

M01 耐熱ステンレス鋼溶接時における HAZ 部粒界液化割れの FEM 解析手法の確立

岩本 拓也 (指導教員 柴原・伊藤)

FE Analysis of Grain Boundary Liquation Cracking in HAZ during Welding of Heat-resistant Stainless Steel

by Takuya Iwamoto

Abstract

Welding is essential to construct steel structures. However, when welding condition and weld material are not appropriately chosen, weld defects may occur. One of welding defects is the hot cracking which occurs in the weld metal and the HAZ (Heat Affected Zone). There are three kinds of hot crack, namely, solidification crack, grain boundary liquation crack and ductility-dip crack. The solidification crack occurs in BTR (solidification Brittleness Temperature Range) in the weld metal. The grain boundary liquation crack occurs in GLR (Grain-boundary Liquation Temperature Range) in the HAZ. The ductility-dip crack occurs in DTR (Ductility Drop Temperature Range) in the weld metal and the HAZ.

Shibahara et al. proposed the criteria using a plastic strain increment in BTR and DTR during cooling of the solidification crack and the ductility-dip crack in weld metal and verified the validity. However, only a few methods are proposed to prevent a grain boundary liquation crack in the HAZ from the mechanical viewpoint.

In recent years, although the stainless steel is widely used to improve oxidation-resistance and heat-resistance, the hot crack may occur in this material. Then, in this study, FE analyses are carried out to establish the criteria of the grain boundary liquation crack in the HAZ during welding of heat-resistant stainless steel. The simulated results are compared with the experimental results. As a result, computed results evaluated by using a plastic strain increment in GLR during cooling in the HAZ agree well with the cracked area obtained as the experimental results, and it is clearly seen that it is possible to predict the grain boundary liquation crack using a plastic strain increment in GLR during cooling.

1. 緒言

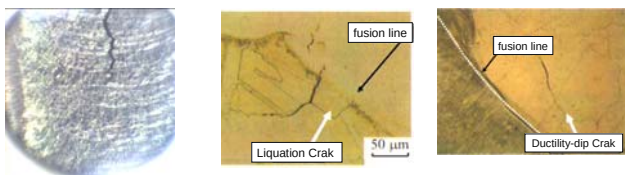
鋼構造物の建造において溶接は必要不可欠である。しかし、溶接において、材料の選定や条件の選定などが適切でない場合、溶接欠陥が発生する場合がある。この溶接欠陥の中の一つに溶接時の溶接金属や溶接熱影響部(Heat Affected Zone, 以下 HAZ と称す)に発生する溶接高温割れがある。近年、耐酸化性、耐熱鋼として広く用いられるステンレス鋼においては、この溶接高温割れが発生する場合があります問題となっている。この為、この溶接高温割れを防止することができれば構造物の健全性の向上、また高温割れを改善するためのコストの削減につながる。

溶接高温割れに対する既往の研究は、冶金学的な立場からのものが多数を占めており、具体的には、含有元素等の冶金学的因子が割れの発生に及ぼす影響や溶け込み形状の影響などについて実験を中心に検討を行い、各種合金の割れ感受性を評価している。また、計算的手法に

よる評価・予測もなされてはいるが、溶接高温割れに対する力学的な観点から割れの評価指標の確立には至っていない。

この溶接高温割れには、Fig.1(a)に示されるような溶接金属の凝固脆性温度範囲 (solidification Brittleness Temperature Range, 以下 BTR と称す)で発生する凝固割れ、また、Fig.1(b)に示されるような溶接熱影響部の粒界液化温度範囲 GLR(Grain-boundary Liquation Temperature Range, 以下 GLR と称す)で発生する粒界液化割れ、Fig.1(c)に示されるような溶接金属、溶接熱影響部の双方の延性低下温度範囲(Ductility Drop Temperature Range, 以下 DTR と称す)で発生する延性低下割れの 3 種類がある。ここで、溶接金属の BTR・DTR で発生する凝固割れ・延性低下割れに対しては、BTR・DTR 内で発生する塑性ひずみの増分値を用いた評価手法を柴原ら^{1, 2)}により提案されその妥当性について評価を行った。しかし、HAZ 部の割れである粒界液化割れに対しては、力学的な割れを防止する方法についての提案はほとんどなされていないのが現状である。

