溶接後熱処理による熱履歴が鋼部材の 応力緩和および変形挙動に及ぼす影響

森 博啓¹・廣畑 幹人²

¹ 学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail:mori.hirotaka@j.mbox.nagoya-u.ac.jp

² 正会員 名古屋大学大学院准教授 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail:hirohata@civil.nagoya-u.ac.jp

既設鋼構造物の補修に溶接接合を適用する場合、溶接残留応力が疲労強度に及ぼす影響や入熱による熱影響部の脆化が懸念される。これに対し溶接後熱処理の適用を考えると、薄い鋼板で構成されることの多い土木鋼構造物では熱処理に伴う入熱による変形が生じる可能性がある。本研究では、薄い鋼板で構成される部材の溶接後熱処理過程における応力緩和および変形挙動の解明を目的に、鋼板にビードオンプレート溶接を施し局所加熱による溶接後熱処理を行った。また、熱弾塑性解析による実験のシミュレーションを実施した。一連の実験および解析の結果から、鋼板全体の残留応力分布を低減させ、熱処理中の面外変形を抑制する熱処理条件を提案した。

Key Words: welding residual stress, post-weld heat treatment, stress release annealing, out-of-plane deformation

1. 緒言

橋梁に代表されるインフラ構造物の経年劣化に伴う損傷が多数報告されており、既設のインフラ構造物を適切に補修補強し維持管理していくことが社会的に重要な課題となってきた¹⁾。鋼橋においても腐食や疲労による損傷事例が増えており、補修補強、維持管理の必要性が高まってきている²⁾。現在、既設鋼橋の腐食減厚や疲労き裂に対する補修部材の接合には、高力ボルトが広く用いられている³⁾。高力ボルト接合は品質の確保が容易という利点がある一方で、添接板やボルト分の重量増加があることや、ボルト孔を設ける作業が必要なこと、狭隘で複雑な構造の桁端部などでは作業性に劣るという欠点がある。これに対し、異なる接合方法の選択肢として溶接の可能性が考えられる。溶接接合では、ボルト接合に比べ重量増加が少なく、穿孔作業が不要であり、景観上有利になるなど種々の利点が期待できる。

ただし、溶接を用いた補修では溶接残留応力が疲労強度に及ぼす影響や入熱による熱影響部の脆化が懸念される。溶接残留応力は溶接金属の凝固冷却過程で内部応力として生じ、溶接部近傍で引張となるため、疲労き裂の発生、進展に影響を及ぼす。さらに、既設構造物では周辺部材の拘束が影響し、より高い引張応力が生じる可能性がある。また、引張応力につり合うように生じる圧縮

残留応力は、部材の耐荷力に影響を及ぼす。一方で、鋼は A_1 変態点(約 720°C)を超えて加熱され、急冷される過程で金属組織が粗大化し、硬く脆い組織へと変化する。溶接による入熱と冷却過程で鋼が硬化し延性が低下することは、部材の力学性能を低下させる一要因となる。

この種の問題に対し、溶接後熱処理(PWHT: Post-weld Heat Treatment)の適用の有効性が一般に知られている。溶接後熱処理とは、溶接部を所定の温度(炭素鋼で約 600°C)に加熱・保持し、徐冷する熱処理である⁴⁾。熱処理の過程で溶接残留応力を除去し、粗大化した熱影響部の金属組織を微細化することが可能であり、溶接補修部の品質を確保することが可能となる。

溶接後熱処理は一般に圧力容器やパイプラインなどの溶接部に適用されている技術であるが⁵⁾、鋼橋に代表される土木鋼構造物では適用例が少ない。その理由として、一般に溶接後熱処理では対象となる構造物全体を加熱炉に入れて熱処理を行うが、大型の土木鋼構造物を収容できる大規模な加熱炉が必要となる。また、補修溶接部に対し溶接後熱処理を行う際、現場で加熱炉を使用することは現実的に不可能と言える。加えて、圧力容器などの構造物と比較して土木鋼構造物は板厚が薄く、熱処理による変形が生じやすい可能性がある。これらの問題に対し、本研究では、複雑な形状に対しても局所的な加熱が可能な熱源としてセラミックヒーター(図-1)の適用を

