

曲線曲面構造を有する大型部材の WAAM法積層造形に関する基礎研究

後藤 浩二

九州大学 大学院 工学研究院

1 はじめに

金属レベルの強度を確保しつつ大型の部材をAMにより製造するには、アーク溶接を応用したWAAM法の適用が有効と期待される。WAAMは造形精度こそ粉末床溶融方式と比べ劣るものの、材料コストや造形効率の観点において利点がある。一方、WAAMに関する先行研究の多くが「単に形状生成を行う」「直線状溶接ビードを単調に積層させ、強度や材質を調査」「積層順序を工夫し、積層線の交差が無いパターンで積層造形」に留まっているようである。著者のグループでは、本研究助成を契機に、WAAMにより大型で強度が要求される部材を製造するために必要となる周辺技術に関して研究を開始した。WAAMのような新製造技術に関する研究では、試行錯誤的に試作を繰り返しながら製造技術に関する知見を集積することが必要であるが、特に製造対象が大型となる場合は、数値検討により製造物の強度性能を事前把握できることが必要であろう。この観点と著者らが有する実験環境も考慮し、本研究では

- 1) CO₂半自動溶接により直線状および円弧状の壁的な構造を積層造形することとし、これに適した条件を探索。
 - 2) 積層造形に関する熱弾塑性FE解析を実施し、施工による変形を推定し、実測と比較。
 - 3) FE解析により得られる温度履歴から、積層物断面のビッカース硬さ分布を推定し、実測と比較。
- について取り組んだ。

2 積層造形試験

溶接電源としてWelbee M500II (ダイヘン製) を用い、溶接ワイヤはMG-50 (直径1.2mm; 神戸製鋼所製)、シールドガスは100%CO₂として、試行錯誤的に溶接施工条件を探索した。本研究は初期段階であることもあり、主観ではあるが、直線状10層のビード積層 (ビード長さ目標値: 200mm) による造形物の外観が良好と判断

表1 施工条件

電流 [A]	電圧 [V]	溶接速度 [m/min]	ガス流速 [L/min]
175	21.0	0.3	18

できる施工条件を探索した。その結果、表1に示す条件で直線状の良好な外観を有する造形が可能であることを確認した。この施工条件により複数の曲率を有する円弧状壁の積層も実施した。

本施工に際しては、積層時の始端と終端は層ごとに入れ替えた。各層の積層間の待ち時間も複数検討した。

上記施工条件で詳細に検討をするための情報取得を目的に、溶接線から10~30mm離れた位置の基板の上に熱電対を貼付し、造形時の温度履歴を測定した。また、レーザ変位計LJ-V7000 (キーエンス製) を用いて、基板裏面の溶接線上の変位を測定した。

3 積層過程中的温度履歴および変形の予測

温度履歴および変形の予測には、FE解析コードSimufact Welding (<https://hexagon.com/ja/products/simufact-welding>) を使用した。事前検討で確定させた施工条件で製作する際の温度履歴を比較しながら熱源形状 (Goldak Model) のパラメータを同定した。図1は直線

