

M05 FCB 溶接時における凝固割れにおよぼす 諸因子の影響に関する力学的検討

今 智史 (指導教員 柴原・生島・河原)

Effect of Various Factors on Solidification Crack under FCB Welding

by Satoshi Kon

Abstract

In this study, to predict the formation of the hot cracking, numerical approach using Idealized Explicit FEM is employed. It is well know that the accuracy of the temperature distribution significantly influences the welding deformation and stress. To obtain accurate temperature distribution, multi-electrode heat source model is introduced and the accuracy of the temperature distribution is discussed by comparing the analysis and measured results. The formation of hot crack is discussed based on the plastic strain increment which occurs in Brittleness Temperature Range (BTR). The influence of various factors on hot cracking is investigated based on experimental results and analysis results.

Consequently, it was found that the accurate temperature distribution can be obtained by heat conduction analysis considering multi-electrode FCB welding heat source. In addition, through the computation of the formation of hot crack using BTR plastic strain increment, it was found that the larger tensile BTR plastic strain increment is generated at the backward of tack welds.

1. 緒 言

船体大型鋼板の板継溶接においては、多電極FCB溶接が採用される場合が多い¹⁾。Fig. 1 に示す通り、FCB溶接では、フラックスおよび裏当て鋼板を用いることで、大電流・多電極による高速溶接を実現している²⁾。しかしながら、溶接始末端部に凝固割れが発生する場合があります問題となっている。凝固割れは溶接継手の性能に極めて大きな影響を及ぼす事から、溶接部の健全性を保障するためには、溶接欠陥を制御・防止するための方策が必要不可欠となっている³⁾。既往の研究では、実験に基づく研究が多数存在するが、FCB溶接においては、鋼板寸法が 20 m 以上と大きく、その実験実施のためには多くの時間と労力が必要となるため、詳細な検討を実施するためのコストが問題となる。

本研究では、FCB 大型鋼板板継溶接時における凝固割れの防止を目的として、著者らにより開発された、大規模解析が可能な理想化陽解法 FEM を用いた熱弾塑性解析により検討を重ねる。凝固割れを対象とする解析においては、溶接中の温度分布の解析精度が重要になることか

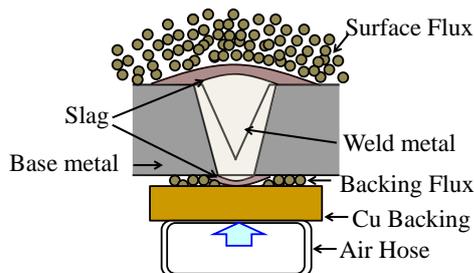


Fig. 1 Schematic illustration of FCB welding process.

ら、まず、多電極熱源モデルの提案を行い、実験および熱伝導解析により得られた温度履歴を比較することにより、その妥当性について検証を行う。次に、BTR (Brittleness Temperature Range, 凝固脆性温度領域)において発生する塑性ひずみ増分を用いた凝固割れ発生モデルの提案を行うと共に、割れ発生メカニズムについて検討を行う。

2. BTR 塑性ひずみ増分を用いた凝固割れ解析

溶接時の凝固過程において、柱状晶の境界部に低融点の液相が残存し、この部分に、大きな引張り変形が作用した際に凝固割れが発生すると言われている。この凝固割れを模式的に示したのが Fig. 2 である。図中の固相線温度 T_S と液相線温度 T_L の間の温度域、すなわち溶接金属の BTR において、実線で示されるような大きな引張りひずみが作用した際に割れが発生すると考えられている。この凝固割れは、冶金学的な観点からその温度域の縮小による割れ防止効果について検討されている。また、力学的なアプローチとしては、BTR に作用するひずみ量を発生指標として、割れ発生評価が行われている。本研究では、熱弾塑性解析理論に基づく非線形有限要素解析を実施し、Fig. 3 に示すように降温過程において BTR に作用する塑性ひずみ増分(以後、BTR 塑性ひずみ増分と称す)を割れの発生指標と考え、割れに及ぼす諸因子の影響について検討を行う。