そこで本研究では、耐熱ステンレス鋼溶接時における HAZ 部粒界液化割れの評価指標の確立を目的とした FEM 熱弾塑性解析を実施し、諸因子の影響評価を行い、実験結果と比較することで、HAZ 部粒界液化割れの評価手法について検討を行う。さらに、凝固割れ、粒界液化割れ、延性低下割れの 3 種類の溶接高温割れの評価・予測手法の確立を目指す。



(a) Solidification Crack (b) Liquation Crack (c) Ductility-dip Crack

Fig.1 Hot Crack.

2. 粒界液化割れの発生メカニズム

HAZ 部で発生する粒界液化割れの発生メカニズムは、溶接境界部である熱影響粗粒域の高温に加熱された粒界が低融点化合物や共晶の生成、成分偏析などで局部的に溶融し、収縮時に開口するものである。力学的な観点から考察すると、Fig.2 で示す延性が低下している領域で限界ひずみ以上のひずみが作用したため割れが発生したと考えられる。

本研究では、Fig.3 に示すように降温過程における GLR 内において発生する塑性ひずみ増分(以後、GLR 塑性ひずみ増分と称す)を割れの発生指標と考える。また、HAZ 部の粒界液化割れにおける力学的因子について検討するために拘束を決める力学的因子のひとつである板厚の変化に対する GLR 塑性ひずみ増分の影響を検討した。さらに実験結果と比較を行うことで妥当性の評価を行う。

3. 板厚の変化に対する GLR 塑性ひずみ増分の影響

HAZ 部の粒界液化割れにおける力学的因子について検

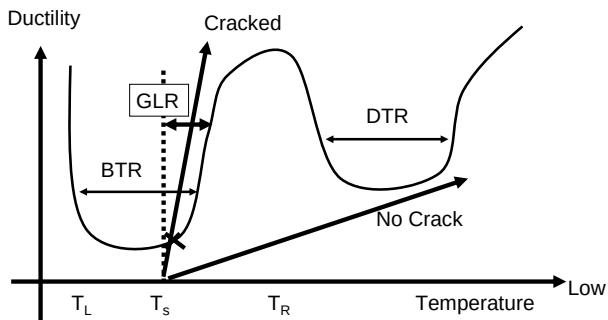


Fig.2 Schematic illustration of relationship between ductility of alloy and temperature of heat-affected zone.

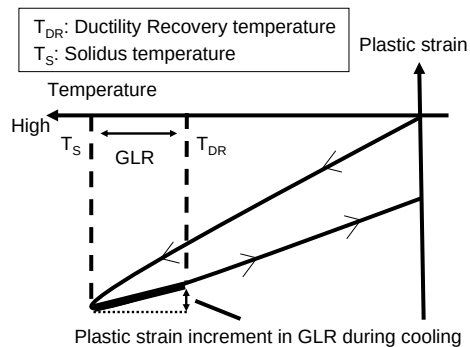


Fig.3 Schematic illustration of plastic strain increment in GLR during cooling.

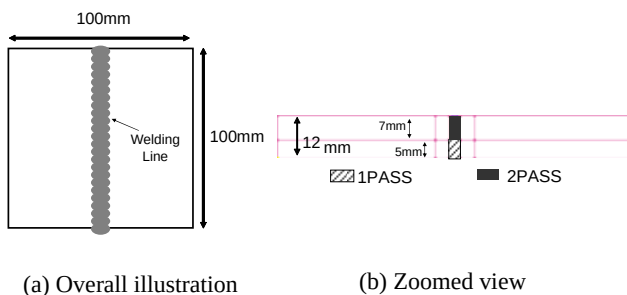


Fig.4 Schematic illustration of restraint crack test.

