

M520 温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法による T 継手完全溶け込み溶接時における梨形ビード割れの解析

野田 裕久 (指導教員: 正岡, 柴原)

1. 緒言

近年、鋼橋部材の溶接では耐震性、疲労強度の向上、及び、作業コストの低減を目的として大電流パルス MAG を用いた T 継手完全溶け込み溶接法¹⁾の適用が検討されている。この溶接法では、表側 1 パスカつ裏はつりなしで、15~30mm の板厚を溶接することが可能であり、特に 17mm 以下の板厚であれば欠陥が生じないことが確認されている。しかし、厚板の溶接施工時においては、溶接条件や継手形状の選択により高温割れの一種である梨形ビード割れ²⁾が発生する場合があります。そこで本研究では梨形ビード割れの発生メカニズムを解明することを目的とし、T 継手完全溶け込み溶接の実験を実施し溶接諸条件が梨形ビード割れの発生に及ぼす影響について検討した。さらに温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法(以下、高温割れ解析法)を実施する事により割れに及ぼす諸因子の影響について検討を行った。

本解析手法を用いることにより溶接諸条件および継手形状を変更した際の割れを、事前に予測することができるため、継手形状の設計、溶接諸条件の設定の際の指針を得るのに有用であると考えられる。

2. 大電流パルス MAG 溶接法による T 継手完全溶け込み溶接の実験

大電流パルス MAG による完全溶け込み溶接法は一般工法として確立していないのが現状である。その理由として、施工時において十分な溶け込みが得られない場合があり、また、十分な溶け込みが得られても梨形ビード割れが発生する場合があります。つまり、本

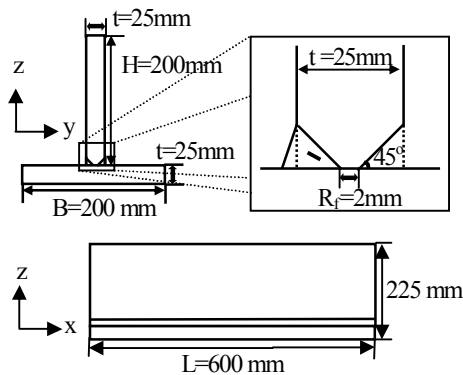


Fig.1 試験体形状と寸法

溶接法の実現化のためには割れの発生を抑制する必要がある。そこで“入熱量 Q および溶け込み形状のアスペクト比 η が割れに及ぼす影響は大きい”という報告³⁾に基づき、それらの影響について実験により検討を行った。実験で用いた試験体の形状および寸法を Fig.1 に示す。試験体は、K 形開先を有する T 継手である。なお、図中に示す文字は以下に示す通りである。

t: 板厚, H: ウェブ高さ, B: フランジ幅

L: 試験体の長さ, R_r: ルートフェース幅

大電流パルス MAG を用いて完全溶け込み溶接を行った試験体の断面マクロ写真を Fig.2 に示す。図は、入熱量 $Q=2400(\text{J}/\text{mm})$ 、溶け込み形状のアスペクト比 $\eta=2.0$ の場合である。この図より、割れは内部に発生している事が確認でき、その長さは約 2.5(mm)である。

Fig.3 には実験結果を入熱量 Q および溶け込み形状のアスペクト比 η で整理した図を示す。図中の○印は割れが発生しない条件を示し、▲印は Fig.2 に示すような梨形ビード割れが発生した条件を示している。この実験結果より入熱量 Q が大きい場合には、割れが発生していないことが確認できる。また、アスペクト比 η に関しては、2.1 以上および 1.5 以下で、割れが生じていないことがわかる。

