

# 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\*

柴原 正和\*\*, 伊藤 真介\*\*\*, 中田 康平\*\*\*, 鷹羽 新二\*\*\*\*,  
芹澤 久\*\*\*\*, 正岡 孝治\*\*\*\*\*, 村川 英一\*\*\*\*\*

## Prediction of Pear-shaped Bead Cracking Under Full Penetration Welding of T-Joints Using Temperature Dependent Interface Element\*

by SHIBAHARA Masakazu\*\*, ITO Shinsuke\*\*\*, NAKATA Kohei\*\*\*, TAKABA Shinji\*\*\*\*,  
SERIZAWA Hisashi\*\*\*\*\*, MASAOKA Koji\*\*\*\*\* and MURAKAWA Hidekazu\*\*\*\*\*

After the experience of Hanshin-Awaji Earthquake, demands for full penetration welding joint with large plate thickness have been increased to improve the performance of bridges under severe earthquake. At the same time, the full penetrated T-joints without significant defects are required from the fatigue strength point of view. In case of conventional methods, removable backing material or back gouging are employed. When the removable backing material is used, root openings are required and assembly process becomes complicated. The gouging produces large noise and fume which are not welcome for good working environment. To achieve defect free full penetration T-joint without environmental problem, high current pulsed MAG welding is introduced as an alternative method. By using this welding method, the plate with thickness from 15 to 30 mm can be welded without back gouging. It is reported that no welding defect occurs when the plate thickness is less than 17mm<sup>1)</sup>. However, when the plate thickness is over 25 mm, the pear-shaped bead cracking were sometimes generated if appropriate welding conditions are not selected. Therefore, in order to apply this welding method for the construction of bridges, it is necessary to clarify the welding conditions which can prevent the formation of pear-shaped bead cracking.

In this study, the influence of the welding conditions on the formation of pear-shaped bead cracking is examined through the experiments of the full penetration welding of T-joints. And the same problems are analyzed using Finite Element Method. The formation and growth of pear-shaped bead crack in T-joints welded by full penetration high current pulsed MAG welding can be simulated using temperature dependent interface element which is introduced in the thermal-elastic-plastic FEM analysis.

Results of experiments show that the pear-shaped bead cracking is not formed when the heat input is greater than 2,500 J/mm or when the penetration bead is formed. However, both large heat input and large penetration bead (deep penetration compared to the penetration width) have negative influence on hot crack formation according to the commonly accepted knowledge. To understand these experimental results, FEM simulations are conducted and influences of heat inputs and size of penetration bead are investigated.

**Key Words:** T-joints, Pear-shaped bead cracking, Hot cracking, Temperature dependent interface element, Full penetration welding, FEM, High current pulsed MAG welding

### 1. 緒 言

阪神大震災以来、鋼橋部材の溶接では、耐震性向上の面から完全溶け込み溶接への期待が高まりつつある。完全溶け込み溶接は疲労強度の向上、作業コストの低減の観点からも有効であり大電流パルス MAG を用いた T 継手完全溶

け込み溶接法<sup>1)</sup>の適用が検討されている。

この溶接法では、表側 1 パスかつ裏はつりなしで 15～30 mm 程度の板厚を溶接することが可能であり、特に 17 mm 以下の板厚であれば欠陥が生じないことが著者らの研究により確認されている。しかし、厚板の溶接施工時には、溶接条件や継手形状の選択によっては高温割れの一種である梨形ビード割れが発生<sup>2)</sup>する場合があります問題となっている。梨形ビード割れは溶接によって加熱された溶融部が凝固、収縮する際に発生すると言われ、製品の品質低下や生産コストの上昇につながる。つまり、この溶接法を実施に適用するためには梨形ビード割れの発生を抑制する必要がある。

実施工においてこのような梨形ビード割れを抑制するためには、割れ発生メカニズムを冶金学および力学的観点から解明する必要がある。そこで本研究では、梨形ビード割れの発生メカニズムを力学的な立場から解明し、実施工における割れを防止することを目的として、T 継手完全

\*受付日 平成20年8月26日 受理日 平成21年1月17日 平成19年度秋季全国大会で発表

\*\*正 員 大阪府立大学大学院 Member, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

\*\*\*学生員 大阪大学大学院 Student Member, Graduate School of Engineering, Osaka University

\*\*\*\*正 員 高田機工株式会社 Member, Takadakiko Co., Ltd.

\*\*\*\*\*正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

\*\*\*\*\* 大阪府立大学大学院 Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

溶け込み溶接の実験を実施することにより、入熱量  $Q$  および溶け込み形状のアスペクト比  $\eta$  などの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を行った。また、温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法をT継手完全溶け込み溶接に適用し、割れに及ぼす諸因子の影響について検討を行った。さらには、実験および解析により得られた結果に基づき割れの防止策についても検討した。

## 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実験

### 2.1 実験概要

大電流パルス MAG による完全溶け込み溶接法は、裏つりの必要がなく、高効率でクリーンな溶接法であり、その溶け込み量の大きさから耐震強度及び疲労強度の向上が期待できる溶接法である。しかしながら、溶接時には高温割れである梨形ビード割れが発生する場合がある。よって、割れ発生条件について検討し、割れを抑制することは重要な課題であると言える。そこで本研究では、入熱量  $Q$  及び次節で示される溶け込み形状のアスペクト比  $\eta$  が割れに及ぼす影響について検討するために、実験を実施した。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

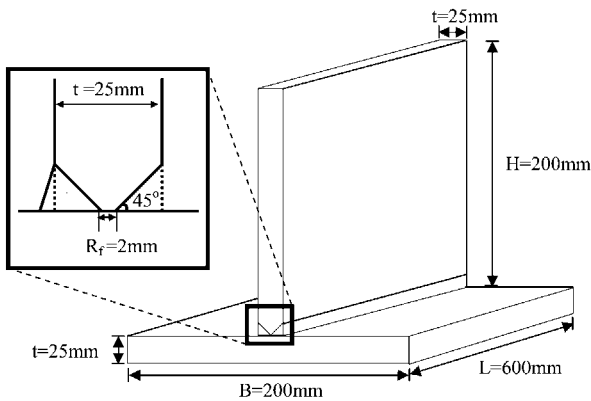


Fig. 1 Shape and size of test specimen.



