

溶接シミュレーションによる溶接変形軽減方法考案と実用化

高橋 剛*・吉田正弘**・残間幹夫***・石塚 和則*

Contrivance and practical use of method of reducing a residual deformation due to the welding simulation

Tsuyoshi TAKAHASHI・Masahiro YOSHIDA・Mikio ZAMMA・Kazunori ISHITSUKA

Abstract — Since steel structures as buildings and bridges are generally fabricated and assembled by welding and so on, residual deformation or residual stresses usually occurs after the processes. They affect badly on the structural strength-durability. To remove them increases amount of working man-hour. Therefore, it is important to conduct the numerical simulation before the construction members are actually welded.

This paper describes the effectiveness of thermal plastic-elastic analysis using FEM, focused on the residual deformation depended on welding condition. As a result, the method of reducing residual deformation was developed. Further, the method was applied to the actual project in the local company.

Key words : Welding, CAE, FEM, Residual stress, Deformation, Numerical simulation

1. はじめに

溶接は、古くから鉄橋や自動車の組み立てなど、あらゆる分野の金属部品接合に用いられている。しかし、未だに残留変形を大幅に軽減させる決定的な溶接方法は見つかっておらず、依然として溶接後にガスバーナーなどで当該部位を繰り返し加熱・加圧することで、残留変形量を除去する方法が一般的にとられている。但し、この作業は施工者の長年の経験や勘が必要となり、限られた熟練者しかできないのが実状である。一方、近年の定年退職の大量化と若年層の製造業離れが同時に進行しているため、熟練者の技能伝承が円滑に進まない問題も深刻化している。そこで、対策の一つとして、急速に普及しているのが CAE を用いた溶接前の残留変形予測と溶接条件の適正化検討である。これであれば多くの溶接経験がなくても、手順と評価法さえ理解していれば定量的に変形量を予測できる。

本研究では、市販の溶接シミュレーションソフト「Quick Welder」^①を用いて溶接残留変形を与える溶接条件の影響度合いを二枚板の重ね合わせ隅肉溶接の基礎試験により明らかにし、残留変形の小さい溶接順序を考案する。さらにこの溶接方法を埠や柵として用いられる鋼矢板に適用し、コストや期間を含めた CAE 効果を検証することを目的とする。

2. 溶接基礎試験シミュレーションによる精度確認と溶接順序の検討

2・1 計算方法

計算ソルバーは弾塑性有限要素法をコード化した Quick Welder を使用した。図 1 に解析システム体系の模式図^②を示す。まず、熱源移動を伴う非定常の熱伝導解析によって時々刻々変化する温度分布を求める。

*釧路工業高等専門学校

**パナソニック電工帯広株式会社

*** 株式会社残間金属工業

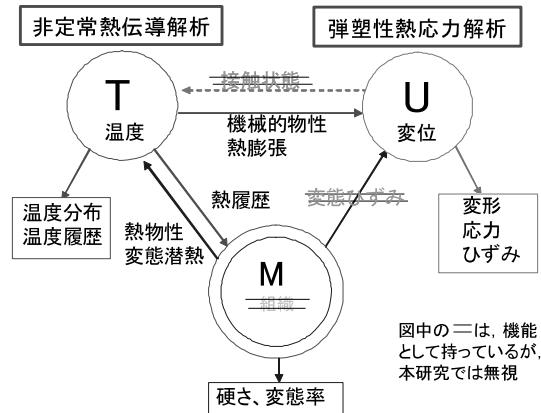


図 1 解析システム体系図

式(1)に非定常熱伝導方程式を示す。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - G \quad \dots(1)$$

