溶接残留応力の分布を明らかにする。自拘束に加え、外的拘束がスリット溶接継手の残留応力に及ぼす影響について検討する。



(a) 溶接線方向成分 σ_x



(b) 溶接線直角方向成分 σ_y

図-5 外的拘束状態の溶接で生じる残留応力の溶接線直角方向の分布

4.2 解析結果

3と同様に、溶接線方向中央 ($x=0$ (mm)) における残留応力の溶接線直角 (y) 方向の分布を図-5に示す。

残留応力の溶接線方向成分 σ_x (図-5(a)) の分布は、自拘束状態の場合 (図-4(a)) とさほど変わらない。

一方、残留応力の溶接線直角方向成分 σ_y (図-5(b)) に注目すると、自拘束状態の場合 (図-4(b)) とは傾向が大きく異なる。溶接金属部近傍に生じる引張残留応力は、 $l/a=1.0$ の場合でも、約250MPaと大きな値となっている。 l/a が小さくなるにつれ、引張残留応力は大きくなるが、 $l/a=0.2$ の場合の引張残留応力は約440MPaであり、この値は自拘束状態の場合とあまり変わらない。また、板端部 ($y=250$ (mm)) の変位が拘束されているため、板端部においても応力はゼロにはならず、引張応力が生じている。板長に対するスリットの長さ (l/a) が長くなるほど、板端部における引張残留応力は大きくなっている。

4.3 外的拘束が溶接残留応力に及ぼす影響

$l/a=0.2$ の場合、自拘束状態と外的拘束状態で生じる残留応力の分布はほとんど同じであった。これに対し、 $l/a=1.0$ や 0.8 の場合、自拘束状態と外的拘束状態で生じる残留応力の分布は、溶接金属部から板端部の全域に渡って大きく異なっていた。以下、この理由について考察する。

板端部の溶接線直角 (y) 方向変位を拘束しない自拘束状態では、溶接入熱により生じた板面内の膨張が、その後の冷却過程において収縮する。板端部の変位を拘束する外的拘束状態では、この膨張と収縮を拘束することになる。溶接終了後の引張残留応力に関係するのは冷却過程における収縮の拘束である。よって、板端部の面内収縮量に注目することで、外的拘束が引張残留応力に及ぼす影響について検討する。

各モデルの自拘束状態における溶接で生じる板端部 ($y=250$ (mm)) の収縮量と、溶接金属部の残留応力との関係を図-6に示す。

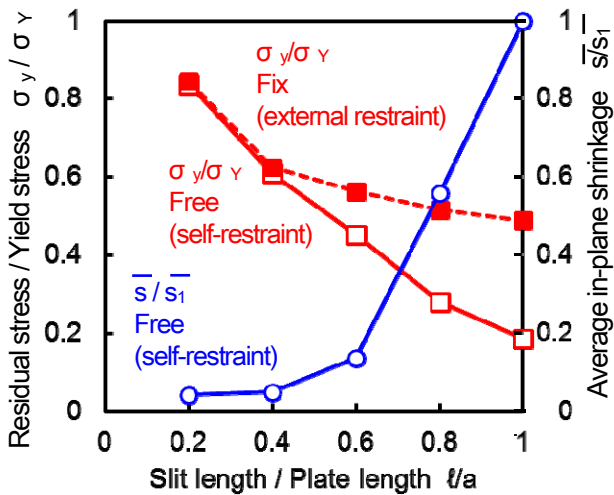


図-6 板端部に生じる面内収縮量と溶接部の残留応力との関係

左側の縦軸は、溶接金属部の残留応力の平均値を溶接金属の降伏応力 ($\sigma_Y=509.6$ (MPa)) で除した無次元量 (σ_y/σ_Y) である。自拘束状態の場合をオープン (□印)、外的拘束状態の場合をソリッドシンボル (■印) で表している。