検討する。セラミックヒーターは火気不使用，熱処理に必要な高精度な温度管理，小型の発電機で使用可能などの点で現場での作業に適する。圧力容器などの鋼構造物では，溶接部の補修において，セラミックヒーターの溶接後熱処理への適用性は既に実証されている⁹⁾。著者らは既往の研究において，このセラミックヒーターを用いて，すみ肉まわし溶接継手⁷⁾およびあて板溶接⁸⁾に対して溶接後熱処理を実施し，溶接残留応力緩和効果を明らかにした。本研究では，主に薄い鋼板で構成される土木鋼構造物の溶接後熱処理過程における応力緩和挙動に加えて，これまで検討していなかった変形生成挙動の解明を目的とした一連の基礎的実験および数値解析を行う。

2. 溶接実験および熱弾塑性解析

(1) 実験供試体

実験供試体には事前に応力除去焼鈍した 500×500×12 mm の SM400A 鋼板 (図-2 (a)) 9 体 (No. 1～9) を用いた。3 体は溶接を施さない鋼板供試体 (No. 1～3) とし，残りの 6 体の鋼板には中央線に沿って CO₂ 半自動溶接によりビードオンプレート溶接を施し (図-2 (b))，溶接供試体 (No. 4～9) とした。溶接供試体のうちの 3 体 (No. 4～6) に対し応力弛緩法により残留応力を測定した。溶接ワイヤには JIS YGW12 (直径 1.2 mm，軟鋼・490 N/mm²級高張力鋼⁹⁾) を用いて，電圧 20 V，電流 150 A の条件で行った。溶接速度は平均 5.5 mm/s であった。鋼板および溶着金属の化学成分と機械的性質 (鋼板はミルシート値，溶着金属はカタログ値) を表-1 に示す。

図-1 セラミックヒーター

(a) 鋼板供試体

(b) 溶接供試体

図-2 実験供試体

表-1 供試鋼材の化学組成と機械的性質 (ミルシート値およびカタログ値)

	化学成分 (%)					機械的性質		
	C	Si	Mn	P	S	耐力 MPa	引張強さ MPa	伸び %
鋼板	0.16	0.14	0.71	0.012	0.004	306	442	32
溶着金属	0.09	0.44	0.96	0.012	0.012	460	540	28

(2) 溶接過程の熱弾塑性解析

溶接実験の熱弾塑性解析には ABAQUS Ver. 6.13 を使用した。解析モデルを図-3 に示す。対称条件より供試体の 1/2 をモデル化した。要素には 8 節点ソリッド低減積分要素を用いて，温度-変位連成解析を行った。また，解析では幾何学的非線形性を考慮している。

力学的境界条件としては図-3 (b) に示すように，解析モデルの対称面における y 軸方向の変位を固定し，底面の 2 点 ($x=0$ mm, $y=0$ mm, $z=0$ mm および $x=500$ mm, $y=0$ mm, $z=0$ mm) においてそれぞれ x 軸方向および z 軸方向の変位と，z 軸方向の変位を固定することで解析モデルの剛体変位を拘束した。熱的境界条件としては供試体の表面から空気中への熱伝達を考慮した。材料の機械的性質および物理定数については実験に基づく既往の研究^{10), 11)}を参照し，図-4 に示す物性値を用いた。応力-ひずみ関係はトリリニア型とし，等方硬化則を用いた。熱影響部は母材と同じ物性値を用いた。

