

温度依存型界面要素法を用いた 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

大阪府立大学大学院
高田機工技術研究所
大阪大学接合科学研究所

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

Prediction of Pear-shaped Bead Cracking of T-Joints in Full Penetration Welding Using Temperature Dependent Interface Element

by Masakazu SHIBAHARA, Yoshihisa NODA, Koji MASAOKA, Hayato NAGAKI, Osamu YASUDA, Shinji TAKABA, Hisashi SERIZAWA and Hidekazu MURAKAWA

1. 緒 言

鋼橋部材の溶接では、耐震性および疲労強度の向上や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 パスのみで裏はつりせずに 15~30mm 程度の板厚を溶接することが可能であり、特に 17mm 以下の板厚なら欠陥が生じないことを確認している。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が発生²⁾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て、T 継手完全溶け込み溶接の実験を実施することにより、入熱量および溶け込み形状のアスペクト比が梨形ビード割れの発生に及ぼす影響について検討を行った。さらに、著者らが開発した温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法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。その結果として、梨形ビード割れの発生および進展を再現することができた。また、実験および、解析の両者において入熱量が比較的大きく、裏波が出る場合に割れが発生し難いという知見を得た。

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、裏はつりの必要が無いため、高効率でクリーンな溶接法であり、また、その溶け込み量の大きさから耐震性能および疲労強度の向上が期待できる溶接法であるが、一般的な工法として確立していないのが現状である。その理由としては、以下の 2 点が挙げられ

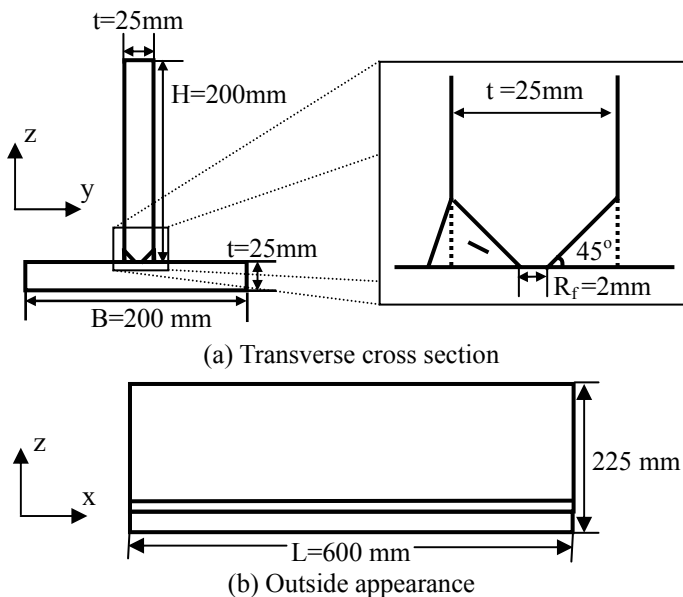
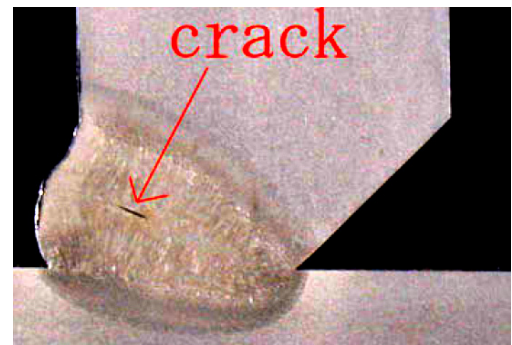
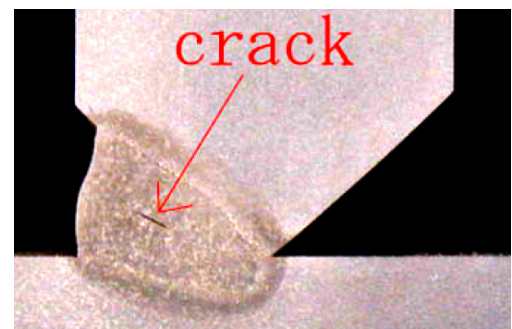


Fig.1 Shape and size of test specimen.



(a) $Q=2400 \text{ J/mm}$, $\eta=2.0$



(b) $Q=1500 \text{ J/mm}$, $\eta=1.6$

Fig.2 Macroscopic photos of transverse cross section.

る。

- ① 施工時において十分な溶け込みが得られない場合がある。
- ② 十分な溶け込みが得られたとしても梨形ビード割れが発生する場合がある。

すなわち、本溶接法の実用化のためには、割れの発生を抑制することが必要条件となる。そこで本章では、”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。ただし、図中に示す文字は以下の通りである。

t : 板厚, H : ウェブ高さ, B : フランジ幅, L : 試験体の長さ, R_f : 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の写真を Fig.2 に示す。(a)は、 $Q=2400$ (J/mm), $\eta=2.0$ の場合であり、(b)は $Q=1500$ (J/mm), $\eta=1.6$ の場合である。これらの図より、割れは内部に発生し、その長さは 2.5 mm 程度であることが確認できる。Fig.3 には入熱量 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す。この実験結果から入熱量 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確認できる。