自拘束状態における板端部の収縮量 s は、溶接線 (x) 方向に沿って変化する。図中右側の縦軸は、溶接線 (x) 方向全長に渡る収縮量の平均値 \bar{s} を、 $l/a=1.0$ の場合の平均収縮量 ($\bar{s}_1=0.38$ mm) で無次元化 (\bar{s}/\bar{s}_1 : ○印) した値である。

スリット長、すなわち溶接長が短くなるほど総入熱量が小さくなると共に、板の面内剛性が大きくなるため、板端部の平均収縮量が小さくなる。 $l/a=0.4$ および 0.2 の場合、板端部の収縮量は極めて小さい。すなわち、この場合は板端部の変位を拘束することはほとんど意味をなさず、残留応力は溶接部近傍の拘束状態 (自拘束) によって決まる。

逆に、スリット長、すなわち溶接長が長くなるほど総入熱量が大きくなると共に、板の面内剛性が小さくなる。 $l/a \geq 0.6$ からは、スリット長に応じて板端部の収縮量が大きくなる。外的拘束状態では、この収縮を完全に拘束することになる。このため、溶接部だけでなく板全体にほぼ一様に引張応力が生じる。

突合せ溶接で生じる板の面内収縮量は、溶接総入熱量と板の面内剛性に依存する。また、スリット継手の場合、これらは板長に対するスリット長の比 (l/a) によって決まる。すなわち、外的拘束が残留応力に及ぼす影響の度合いは、板長に対するスリット長の比 (l/a) の大小によって決定されることを結果は示唆している。

本解析モデルの場合、 $l/a \geq 0.6$ では残留応力に及ぼす外的拘束の影響が支配的となる。スリット長の違いが残留応力に及ぼす影響は小さく、自拘束の度合い (l/a) に関係なく板全体に大きな引張応力が生じることがわかった。一方、 $l/a \leq 0.4$ では外的拘束の影響がなく、溶接残留応力は自拘束状態の場合と何ら変わらないことがわかった。

表-1 外力作用下における溶接の解析ケース

Forced displacement v (mm) (Nominal stress (MPa))	Slit length / Plate length l/a			
	0.2	0.4	0.6	0.8
0.061 (50)	○	○	○	○
0.122 (100)	○	○	○	△
0.183 (150)	○	○	△	△

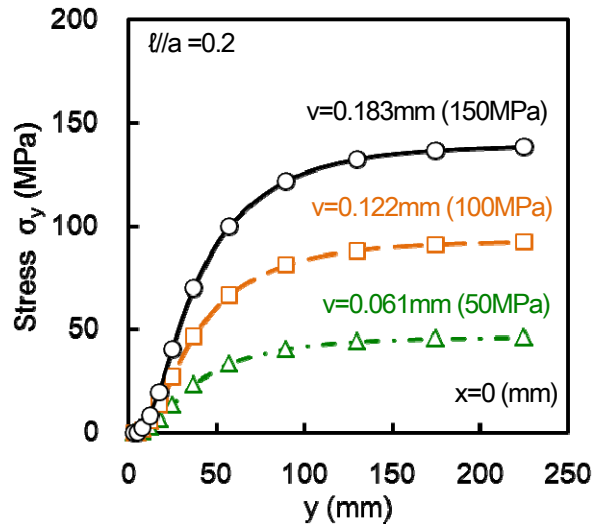


図-7 外力により生じる応力の分布 ($l/a=0.2$)

5. 外力作用下の溶接で生じる残留応力

5.1 解析条件

ここでは、図-1 に示すモデルに対し、境界条件として板端部に溶接線直角 (y) 方向の引張外力を付与した状態で生じる残留応力の分布を明らかにする。なお、4. の外的拘束状態との整合性を考慮して、外力は変位制御で与える。外力の大きさであるが、スリットのない状態で y 方向の公称応力が 50, 100, 150MPa となる場合の板端部の強制変位 v の大きさ (0.061, 0.122, 0.183 (mm)) を予め求めておき、これらを付与した。