3. 温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法²⁾

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溶融部が凝固、収縮する際に発生す

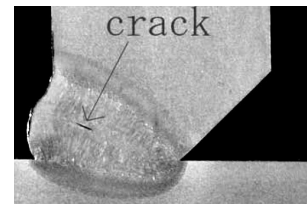


Fig.2 実験結果のマクロ写真

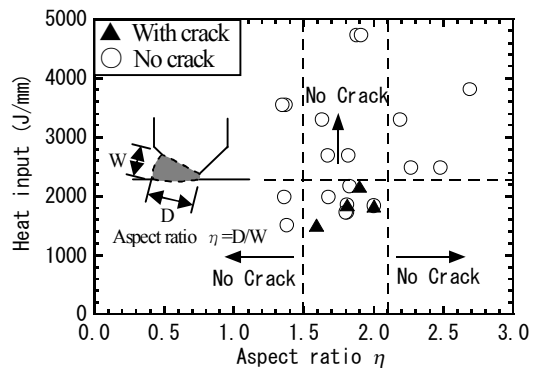


Fig.3 入熱量と溶け込み形状のアスペクト比が割れに及ぼす影響

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.4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.5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くこととなる。

4. T継手完全溶け込み溶接時の梨形ビード割れの解析

4.1 解析モデル

本節では、溶接諸条件が割れに及ぼす影響について検討するため、Fig.1に示す形状および寸法の試験体に対し完全溶け込み溶接を行った場合を対象に高温割れ解析を実施した。解析に用いた基本条件($Q=2892\text{J/mm}$)における要素分割図をFig.6に示す。(a)は解析モデル全体の要素分割図であり、(b)は開先部を拡大したものである。割れは開先中央部に発生すると仮定し、温度依存型界面要素を配置した。また図中のA部には剛性および熱容量を持たないダミー要素を配置した。ただし本節で実施される解析は2次元平面ひずみ解析であるため、解析対象断面が溶接線方向前後部から受ける拘束を考慮できていない。そこで、B部には溶接線方向前後部による拘束を模擬した $E=10(\text{GPa})$ の仮想拘束部を設置した。

溶接金属量および裏波ビード脚長については、実験結果より得られた入熱量と溶接金属量、および入熱量と裏

波ビード脚長の関係⁶⁾を考慮した要素分割とした。その模式図をFig.7に示す。すなわち溶接金属量がFig.7(b)に示す入熱量 $Q=2892(\text{J/mm})$ の場合を境とし、入熱量が $2892(\text{J/mm})$ 以下の場合には(a)に示す形状、また $2892(\text{J/mm})$ 以上の場合には(c)に示す余盛り部が形成される形状の要素分割を用いた。なお、入熱は要

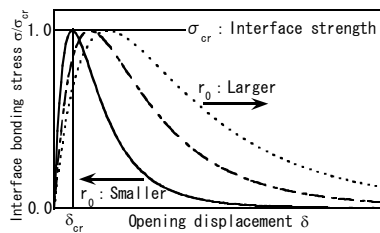


Fig.4 開口変位量 δ と結合応力の関係

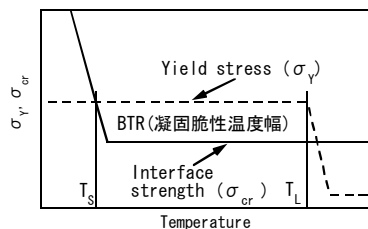


Fig.5 BTR(凝固脆性温度幅)の模式図

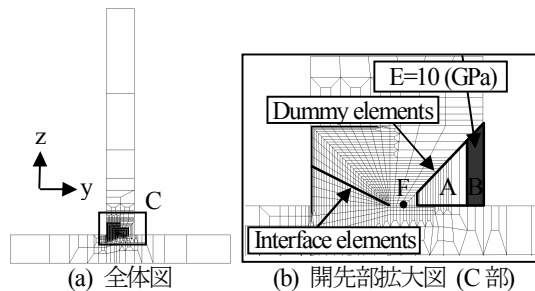
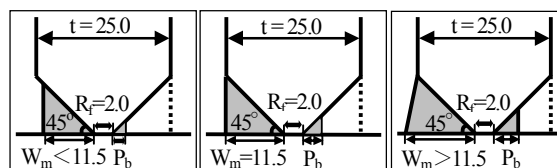