討するために拘束を決める力学的因子のひとつである板厚を 6mm, 12mm, 24mm と 3 通り変化させて 2 次元熱弾塑性解析を行い、板厚の変化に対する GLR 塑性ひずみ増分の影響を検討した。ここで、解析モデルは Fig.4(a)に示すような 100mm×100mm×12mm の厚板を Fig.4(b)に示すような I 型に 2 層肉盛り溶接を行う実験を想定したものであり、溶接は、1 層目は電流 150A, 電圧 15V, 溶接速度 10cm/min, 2 層目は 150A, 電圧 25V, 溶接速度 12cm/min の条件で行う。また、本解析に用いた材料は 25Cr-20Ni 系合金をベースとしたもので GLR の領域が 1400℃から 1290℃の 110℃である材料特性を示すものである。このとき、板厚が 5mm のものは 1 層のみの溶接となる。Fig.5 に板厚が(a), (b), (c)にそれぞれ 5mm, 12mm, 24mm のときの要素分割図を示す。

次に熱伝導解析結果を示す。Fig.6 にそれぞれ(a), (b), (c)として、板厚が 5mm, 12mm, 24mm の最高到達温度分布を示す。また、図中の白色の点線内部が溶融領域である。Fig.6 より、厚板の溶融部上面において、開先部への熱伝導による熱の拡散が大きいいため、溶融形状および GLR 領域に違いが見られる。さらに Fig.7, Fig.8, に(a), (b), (c)として、それぞれ 5mm, 12mm, 24mm の最大 GLR 塑性ひずみ増分の主方向ベクトル、z 方向 GLR 塑性ひずみ増分の分布を示す。Fig.13 より最大 GLR 塑性ひずみの主方向ベクトルは最終凝固位置を向く傾向にあることが確認できる。また、Fig.8 より板厚が 5mm のときは、12mm, 24mm のときと比較して 1 パス目溶接時の HAZ 部の粒界液化割れを引き起こす原因と考える z 方向の GLR 塑性ひずみ増分の分布が溶融線近傍で大きく分布している。こ

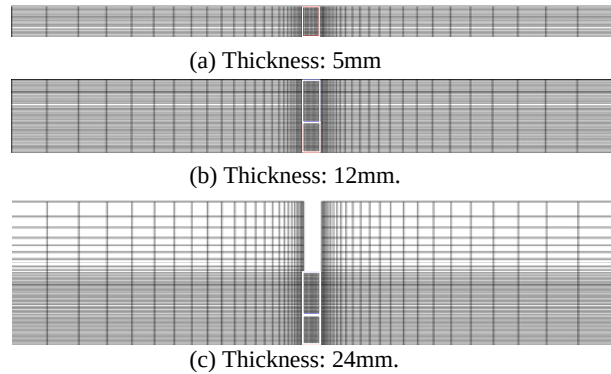


Fig.5 FE mesh division.

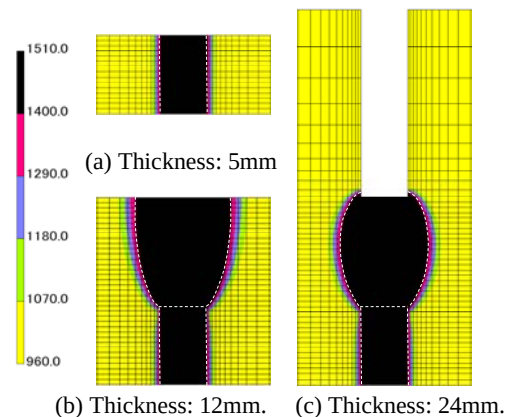
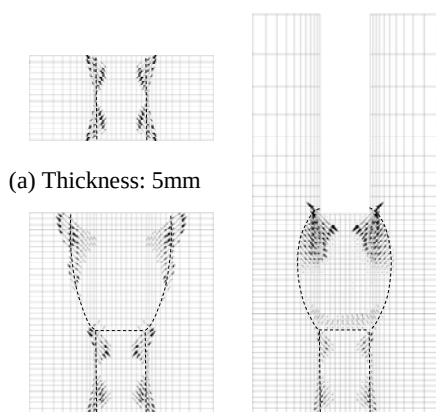
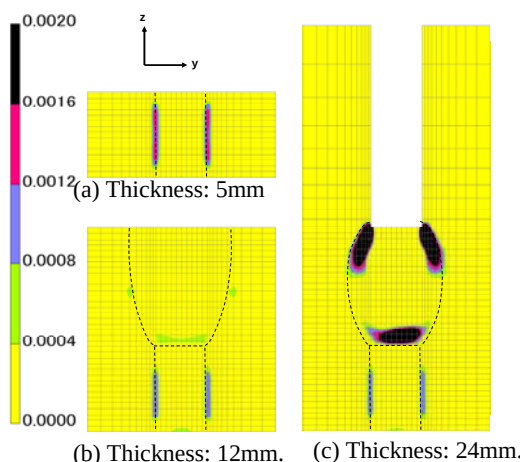