溶融部の形状は断面マクロ写真より決定し (図-3 (a))，各試験体の平均的な値として，溶込み深さ 1.5 mm，余盛高さ 2.5 mm，ビード幅 7.5 mm (半幅 3.75 mm) とした。溶融部に物体熱流束による入熱を投与するとともに，溶接部の剛性の変化を再現するため，要素生成機能により溶着金属を順次供給した。溶接部に投与する入熱量は式(1)に基づき溶接条件から決定した。ただし，溶接速度には溶接供試体 6 体の平均値 (5.5 mm/s) を用いた。アーク溶接の熱効率 η は 0.65～0.8 であることが知られている¹²⁾。熱効率 η を種々変化させて試行的に解析を行い，実験の温度履歴を再現できる $\eta=0.7$ を熱効率 η として採用した。

$$Q = \eta EI / v$$

ここに、 Q ：入熱量 (J/mm)

η ：熱効率

E ：溶接電圧 (V)

I ：溶接電流 (A)

v ：溶接速度 (mm/s)

(3) 実験結果と解析結果の比較

溶接時の温度履歴、溶接変形、溶接残留応力の実験結果と解析結果の比較を図-5 に示す。解析では、実験時の室温 (30℃) と供試体の温度が同等になるまで十分な冷却時間 (20 時間程度) を設けているが、図には温度変化が小さくなる 500 秒までの履歴を示している。シンボルが実験値、実線が解析値を示しており、比較はすべ

(1) て溶接線方向の中央の位置 ($x=250$ mm, 図-3 (b)の青い破線上) で行った。図-5 (a)は溶接ビードの中心部からそれぞれ 15 mm, 30 mm, 45 mm 離れた位置での上表面の温度履歴である。実験値には 6 体の溶接速度が平均値と最も近い No. 5 の結果を用いた。図-5 (b)の溶接変形の実験値には溶接供試体 6 体の平均値を用いて比較し、図-5 (c)は溶接供試体のうち、残留応力測定用の 3 体の平均値を用いた。残留応力の測定には応力弛緩法⁸⁾を用いたが、供試体の溶接ビード側の表面に 2 軸ひずみゲージを貼付してひずみゲージの周辺を切断し、解放されるひずみを計測し残留応力を推定した。切断された小片は、一辺が 10 mm 程度となるように切断した (図-6)。ただし、応力弛緩法では上表面に貼付したひずみゲージから推定される残留応力が、上表面の応力ではなく板厚方向の平均的な値に近くなる可能性がある。そこで、解析におい

(a) 溶融部の断面マクロ写真とメッシュ形状

(b) メッシュ形状および境界条件

図-3 溶接供試体の解析モデル

(a) 機械的性質

(b) 物理定数

図-4 材料の機械的性質および物理定数

て表面の残留応力だけでなく板厚方向の残留応力の平均値も求め、実験値と比較した。溶接ビード近傍においてのみ有意な差が確認でき、特に σ_x において表面より平均値の方が実験値に近くなることが分かった。一連の実験結果と解析結果を比較すると、両者は概ね一致しており、熱弾塑性解析により溶接実験を精度よく再現することができた。

(a) 溶接時の温度履歴

(b) 溶接変形

(c) 溶接残留応力

図-5 溶接実験の結果および解析結果

3. 溶接後熱処理実験および熱弾塑性解析

(1) 実験方法

a) 溶接後熱処理条件

溶接供試体のうち熱処理用の3体 (No. 7~9) と、鋼板供試体3体に溶接後熱処理を実施した。溶接後熱処理時の入熱にはセラミックヒーター (図-1) を使用し、JIS Z 3700¹³⁾に規定される加熱条件を満たすように鋼板に熱電対を取り付けて温度管理を行った。表-2にJIS Z 3700に定められた425℃以上における温度制限と実験条件の比較を示す。熱処理時には、図-7の①~⑥の位置に熱電対を取り付け、①の熱電対の温度をモニターしながら所定の温度履歴を満たすように、ヒーターの入熱を自動制御するプログラムを設定した。