3. 3 電極 FCB 溶接の熱伝導解析

本章では、多電極熱源モデルを考慮した熱伝導解析を実施し、実験結果との比較を通して解析の妥当性について検証を行う。

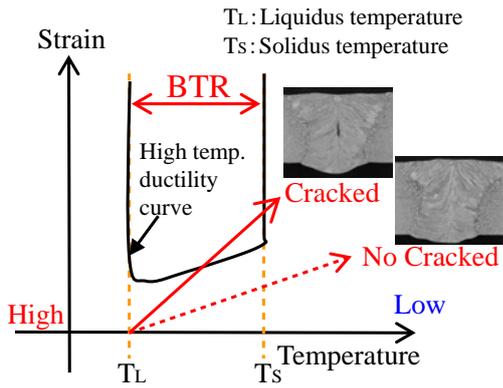


Fig. 2 Schematic illustration of relationship between High temperature ductility of alloy and loaded strain in cracked / no crack case.

3.1 3 電極 FCB 溶接実験およびその解析

本研究においては 3 電極による FCB 溶接を実施した。Fig. 4 に本実験に用いた試験体寸法および熱電対による温度計測位置を示す。試験体寸法は、長さ 1200 mm、半幅 150 mm、板厚 25 mm である。また、開先は、開先角 50 度の Y 開先であり、ルートフェイスは 5 mm とし突合せ溶接を実施した。溶接条件としては、1 電極目を電流 1400 A、電圧 33 V、2 電極目を電流 1000 A、電圧 42 V、3 電極目を電流 1000 A、電圧 44 V とし、溶接速度を 600 mm/min とした。1 電極目、2 電極目、3 電極目の電極をそれぞれ L、T1、T2 と定義する。電極間隔は L-T1 間を 35 mm、T1-T2 間を 120 mm とした。試験体の材料は、SM490(軟鋼)を想定し、解析を実施した。

本解析においては、エレメントベース法を用いる。エレメントベース法は、トーチの進行とともにビードに相当する溶接部の要素が逐次実効化される手法である。本手法を用いることで、3 電極の発熱に伴う溶融プールの生成をモデル化できるため、実施工に近い解析といえる。

3.2 実験結果および解析結果

熱電対を用いて、前節に示す計測位置における温度履歴について調べた結果を Fig. 5 に示す。横軸は時間を示

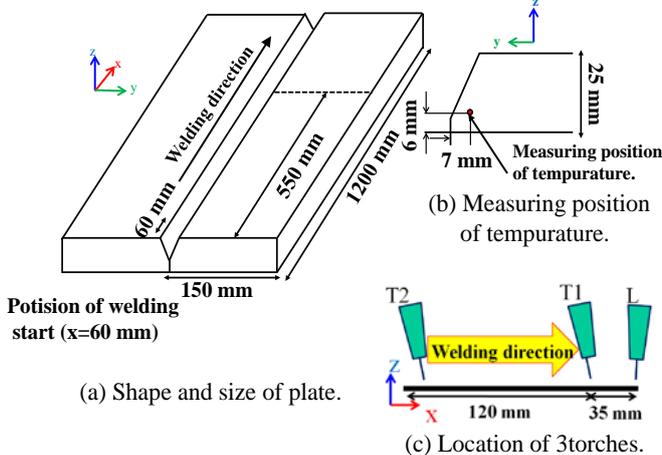


Fig. 4 Temperature dependent physical constants.

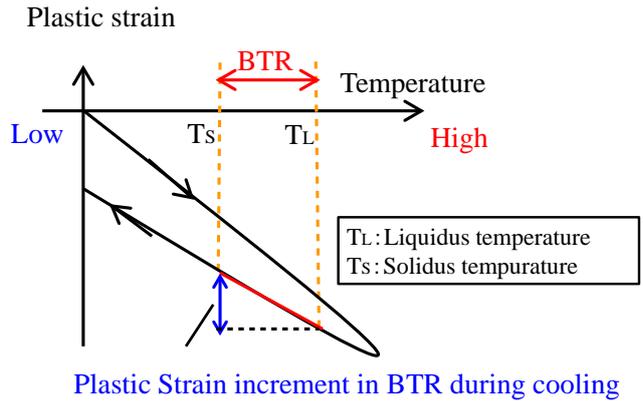


Fig. 3 Schematic illustration of plastic strain increment in BTR during cooling.