次に、割れとの関係が予想される、表ビードおよび裏波ビードと入熱量の関係について検討する。表ビードおよび裏波ビードは、一般に Fig.2 (a)あるいは Fig.2 (b)に示すような多様な形状をしている。そこで、Fig.4 (a), (b)に示す溶接金属量 S および、(c)に示す裏波ビード脚長 P_b により整理を行った。その結果を Fig.5 および Fig.6 に示す。Fig.5 に示す結果より、溶接金属部は、約 2900 (J/mm) を境にして、入熱量がそれより小さい

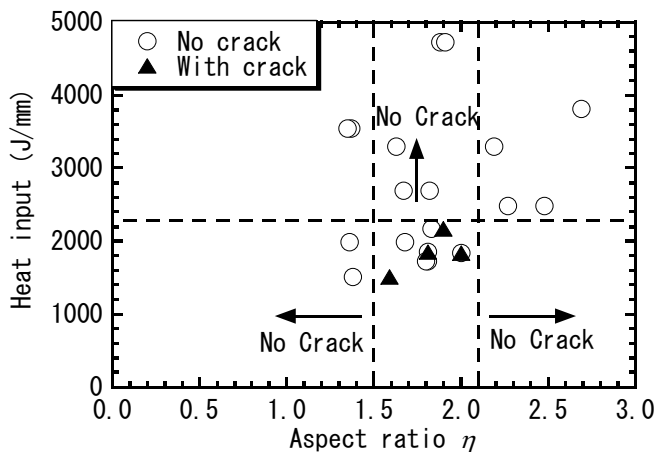


Fig.3 Influence of heat input Q and aspect ratio η of weldmetal on formation of pear-shaped bead cracking.

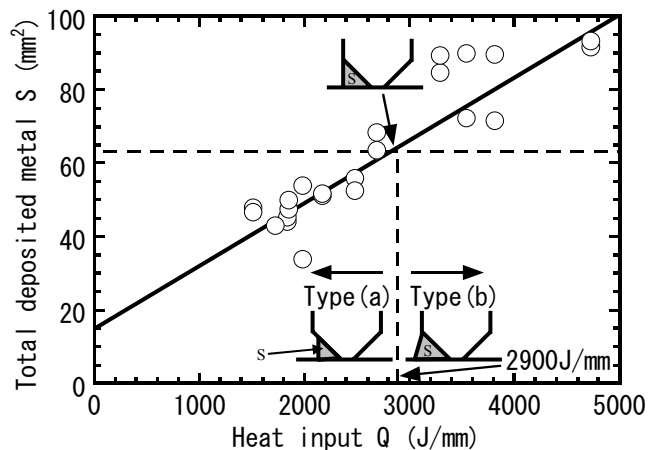
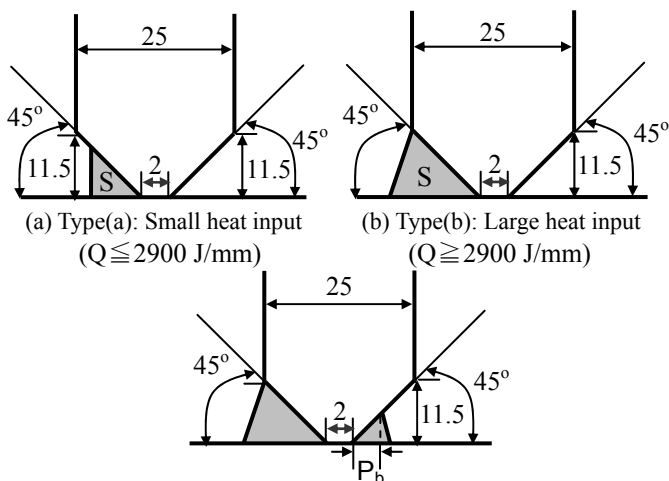


Fig.5 Relationship between total deposited metal S and heat input Q .



(c) Type(c): Large heat input with penetration bead.

Fig.4 Schematic illustration of weldmetal and penetration bead.

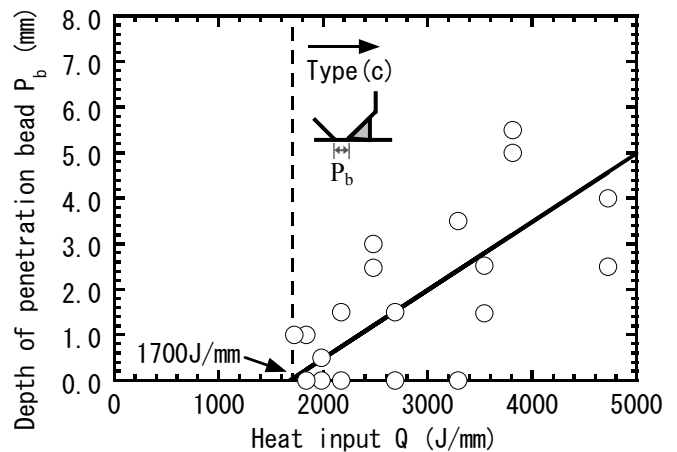


Fig.6 Relationship between depth of penetration bead P_b and heat input Q .

