

M01 溶接高温割れ制御における力学要因の定量化

有村 翼 (指導教員 柴原正和)

Quantification of Mechanical various Factors to Control Hot Cracking During Welding.

by Tasuku Arimura

Abstract

It is an important subject to clarify the mechanism of welding crack formation to eliminate defects in welds in structures. There are many studies in metallurgy fields about hot cracking. But it requires consideration of mechanical factors to control hot cracking as well as metallurgy factor, because there are correlations between hot cracking and mechanical condition like heat input and constraint. A finite element method (FEM) using temperature dependent interface element is one of the mechanical approach in order to analyze all the processes of the crack formation, propagation and its arrest. But, it is required to simplify the calculation to use in industry. In this study, mechanical models are suggested to control hot cracking and the results calculated by proposed method are compared with those by finite element method. Then, this model is also applied to pipe joints and the applicability of the proposed method is performed

1. 緒 言

溶接施工においては、材料の選択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¹⁾があり、問題となっている。溶接欠陥は溶接継手の特性に極めて大きな影響を与える事から、溶接部の性能と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。船舶建造時に用いられている FCB 溶接時における大型鋼鉄の板継溶接の施工では、始末端部において、溶接高温割れが発生しやすい。したがって、施工終了後に超音波や X 線など非破壊検査を実施し、欠陥が発見された部分については補修溶接がおこなわれている。

高温割れは溶接施工上において、重大な溶接欠陥の一つであるため、数々の研究がなされている。既往の研究において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²⁾。しかし、高温割れは溶接条件や拘束状態などの様々な力学的因子によって発生状況が異なるため、このような冶金学的因子のみでは実際の構造物における高温割れを予測・評価することができないため、力学的因子に関する検討が必要である。

高温割れに対し力学的な評価を行える手法として柴原らが開発した温度依存型界面要素³⁾を用いた高温割れ解析法が挙げられる。利点として、割れ発生後の割れの進展・停止をシミュレートできる点である。しかし、溶接施工現場において施工前に割れ発生確認のため使用するにはより簡易な計算で行える事が望まれる。

そこで本研究では、実構造物における高温割れの制御

を目的とし、簡易な計算で割れ発生における力学的な評価が可能な力学モデルを提案し、実験、高温割れ解析結果との比較を行った。さらに適用例として配管の周溶接における溶接高温割れ問題に適用した。

2. 拘束高温割れ試験結果

高温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を変化させて実験を複数回行い割れ発生有無に関して検討した。Fig.1 に実験装置を示す。同図は実験装置を模式的に表したものであり、周囲を隅肉溶接により拘束したビードオンプレートを実施した。一般に凝固割れ感受性に影響を及ぼす不純物元素として、P, S, Si 等が挙げられる。本研究において使用する材料は、固相変態を伴わない完全 γ 系汎用ステンレス鋼である SUS310 をベースに P 量を変化させる事で凝固割れ感受性を变化させた材料を用いた。また、試験片の寸法は縦 100mm×横 100mm であり、板厚を 4mm から 30mm まで力学的なパラメータを 8 通りに変化させて実験を行い、割れに及ぼす影響について検討した。Table1 に入熱条件を示す。

Fig.2 に実験結果を示す。同図は横軸に板厚、縦軸に割れ発生率を示している。同図から板厚が 12mm, 14mm において割れが発生せず、最も割れにくくなっており、板厚が増すと割れ発生率が大きくなっていることが

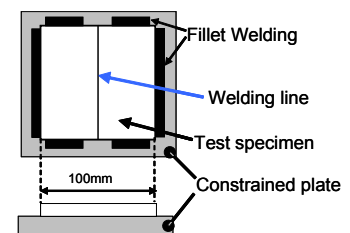


Fig.1 Schematic illustration of hot cracking specimen.