ここで、 k :熱伝導率, $c\rho$:熱容量, G :潜熱など内部発熱である。このとき、熱伝導率は温度依存性を、潜熱は変態潜熱を考慮する。更に、熱的境界条件としては溶接入熱に関わる熱流束、放熱に関わる熱輻射と対流熱伝達を考える。対流熱伝達については、溶接中の溶接部周辺を強制対流、それ以外の部位を自然対流とし、溶接後室温に戻るまでの大気放冷過程は板全体を自然対流として仮定する。なお、実際には各部の測温結果と比較し、これらの熱伝達率を調整した。

次に、計算で得られた温度分布の逐次取り組み、弾塑性熱応力解析を行った。これに用いられる支配方程式を(2)～(4)に示す。

$$\cdot \text{変位}-ひずみ関係 \quad \varepsilon = \varepsilon(u) \quad \dots(2)$$

$$\cdot \text{応力}-ひずみ関係 \quad \sigma = \sigma(\varepsilon) \quad \dots(3)$$

$$\cdot \text{応力の平衡方程式} \quad \nabla \cdot \sigma = 0 \quad \dots(4)$$

式(3)において、溶接のような弾塑性熱応力を取り扱う

ときの全ひずみ ϵ は式(5)のように分解できる。

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^T + \epsilon^c + \epsilon^{tr} \quad \cdots (5)$$

ここで、 ϵ^e ; 弾性ひずみ、 ϵ^p ; 塑性ひずみ、 ϵ^T ; 热ひずみ、 ϵ^c ; クリープひずみ、 ϵ^{tr} ; 変態ひずみである。本研究では ϵ^c 、 ϵ^{tr} は相対的に小さいとして無視した。材料の硬化則は温度依存性を考慮した von-Mises 等方硬化則であり、 ϵ^p は塑性流れ則(J_2 flow)により算出される。

2・2 溶接基礎試験内容と計算モデル

精度検証用および溶接順序検討用の供試材として、長さ 660mm、幅 100mm、板厚 6mm の溶接用鋼板 SM400 の 2 枚に対し、溶接台車を使って板幅の半分を重ね合わせる隅肉溶接を実施した。これに対応する計算モデルが図 2 である。図中に示す溶接ビードは予めモデル化しておく必要があるが、当該要素が入熱されるまでは剛性がゼロすなわち拘束力が生じないように工夫されている。要素タイプは、全て三次元ソリッド要素を用い、鋼板は六面体、溶接ビードは五面体とした。

鋼板および溶接ビードの応力-ひずみ関係の機械特性値には、図 3 に示すように温度別引張試験を行い、公称応力-ひずみ関係のデータを取得し、この結果を元に加工硬化係数を求め入力した。溶接時の溶接入熱

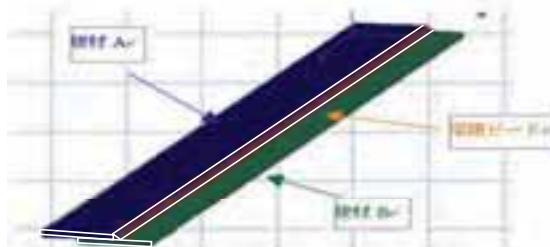


図 2 計算モデル(重ね板隅肉溶接)