Fig.6 要素分割図



(a) $Q < 2892\text{J/mm}$ (b) $Q = 2892\text{J/mm}$ (c) $Q > 2892\text{J/mm}$

Fig.7 溶接金属部および裏波ビードモデル

素内部発熱とし、開先部、ルート部、裏波部およびそれらの周辺から発熱するものと仮定した。

4.2 溶け込み形状についての検討

ここで高温割れ解析と実験を比較するに当たり、解析の各入熱量($Q=2120,2892,3270,3458,3900,4338\text{J/mm}$)において、解析で用いている入熱量に比較的近い実験結果($Q=2170,2688,3294,3544,3813,4725\text{J/mm}$)を対象とし、それらのマクロ写真と対応した溶け込み形状を熱伝導解析によって再現した。実験結果の一例として $Q=3544\text{J/mm}$ のマクロ写真を Fig.8 に示す。また熱伝導解析結果の一例として $Q=3458\text{J/mm}$ の最高到達温度分布を Fig.9 に示す。本解析で用いた材料の融点が約 1450°C であるため 1450°C 以上の領域は溶け込み形状を示している。両図より、両者は良好に対応している事が確認できる。次項以降の解析においては、各入熱量において実験と対応した溶け込み形状を用いて高温割れ解析を行った。

4.3 梨形ビード割れの解析結果

4.3.1 溶け込み形状のアスペクト比 η の影響

高温割れ解析法において、割れ感受性を支配する冶金的パラメータは寸法パラメータ r_0 、BTR(凝固脆性温度幅)、凝固収縮ひずみ⁷⁾である。各パラメータが割れに及ぼす影響の説明は文献⁹⁾に詳しく示されているのでここでは割愛する。本解析では BTR を $1350-1450^\circ\text{C}$ 、凝固収縮ひずみを $M_s/M_0=1.0$ に固定し、寸法パラメータ r_0 が 0.060mm 及び 0.075mm の2通りの場合について解析を行った。その結果を溶け込み形状のアスペクト比 η と入熱量 Q で整理した図を Fig.10 に示す。○印は割れが発生しない条件を示し、▲、×印はそれぞれ梨形ビード割れ、表

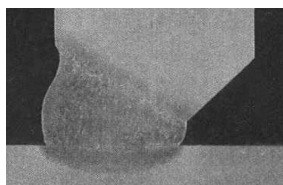


Fig.8 マクロ写真

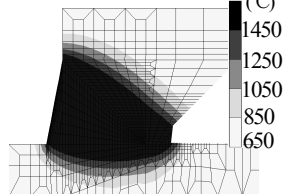
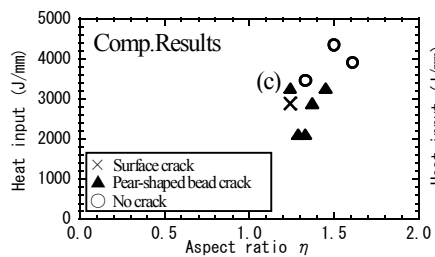
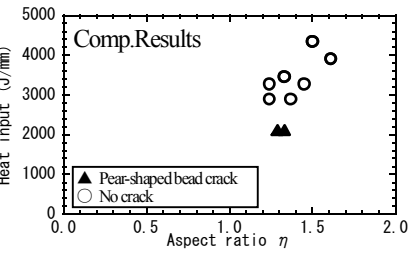


Fig.9 最高到達温度分布



(a) $r_0=0.060\text{mm}$



(b) $r_0=0.075\text{mm}$

Fig.10 入熱量 Q と溶け込み形状のアスペクト比 η が割れに及ぼす影響(解析結果)

面割れが発生した条件を示す。同図より寸法パラメータ r_0 が小さい $r_0=0.060\text{mm}$ の場合に割れが発生し易い事が確認できる。また(a),(b)両方の解析結果より入熱量、溶け込み形状のアスペクト比 η が共に大きい場合に割れが発生していない事がわかる。ここで、比較対象とした実験結果を入熱量 Q と溶け込み形状のアスペクト比 η で整理した図を Fig.11 に示す。実験結果である同図と Fig.10(b) の $r_0=0.075\text{mm}$ の場合の高温割れ解析結果を比較すると、アスペクト比に差があるものの、割れ発生領域の傾向が良く一致していることが確認できる。この結果より、BTR および凝固収縮ひずみを実験データベースより取得し、溶け込み形状を実溶接のもの一致させた上で、割れやすさの指標である r_0 を調整することにより実現とほぼ一致した割れ分布が解析により再現される事がわかる。