JIS Z 3700の規定に従い溶接ビードの左右に有効加熱幅 (板厚の2倍) を加えた範囲 (図-8) を含むように加熱し、有効加熱幅内で最低保持温度である595℃を満たし、被加熱部全体で温度差が85℃以下となるように温度管理を行った。熱処理時には供試体を厚さ75mmの断熱材で覆った。熱処理終了後、応力弛緩法により残留応力を測定した。

b) 面外変形計測方法

溶接後熱処理時には鋼板の3点 (鋼板の縁2点と中央1点) で鉛直変位を測定し、縁に対する中央の相対鉛直変位を求めた (図-9(a))。溶接供試体には溶接後熱処理開始時点で、V字形の溶接変形が生じていた。溶接変形の向きと加熱面の関係について検討するため、供試体の下側にヒーターを設置して片面から加熱を行い、2体 (No. 7, 8) は溶接ビード側を下向きに、1体 (No. 9) は溶接ビード側を上向きにして加熱した。

鉛直変位は供試体の上方に組んだフレームに変位計を固定し、変位計が高温になり測定誤差が生じることを防ぐために、供試体の上に設置した耐熱ブロックに変位計の針を当て測定した (図-9(b), (c))。熱処理過程における変位計先端の温度は保証値である70℃以下になっていることを確認した。

図-6 残留応力測定用の切断小片

(2) 熱影響部の硬さおよび金属組織

熱処理の効果を冶金的観点から検証することを目的として、硬さ試験および金属組織観察を行った。図-10 にビッカース硬さ試験結果を示す。溶接部断面の縁から 10 mm ($z=10$ mm) の熱影響部において、溶接後に 250 Hv 程度であった熱影響部の硬さは、熱処理後に 200 Hv 程度まで低下した。熱処理の前後で母材および溶接金属のビッカース硬さに変化はなかった。

また、溶接後熱処理の前後での金属組織の変状を確認

するために組織観察を行った。金属組織写真を表-3 に示す。溶接後熱処理時の最高加熱温度（約 600 °C）が A_1 変態点である約 720 °C 以下であったため、母材部では金属組織にほとんど変化が見られなかった。一方、熱影響部および溶接金属では、溶接後に確認できた粗大な結晶構造が熱処理後に確認できなくなったことから、組織が再結晶により微細化したと判断した。冶金的観点から適切に溶接後熱処理が行われたことを結果は示唆している。

図-7 熱電対の取り付け位置

表-2 実験溶接後熱処理条件¹³⁾

	JIS Z 3700	実験条件
加熱速度 (425 °C以上)	最大 220°C/h	150°C/h
冷却速度 (425 °C以上)	最大 280°C/h	150°C/h
保持温度	最低 595°C	600°C
保持時間	最短 t/25時間	1時間

※ただし、tは溶接部の板厚(mm)

図-8 加熱範囲

(a) 鉛直変位の測定位置

(b) 供試体上の耐熱ブロック

(c) 耐熱ブロック上の変位計の針

図-9 変位計測の状況

表-3 熱処理前後の金属組織写真

図-10 ビッカース硬さ試験結果

(3) 溶接後熱処理過程の熱弾塑性解析

溶接後熱処理過程の熱弾塑性解析には、溶接過程の熱弾塑性解析に用いたモデルに溶接後熱処理の過程を追加したモデルを作成し使用した。解析条件は溶接過程のモデルを踏襲し、クリープひずみと断熱材の存在を考慮した熱伝達係数^{7, 14)}を新たに導入して解析を行った。セラミックヒーターからの入熱は表面熱流束により加熱面から投与したが、セラミックヒーターの入熱量を決定する一般的な方法がないため、入熱面においては解析の時間ステップごとに入熱量を逐次変化させ、実験時の温度履歴を再現した¹⁴⁾。溶接ビード側、溶接ビードの裏側それぞれで入熱面を変えて、加熱面の違いを再現した。クリープひずみには文献¹⁵⁾を参照し、式(2)で表されるクリープ則を使用した。このクリープ則は、応力緩和機構を表現するのに適するとされる時間硬化則による定常クリープを考慮したものである¹⁶⁾。なお、クリープひずみは400℃以上で発生するものとした。