わかる。

3 温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法

本研究では温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析を実施し、実験結果との比較を行うことで実験の妥当性について検討した。

3.1 溶接高温割れモデル

溶接金属内部で発生する高温割れは、凝固割れといわれ、溶接により形成された熔融部が凝固、収縮する際に発生する。材料学的には粒界割れの一種であると考えられ、本研究では材料学的現象である結晶粒界の強度低下を力学的に捉え、表面エネルギー γ と界面強度 σ_{cr} の温度依存性により表すことができると仮定した。

結晶粒のバルクとしての変形特性は、降伏応力やヤング率により表され、界面の特性は、割れ界面強度 σ_{cr} および表面エネルギー γ によって表されると考える。また、割れの進展は、き裂進展の場合⁴⁾と同様、単位面積あたり γ なる表面エネルギーを消費しながら進展すると考える。本研究で用いた高温割れ解析法は、以上のような高温割れの基本特性を温度依存型界面要素⁵⁾の形に理想化し、これを熱弾塑性有限要素法に導入したものである。

3.2 温度依存型界面ポテンシャルエネルギー関数

高温割れ解析において、割れが発生・進展し、割れにより新しい表面が形成される現象をモデル化するには、表面エネルギー 2γ に相当するエネルギーが消費され、更に、これが温度の関数であるようなポテンシャル関数が必要となる。そのようなポテンシャルとして本研究では、Lennard-Jones 型のポテンシャル関数を用いた。ここで単位面積あたりの界面ポテンシャル ϕ は次式で表される。

$$\phi(\delta, T) = 2\gamma(T) \left\{ \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^6 \right\} \quad (1)$$

δ は割れの開口変位量であり、 ϕ に含まれる定数 γ 、 r_0 はポテンシャルを規定するパラメータである。本研究では表面エネルギー γ のみが温度依存性を有すると仮定し、温度上昇に伴う割れ表面の界面強度低下をFEM解析において考慮できるようにした。

一方、ポテンシャル ϕ の割れ開口変位量 δ に関する微分は割れ表面に作用する単位面積あたりの結合力であり次式で表される。

$$\sigma(T) = \frac{\partial \phi(T)}{\partial \delta} = \frac{24\gamma(T)}{r_0} \left\{ \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^7 - \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^{13} \right\} \quad (2)$$

この開口変位量 δ と結合応力 σ の関係を具体的に示した図がFig.3である。同図から、寸法パラメータ r_0 が大きい時には、界面が破断する際の限界開口変位量 δ_{cr} が大きくなる事がわかる。また同曲線の最大値は界面強度 σ_{cr} を表す。ここで、温度上昇に伴う結晶粒界の脆化を力学的に捉え、BTR(凝固脆性温度幅)を $\sigma_Y > \sigma_{cr}$ と定義した。それを模式的に示した図がFig.4である。図中の T_L は液相線温度、 T_S は固相線温度を示している。このような力学的非線形特性を示す界面要素を、割れが発生、進展すると予想される経路に配置することで、割れが発生する場合に界面要素が開口することとなる。

3.3 温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析結果

Fig.5に解析モデルおよび要素分割図、境界条件を示す。同図に示すように溶接横断面内での溶接高温割れを解析対象とし、二次元平面ひずみ問題と仮定した。また、隅肉溶接による拘束を考慮するために隅肉溶接部を実際にモデル化した。また、溶接高温割れは溶接中心面上に発生するので、温度依存型界面要素を溶接中心面上に配置した。また、試験辺下部と拘束板との接触を考慮するために接触要素を導入した。ここで解析対象はP量が0.1%の場合における解析であり、BTRが235℃の材料であり、

Table1 Heat input

Current	150 A
Voltage	15 V
Welding speed	10 cm/min

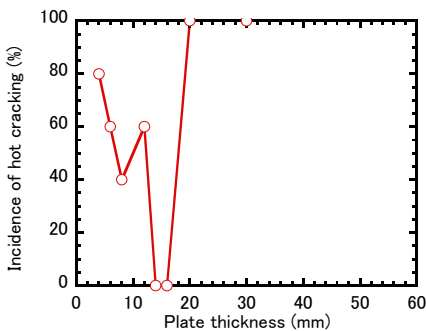


Fig.2 Experimental result



Fig.5 FE mesh division and geometrical boundary condition.