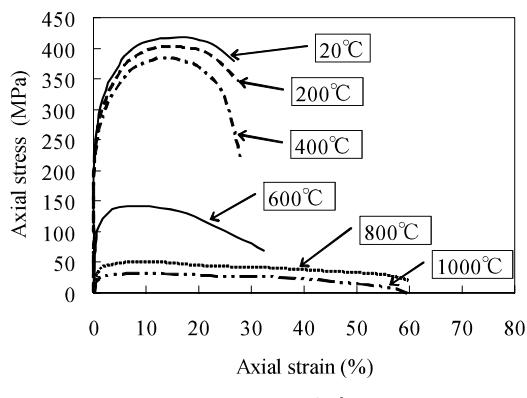


図 3 引張試験

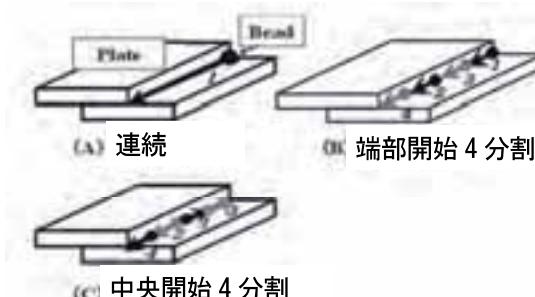


図 4 溶接分割方法および溶接順序

は、予め作成しておいたビード要素に対し、実験と同じ条件(電流、電圧、溶接速度)で与えた。実験において鋼板は台の上に置いた状態で溶接しているので、その条件に合わせるために機械的拘束条件は与えない。

2・3 溶接条件

残留変形量を低減する目的で電流、電圧などの溶接条件を変更することは、溶接欠陥を生じる懼れがあるため行うべきではない。そこで最も現実的な方法は、溶接順序を変更することである。これには溶接入熱量が少なくて済む千鳥溶接のような間欠溶接も含まれるが、密閉性及び溶接部強度の低下を招くため、ここでは除き、間欠の無い溶接順序の工夫で残留変形量を低減する方法を検討する。ここで取り上げる以下の 3 種類の溶接順序(a)～(b)の模式図を図 4 に示す。図中の番号は溶接順番を表している。

(a)連続溶接

(b)端部開始 4 分割溶接

(c)中央開始 4 分割溶接

図(a)の連続溶接とは、板の端から反対側の端まで一挙に連続して溶接する方法である。図(b),(c)はいずれも全長を 4 等分割し、それを溶接の一区間長とする。(b)と(c)の違いは、(b)が端部から始まり一方向に向かって断続的に溶接していくのに対し、本研究で提案している(c)は中央点から始まり、両端部に向かって交互に溶接していく方法である。

2・4 解析精度と溶接変形量低減方法の検討

図 5 は連続溶接中の温度分布の変化を示したもので、(a)は赤外線サーモグラフィーの結果であり、(b)は熱伝導解析結果である。熱源移動に伴い、溶接熱が板全体に広がっていく様子が良く一致しているのが分かる。更に、溶接中の変形状態をイメージし易くするため、約半分まで溶接したときの状態を図 6 に示す。全体的に弓型に反っているのが分かる。これは、二枚の鋼板のうち、下の鋼板(図 2 板材 B)は板幅中央線が溶接線

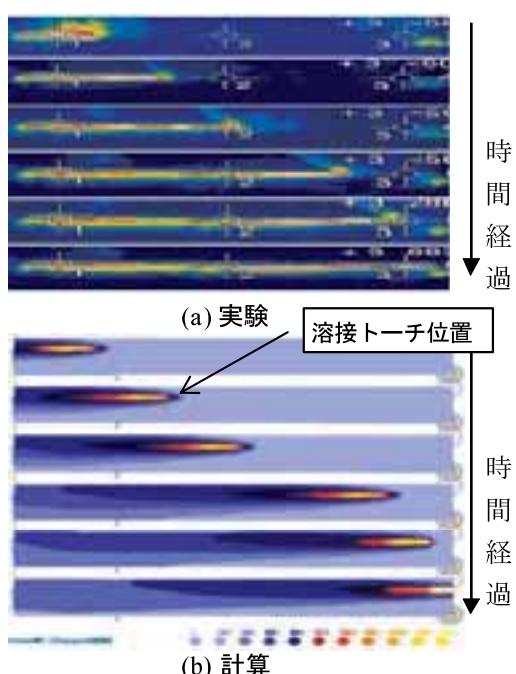


図 5 計算精度検証(温度分布の実験結果比較)