解析ケースを表-1 に示す。各モデルに付与する強制変位の大きさは、スリットがない状態において生じる公称応力から決定している。実際にはスリットがあるため、スリット部を除く $y=0$ (mm) の断面に生じる応力は想定した公称応力よりも大きくなる。この応力によって溶接前に板が降伏することのないよう、スリット長に応じて付与する応力の大きさ (解析ケース) を制限している。

5.2 解析結果および考察

まず、溶接前に負荷した外力 (強制変位) によって生じる応力の分布を確認した。結果の一例として、 $l/a=0.2$ の場合を図-7 に示す。

当然ながら、スリット部 ($y=0$ (mm)) の応力はゼロであり、板端部の要素には、負荷した強制変位の大きさに対応した応力が生じている。他のモデルにおいてもこの傾向は同じであった。

外力 (強制変位) 作用下で生じる溶接残留応力の分布を図-8 に示す。なお、溶接線直角 (y) 方向の外力が残留応力の溶接線方向成分 σ_x に及ぼす影響は小さく、その分布は外的拘束状態の場合とさほど変わらないことを確認している。よってここでは、残留応力の溶接線直角方向成分 σ_y のみ注目する。

図は、 $l/a=0.2\sim 0.8$ のモデル各々に対し、自拘束、外的拘束および強制変位 v (mm) を負荷した状態で生じる溶接残留応力 σ_y を比較したものである。強制変位 v の後ろの括弧内の数値は、スリットがない場合の板に作用する公称応力の大きさを示している。

自拘束状態 (赤線) と外的拘束状態 (青線) の違いについては3.および4.で述べた通りであるが、スリットが長い場合 ($l/a\geq 0.6$)、両者の差は溶接部 ($y=0$ (mm)) から板端部 ($y=250$ (mm)) の全域に渡って顕著に表れる。こ

れに対し、スリットが短い場合 ($l/a\leq 0.4$) は、溶接部の残留応力は両状態ではほとんど変わらないが、板端部においては外的拘束によって50~100MPaの引張応力が生じていることが再確認できる。

外力 (強制変位) 作用下の場合については、全てのモデルにおいて、溶接部の残留応力は外的拘束の場合とほとんど変わらない。一方、板端部に生じる応力は、予め付与した外力 (強制変位) の大きさに伴い、増加していることがわかる。

外力作用下の溶接では、厳密には応力の再配分が生じるが、残留応力の分布は予め外力によって発生する応力に溶接で生じる応力が加算される形に概ねなっている。ただし、図-7に示すように溶接部 (スリット部) には外力による応力は生じないので、溶接部の残留応力も単に外的拘束した場合とほとんど変わらない。すなわち、外力負荷ではなく、板端部の変位を拘束することの影響が支配的となる。ただし、板全体で見れば、外力と溶接に起因する応力が足し合され、外的拘束状態に比べ引張応力が大きくなることには注意する必要がある。