し、縦軸は温度を示す。また、同図の実線は実験結果を示し、破線は解析結果を示す。同図より、電極L到着時に温度が急激に上昇し、さらにT2到着時に再上昇していることが確認できる。また、実験結果と解析結果が良好に一致していることが分かる。次に、理想化陽解法FEMに基づく熱伝導解析結果として得られた溶接過渡期の温度分布を Fig. 6 に示す。Fig. 7 (a), (b), (c)にそれぞれ中央断面において各電極L、T1、T2 が到着した際の温度分布を示す。同図の灰色部分は最高到達温度 1450°C以上の溶融領域を示している。同図より、各電極の進行とともに溶接部のビードが生成される様子が確認でき、3 電極熱源を忠実に再現できていることが分かる。また、溶接金属は、各電極が到着時、溶融していることがわかり、さらに、T1 到着時(b)にはLとT1 が融合していることがわかる。Fig. 7 (d) に 3 電極による最高到達温度分布を示す。同図より、各電極の溶け込み形状の解析が可能となった。

以上の結果より、熱伝導解析結果および実験により得られた温度分布が良好に一致していることが確認でき、本手法を用いることで、各電極による溶け込み形状を詳細に予測できることが分かった。

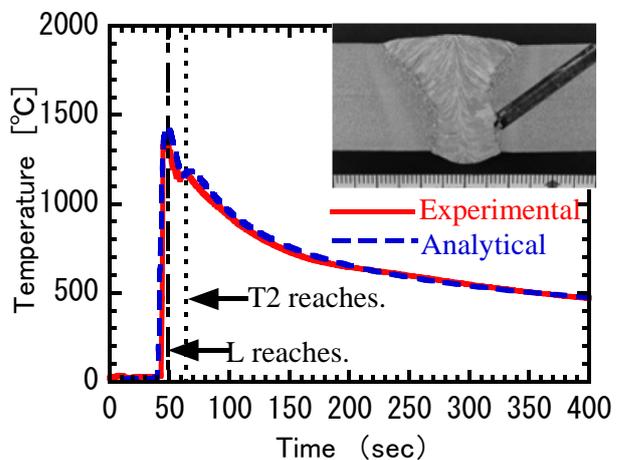


Fig. 5 Comparison of temperature history obtained by experiment and analysis.

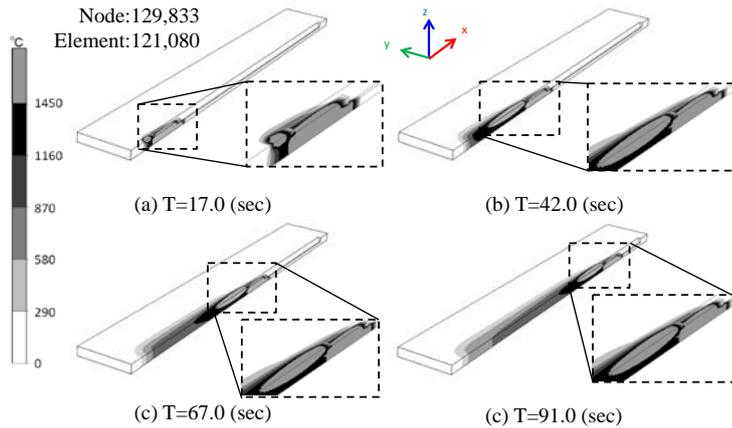


Fig. 6 Transient temperature distribution.