Fig.6 Distribution of maximum temperature.



(b) Thickness: 12mm. (c) Thickness: 24mm.

Fig.7 Vector diagram of principal plastic strain increment in GLR.



(b) Thickness: 12mm. (c) Thickness: 24mm.

Fig.8 Distribution of plastic strain increment in GLR in y-direction.

これは、厚板の場合、開先部への熱伝導による熱の拡散が大きいため、溶融形状や GLR 温度域が異なったためであると考えられる。また、板厚が 12mm, 24mm の結果より、1 パス目においては、溶融形状が同様の分布を示しており、さらに HAZ 部の粒界液化割れを引き起こす原因と考える溶融線に沿う z 方向の GLR 塑性ひずみ増分の分布も同様の傾向を示していることから、GLR 塑性ひずみ増分には板厚の拘束による影響は大きくないと考えられる。2 パス目溶接時においては、HAZ 部の粒界液化割れを引き起こす原因と考える溶融線に平行方向に働く引張りの GLR 塑性ひずみ増分の分布は小さいことが分かる。これは Fig.7 より、最大 GLR 塑性ひずみ増分の主方向ベクトルの向きが最終凝固位置を向く傾向にあるためであり、そのため、溶融線と平行に近い方向の大きな最大 GLR 塑性ひずみの主方向ベクトルが存在しないことから理解できる。従って、I 型開先の 2 パス目は 12mm, 24mm 共に HAZ 部の粒界液化割れを引き起こしにくい溶融池形状であることが分かる。

4. GLR 塑性ひずみ増分の粒界液化割れ評価に対する妥当性検証

本章では、V 型開先で開先角度が 60° モデルにおいて高温割れ実験を行い、その実験に対応した GLR 塑性ひず

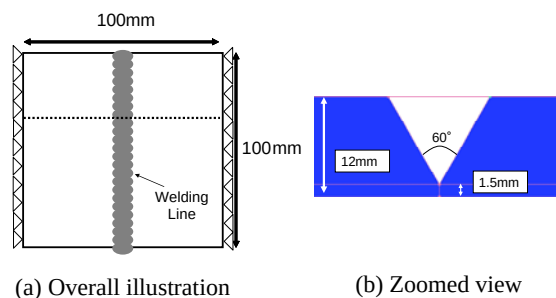


Fig.9 Schematic illustration of restraint crack test.

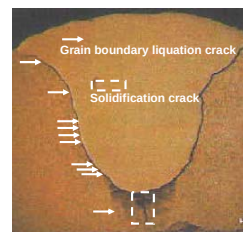


Fig.10 Position of grain boundary liquation cracking after experiment.