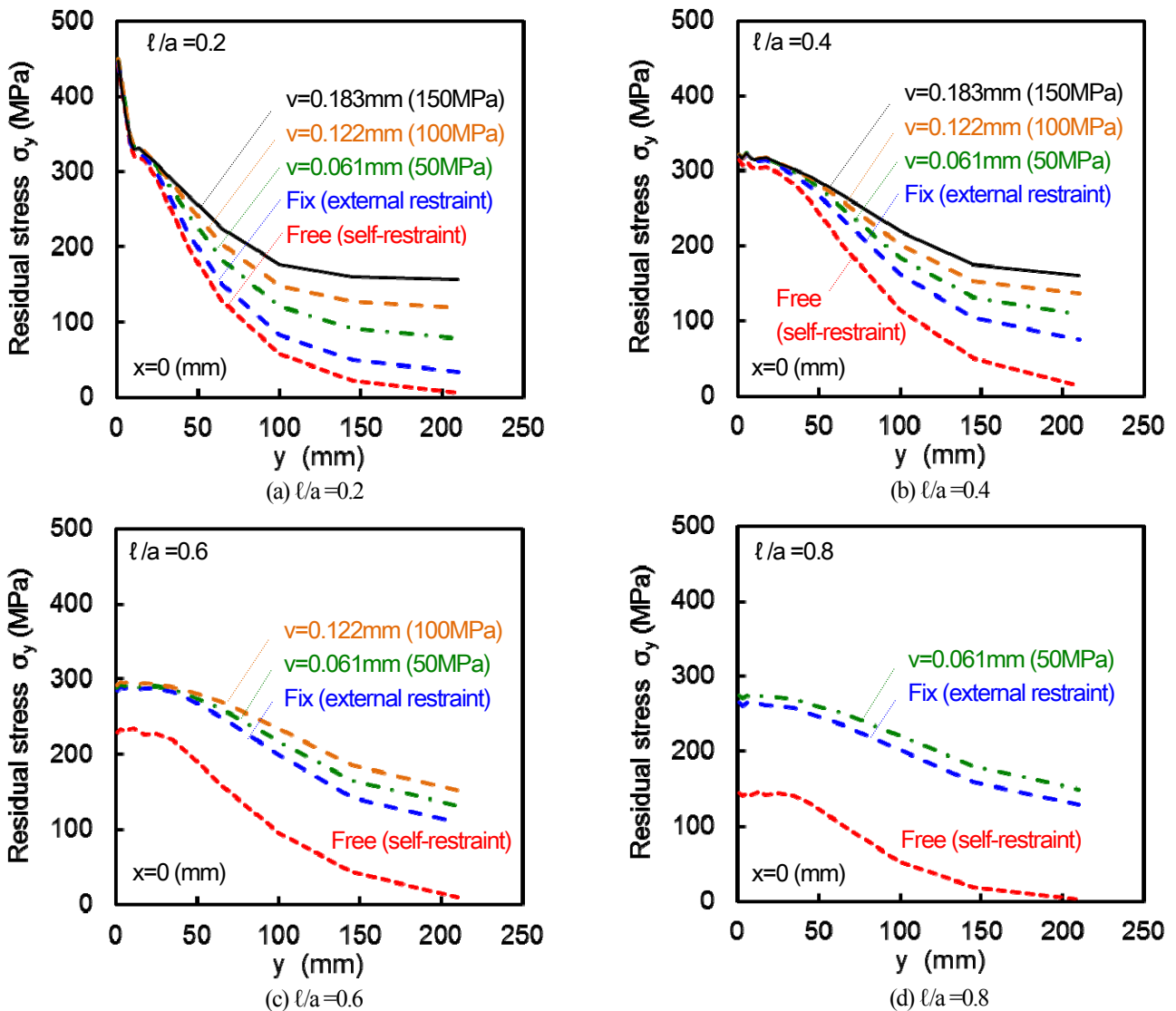


図-8 外力作用下の溶接で生じる残留応力の溶接線直角方向分布

6. 拘束および外力作用下で生じる溶接残留応力と継手の拘束度との関係

突合せ溶接継手における拘束度は、「継手の開先間隙を弾性的に単位量だけ縮めるのに要する単位溶接長当りの力」と定義されている¹⁵⁾。溶接に伴う熱膨張・収縮およびその拘束が溶接線に沿って一様でないいわゆる一次元拘束状態では、拘束度から溶接金属に生じる残留応力(拘束応力)が推定できることが示されている¹⁴⁾。しかし、本研究で対象としたスリット溶接継手のような二次元拘束状態では、拘束度および残留応力が溶接線に沿って変化する。また、溶接金属が塑性化する場合、拘束度は継手の拘束の程度を表し得ないことが明示されている。しかし、幾何学的形状から決まる弾性的な拘束の度合いを比較する簡便な指標としての拘束度の適用性は検証されている²¹⁾。

ただしこれは、自拘束状態におけるスリット継手の拘束度を対象に得られた知見であり、本研究で対象とする板端部の変位を外的に拘束した場合や、外力を作用した状態における拘束度が、自拘束状態と同様に継手の拘束の度合い

を表す指標となり得るかは不明である。

ここでは、種々異なる拘束状態で生じる溶接残留応力と拘束度との関係を明らかにすると共に、各種拘束状態が溶接残留応力に及ぼす影響を拘束度により説明できるか否かを検討する。