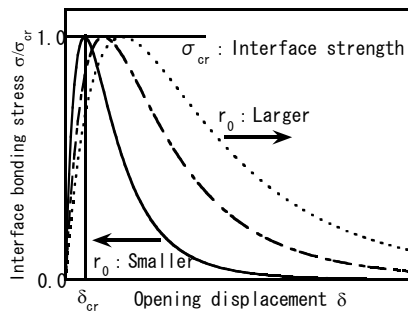


Fig.3 Stress-displacement curves of interface element.

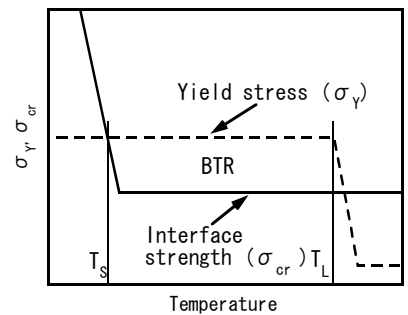


Fig.4 Temperature dependent yield stress (σ_Y) and critical stress of interface (σ_{cr})

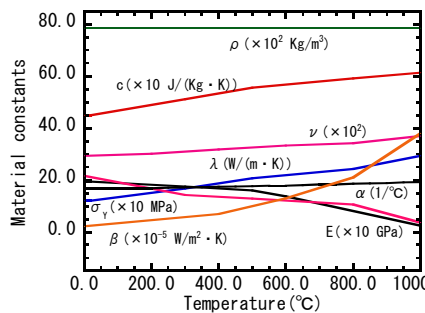


Fig.6 Temperature dependent material constants.

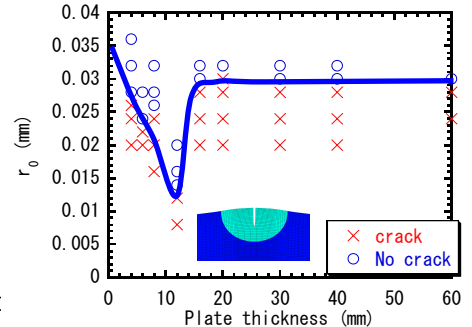


Fig.7 Effect of thickness on hot cracking

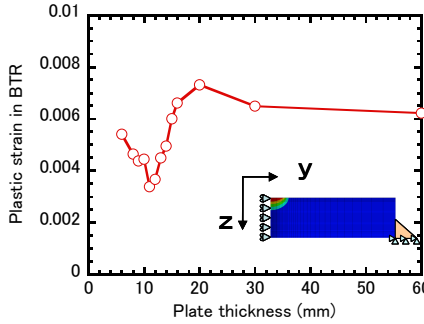


Fig.8 Plastic strain in BTR analyzed by Thermal-elastic-plastic FEM

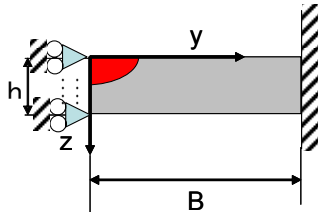


Fig.9 Mechanical model

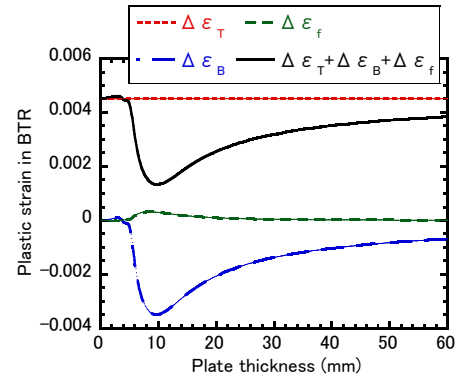


Fig.10 Plastic strain in BTR analyzed using mechanical model

温度域を 1165℃～1400℃とした。入熱条件は Table1 に示す実験条件と同一であり、熱効率を 0.7 と仮定した。解析に用いた材料定数の温度依存性を Fig.6 に示す。ただし、図中の物理定数は以下の通りである。