$$\varepsilon_{cr}(t, T, \sigma) = \frac{1}{100} a(T) \left(\frac{t}{60} \right)^{b(T)} \left(70.5 \frac{\sigma}{\sigma_{uRT}} \right)^{c(T)} \quad (2)$$

$$a(T) = \begin{cases} 10^{-(13.25-0.00851 \times 20)} & (T < 20) \\ 10^{-(13.25-0.00851 T)} & (20 \leq T < 725) \end{cases}$$

$$b(T) = -1.1 + 0.0035T \quad (T < 725)$$

$$c(T) = 2.1 + 0.0064T \quad (T < 725)$$

ここに、 σ : 応力 (MPa)

σ_{uRT} : 引張強度 (MPa)

T : 温度 (℃)

t : 時間 (s)

$$\text{べき乗数} : \frac{1}{100} a(T) \left(\frac{1}{60} \right)^{b(T)} \left(\frac{70.5}{\sigma_{uRT}} \right)^{c(T)} b(T)$$

$$\text{相当応力次数} : c(T)$$

$$\text{時間次数} : b(T) - 1$$

断熱材を考慮した熱伝達係数を図-11 (a)に示す。熱電対を取り付けた鋼板を電気炉で加熱し、溶接後熱処理で用いたものと同じ厚さ 75 mm の断熱材で被覆した鋼板の冷却過程における温度履歴 (図-11 (b)) を記録した。解析において熱伝達係数を種々変化させ、その温度履歴を再現することで逆算的に推定した。

(4) 実験結果と解析結果の比較

a) 溶接後熱処理時の温度履歴

溶接後熱処理時の温度履歴の実験値と解析値の比較を図-12 に示す。図-12 (a)より、有効加熱幅の範囲では最低保持温度である 595℃を上回っていることが確認でき、解析において実験時の温度履歴を再現できたと判断した。図-12 (b)より、実験時には被加熱部全体で温度差を 85℃以下に抑えられていたことが分かった。解析においてもこの温度履歴を再現することができた。また、図-12 (c)より、供試体の表裏では温度差はほとんど生じていないことを確認した。

b) 残留応力

溶接後熱処理前後の残留応力分布を図-13 に示す。シンボルは応力弛緩法により求めた実験値の平均値を示しており、実線は溶接ビード側から加熱した解析結果を示しているが、加熱面の違いによる残留応力の差はほとんど見られなかった。溶接ビードに近い範囲においては、

(a) 断熱材を考慮した熱伝達係数

(b) 断熱材により被覆した鋼板の温度履歴

図-11 断熱材を考慮した熱伝達係数の推定

残留応力が低下したことが分かった。一方で、鋼板および溶接供試体の両者で、加熱範囲の外側においては溶接後熱処理後に圧縮応力が増加する傾向があり、また、加熱範囲内の溶接ビード近傍以外では引張残留応力が増加する傾向が確認された。以上の結果から、局所加熱による溶接後熱処理過程により溶接ビード近傍においては残留応力低減の効果が得られた可能性があるが、それ以外では熱処理過程で残留応力が増加した可能性があるかと判断した。

c) 面外変形挙動

溶接後熱処理時の鋼板供試体 (No. 1) および溶接供試体 (No. 7, 9) の面外変形挙動を図-14に示す。3体の鋼板供試体の面外変形挙動の特徴は概ね同じ傾向であり、2体の溶接ビード側を下向きに設置し加熱した溶接供試体も概ね同じ傾向を示した。鋼板供試体、溶接供試体ともに熱処理後の面外変形を精度よく再現できた。一方、溶接供試体の加熱および保持過程 (約300分まで) の変形挙動には差が見られる。解析では一様に鋼板表面から入熱したが、実験では溶接変形および溶接ビードの存在により、ヒーターと鋼板との間にわずかな隙間が生じていたため、ヒーターと鋼板の接触が一様ではなく入熱が不均一であった可能性がある。このような入熱の不均一を解析で考慮しなかったことが、実験結果の再現精度に影響を及ぼしたのと考えられる。これは、初期変形が小さく溶接ビードのない鋼板供試体の面外変形挙動が精度よく再現できていることから推察される。