6.1 拘束および外力作用下のスリット継手の拘束度

スリット継手の拘束度は、溶接線方向座標の関数として式(2)で表される¹⁵⁾。

$$R(x) = \frac{\sigma(x)h_w}{\delta(x)} \quad (2)$$

ここに、 $R(x)$: 拘束度 (N/mm・mm)

$\delta(x)$: 開先の変位 (mm)

$\sigma(x)$: 開先に作用する応力 (MPa)

h_w : のど厚(本モデルの場合、板厚) (mm)

本研究で対象とした各モデルに対し、スリット部の節点にスリット閉口方向の単位強制変位を与える弾性解析を行い、スリットに沿う拘束度の分布を求めた結果を図-9に示す。

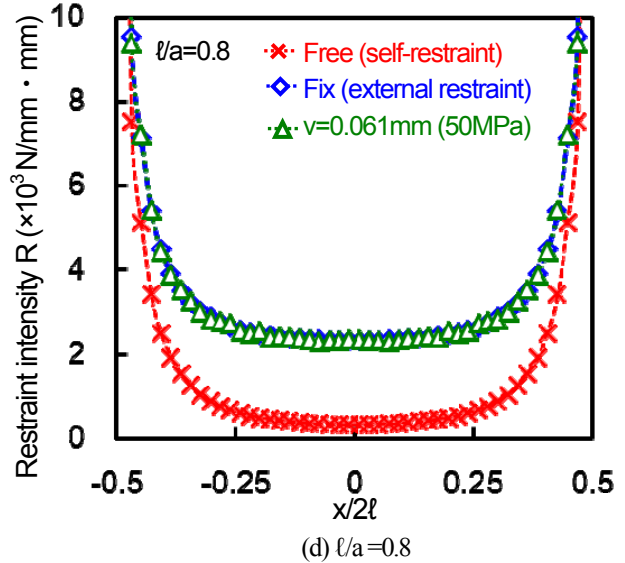
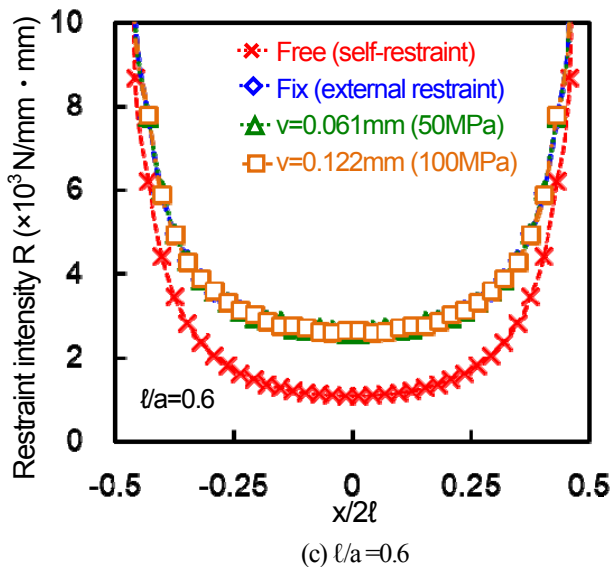
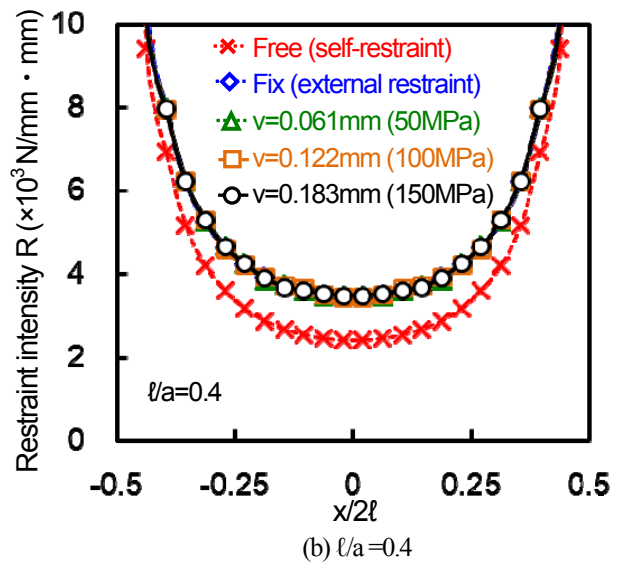
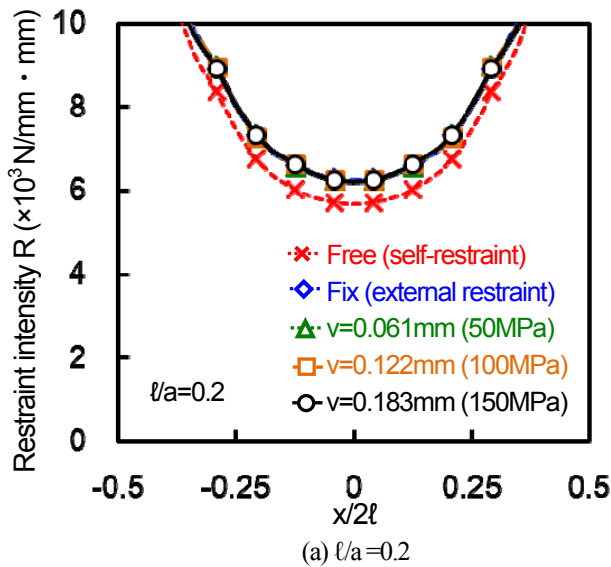