ここで Fig.10 (a)における図中(c)の条件を用いた解析結果として得られた、割れを含む変形図を最高到達温度分布と併せて Fig.12 に示す。同図より割れの発生位置および長さは Fig.2 のマクロ写真における割れ発生位置および長さにはほぼ対応していることが確認できる。

4.3.2 裏波が割れに及ぼす影響

これまで得られた解析結果および実験結果より入熱量 Q が大きい場合、または溶け込み形状のアスペクト比 η が大きい場合に割れが発生し難い傾向が確認できた。そこで、入熱量 Q 、アスペクト比 η が共に大きい場合には、裏波が発生する点に着目し、裏波が割れに及ぼす影響について実験および解析により検討を行った。

Fig.3 に示した割れの有無についての実験結果を裏波ビード脚長 P_b と溶け込み形状のアスペクト比 η で整理した図を Fig.13 に示す。同図より、裏波ビード脚長 P_b が 0mm より大きい場合、つまり裏波が発生している場合に割れが発生していないことが確認できる。

さらに解析においても、実現と対応した様々な溶け込み形状を再現し、裏波の影響について検討した。その解析結果について Fig.6 に示す開先裏側 F 点の温度と溶け込み形状のアスペクト比 η により整理した図を Fig.14 に示す。同図より、開先裏側 F 点の温度が 1450°C 以上、

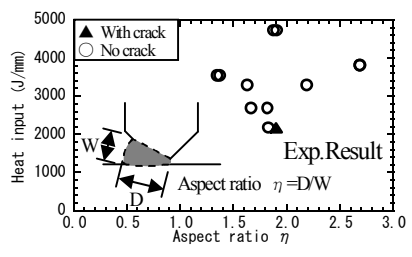


Fig.11 入熱量 Q と溶け込み形状のアスペクト比 η が割れに及ぼす影響(実験結果)

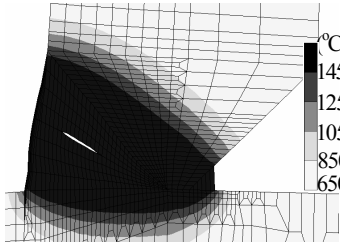


Fig. 12 梨形ビード割れ変形図

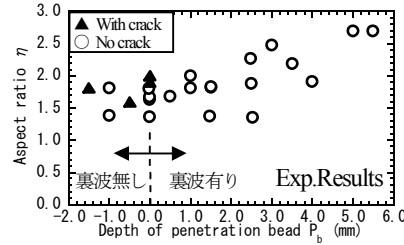


Fig. 13 溶け込み形状のアスペクト比 η と裏波ビード脚長 P_b が割れに及ぼす影響

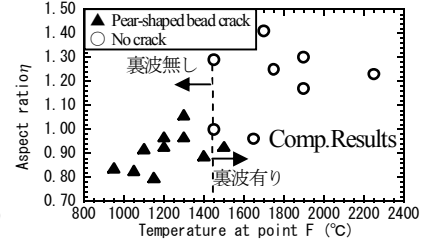


Fig. 14 溶け込み形状のアスペクト比 η と開先裏側 F 点の温度が割れに及ぼす影響

すなわち裏波が発生した場合に割れが発生し難い傾向が確認できる。

以上で示した実験結果および解析結果より、梨形ビード割れの発生を防止するためには、溶け込み形状のアスペクト比 η を大きくし、裏波が発生する溶接法すなわち完全溶け込み溶接法が有効であるという溶接施工上の新しい知見が得られた。

5. T継手完全溶け込み溶接の3次元高温割れ解析

高温割れ解析法は非線形性が強く、また、多くの有限要素を必要とするため計算コストの高い手法である。そこで、溶接問題の特徴を活かした高速化手法である反復サブストラクチャー法⁹⁾を本手法に導入し T継手完全溶け込み溶接の3次元高温割れ解析を行った。反復サブストラクチャー法では大規模な非線形問題を線形領域と非線形領域に分け、それらの境界における連続性を反復計算により満足させる手法である。なお、本解析では要素温度が 300°C以上の要素を非線形領域として設定した。