面外変形は主に加熱過程 (約200分まで) において発生していることが確認された。溶接後熱処理後の鋼板供試体には0.03 mm程度の残留変形が生じていた。一方、溶接供試体では、溶接ビード側、溶接ビードの裏側いずれから加熱しても溶接による変形が大きくなる方向に変形が増加し、0.2 mm程度の残留変形が生じた。

(a) 有効加熱幅内

(b) 被加熱部全体

(c) 表裏

図-12 溶接後熱処理時の温度履歴

4. 考察

(1) 熱処理過程における残留応力の挙動

残留応力および面外変形の発生メカニズムを明らかにすることを目的に、解析結果を基本とした一連の検討を行う。

3. (4) b)において、JIS Z 3700に規定される条件を満たす溶接後熱処理を行えば、溶接ビード近傍の引張残留応力を緩和できることが分かった。ただし、溶接ビード近傍以外に着目すると、溶接後熱処理による残留応力の低減効果が不十分、もしくは熱処理により新たに応力が生じる可能性が示された。そこで、溶接部近傍の局所領域に限らず、鋼板全体の残留応力を抑制する加熱条件を解析に基づいて検討する。そのため、まず、熱処理過程における残留応力の生成挙動を明らかにする。

解析モデルの中央線上における溶接ビード近傍の要素の溶接後熱処理過程の応力変化挙動を図-15に示す。保持終了時点では応力がほぼゼロとなっているが、保持終了後の冷却過程に入ると応力が増大していくことが確認できた。これより、溶接後熱処理後の残留応力を低減するためには、冷却時に発生する応力を抑制する必要があると分かる。

(a) 鋼板供試体

(b) 溶接供試体

図-13 溶接後熱処理の加熱条件による残留応力

(2) 残留応力低減効果のための加熱条件

冷却時に応力が発生するメカニズムとしては、セラミックヒーターによる加熱を受ける領域と加熱されない領域との間の温度差が考えられる。鋼板内の温度差により材料強度と剛性が位置によって異なることで、供試体内の高温領域と低温領域で膨張、収縮の拘束が生じ、応力が生成される。そこで、供試体内の温度差を小さくすることにより応力を低減させる可能性を検証した。図-16に、供試体の入熱幅 (Bとする) を 220 mm から 400 mm および 500 mm に拡大して解析した場合の残留応力を示

(a) 鋼板供試体

(b) 溶接供試体 (溶接ビード側から加熱)

(c) 溶接供試体 (溶接ビードの裏側から加熱)

図-14 溶接後熱処理の加熱条件による面外変形挙動

す。ただし、入熱はすべて溶接ビード側から行った。図-16 (a)に x 方向, (b)に y 方向の残留応力成分の分布を示す。加熱、保持および冷却過程の温度履歴は、図-7 の①の位置での温度履歴が実験と一致するように入熱量を変化させた。

図-17 に示すように、B=220 mm から B=400 mm および B=500 mm に拡大すると熱処理中の供試体の中心 (y=0 mm) と縁 (y=250 mm) との加熱過程および冷却過程の温度差は小さくなる。この温度差が小さくなるほど残留応力が小さくなることが分かる (図-16)。以上の解析結果から、冷却過程の供試体内の温度差が最終的な残留応力を決定する主要因であり、鋼板全体の残留応力を抑制するためには、冷却過程における供試体内の温度差を小さくすることの有効性が示唆された。

(3) 残留応力低減効果のための加熱条件

4. (1)で示したように、冷却時に発生する残留応力を抑制するためには、供試体の面内方向の温度差を小さくすることが有効であると確認できた。ここで、B=220

mm から B=400 mm および B=500 mm へと拡大させた際の、面外変形挙動の比較を図-18 に示す。残留変形量を比較すると、0.21 mm から 0.11 mm および 0.08 mm までそれぞれ低下したことが分かった。入熱幅の拡大による面内方向の温度差の抑制は、残留応力のみならず面外変形の低減にも効果的であることを結果は示唆している。