場合には、Type (a)のような形状となり、また、入熱量が約 2900 (J/mm)より大きい場合には、Type (b)に示すような、余盛りが形成されることが分かる。また Fig.6 より、 $Q \geq 1700$ (J/mm)の場合に裏波が形成されることが分かる。これらの結果から、少々のばらつきはあるものの、入熱量 Q と溶接金属量 S および裏波ビード脚長 P_b の間に、図中の実線で示されるような線形関係が認められる。

3. 温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法

3. 1 溶接高温割れのモデリング

次に、本研究で用いた温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法の解析理論および概要について説明する。

溶接金属内部で発生する高温割れは、凝固割れと言われ、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と言われている。材料学的には結晶粒界に発生する粒界割れの一種であると考えられるので、この現象を FEM においてモデル化する際には、結晶粒界の強度低下を考慮する必要がある。本研究では、この材料学的現象である結晶粒界の強度低下を力学的にとらえ、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わすことができると仮定した。なお、高温割れは複雑な物理現象であり、凝固現象をはじめ材料不均一性や粒界への合金元素のマイクロ偏析、さらには相変態等の多様な影響を一般に受けるが、本研究ではこれらを無視し、 γ と σ_{cr} の温度依存性のみを考慮した解析を実施した。

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って表され、結晶粒界、すなわち界面の特性は、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。つまり、作用応力が割れ界面強度 σ_{cr} より大きい、すなわち $(\sigma : \text{応力}) > (\sigma_{cr} : \text{割れ界面強度})$ の時に割れが発生すると考える。また、割れの進展は、き裂進展の場合⁴⁾と同様、単位面積当たり 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的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。

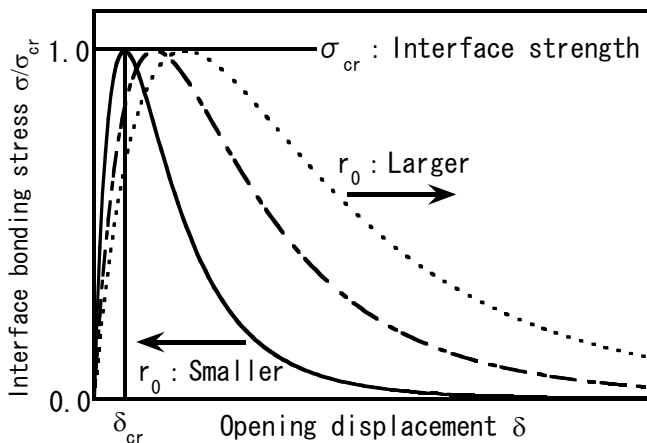


Fig.7 Stress-opening displacement curves of interface element.

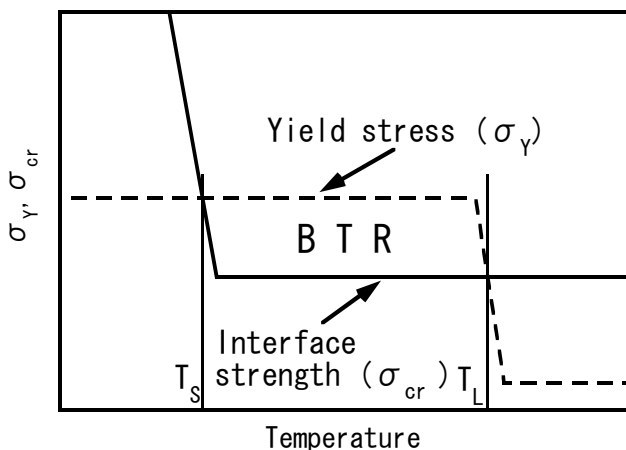


Fig.8 Temperature dependent yield stress σ_Y and critical stress σ_{cr} of interface element.

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、なおかつ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は無数に考えられるが、本研究においては、Lennard-Jones 型ポテンシャル関数を用いた。この場合、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。

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

ここで、 δ は割れの開口変位量であり、 ϕ に含まれる定数 γ および r_0 はポテンシャルを規定するパラメータである。 γ は新しい単位面積の割れ表面を生成するのに必要な表面エネルギーであり、 r_0 は、界面ポテンシャル形状を規定する寸法パラメータである。本研究では、パラメータ γ 、つまり表面エネルギー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

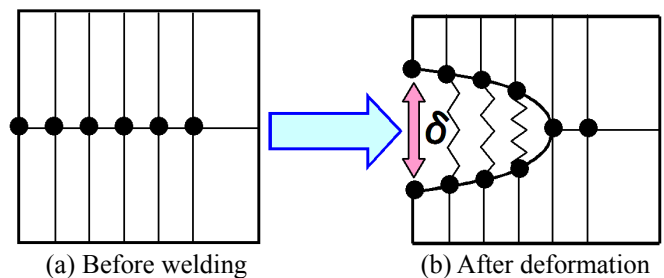


Fig.9 Schematic illustration of hot crack propagation.

結合強度（界面強度）低下を，FEM 解析において考慮できるようにした．なお，各パラメータの力学的意味に関する説明は，文献⁵⁾に詳しく示されているので，ここでは割愛する．

一方，ポテンシャル ϕ の割れ開口変位量 δ に関する微分，すなわち，

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

は，割れ表面に作用する単位面積あたりの結合力を表わす．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.7である．同図より，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} が大きくなる事が分かる．また，同曲線の最大値は $\sigma_{cr}(T)$ と定義され，式(2)からも分かるように， γ に比例して変化すると仮定した．ここで，温度上昇に伴う粒界の脆化を力学的に捉え，BTRにおいて $\sigma_y > \sigma_{cr}$ と定義した．それを模式的に示した図が Fig.8 である．図中の T_L は液相線温度を示し， T_S は固相線温度である．