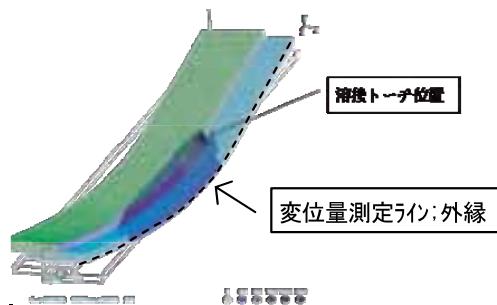


図 6 シミュレーション結果
(連続溶接途中の温度分布と変形状態)

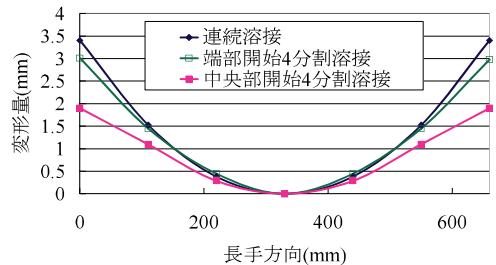


図 7 シミュレーション結果の一例(溶接中の温度分布)

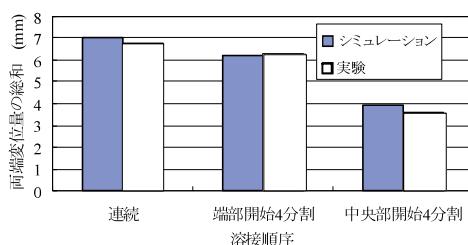


図 8 溶接順序違い比較結果

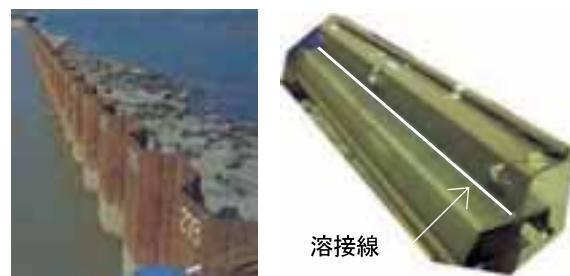
になるため上方の板(図 2 で言えば板材 A)よりも受熱しやすく蓄熱量が多くなる。そのため平均温度も高くなり、上方の鋼板よりも熱膨張量が大きくなることによって反り上がるるのである。

図 7 は、下方の鋼板の外側エッジに沿う鋼板の面外方向の残留変形量、すなわち反り量の分布を示している。変形量は(a)連続、(b)端部開始 4 分割、(c)中央開始 4 分割の順に小さくなっている。但し、変形モードは何れの条件も同じであることが分かる。そこで、変形量を定量的に比較するため、鋼板の両端変形量の和を縦軸にとったものを図 8 に示す。併せて解析結果と実験結果の比較も示す。解析結果と実験結果は定量的によく一致していること、更には本研究で提案している(c)中央部開始 4 分割の変形量が 3 つの条件の中で最も小さいことが実験結果からも言える。

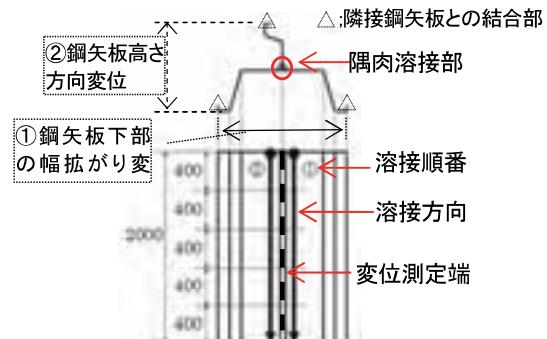
この結果から、溶接変形を軽減する方法として考案した中央部開始 4 分割溶接順序が有効であることが明らかになった。これは中心部から外側に向かって交互に溶接することにより、熱が拡散されるので冷却効率が良く、前後端での上板と下板の伸び量の差が比較的小小さくなることで、反りが小さくなると考えられる。