図-9 拘束度のスリット方向の分布

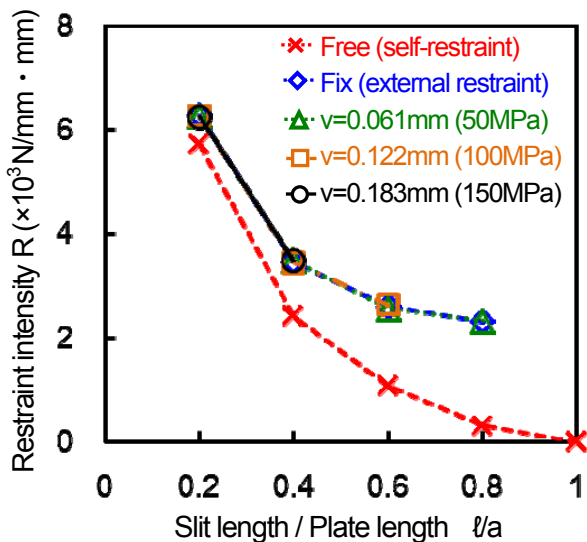


図-10 各種拘束状態における l/a と拘束度の関係

自拘束状態, 外的拘束状態, 外力作用下の全ての場合で, 拘束度はスリット中央部 ($x/2l=0$) において最小であり, スリット端部 ($x/2l=\pm 0.5$) に向かって単調に増加している. 拘束度はスリット端部において非常に大きな値となるため, 継手の拘束の度合いを評価するには端部の影響のない領域の拘束度に注目すべきと考える. ここでは, 拘束度がほぼ一定となるスリット中央部 ($x/2l=0$) における値 ($R(0)$) を, 代表的な拘束度として用いる.

板長に対するスリット長の比 (l/a) と拘束度 ($R(0)$) との関係を図-10 に示す.

自拘束状態, 外的拘束状態, 外力作用下の全ての場合で, l/a が小さくなるほど拘束度が大きくなっている. 自拘束状態に比べ, 外的拘束状態の拘束度は大きい, l/a が小さくなるほどその差が減少している. $l/a=0.2$ では, その差はほとんどない. 一方, 外的拘束状態と外力作用下のスリット継手の拘束度は, 作用外力の大小によらず, 全てのモデルでほぼ同じである.