以上の力学的非線形特性を示す界面要素を，割れが発生し進展すると予想される経路に配置することで，Fig.9に示す様に，割れが発生する場合には界面要素が開口することになる．

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に，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における要素分割図を Fig.10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．また，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．

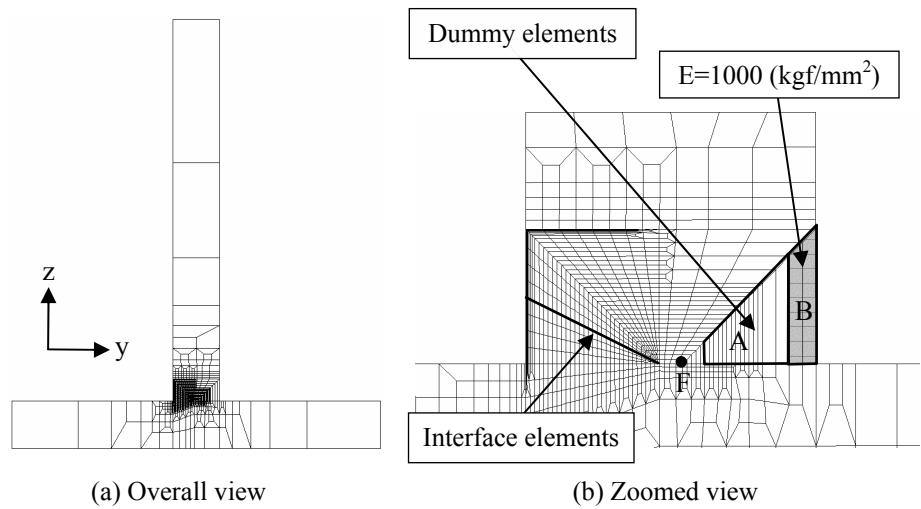
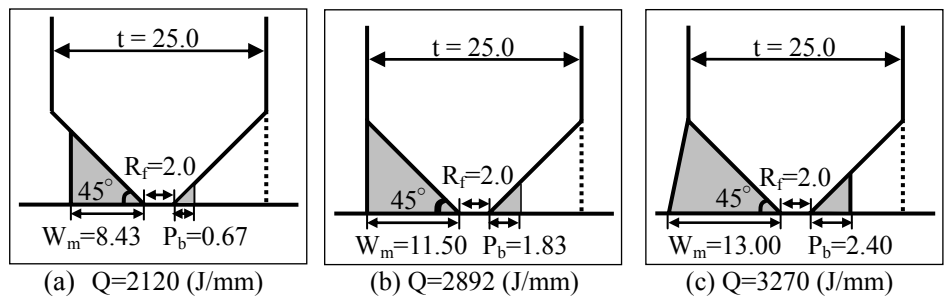


Fig.10 FE Mesh divisions.

溶接金属および脚長については，Fig.5に示す入熱量と溶接金属量の関係，また Fig.6に示す入熱量と裏波脚長の関係を考慮した要素分割とした．なお，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．



入熱は要素内部発熱とし，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．また，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分から受ける拘束を考慮することができない．そこで本研究では，

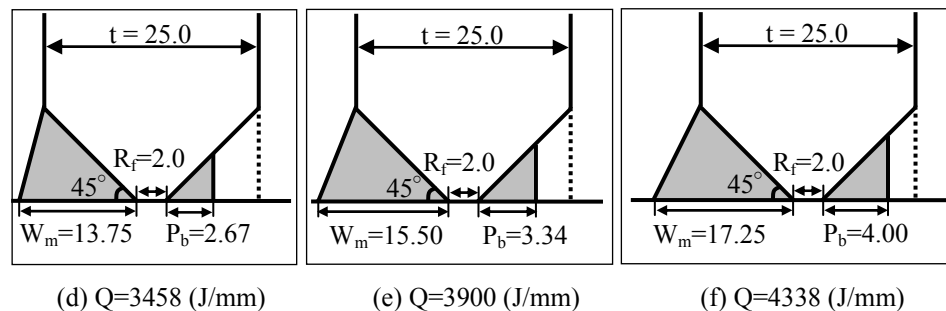


Fig.11 Schematic illustration of weldmetal and penetration bead.

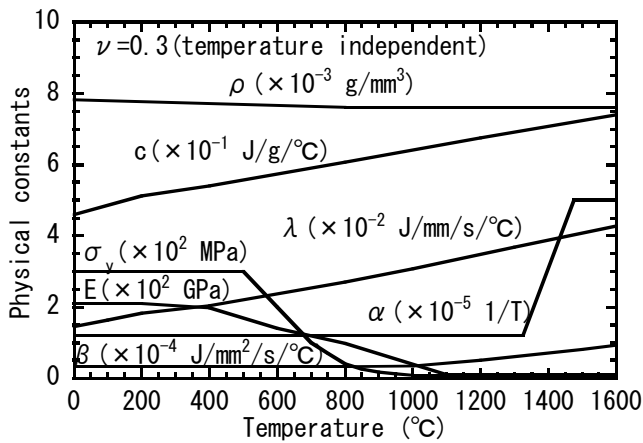


Fig.12 Temperature dependent physical constants.