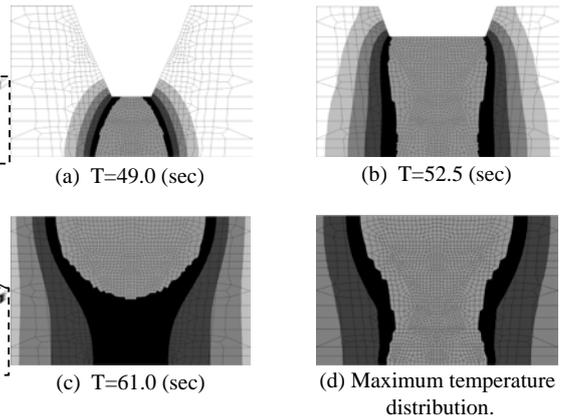


Fig. 7 Transient and maximum temperature distribution on transverse cross section near welding line.

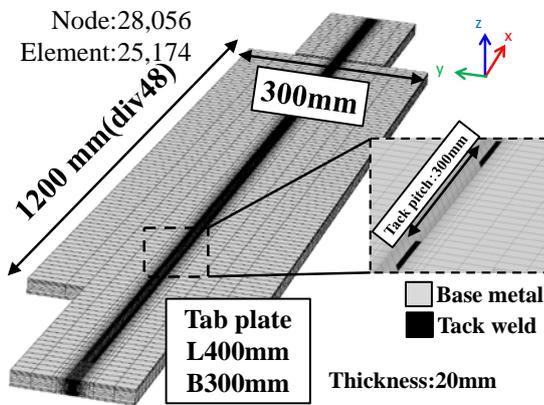


Fig. 8 Shape and size of test specimen for FCB welding.

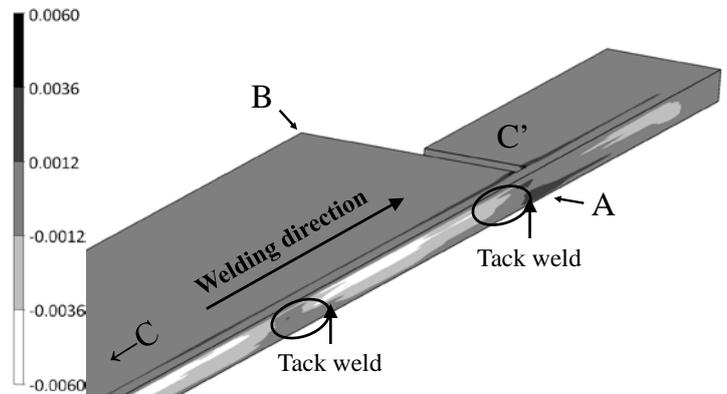


Fig. 9 Distribution of plastic strain increment in BTR near welding line.

4. BTR 塑性ひずみ増分を用いた凝固割れ評価

前章において、多電極熱源モデルを用いた熱伝導解析の妥当性を示した。本章では、理想化陽解法 FEM を用いた熱弾塑性解析を小型試験体モデルに適用し、凝固割れの発生メカニズムおよび諸因子の影響について検討を行う。

4.1 解析モデルおよび解析条件

解析に用いた要素分割図を Fig. 8 に示す。要素分割は、溶接線方向(x方向)に 48 分割とし、板幅方向には溶接部ほど細かい不等分割を採用した。節点数、要素数はそれぞれ 28,056、25,174 である。開先角度は 45 度、Y開先でルートフェイスは 3 mm とした。仮付け溶接の寸法は長さ 60 mm、のど厚 6 mm、仮付け間隔 300 mm とした。試験体寸法は、長さ 1200 mm、半幅 300 mm、板厚 20 mm とした。この大きさは、実験室レベルで再現実験可能な寸法を想定している。解析に用いた材料は前章と同じ(軟鋼)とした。また、BTR を 1300°C から 1450°C の 150°C とした。3 電極による FCB 溶接を行うものとし、1 電極目、2 電極目、3 電極目をそれぞれ L、T1、T2 と定義する。電極間隔は L-T1 間を 35 mm、T1-T2 間を 120 mm とした。また、入熱量は、3 電極で 4038 J/mm とし、溶接速度は 600 mm/min とした。本章では、以上で示した条件を基本条件とし、凝固割れにおよぼす影響について検討を行った。

