

厚板多層溶接における温度履歴の簡易計算法に関する検討

大阪大学大学院工学研究科

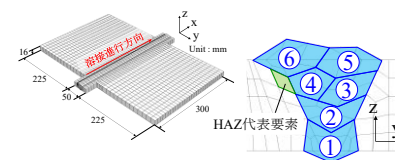
学生員 ○井上 貴之

大阪大学大学院工学研究科

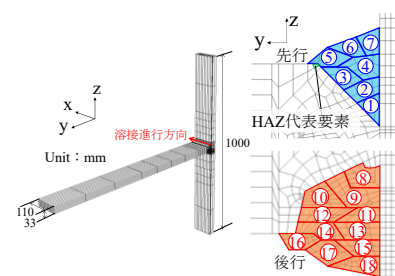
正会員 廣畑 幹人

1. 研究背景および目的

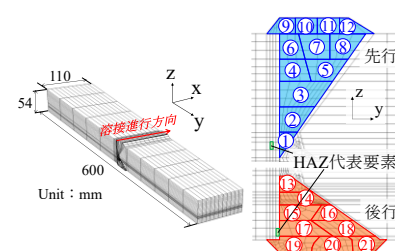
鋼構造物の部材接合には溶接が広く用いられる。溶接部は溶けて固まった溶接金属と溶接熱により組織変化の生じた熱影響部（HAZ）から成り、HAZの中で融合線のごく近傍の粗粒域は一般に硬化し、脆性破壊の起こりやすさの指標である破壊靱性が低くなることが知られている。HAZの組織や硬さなどを決定する主因子が溶接熱サイクルにおける800℃から500℃までの冷却時間 $t_{5/8}$ であることが報告されており¹⁾、 $t_{5/8}$ に関する研究が多く実施されてきた。溶接部の靱性評価において、HAZの温度履歴を精度よく把握することが重要である。しかし、近年開発された新鋼材や、その厚板の多層溶接における温度履歴がHAZの組織状態や硬さに及ぼす影響については不明な点が多い。本研究では、温度履歴の把握等に有用である熱伝導解析を用いて、厚板多層溶接における温度履歴を高精度かつ効率的に再現する簡易計算法を提案するための一連の検討を実施した。



(a) 板厚 15 mm (6 パス)



(b) 板厚 33 mm (18 パス)



(c) 板厚 54 mm (21 パス)

図-1 解析モデル

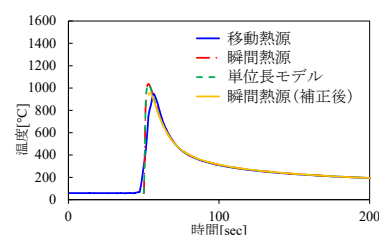


図-2 温度履歴

(板厚 15 mm, パス 6)

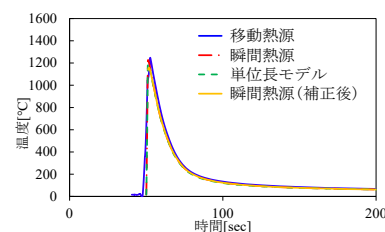


図-3 温度履歴

(板厚 33 mm, パス 5)

2. 移動熱源モデルによるシミュレーション

本研究では、板厚 15 mm (6 パス)、33 mm (18 パス)、54 mm (21 パス) の解析モデルを構築し、溶接シミュレーションを行った。まず、熱源の移動を考慮した溶接線全長のモデル（以下、移動熱源モデルと称す）を作成した。解析モデルおよび温度履歴を出力する HAZ の代表要素を図-1 に示す。熱的境界条件として空気への熱伝達を考慮し、材料特性は温度依存型とした。

板厚 15 mm のモデルについては既往の研究²⁾における実験を参考に作成した。解析結果を実験結果と比較した結果、温度履歴は概ね一致していることを確認しており、移動熱源モデルの妥当性が示された。各板厚のモデルについて、解析結果を図-2~4 に青線で示し、後のシミュレーションに対する基準とする。

3. 瞬間熱源モデルによるシミュレーション

各パスで溶接金属が継手の溶接線全長に単位時間で同時に溶着されるとする瞬間熱源のモデル（以下、瞬間熱源モデルと称す）を作成し、シミュレーションを行った。物体熱流束は正味の入熱量が移動熱源モデルと一致するように設定し、その他の解析条件は移動熱源モデルと同様である。解析結果を図-2~4 に赤色の一点鎖線で示す。

4. 単位長モデルによるシミュレーション

瞬間熱源モデルにおける溶接線方向の中央 1 mm 幅のモデル（以下、単位長モデルと称す）を作成し、シミュレーションを行った。断面を連続する面として定義し、断面を除く表面に対して空気への熱伝達を考慮した。その他の解析条件は瞬間熱源モデルと同様である。解析結果を図-2~4 に緑色の一点鎖線で示す。