3. 実部品(鋼矢板)への適用と検証

3・1 実部品と溶接条件



(a) 防波堀として (b) 堀の直角結合用として
図 9 鋼矢板の使用例



(a) 連続溶接

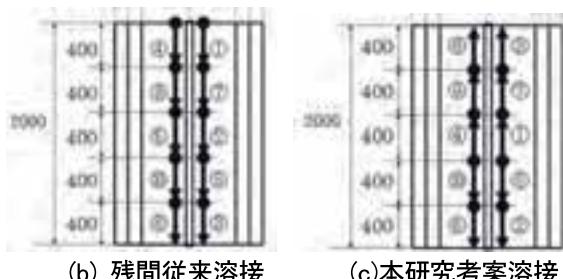
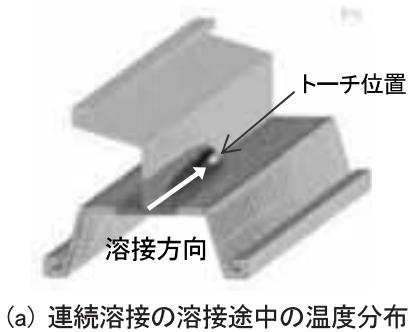


図 10 鋼矢板断面及び溶接順序

2. で得られた溶接順序の知見を実部品の鋼矢板に適用し、考案した溶接順序の有効性を検証する。鋼矢板そのものはハット型断面をしており、寸法は高さ 325mm、幅 400mm、長さは約 6m、板厚は平均 12mm であり、これを外縁のフック箇所で組み繫いでいき一つの堀(或いは柵)のようにして使うものである。一般的には図 9(a)に示す使用例のように真っ直ぐな堀にし、河川工事の土砂崩れや浸水を防ぐ目的で使用される。

一方、堀と堀を直角に繋ぐために鋼矢板を幅半分に切り、それを鋼矢板の上面中央に直角に隅肉溶接する場合がある。図 9(b)にその外観写真を示す。このとき問題になるのは溶接による残留変形である。上述したように鋼矢板は何枚も繋いで堀にするため、残留変形が大きいと隣接の鋼矢板との結合が困難になる。したがって、この変形を極力小さくすることが求められる。

図 10 に鋼矢板断面形状と 3 種類の溶接順序を示す。本部材は検証用としたため本来の長さの約 1/3 である 2m に切断して用いた。上述したように溶接による断面変形が大きいと組み付け施工性が低下する。ここでは、この施工性に影響を及ぼす①鋼矢板下部の幅拡がり変位、②鋼矢板高さ方向変位を管理測定箇所とし、その寸法を図 10(a)の断面図に示す。溶接順序(b)は従来用いられてきた順序であり、図 4 で言えば(b) 端部開始 4 分割に、溶接順序(c)は本研究提案順序に対応する。



(a) 連続溶接の溶接途中の温度分布

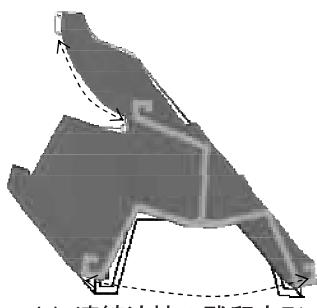
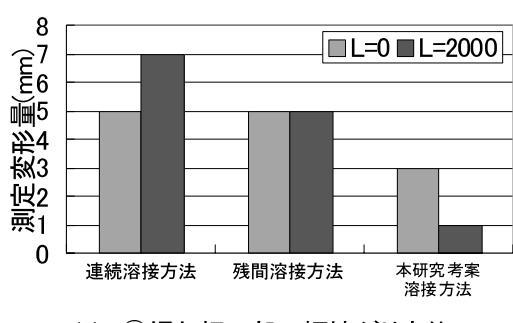
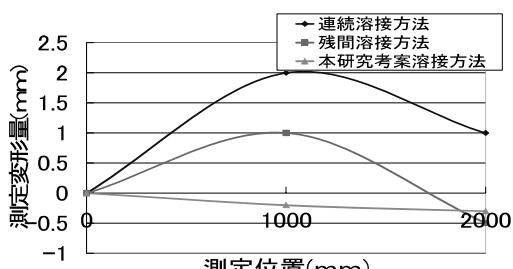