6.2 溶接部に生じる残留応力と拘束度との関係

6.1 で求めた各モデルのスリット中央部における拘束度と, 3.~5.で求めた溶接部における残留応力の溶接線直角方向成分との関係を図-11 に示す. 縦軸の残留応力は, 溶接金属部の残留応力の平均値を, 溶接金属の降伏応力 ($\sigma_Y=509.6$ (MPa)) で除した無次元量 (σ_r/σ_Y) である.

自拘束状態, 外的拘束状態, 外力作用下の各種拘束状態に関係なく, 溶接部に生じる残留応力の大きさと拘束度が対応していることがわかる.

拘束度は単に継手の幾何学的形状や寸法から決まる弾性的な拘束の度合いを表す指標であり, 入熱量など各種溶接条件に依存する残留応力が拘束度から一義的に決まるものではない. しかし, 継手形状や寸法, 溶接条件が一定の場合, 自拘束状態と同様に, 外的拘束および外力作用下における継手の拘束の度合いが拘束度により説明できることを結果は示唆している.

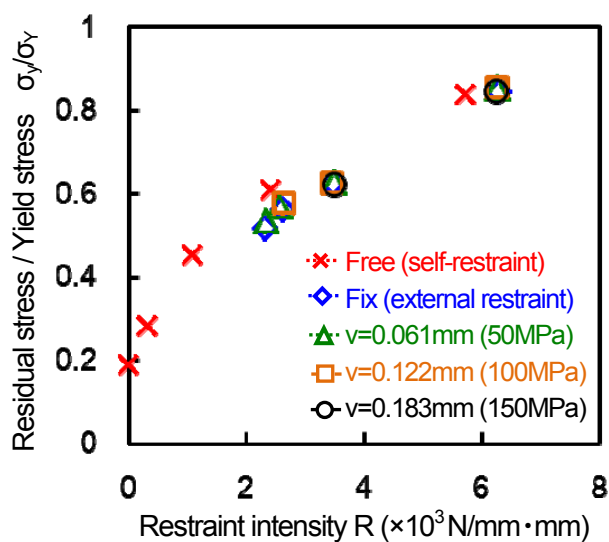


図-11 拘束度と溶接金属部の残留応力の関係

本解析モデルに対する結果の範囲では, スリット長が同じでも, 板端部の拘束状態 (境界条件) によって継手の拘束の度合いは種々変化する. これにより, 溶接部の残留応力の溶接線直角方向成分の大きさが降伏応力の 20~80% まで著しく変化することがわかった.

7. 結言

薄肉鋼板の突合せ溶接継手に生じる疲労き裂除去部の埋戻し補修溶接を想定し, 板長 $a=300$, 板幅 $b=500$, 板厚 $t=6$ (mm) の鋼板中央部に設けた長さ l (mm) のスリット部の 1 バス突合せ溶接を熱応力解析によりシミュレーションし, 発生する残留応力を求めた.

得られた主たる知見を以下に示す.

- (1) 板端部の変位を拘束しない自拘束状態では, 板長に対するスリット長の比 (l/a) が小さくなるほど, 溶接部における残留応力の溶接線直角方向成分が大きくなった. 通常の 2 枚の板の突合せ溶接では 100MPa 程度の引張残留応力が生じるのに対し, $l/a=0.2$ では, 引張残留応力は約 440MPa に達することを確認した.
- (2) 板端部における溶接線直角方向の面内変位を完全に拘束した状態 (外的拘束状態) では, 板長に対するスリット長の比 (l/a) が大きくなるほど, 自拘束状態の場合に比べ残留応力の溶接線直角方向成分が大きくなった. $l/a=0.6$ では, 残留応力は自拘束状態の場合の 1.2 倍, $l/a=0.8$ では 1.8 倍以上になった. しかし, l/a が小さく ($l/a \leq 0.4$) になると, 外的拘束と自拘束状態とで生じる残留応力はほぼ同じとなった.
- (3) (2)の理由は, l/a が小さくなるほど溶接総入熱量が小さくすると共に板の面内剛性が増加し, 溶接による板端部の面内収縮量が小さくなるためである. 本解析モデルの場合, $l/a \leq 0.4$ では板端部の変位がほとんど生じないので, これを拘束しても残留応力には影響を及