キーワード 厚板, 多層溶接, 熱伝導解析, 温度履歴

連絡先 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 TEL 06-6879-7598

5. 解析結果および考察

瞬間熱源モデルと単位長モデルの温度履歴を比較すると、各板厚の全てのモデルについて概ね一致していた。このことから、瞬間熱源によって理想化する際には、溶接進行方向のモデル化範囲は温度履歴に対してほとんど影響を及ぼさない可能性が示された。

瞬間熱源を用いることで、真の値よりも最高到達温度は高く、最高温度に達するまでの時間は短く、最高温度からある一定温度までの冷却時間は長くなることがわかっている。HAZ 代表要素の温度履歴では、多くのパスでこの傾向が見られたが、板厚が大きいモデルではこの傾向と外れた温度履歴も散見された。さらに、板厚 54 mm モデルの先行、後行それぞれ初めの 2 パスにおいて 268 ~ 405 °C の大きな差が生じた(図-4 (a))。それらの原因として多層多パスの溶接となることでより複雑な温度分布を呈することや、継手の開先形状による影響、移動熱源の温度履歴が真の温度履歴と異なる可能性があることなどが考えられる。

既往の研究³⁾において、図-5 のような溶接線からの距離 r にある任意の点 P の移動点熱源による温度上昇は、ある適用範囲においては瞬間線熱源によって近似できることが示されている。移動点熱源における温度分布の正しい解 θ と線熱源が与えられた場合の温度上昇 θ_L の比 θ/θ_L を α として、パラメータの変化によって α がどのように変化するかを検討することで近似の適用範囲が示されている。

解析条件から速度 v と熱拡散率 k を仮定し、熱源から熱履歴取得要素までの距離から r を仮定することで、図-6 のような α の時間変化を得ることができる。得られた α と瞬間熱源モデルの温度履歴の積で得られる温度履歴を、補正後の瞬間熱源による温度履歴として、図-2~4 に黄線で示す。

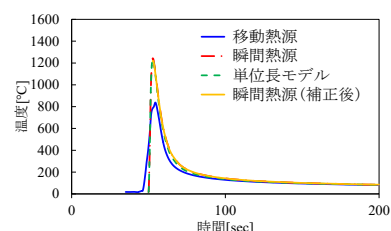
α による補正を適用することで多くのパスで瞬間熱源モデルの最高到達温度を移動熱源モデルに近づけることができた。

6. まとめ

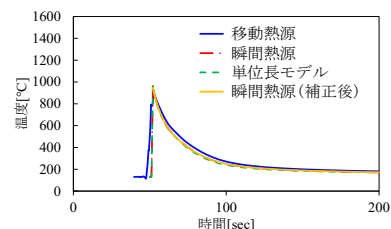
- (1) 厚板多層溶接における温度履歴を効率的に推定するため、熱伝導解析による簡易計算方法を検討した。板厚 54 mm モデルの先行、後行それぞれ初めの 2 パスを除くと、熱源の移動を理想化した瞬間熱源モデルにより、移動熱源モデルに対して最高温度は 17 ~ 133 °C の差、 $t_{5/8}$ は 0.13 ~ 1.3 秒の差で求めることができた。
- (2) 溶接線方向の長さを単位長としたモデルでは、瞬間熱源モデルとほぼ一致する温度履歴が得られた。
- (3) 継手の板厚や開先形状の影響により、温度履歴を出力する部分によって真の値や熱伝導による理論とは異なる傾向が表れる可能性が示された。
- (4) 移動点熱源と瞬間線熱源の温度差に基づく補正を考慮することで、瞬間熱源モデルの精度を向上させられる可能性が示唆された。
- (5) 瞬間熱源や単位長モデルを用いることで、各板厚の継手で移動熱源モデルに対し 90 % 以上の計算時間短縮効果が得られた。

参考文献

- (1) 稲垣道夫: 鋼材の溶接諸条件と冷却時間(第 1 ~ 7 報), 溶接学会誌, 1959.
- (2) Hirohata, M.; Chen, G. etc. An investigation on laser-arc hybrid welding of one-pass full-penetration butt-joints for steel bridge members. Welding in the World. Vol.66, pp.515-527, 2022.
- (3) 佐藤邦彦: 移動熱源による熱伝導の特性に関する覚え書, 溶接学会誌, Vol.36, No.2, pp.154-159, 1967.



(a) パス 1



(b) パス 17

図-4 温度履歴 (板厚 54 mm)

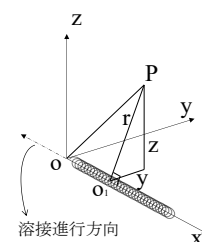


図-5 任意の点 P の位置関係

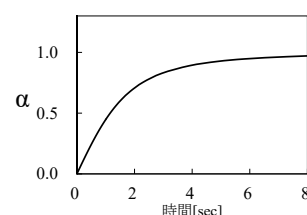


図-6 α の時間変化