3次元解析モデルの要素分割において、温度依存型界面要素、ダミー要素の配置は Fig.6 に示される 2次元解析の場合と同様であり、仮想拘束部は設置していない。溶接条件は実験と対応した入熱量 $Q=2892(\text{J}/\text{mm})$ 、溶接速度 $v=5(\text{mm}/\text{s})$ を用いた。その結果として得られた変形図を温度分布と併せて Fig.15 に示す。解析条件は $r_0=0.075(\text{mm})$ 、BTR は 1350-1450°Cとした。Fig.15(a)は溶接途中の全体図であり、(b)はトーチ周辺を拡大した図である。(b)の図よりトーチの通過後に割れが溶接線方向に進展している様子が確認できる。このように、本手法を用いることで、構造強度の低下と関連性の高い割れの発生、および進展を3次元的に予測できるようになった事は有意であると言える。

6. 結言

T継手完全溶け込み溶接時における梨形ビード割れを対象に、実験および温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析を実施し割れに及ぼす影響について検討を行った結果、以下の結論が得られた。

1. 高温割れ解析法により T継手完全溶け込み溶接時における梨形ビード割れの発生、および、進展が再

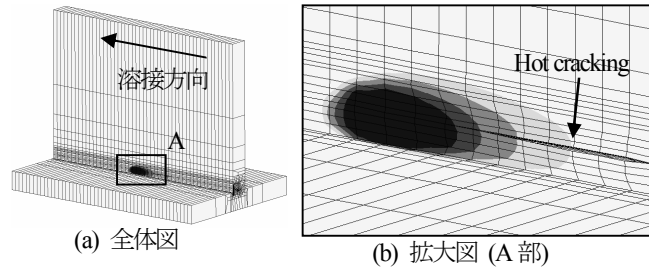


Fig. 15 3次元高温割れ解析結果

現できた。

2. 高温割れ解析法により、割れやすさを支配する寸法パラメータ r_0 を調整することで、実験と解析の割れ分布の傾向がほぼ一致する事を確認した。
3. 実験および解析の両者において、裏波が発生すると割れが発生し難いという同様の傾向を得た。また、割れ発生を抑制する方法として裏波を発生させる溶接法が有効であるという知見を得た。
4. 高温割れ解析法に反復サブストラクチャー法を導入することにより3次元解析が可能になった。

参考文献

- 1) 安田修, 永木勇人, 三田常夫: Full Penetration Welding Process of T Joints of Thick Plates Without Gouging or Backing Material Using High Current Pulsed MAG Welding, International Institute of Welding, (2005), Doc. XII-1857-05
- 2) 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巻8号, 19-29
- 3) 森幸雄, 益本功: 梨形溶け込みビード割れの研究, 溶接学会誌, 49巻1号, 19-23
- 4) 柴原正和, 芹澤久, 村川英一: 界面要素を用いた FEM による溶接高温割れに関する理論的研究(第3報), 関西造船協会誌235号, 161-169
- 5) 柴原正和, 芹澤久, 村川英一: 温度依存型界面要素を用いた溶接高温割れのモデル化と Fish Bone 型高温割れ試験への応用, 溶接学会論文集, 19巻2号, 365-372
- 6) 柴原正和, 野田裕久, 正岡孝治, 永木勇人, 安田修, 鷹羽新二, 芹澤久, 村川英一: 温度依存型界面要素を用いた T 継手完全溶け込み溶接時における梨形ビード割れの発生予測, 溶接シンポジウム講演資料, 287-294
- 7) 柴原正和, 伊藤真介, 芹澤久, 村川英一, 中村照美, 平岡和雄: 温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法の開発と狭間先溶接時における梨形ビード割れの予測, the proceedings of the 15th international offshore and polar engineering conference 2005, 61-68
- 8) 村川英一, 尾田勇, 伊藤真介, 芹澤久, 柴原正和, 西川弘泰: 反復サブストラクチャー法を用いた溶接熱弾塑性解析の高速化, 関西造船協会論文集, 243巻, 67-70