図-15 残留応力の変化履歴

(a) 冷却後の σ_x の比較

(b) 冷却後の σ_y の比較

図-16 入熱幅の違いによる冷却後の残留応力の比較

図-17 入熱幅の違いによる温度差の比較

図-18 入熱幅の違いによる面外変形挙動の比較

図-19 面外変形の発生メカニズム

加熱過程における面内方向の温度差が面外変形の発生原因であると考えられるが、そのメカニズムは次のように説明できる。図-19 に示すように、局所的な加熱により供試体の面内方向に温度差が生じる。4. (2)において説明したように、材料強度および剛性は温度に依存しているため、高温部は剛性が低く大きく膨張する一方で、低温部は剛性が高くあまり膨張しない。そのため、供試体の面内方向で膨張量に差が生じ、高温部の伸びを低温部が拘束することで高温部に圧縮力が作用する。この圧縮力により、溶接変形（初期変形）が大きくなる方向へと面外変形が生じたと推測できる。

入熱幅を拡大し供試体の面内方向の温度差を抑制する手法は、残留応力と面外変形の両者の低減に効果的であることが分かった。ただし、入熱幅すなわち入熱領域の拡大は、熱処理に要するコストの増加に関係する。解析において溶接後熱処理時の入熱量を比較した結果を図-20 に示す。入熱幅が拡大すると入熱量も増加することを確認した。また、最適な入熱領域は対象とする構造部材の寸法によって種々異なると考えられる。合理的、経済的な施工と残留応力および面外変形の低減効果の双方を考慮して適切な入熱領域を決定する方法を検討する必要があると言える。

本研究では $500 \times 500 \times 12$ mm の鋼板を対象としたが、実構造物では加熱領域外にも部材が連続する。部材の非加熱領域に熱が伝導する影響や、部材の非加熱領域による力学的な拘束の影響が本研究における供試体の場合よりも大きくなると予想される。また、本研究で用いた鋼板の板厚（12 mm）では、板厚方向にほとんど温度差が生じなかったが、より厚い鋼板の場合、板厚方向の温度差が生じやすくなるため、面外変形挙動に影響を与える可能性がある。今後は、本研究で構築した手法を用いて実構造物の形状、寸法、板厚などを変化させた解析を行い、実構造物への溶接後熱処理の適用性を検討していく。

図-20 熱処理シミュレーションにおける入熱量

5. 結言

本研究では、主に薄い鋼板で構成される土木鋼構造物の溶接後熱処理過程における応力および変形挙動の解明を目的に、一連の基礎的実験および数値解析を行った。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 溶接実験および熱弾塑性解析を行い、実験時の供試体の温度履歴、溶接変形、溶接残留応力を高精度に再現できる解析モデルを構築した。
- (2) JIS Z 3700 に規定される条件下で溶接後熱処理実験を行い、熱影響部の硬化が緩和され、金属組織が微細化されたことを確認した。また、熱弾塑性解析により熱処理実験をシミュレーションし、溶接ビード近傍において残留応力が緩和されたことを確認した。一方、溶接ビード近傍以外では、熱処理過程で残留応力が増加したことが分かった。
- (3) 鋼板供試体に溶接後熱処理の温度履歴を与えると、熱処理後に 0.03 mm 程度の残留変形が生じた。一方、溶接供試体に溶接後熱処理の温度履歴を与えると、溶接ビード側、溶接ビードの裏側いずれから加熱しても溶接変形と同じ傾向の変形が生じ、溶接変形よりも 0.2 mm 程度大きな残留変形が生じた。
- (4) 鋼板の一部の領域を局所的に加熱する熱処理条件では、加熱過程および冷却過程における供試体の面内方向の温度差がそれぞれ面外変形、残留応力を発生させる主要因子となることが分かった。
- (5) 熱処理過程において生じる鋼板全体の残留応力と面外変形の抑制を両立する手法として、加熱範囲を現行の局所熱処理条件よりも拡大する手法を提案し、その有効性を示した。