み増分を用いた FEM 解析による HAZ 部の粒界液化割れ評価と比較することで、GLR 塑性ひずみ増分を用いた粒界液化割れの評価手法の妥当性検証を行う。

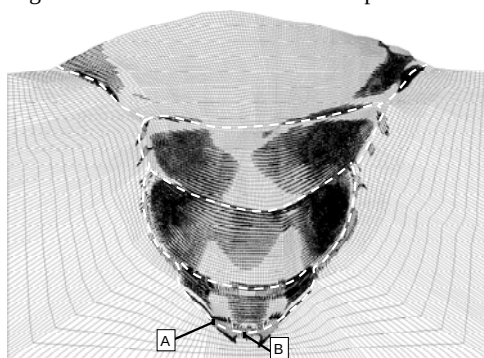
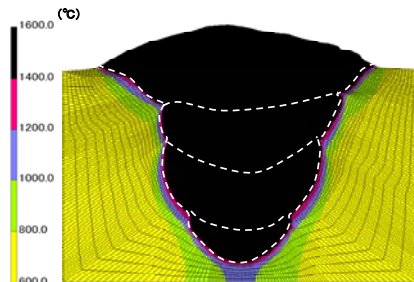
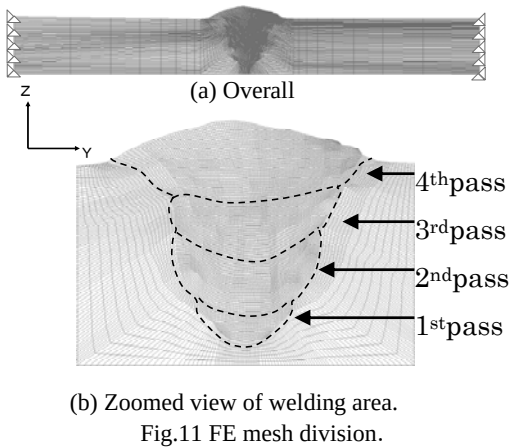
4.1 拘束高温割れ実験

Fig.9(a), (b)に本研究で行う高温割れ実験の概要を示す。Fig.9 に示すような $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 12\text{mm}$ の寸法の厚板を開先角度 60° で多層肉盛溶接を実施する。なお、1 層目は電流 150A, 電圧 15V, 溶接速度 10cm/min の条件で行い、2 層目以降は 150A, 電圧 25V, 溶接速度 12cm/min の条件で 3 層肉盛溶接を行う全 4 パス溶接である。Fig.10 に実験結果の断面図を示す。Fig.10 の断面は、溶接後の試験片を溶接線方向に 12 分割したときの 9 番目を検鏡した写真であり、矢印部に粒界液化割れが発生している。また、点線で囲んだ箇所に凝固割れも発生している。なお、本解析に用いた材料は 25Cr-20Ni 系合金をベースとしたもので GLR の領域が 1400°C から 1290°C の 110°C である材料特性を示すものである。

4.2 GLR 塑性ひずみ増分を用いた粒界液化割れの評価

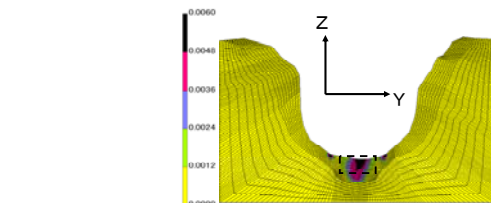
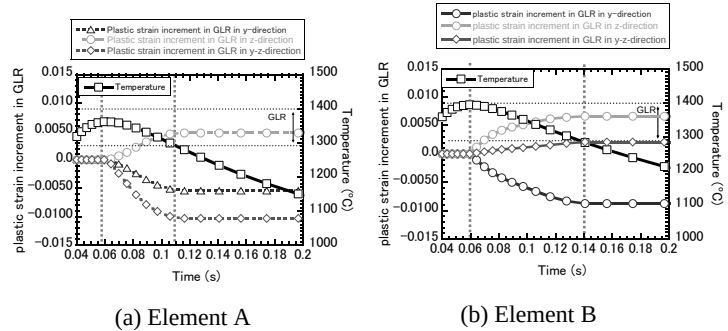
Fig.10 に示す断面における溶け込み形状を基に要素分割を行った。このときの要素分割図を Fig.11(a), (b)に示す。同図(a)に試験片全体の要素分割を示し、同図(b)には開先部の拡大図を示す。両端は Fig.11(a)に示すように完全拘束している。また、本解析は 2 次元モデルで行い、溶接線方向(x 方向)には全節点拘束している。