4.2 凝固割れ発生メカニズムの検討

Fig. 9 に溶接終端部付近における BTR 塑性ひずみ増分 $\epsilon_{y}^{P_{BTR}}$ の分布を示す。同図より、溶接終端部付近および仮付け後方付近に大きな引張りの BTR 塑性ひずみ増分 $\epsilon_{y}^{P_{BTR}}$ が発生していることがわかる。このことは、溶接最終端および仮付け後方に凝固割れが発生する可能性を示唆している。事前検討により、裏面から z 方向に 3 mm の位置において、凝固割れが発生するケースが確認されている。そこで $z=3$ mm における始端から終端までの溶接線上(Fig. 9 中の C-C')における y 方向 BTR 塑性ひずみ増分の分布を Fig. 10 に示す。縦軸は BTR 塑性ひずみ増分を示し、横軸は溶接線方向の座標を示す。同図より、仮付け後方付近に大きな引張りの BTR 塑性ひずみ増分が発生していることがわかる。この理由として、Fig. 11 に示すように、溶接が進行し、仮付け部が溶融することにより、仮付け部付近に蓄積されていた引張り応力が開放された瞬間に大きな引張りひずみが発生するためと考えられる。

次に、溶接最終端で発生する塑性ひずみ、および、同位置において発生する幅方向変位すなわち端部回転変形の関係について詳細に検討を行う。Fig. 12 に、Fig. 9 中 A 点における塑性ひずみと B 点の幅方向変位の時系列変化を示す。Fig. 12 において横軸は時間を示し、縦軸は、塑性ひずみおよび端部の幅方向変位を示す。図中の実線は端部の回転変形の履歴を示し、点線は塑性ひずみの履

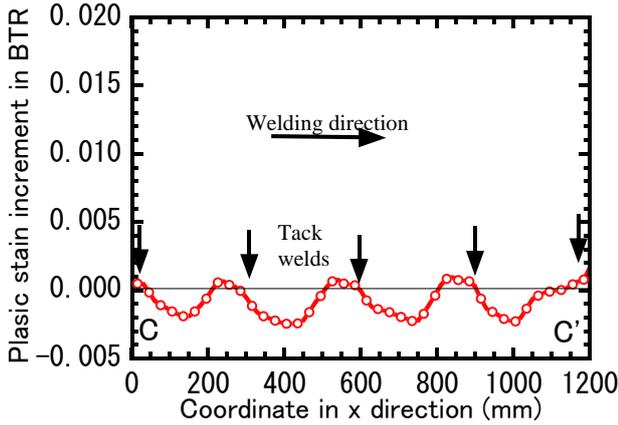


Fig. 10 Plastic strain increment in BTR along line C-C'. (z=3 mm)

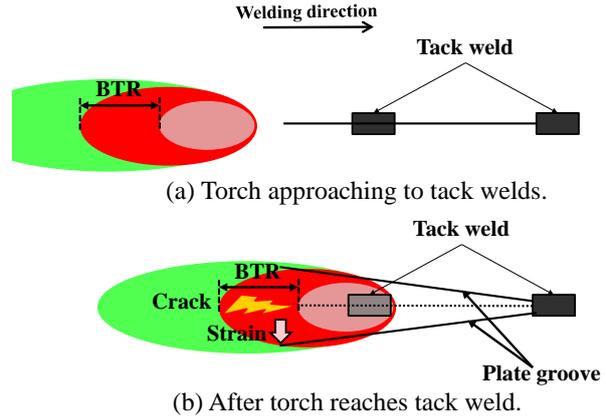


Fig. 11 Mechanism of solidification crack.

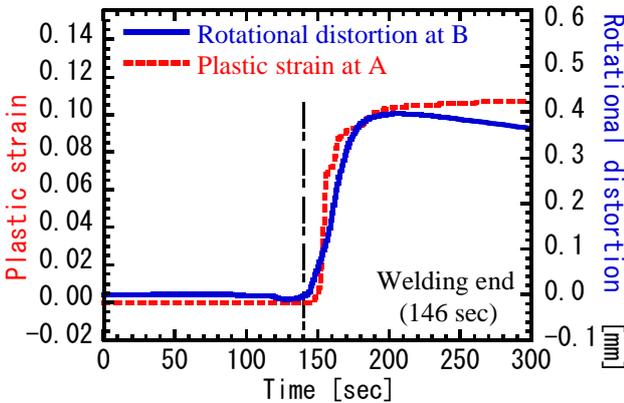


Fig. 12 Time history of rotational distortion and plastic strain.