図 11 シミュレーション結果



(a) ①鋼矢板下部の幅拡がり変位



(b) ②鋼矢板高さ方向変位

図 12 変形量測定結果

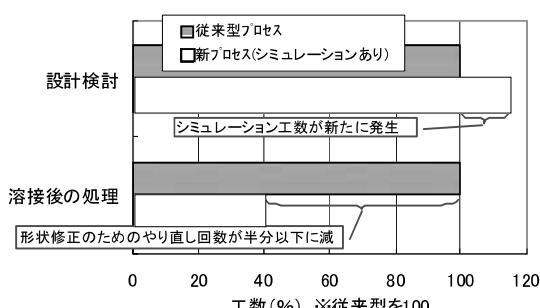


図 13 溶接シミュレーションによる対費用効果

これら3種類の溶接条件(電流、電圧)は全て同じであり、溶接は熟練溶接工が担当した。溶接速度はその

速度を実測し、その平均値を用いた。

3・2 提案する溶接順序に対する有効性検証

図11は溶接シミュレーション結果であり、(a)図は連続溶接途中の温度分布を示している。ソフトウェアの要素数制限により、長手方向には高い解析精度を得るだけの十分な要素数を確保できていないものの、溶接速度から算出される要求要素長は満足しているため、実時間通りの結果が得られている。(b)図は実変形を3倍スケールアップした残留変形状態と変形前と併せ表している。上述したように、鋼矢板下部が幅方向に拡がっていること及び長手方向に沿って湾曲しているので鋼矢板の高さ位置も変化していることが分かる。このような変形が鋼矢板を繋いでいくときに障害となる。

図12は3種類の溶接順序に対する実際の変形量を示している。(a)図では、鋼矢板の前後端面位置での下部の幅拡がり変位を、また(b)図では長手方向に沿った鋼矢板の高さ変位を比較している。いずれも本研究提案順序の変形量が他の順序に比べて明らかに小さいことが分かる。これは、上述したように溶接を長手方向中点から開始し、端面に向って交互に進めることで、平均温度が低くなり、端面位置での部材伸び量の差が小さくなるため反り変形が小さくなると考えられる。

3・3 コストに対する有効性検証

図13はシミュレーションのない従来型工数を100とし、シミュレーション実施した場合を試算した結果を示す。通常、長さ6m程度の鋼矢板の残留変形除去工数は本溶接と同じくらい必要とするため、例えば30本あれば60時間にもなる。これに対し、シミュレーションによる事前検討を行えば、残留変形量を低減できるので除去工数は60%程度すなわち36時間程度削減できる。当然、シミュレーション工数が新たに15%程度追加になるが、これを差し引いても明らかに工数低減効果が生まれる。なお、計算時間はCPUクロック数2GHzのOAパソコンで7~8時間程度かかるものの、就業時間外の夜間計算の利用やたとえ就業時間内であっても計算終了までは別な業務をすることができる。日常業務への影響は想像するよりも少ないのが実状である。また、条件絞り込みのために繰り返し計算する際も溶接条件の数値だけを変更するだけで良く、コストも電気代だけであり、その対費用効果は非常に大きいと言える。

4. 結言

重ね合わせ隅肉溶接シミュレーションおよび実験結果から著者が考案した「中央開始4分割溶接順序」が溶接残留変形量を軽減する方法として有効であることが分かった。これを塀や柵として用いられる実部品の鋼矢板に適用したところ残留変形を大幅に軽減することが確認でき、実務展開が可能になった。

参考文献

- Quick Welder 使用マニュアルA編, B編, 著:(株)計算力学研究センター 平成13年7月出版
- 村川英一, 工作精度管理のための溶接変形シミュレーション, 溶接技術, (2002 Mar.), pp.75-80