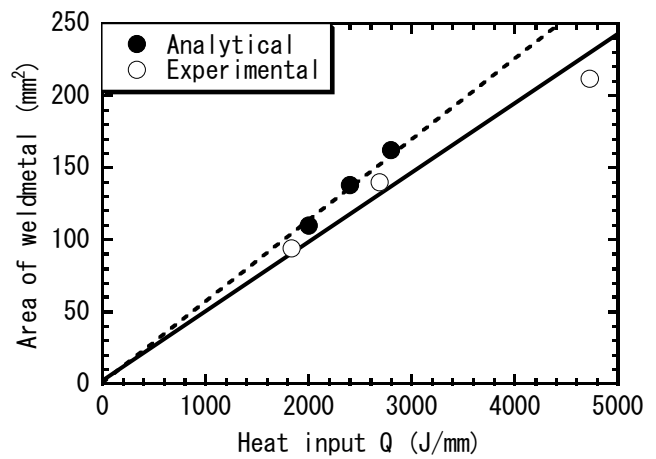


Fig.13 Relationship between area of weldmetal in transverse cross section and heat input Q .

Fig.10 (b)のB部に対し、溶接線方向前後部による拘束を模擬した $E=1000$ (kgf/mm²)の仮想拘束部を設置した。Fig.11 に溶接金属と裏波脚長の異なる6つのモデルを示す。各モデルは標題に示す入熱量 Q に対応したモデルであり、入熱量 Q の比較的大きなケース(c) ~ (f)では余盛り部を考慮したモデルとなっている。解析に用いた材料定数の温度依存性を Fig.12 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

解析では、BTR(凝固脆性温度域)において凝固収縮ひずみが発生すると仮定し、それと等価な線膨張係数の温度依存性を用いて凝固収縮ひずみを表した。また、基本条件としてBTRは、1350°C~1450°Cと仮定した。

4. 2 熱伝導解析結果

次に、熱効率について検討するために、三種類の入熱量を用いたFEM解析と実験を実施し、横断面における溶接金属の面積について比較を行った。その結果を Fig.13 に示す。同図に示す、実験結果および解析結果の両者の傾きの比より、近似的にはあるが、熱効率は約0.9と考えることができる。よって、以後の解析においては、実験における電流×電圧の値に熱効率0.9を乗じた値を解析における入熱量とした。

ここで、入熱量による影響について検討するため、まずは、Fig.11 に示す6通りの入熱量、開先や裏波の形状および寸法を用いた熱伝導解析を実施した。

その結果を、最高到達温度の分布で整理したのが Fig.14 である。実験および解析で用いた材料の融点は約1450°Cであるため、図中の1450°Cの線は溶け込み形状を示している。また、図中の η は、同図(a)で示した溶け込み深さ D と溶け込み幅 W を用いて次式で表される。

$$\eta = D/W$$

すなわち、 η は溶け込み形状のアスペクト比を示している。

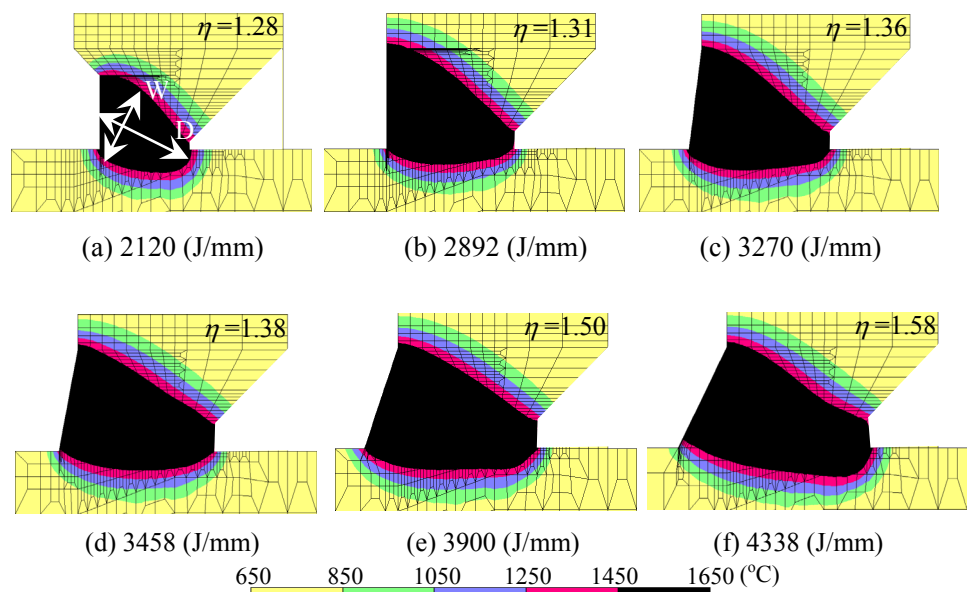


Fig.14 Maximum temperature distribution.