- E: ヤング率, σ_Y : 降伏応力, ν : ポアソン比,
- α : 線膨張係数, c: 比熱, ρ : 密度,
- λ : 熱伝導係数, β : 熱伝達係数

解析結果を Fig.7 に示す。同図は縦軸が界面要素における寸法パラメータ r_0 、横軸が板厚となっており、割れ発生の有無をプロットしたものである。同図中におけるラインは限界寸法パラメータ r_0 を示しており、低いほど割れにくい板厚寸法を示している。どうもよりすなわち板厚が 12mm において最も割れにくく、12mm 以上では限界寸法パラメータ r_0 が増加し、また、板厚が 30mm 以上においては限界寸法パラメータ r_0 がほぼ一定の値を示していることがわかる。同図と実験結果である Fig.2 は傾向が良好に一致していることがわかる。よって高温割れ解析結果と実験結果が同一の傾向を示す事から、実験結果が妥当であることがわかる。

4. 力学モデルの提案

しかし実験および高温割れ解析による結果では、力学的な要因についての検討は行えず、さらに多大な時間を要する。そのため溶接施工前に短時間で力学的な考察を行える力学モデルを構築することが望まれる。Fig.8 に熱弾塑性解析結果による溶接線上に発生する塑性ひずみと板厚の関係を示す。同図は縦軸に BTR 内において発生した板幅方向の塑性ひずみを示し、横軸は板厚を示す。同図は Fig.2, および Fig.7 との板厚の変化における影響の傾向が定性的に一致していることから、高温割れを BTR 内で発生する引っ張り方向のひずみで整理できると考える事ができる。そこで本研究では、短時間で簡易的に用いる事ができる力学モデルを構築した。

4.1 高温部におけるひずみ発生因子についての検討

検討するモデルは周囲を隅肉溶接により拘束したビードオンプレートとし、溶接横断面のモデル化を行った。ここで BTR 内に発生するひずみに影響を及ぼす主要な因子と考えられる

- (i) 熱収縮によるひずみ,
 - (ii) 深さ方向における温度分布の差に起因して発生する曲げひずみ,
 - (iii) 外部拘束により発生するひずみ
- を考慮可能な力学モデルの構築を行った。

また、計算時の温度分布に関しては、熱伝導方程式から導かれる瞬間線熱源を用い、熱の反射を考慮した(1)式

を用いた。

$$T = \frac{Q}{c\rho} \left[\frac{e^{-\frac{y^2+z^2}{4kt}}}{4\pi kt} + \frac{e^{-\frac{y^2+(2h-z)^2}{4kt}}}{4\pi kt} + \frac{e^{-\frac{y^2+(4h-z)^2}{4kt}}}{4\pi kt} + \frac{e^{-\frac{y^2+(-2h-z)^2}{4kt}}}{4\pi kt} + \dots \right] \quad (3)$$

(i) 熱収縮によるひずみ

冷却過程において溶融部が凝固する際、溶融部は剛性が大きな溶融部周辺から引張り力を受けるため、引張りひずみが発生すると考えられる。その際 BTR 内で生じるひずみ量 $\Delta \epsilon_T$ は、線膨張係数を α 、液層線温度を T_L 、固層線温度を T_S とした時、次式のように表せる。

$$\Delta \epsilon_T = \alpha(T_L - T_S) \quad (4)$$

(ii) 曲げ変形によるひずみ

溶接線直下すなわち、Fig.9 における直線 $y=0$ 上で、 z 方向に温度が様でない場合、曲げが発生する。このとき、BTR 内で生じる曲げひずみ量 $\Delta \epsilon_B$ は以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_B &= \frac{\Delta M}{EI} \cdot \frac{h}{2} \\ &= \frac{h}{2EI} \left\{ \int_{-h/2}^{h/2} E\alpha T_L(z) \cdot (z-h/2) dz \right. \\ &\quad \left. - \int_{-h/2}^{h/2} E\alpha T_S(z) \cdot (z-h/2) dz \right\} \\ &= \frac{\alpha h}{2I} \int_{-h/2}^{h/2} (T_L(z) - T_S(z)) \cdot (z-h/2) dz \end{aligned} \quad (5)$$