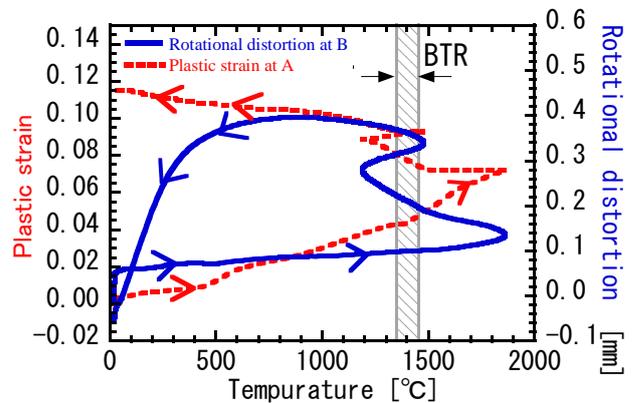


Fig. 13 Temperature history of rotational distortion and plastic strain.

歴を示す。この図から、終端部に熱源が到着する、溶接開始から約 146 秒後に、終端部において大きく開くような回転変形が発生していることが確認される。また、この回転変形の発生に伴い塑性ひずみが増加している様子が確認できる。Fig. 13 に Fig. 12 と同地点における塑性ひずみおよび終端部の回転変形と終端部における温度履歴の関係を示す。横軸には温度を示し、縦軸には塑性ひずみおよび端部の回転変形を示す。また、図中の斜線部は BTR(1350-1450°C)を示す。実線は端部の回転変形の履歴を示し、点線は塑性ひずみの履歴を示す。同図より、1 電極目で大きなひずみが発生し 2 電極目の通過に応じて再度大きなひずみ増分が発生していることが確認できる。

以上で示した様に、本研究で提案した複数熱源モデルおよび BTR 塑性ひずみ増分を用いることで、複数電極を用いた場合の割れについても検討可能であると考えられる。これらの手法は、レーザー溶接や TIG 溶接等の各種溶接方法に対しても適用可能と考えられるため、今後の発展に期待が持てる。

4. 結 言

FCB 大型鋼板継溶接時における凝固割れの発生予測を目的とした FEM 熱弾塑性解析を実施し、溶接金属の BTR で発生する塑性ひずみの増分値を用いた評価手法を用いて、凝固割れの評価・予測を行った結果、以下の知見を得た。

1) 多電極 FCB 溶接を想定した熱伝導解析を実施した

結果、実験結果と良好に一致する溶け込み形状が得られた。また、エレメントベースを用いることで、電極の進行とともに溶接部の要素がビードとして形成される過程を再現することができた。

- 2) BTR 塑性ひずみ増分を用いて凝固割れ発生メカニズムについて検討した結果、仮付け後方付近において大きな引張り BTR 塑性ひずみ増分が発生することを確認した。また、終端ほど大きな引張り BTR 塑性ひずみ増分が発生することを確認した。
- 3) 終端部における塑性ひずみと面内回転変形が連動して発生することを確認した。

参 考 文 献

- 1) K. Nagatani, M. Komura: One-side Submerged Arc Welding : the Key to Modern Ship Construction, KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS/Vol.50, No.3 (Dec,2000),pp.70-73
- 2) M. Komura: Shielded Metal Arc Welding ・ Submerged Arc Welding : Journal of The Japan Welding Society, Vol.72 (2010) , pp.46-53
- 3) M. Shibahara, T. Iwamoto, T. Osuki, K. Ogawa, H. Serizawa, H. Murakawa : Modeling of Mechanical behavior of Solidification Cracking During Welding, 溶接構造シンポジウム, (2011), pp.41-48