4. 3 梨形ビード割れの解析結果

4. 3. 1 BTR 温度幅の影響

温度依存型界面要素を用いた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 温度幅および凝固収縮ひずみ⁶⁾である。そこで本項では、まず BTR 温度幅が割れに及ぼす影響について検討した。その際、液相線温度である T_L を 1450°C に固定し、固相線温度 T_S を変化させる形で BTR 温度幅を変化させた。結果を入熱量毎に整理した図が Fig.15 である。なお、凝固収縮ひずみは、次項で示す M_a/M_0 を用いて $M_a/M_0=1.0$ とし、寸法パラメータ r_0 は $r_0=0.075$ mm で一定とした。図中の○印は割れが発生しない条件を示し、▲印および×印はそれぞれ梨形ビード割れおよび表面割れが発生する条件を示している。同図より、BTR 温度幅が 50°C および 75°C の場合には割れは発生せず、BTR 温度幅が大きくなるに従い、割れ発生領域が拡大していることが確認できる。また、入熱量に関しては約 3200 J/mm の場合に最も割れが発生し易く、入熱量がその値より大きい場合、また、小さい場合共に、割れが発生し難いことが確認できる。

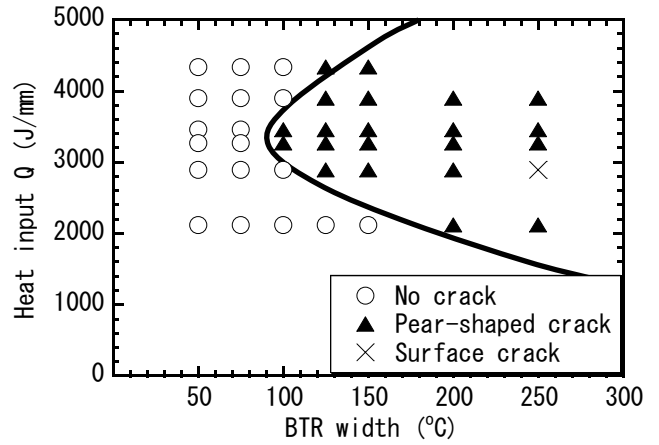


Fig.15 Influence of heat input Q and BTR width on formation of hot cracking.

4. 3. 2 凝固収縮ひずみの影響

BTR および寸法パラメータ r_0 を 1350°C~1450°C および 0.075 mm に固定し、凝固収縮ひずみの影響について検討を行った。その際 Fig.16 に示す、凝固ひずみと等価な線膨張係数の温度依存性を用いて、凝固ひずみ

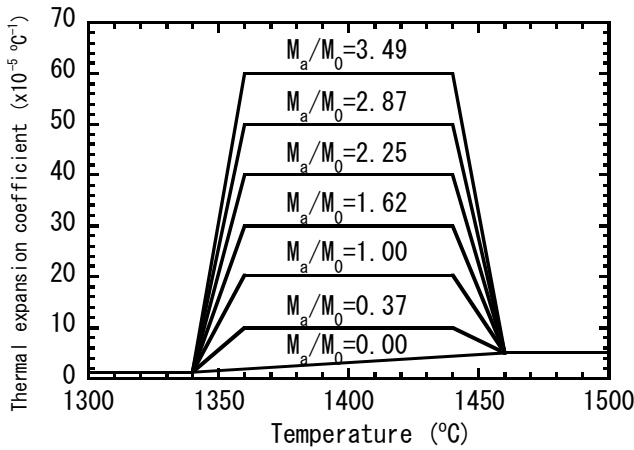


Fig.16 Temperature dependent thermal expansion coefficient.

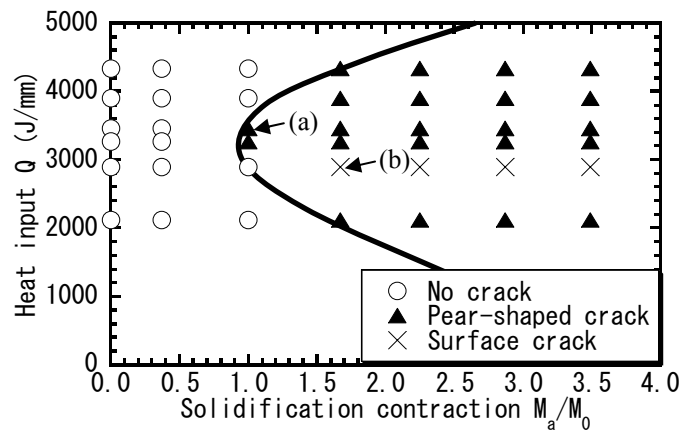


Fig.17 Influence of heat input Q and Solidification contraction M_a/M_0 on formation of pear-shaped bead cracking.

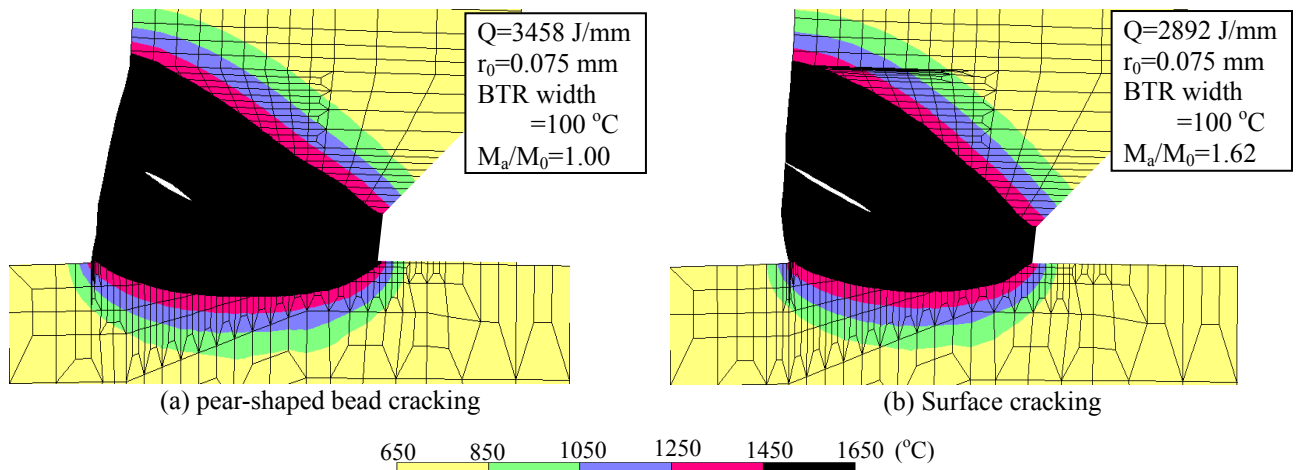


Fig.18 Maximum temperature distribution with deformation.