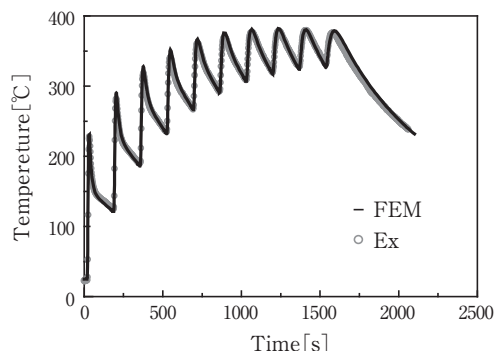


図1 積層時温度履歴の推定例

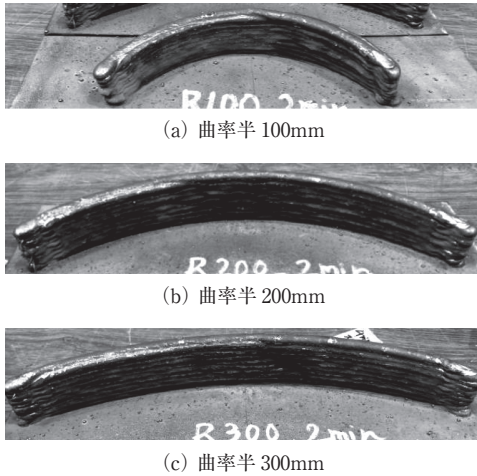


図2 円弧壁積層の例

積層時のビード直下基板裏面の温度履歴についてFE解析により推定値と実測値を比較した結果であるが、複数積層中の温度履歴を良好に推定できている。

3.1 直線壁形状

表1と同じ条件で20層（ビード長さ目標値：200mm）の積層を、1層ごとの冷却時間を3条件（1分、2分、4分）設定して施工した。冷却時間1分の場合、他条件と比較して両端部の垂れが目立つ状況であった。なお、積層時の各段階において、最上部ビード（長さ方向中央位置）の温度を放射温度計により計測し、FE解析における値と比較したが、どの条件でも積層の各段階における温度履歴をおおむね良好に推定できることを確認した。また完成後の基板の反り（長さ方向面外変形）についても実測とFE解析を比較し、良好に推定できることを確認した。

3.2 円弧壁形状

図2に示す3種の曲率を有する円弧状積層（20層；ビード長さ狙い値200mm）を製作した。層ごとの冷却時間は前述の結果で、形状の良好性と施工時間の短さを考慮して2分とした。

これらの積層時の各段階において、最上部ビード（長さ方向中央位置）の温度を放射温度計により計測し、FE解析における値と比較した。直線状積層時と比較すると積層後半段階で推定値が低めの値であるものの、おおむね良好に推定できることを確認した。また、基板の縦曲がり変形についても同様の比較を行ったが、曲率半径100mmの場合のみ実測値と推定値の差が板端ほど大きくなる結果となったが、この原因は調査中に留まっている。

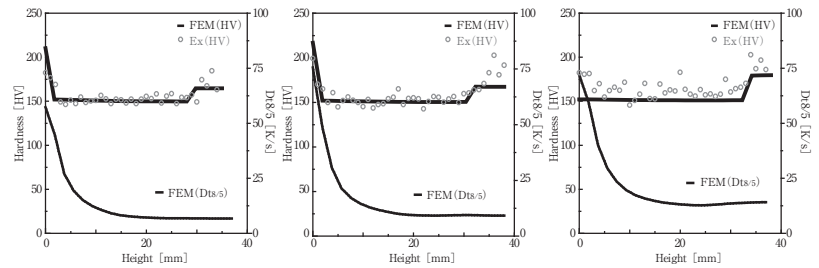


図3 積層断面高さ方向の硬さ分布に関する推定値と実測値の比較

4 積層断面の硬さ分布の推定

積層物の強度確保の観点から、施工条件から硬さ分布を推定できることが期待される。そこで、溶接の先行研究による知見を活用して、硬さ分布の測定を試みた。これに先立ち積層断面のマイクロ観察を行い、組織の特徴を調査した。その結果、積層物の強度担保の観点から、複数回積層に伴う再熱過程による組織変化や硬度低下についての考慮の必要性が示唆された。

次にFE解析により得られる温度履歴の情報から、複数パス溶接に対する硬さを推定できる三上ら¹⁾の方法により断面の硬さ分布を推定し、実測値と比較した。図3に結果を示すが、おおむね良好に推定可能であること、層間冷却時間が長いほど実測の硬さ分布のパラツキが大きくなること、を確認した。

硬さ分布にばらつきが大きいことは積層物の構造強度健全性の観点からは好ましくないため、このような状況を避けるために推奨すべき層間冷却時間設定指針を提案することを目指して研究を継続していくことにしている。

5 おわりに

本研究は、WAAMにより強度担保が必要となる大型構造体製造に資する基礎的な内容にとどまったが、この研究を通じて解決していく必要がある内容について認識できたこともあり、今後はより大きく、複雑でかつ積層が交差するような部位を有する構造物の積層造形に向けて研究を継続したい。

本研究を実施するに際し研究助成をいただきました日本溶接協会、AM実験装置の構築と積層断面のマイクロ観察およびこれに関する考察について有用な知見をご提供いただきました寺崎秀紀教授（熊本大学）に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 三上他, 溶接学会論文集, 23(4), 2005.