次に、Fig.12 に 1 パスから 4 パス溶接終了後の最高到達温度分布を示す。Fig.12 より、本解析は実験と同様の溶融形状を有していることが確認できる。この熱伝導解析結果を基に、FEM 熱弾塑性解析を行い、GLR 塑性ひずみ増分を算出した。Fig.13 に最大 GLR 塑性ひずみ増分の主方向ベクトルを示す。Fig.13 より GLR 塑性ひずみ増分の主方向ベクトルが最終凝固位置である溶融地中央付近を向く傾向があることが確認できる。Fig.13 に示される要素 A と要素 B において、大きな GLR 塑性ひずみ増分が発生しており、割れが生じる可能性が高い要素 A と



GLR 塑性ひずみの値が小さい要素 B について検討するために 1 パス目溶接時における要素 A, B の温度と塑性ひずみ増分の履歴を比較し Fig.14 に示す。同図の横軸は溶接開始からの時間、縦軸の第 1 軸は塑性ひずみ増分、第 2 軸は温度を示している。Fig.14 より、降温過程において要素 A, B 共に急激な塑性ひずみ増分の発生は確認されなかった。また、Fig.14(a)より、要素 A においてせん断ひずみ増分が一番大きく、溶融線と平行な方向の主ひずみ増分が発生していることが Fig.13 より確認できる。Fig.14(b)より、要素 B においては z 方向のひずみ増分が一番大きく主方向は z 方向であるが、溶融線と垂直方向であり、溶融線と平行な方向の y 方向塑性ひずみ増分は圧縮方向であり、割れを引き起こさないと考えられる。

さらに、大きな引張り方向の GLR 塑性ひずみ増分が分布している場所と実験結果である Fig.10 の割れ発生位置を比較すると、Fig.10 の実験結果で粒界液化割れが発生した場所と大きな引張り方向の GLR 塑性ひずみ増分が分布している場所が定性的な一致を示していることが分かる。また、粒界液化割れは溶融線のエッジ箇所が発生し



やすい傾向があることが分かる。

続いて、1 パス溶接時に発生する凝固割れの発生について考察する。凝固割れに関しては BTR 塑性ひずみ増分を用いて割れの評価を行う。Fig.15 に 1 パス目で発生する BTR 塑性ひずみ増分の分布を示す。ここで BTR 幅は $1400^{\circ}\text{C} \sim 1235^{\circ}\text{C}$ の 165°C である。Fig.15 より、点線部において、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確認される。このことから、同図の点線部において凝固割れが発生する可能性があると考えられる。これは、実験結果と良好に対応している。以上より、GLR 塑性ひずみ増分を粒界液化割れ発生指標とする FEM 熱弾塑性解析結果は、実験結果と良好に対応し、本指標を用いた粒界液化割れの発生予測が可能であることを示した。

5. 結言

本研究では、耐熱ステンレス鋼溶接時における HAZ 部粒界液化割れの評価指標の確立を目的とした FEM 熱弾塑性解析を実施し、実験結果と比較・検討することで、HAZ 部粒界液化割れの評価・予測を行った結果以下の知見を得た。

- 1) GLR 塑性ひずみ増分には力学的因子である板厚の拘束による影響は大きくないことを示した。
- 2) GLR 塑性ひずみ増分を粒界液化割れ発生指標とする FEM 熱弾塑性解析結果は、実験結果と良好に対応し、本指標を用いた粒界液化割れの発生予測が可能であることを示した。
- 3) 実験結果・解析結果より粒界液化割れは溶融線のエッジ部分に発生しやすい傾向にあることを確認した。

参考文献

- 1) 柴原ら：鋼管円周溶接部の高温割れ解析 溶接学会全国大会講演概要 89, pp.168-169, 2011-08-18
- 2) 柴原ら：多層溶接時に発生する延性低下割れの FEM 解析 関西造船協会論文集 pp.177-186.