謝辞：本研究の一部は（一社）日本溶接協会平成 28 年度次世代を担う研究者助成事業を受けて実施した。本研究の熱処理作業には JEMIX（株）平松慶大氏，重信敏男氏の協力を賜った。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：インフラ長寿命化基本計画，インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議，17p, 2013.
- 2) 山田健太郎：鋼橋の長寿命化における塗替え塗装の重要性-木曽川大橋の斜材の破断事故の教訓-，橋梁・鋼構造物塗装，Vol.36，No.1，pp.2-9，2008.
- 3) 土木学会 鋼構造委員会 鋼構造の残存耐荷性能評価と耐久性向上方策研究小委員会：腐食した鋼構造物の残存性能評価および性能回復技術，2007.
- 4) 田中甚吉：溶接後熱処理は何故必要か？，溶接学会誌，第 65 巻，第 3 号，pp.12-14，1996.
- 5) 鈴木宏，岡田八郎，橋本宏：圧力容器における PWHT の効果とその決定条件，溶接学会誌，第 61 巻第 6 号，pp.473-477，1992.
- 6) 平松卓也：溶接後熱処理（PWHT），熱処理，第 51 巻，第 6 号，pp. 332-337，2011.
- 7) 廣畑幹人，伊藤義人：簡易熱源を用いた熱処理によるすみ肉まわし溶接継手の残留応力緩和に関する研究，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.71，No.2，pp. 208-220，2015.
- 8) 廣畑幹人，伊藤義人：荷重作用下における鋼部材へのあて板溶接で生じる残留応力および応力除去焼鈍に関する研究，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.71，No.2（応用力学論文集 Vol.18），pp. 773-784，2015.
- 9) 神戸製鋼株式会社：神戸製鋼溶接総合カタログ-溶接材料・システム-軟鋼～550MPa 級鋼（ソリッドワイヤ）MG-50T，2016.
- 10) 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.
- 11) 中川弘文，鈴木弘之：鋼梁の崩壊温度，鋼構造文集，第 6 巻，第 22 号，pp.57-65，1996.
- 12) 溶接学会：溶接・接合便覧 第 2 版，丸善出版，pp.1145-1146，2003.
- 13) 日本規格協会：溶接後熱処理方法 JIS Z 3700・同解説，2009.
- 14) 廣畑幹人，伊藤義人：トラフリブ溶接部の残留応力緩和に対する簡易熱源による熱処理の適用性検討，構造工学論文集，Vol.62A，2016.
- 15) Gayle, F.W., Fields, R.J., Luecke, W.E., Banovic, S.W., Foecke, T., McCowan, C.N., Siewert T.A. and McColskey, J.D.: Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster: Mechanical and Metallurgical Analysis of Structural Steel, *NIST NCSTAR 1-3*, National Institute of Standards and Technology, 2005.
- 16) 田中甚吉，小幡忠良：応力除去焼鈍に関する研究（第 2 報），溶接学会誌，第 36 巻，第 3 号，pp.36-42，1967.

(2017.6.23 受付)

EFFECT OF THERMAL HISTORY BY POST-WELD HEAT TREATMENT ON RESIDUAL STRESS RELAXATION AND DEFORMATION BEHAVIOR OF STEEL MEMBER

Hiroataka MORI and Mikihiro HIROHATA

When welding is considered as a joining method for repair and reinforcement of steel structures, welded joints have disadvantages such as influence of residual stress on fatigue strength and embrittlement of heat affected zone by welding heat input. Post-weld heat treatment is an effective method to solve these problems. However, civil steel structures assembled by thin plates are possible to be deformed easily by PWHT. For investigating residual stress change and deformation behavior of welded thin plates by PWHT, a series of experiment and analysis were carried out. A condition of PWHT for reducing residual stress and out-of plane deformation was proposed with considering generation mechanism of them.