ばさず、残留応力は自拘束状態の場合と同じとなることを明らかにした。

- (4) 板端部において、溶接線直角方向に強制変位による一定引張外力を負荷した状態では、外的拘束状態と比べ、溶接部に生じる残留応力はほとんど変わらなかった。ただし、溶接部から離れた母材部に生じる残留応力は、外力の大きさに応じて大きくなった。母材部の残留応力は、予め外力によって発生している応力に溶接で生じる残留応力が加算される形になることを確認した。
 - (5) 自拘束状態、外的拘束状態および外力作用下のいずれの場合においても、残留応力の溶接線方向成分の大きさや分布はほとんど同じであった。
 - (6) 自拘束状態、外的拘束状態および外力作用下においてスリット継手の拘束度を求め、溶接部に生じる残留応力の大きさと拘束度が対応することを確認した。すなわち、自拘束状態と同様に、外的拘束および外力作用下における継手の拘束の度合いが拘束度により説明できることを結果は示唆していた。
 - (7) スリット長が同じでも、板端部の拘束状態(境界条件)によって継手の拘束の度合いは種々変化する。これにより、溶接部に生じる残留応力の溶接線直角方向成分の大きさが降伏応力の 20~80%まで大きく変化することがわかった。
- 8) 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.
 - 9) 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, 第 244 号, pp.1-14, 1975.
 - 10) 土木学会: 座屈設計ガイドライン, 技報堂出版, 1987.
 - 11) J. S. Boudreau: A Weld Cracking Susceptibility Test For Sheet Materials, *Welding Journal*, 35, pp.164-168, 1956.
 - 12) R. E. Travis, J. M. Barry, J. V. Robinson, W. G. Moffatt, C. M. Adams Jr.: Fundamentals of Weld Behavior Under Hindered Contraction, *Welding Journal*, 40, pp.49-56, 1961.
 - 13) 渡辺正紀, 佐藤邦彦, 松井繁朋: 溶接継手のルート割れにおよぼす外的拘束の影響, 溶接学会誌, 第 33 巻第 6 号, pp.42-53, 1964.
 - 14) 佐藤邦彦, 松井繁朋: 溶接継手の拘束応力とこれともなう溶接割れの研究, 溶接学会誌, 第 36 巻第 10 号, pp.38-51, 1967.
 - 15) 溶接学会: 第 2 版 溶接接合便覧, 丸善出版, 2003.
 - 16) Fujita, Y., Nomoto, T., Hasegawa, H.: Studies on Thermal Elastic-Plastic Problems (1st Report), *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 130, pp.183-191, 1971.
 - 17) 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.
 - 18) 土木学会: 鋼床版の疲労 2010 年改訂版, 丸善出版, 2010.
 - 19) 日本橋梁建設協会技術委員会 鋼床版小委員会: 海外における鋼床版橋梁の疲労に関する現状 —デッキと閉断面リブ溶接線の疲労損傷について—日本橋梁建設協会中部地区 平成 23 年度橋梁技術発表会および講演会講演資料, pp.4-14-11, 2011.
 - 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) 上田幸雄, 福田敬二, 金 裕哲, 古木良一: スリット溶接継手に生じる拘束応力・拘束ひずみの一般特性及び拘束度の力学的指標としての意義, 溶接学会誌, 第 51 巻第 8 号, pp.18-25, 1982.

(2012 年 3 月 8 日 受付)

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) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 1993.
- 5) Fukumoto, Y., Itoh, Y., Kubo, M.: Strength Variation of Laterally Unsupported Beams, *ASCE ST1*, No.15142, 1980.
- 6) Fukumoto, Y., Itoh, Y.: Statistical Study of Experiments on Welded Beams, *ASCE ST1*, No.15965, 1981.
- 7) 青木徹彦, 福本秀士: 溶接 H 形鋼柱の中心軸座屈強度に関する統計的実験, 第 37 回土木学会年次講演会, pp.397-398, 1982.