の影響について検討を行った。すなわち、 M_d/M_0 が大きいほど凝固収縮ひずみが大きいことを意味しており、 $M_d/M_0=1.0$ は通常の鉄鋼材料に対応している。

入熱量 Q で整理を行った結果を Fig.17 に示す。同図より、凝固収縮ひずみ量が大きいほど割れが発生し易い傾向にあることが分かる。なお、 $M_d/M_0=1.0$ の場合には、入熱量が約 3200 J/mm の場合に割れが発生し、入熱量がその値より大きい場合、また、小さい場合共に、割れが発生しないことが確認できる。なお、図中の(a)および(b)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と併せて Fig.18 に示す。(a)の場合には梨形ビード割れが生じており、(b)の場合には表面割れが生じていることが分かる。これらの結果より、(a)に示す梨形ビード割れの場合の割れ発生位置および長さは、Fig.2 の写真における割れ発生位置および長さに対応していることが確認できる。

4. 3. 3 寸法パラメータ r_0 の影響

Fig.19 は、寸法パラメータ r_0 が割れに及ぼす影響を示している。なお、寸法パラメータ r_0 は割れ易さを支配する冶金的パラメータと考えることができ、この値が小さいほど割れ易い材料と考えることができる。BTR は 1350°C~1450°C、凝固収縮ひずみ M_d/M_0 は 1.0 とした。同図より、寸法パラメータ r_0 が大きいほど割れが発生し難い傾向にあることが確認できる。また、この場合にも、入熱量が 3200 J/mm の場合に最も割れが発生し易く、入熱量がその値より大きい場合、または小さい場合共に、割れが発生し難いことが確認できる。

4. 3. 4 溶け込み形状のアスペクト比 η の影響

Fig.20 には、Fig.19 における $r_0=0.075\text{mm}$ の場合の 6 ケースについて、溶け込み形状のアスペクト比 η で整理した結果を示す。同図より、アスペクト比 η が比較的大きい約 1.5 以上の場合に割れが発生せず、また、約 1.3 以下の場合にも割れが発生しなかった。

以上の一連の解析結果より、入熱量が大きい場合、あるいは小さい場合に割れが発生し難い傾向が認めら

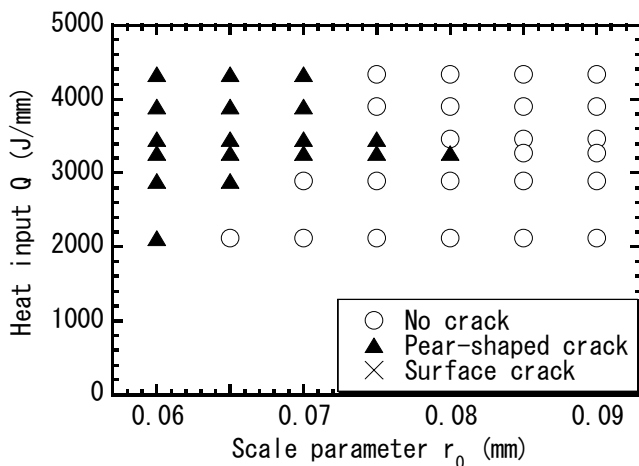


Fig.19 Influence of heat input Q and scale parameter r_0 on formation of hot cracking.

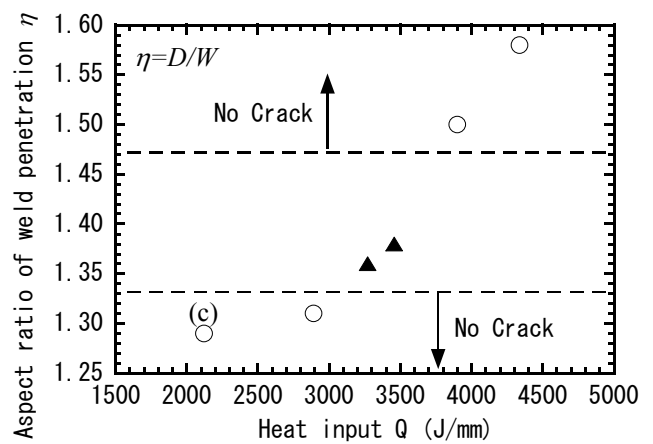


Fig.20 Influence of heat input Q and aspect ratio of weld penetration η on formation of hot cracking.