ここで E はヤング率、I は断面 2 次モーメント、h は板厚を示している。

(iii) 外部拘束により発生するひずみ

曲げ変形が拘束される場合を考える。Fig.9 に示すような梁モデルを考える。無拘束において発生する回転角を生じないように拘束することで BTR 内に発生するモーメント ΔM_f が起因するひずみ $\Delta \epsilon_f$ は以下の式で表すことができる。

$$\Delta \epsilon_f = \left(\frac{\Delta M_f}{EI} \cdot \frac{h}{2} \right) \quad (6)$$

$$\Delta M_f = \frac{\theta|_{y=0}}{B} EI = -\frac{EI}{B} \int_0^B \frac{\Delta M}{EI} dy \quad (7)$$

ここで θ は回転角をあらわしている。

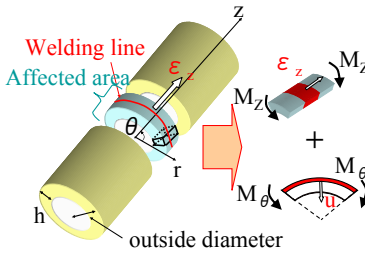


Fig.11 Pipe mechanical model

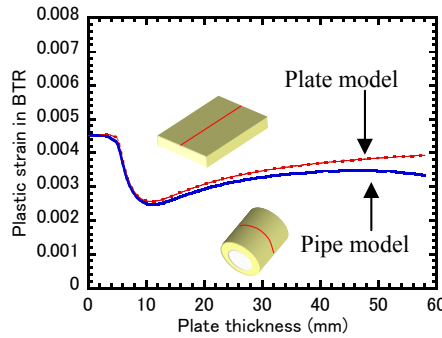


Fig.12 Plastic strain in BTR calculated by mechanical model

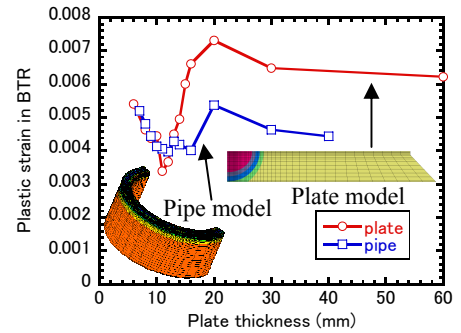


Fig.13 Plastic strain in BTR analyzed using Thermal-elastic-plastic FEM

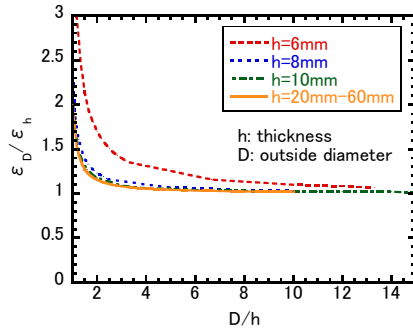


Fig.15 Effect of outside diameter on strain from bending moment

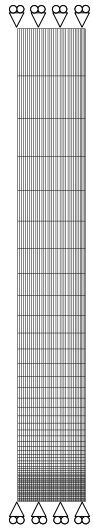


Fig.14 FE mesh division

る。

(i)~(iii)より、溶接線上に発生するひずみは以下の式で表すことができる。

$$\Delta \varepsilon_{BTR} = \Delta \varepsilon_T + \Delta \varepsilon_B + \Delta \varepsilon_f \quad (8)$$