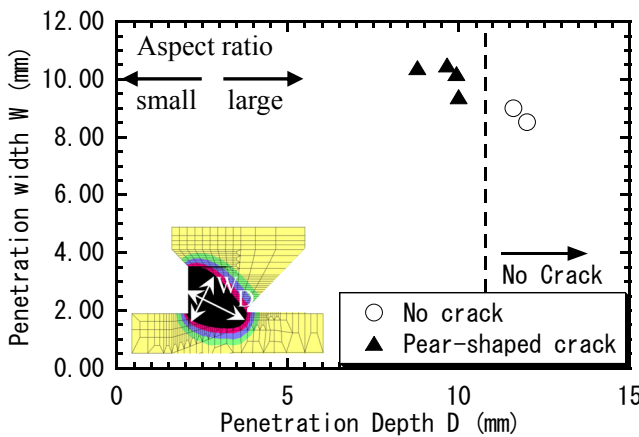


Fig.21 Influence of penetration width W and depth D on formation of hot cracking.

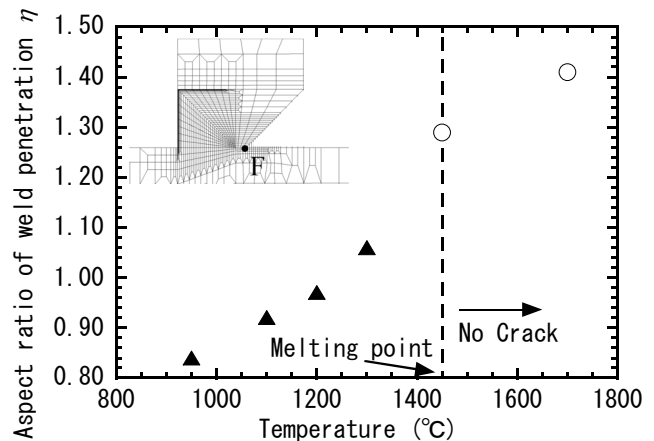


Fig.22 Influence of aspect ratio of penetration η and temperature at F on formation of hot cracking.

れた。その発生メカニズムを考えると、入熱量が小さい場合には、割れを発生させる駆動力である凝固収縮量が小さくなるために割れが発生し難くなると考えられるが、入熱量が大きい場合には、他のメカニズムが作用していると考えられる。そこで、割れが発生していない Fig.20 に示される(c)の条件、すなわち $Q=2120$ J/mm, BTR=1350°C~1450°C, 凝固収縮ひずみ $M_s/M_o=1.0$ の条件を用いて、同一入熱量でアスペクト比を変化させた解析を実施した。その結果を Fig.21 に示す。さらに、同図の結果を Fig.10 (b)の点 F における温度で整理し Fig.22 に示す。Fig.21 の結果より、アスペクト比が大きく、深溶け込みで裏波が大きく出ているような場合には割れは発生せず、アスペクト比が小さく、裏波が出ていない場合に割れが発生することが確認できる。また、Fig.22 の結果からも同様のことが確認でき、点 F の温度が 1450°C 以上の場合、すなわち、点 F における温度が溶融温度以上になり、裏波が出る場合には割れが発生し難くなることが確認できる。

以上の解析結果より、大入熱溶接時における梨形ビード割れを防止するためには、裏波が出る溶接法、すなわち完全溶け込み溶接にすれば良いとの知見を得ることができた。今後、同様の方法によりレーザー溶接やレーザー・アークハイブリッド溶接時の割れ問題等との関連性についても検討を重ね、厚板溶接時の一般的な割れ防止策について検討する予定である。

5. 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法を用いた高温割れ解析を実施し、割れの発生に及ぼす諸因子の影響について検討した結果、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を再現することができた。
2. 高温割れ解析法により、入熱量が約 3200 J/mm の場合に割れが発生しやすく、約 3200J/mm より大きい、あるいは小さい場合に割れは発生し難い傾向にあることが確認された。
3. 解析結果として得られた割れ発生位置および長さは、実験結果として得られた位置および長さとはほぼ一致することが分かった。
4. 実験および解析の両者において、裏波が出ると割れが発生し難いという同様の傾向が示された。

6. 参考文献

- 1) Osamu Yasuda, Hayato Nagaki and Tsuneo Mita: 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) Masakazu Shibahara, Hisashi Serizawa and Hidekazu Murakawa: Modeling and Prediction of Hot Cracking Using Temperature Dependent Interface Element, Japan Light Metal Welding & Construction association, 41-8, (2003), 19-29 (in Japanese)
- 3) Y. Mori and I. Masumoto: Consideration about the forming of the pear-shaped bead crack, Journal of JWS, 49-1 (1980), 19-23 (in Japanese)
- 4) Masakazu Shibahara, Hisashi Serizawa and Hidekazu Murakawa: Finite Element Method for Hot Cracking Using Interface Element (3rd Report) Development of Static-Dynamic Hybrid Method, 235, (2000), 161-169 (in Japanese)
- 5) Masakazu Shibahara, Hisashi Serizawa and Hidekazu Murakawa: Development of Computational Method for Hot Cracking Using Temperature Dependent Interface Element and Application for Fish Bone Type Test, Journal of JWS, 19-2, (2001), 365-372 (in Japanese)
- 6) Masakazu Shibahara, Shinsuke Itoh, Hisashi Serizawa, Hidekazu Murakawa, Terumi Nakamura and Kazuo Hiraoka: Development of Three Dimensional FEM Using Temperature Dependent Interface Element for Predicting Pear-shaped Bead Cracking under Narrow Gap Welding, the proceedings of the 15th international offshore and polar engineering conference, (2005), 61-68