Fig.10 に計算結果を示す。同図は材料が 0.1P 材の場合、BTR 中に発生するひずみ量を示しており、縦軸にひずみ量、横軸に板厚をとっている。また入熱量は 945J/mm とし、板幅は 50mm となっている。提案式による値が小さいほど、BTR において発生するひずみ量が小さい、すなわち割れにくいことを示している。同図より、板厚が 10mm 付近において最も割れにくくなるという結果を示している。Fig.2, Fig.7, Fig.10 から、高温割れは BTR における引っ張り方向のひずみに起因し、熱収縮、曲げ変形、および外的拘束を考慮した力学モデルにより評価できると考えられる。以上から、(8)式に示す提案モデルが高温割れ指標として使用できると考えられる。

4.2 パイプの周溶接問題への適用

本節では前節において示したモデル化を肉厚パイプの周溶接問題に適用した。Fig.11 に示すように、溶接線周辺に影響領域を仮定し、前節と同様に熱収縮、曲げ変形、外的拘束について検討し、溶接線上に発生するひずみを算出した。パイプと平板の相違点として、

- (i) 径の変化による断面 2 次モーメントの影響
- (ii) 径方向の温度差により発生する周方向の曲げによる影響

が考えられる。(i)に関しては、(5), (7)式における断面 2 次モーメント I を Fig.11 中に示すような円弧についての計算を行った。また、(ii)に関しては考慮した結果、影響が小さかったため無視した。この時、パイプにおける力学モデルも(8)式で与えられる。

Fig.12 にパイプの外径を 58mm とし肉厚と BTR 内において発生するひずみの関係を示す。同図からもわかる

ように、板厚の小さい場合においては平板における結果と同じ値を示している。これはパイプにおける断面 2 次モーメントが平板に近づいていくためであると考えられる。また、熱弾塑性解析結果を Fig.13 に示す、パイプの解析は軸対称問題を仮定し、Fig.14 に示すような要素分割で解析を行った。同図からもわかるように、提案モデルによる計算と熱弾塑性解析による結果が定性的に一致していることがわかる。よってパイプにおける力学モデルは妥当であると考えられる。また、パイプの周溶接施工前割れ発生有無を平板の試験において実験したい場合、Fig.12 より、等価な板厚で実験を行えばよいことがわかる。

さらに、Fig.15 に外径が曲げモーメントに起因するひずみに及ぼす影響について示す。同図は横軸が外径と板厚の比を示し、縦軸は同じ板厚の場合の平板に発生するひずみとの比を示す。同図からもわかるように外径が板厚に対して大きい場合、断面形状が平板と差が無くなるため同じ値を示すことがわかる。また厚板において板厚が外径に対して十分大きいと平板と同じ板厚で実験を行うことで施工時の割れ発生が予測できると考えられる。

5. 結 言

本研究では高温割れ制御を目的とした力学モデルの提案を行った結果以下の知見が得られた。

- 1) 周囲を隅肉溶接により拘束したビードオンプレートによる高温割れ試験の結果、温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析結果および熱弾塑性解析により、高温割れが、BTR 中に発生する引っ張り方向のひずみで評価できることを示した。
- 2) 提案した力学モデルは熱弾塑性解析結果と定性的な傾向が一致した。
- 3) パイプの周溶接問題において平板と同様にモデル化を行った結果、パイプの周溶接施工前割れ発生有無を平板の試験において力学モデルによる比較を行うことで、等価な平板を求めることが可能である。

参考文献

- 1) 才田一幸・西本和俊：溶接技術者のためのやさしい溶接冶金学，溶接技術，第 54 巻，第 7 号，2006，pp131-134
- 2) 篠崎，黒木ら：液化割れに及ぼす溶け込み形状の影響 -Ni 基超耐熱合金のレーザ溶接性(第 2 報)-，溶接学会全国大会講演概要，第 58 集 (1996-4)pp.122-123
- 3) 柴原正和，芹澤久，村川英一：温度依存型界面要素を用いた高温割れのモデル化と割れ発生予測，軽金属溶接 41(8)(488) pp.363-373 2003/8 軽金属溶接構造協会