Fig. 2 Picture of full penetration welding method of T joints using high current pulsed MAG welding.

は、K 形開先を有する T 継手であり、開先角度は  $45^\circ$  である。Fig. 1 に示す試験体を用いて実験を行った様子の写真を Fig. 2 に示す。なお、試験体材料は SM490 を用い、溶接ワイヤーは YGW15 を用いた。また、試験体の始末端部には立て板の姿勢を保つために拘束板を設け、小入熱で仮付け溶接を施した。

### 2.2 実験結果

#### 2.2.1 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

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. 3 に示す。同図は、入熱量  $Q=1500 \text{ J/mm}$ 、溶け込み形状のアスペクト比  $\eta=1.6$  の場合である。この図に代表されるように、割れはほぼ開先中心線上に沿って発生していることが確認できる。

Fig. 4 に入熱量  $Q$  及び溶け込み形状のアスペクト比  $\eta$  が割れに及ぼす影響を示す。縦軸は入熱量  $Q$ 、横軸は溶け込み形状のアスペクト比  $\eta$  である。溶け込み形状のアスペクト比  $\eta$  は Fig. 5 に示す図より、溶け込み深さ  $D$  と溶け込み幅  $W$  を用いて  $\eta=D/W$  で表される。Fig. 4 中の○印は割れが発生しない条件を示し、▲印は Fig. 3 のマクロ写真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

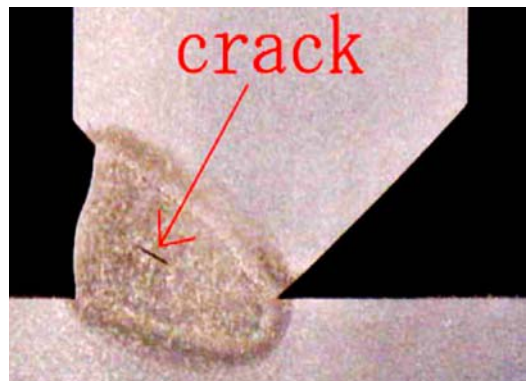


Fig. 3 Macroscopic photos of transverse cross section. ( $Q=1500 \text{ J/mm}$ ,  $\eta=1.6$ )

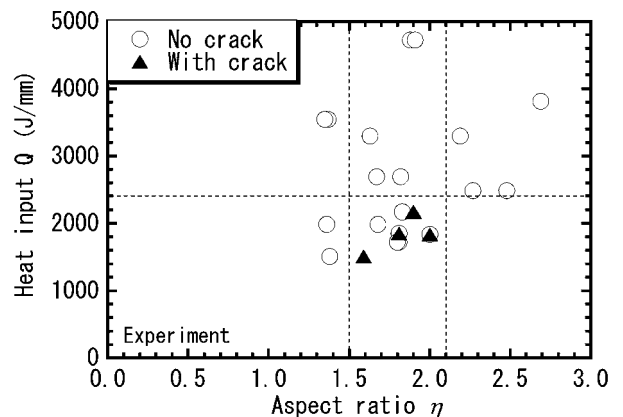


Fig. 4 Influence of heat input and aspect ratio of penetration shape  $\eta$  on the formation of cracking.

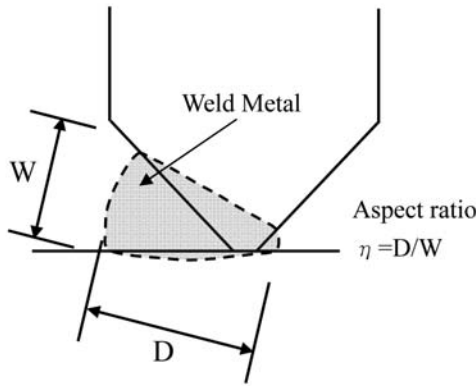


Fig. 5 The definition of aspect ratio of penetration shape.

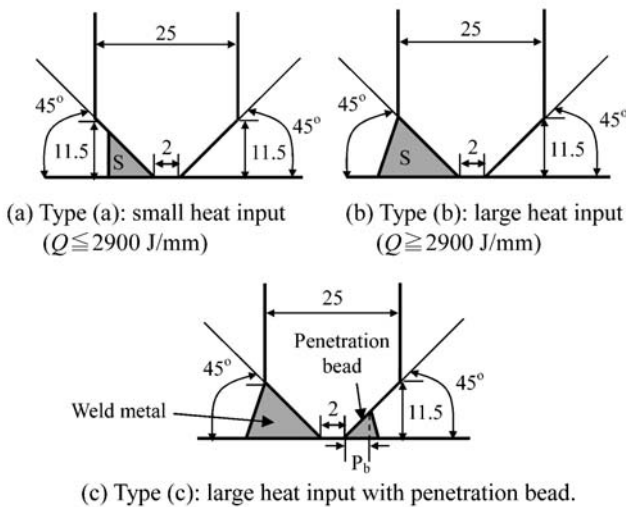


Fig. 6 Schematic illustrations of weld metal and penetration bead.

実験結果より入熱量  $Q$  が約  $2400 \text{ J/mm}$  以上の場合には、割れが発生していないことが確認できる。また、溶け込み形状のアスペクト比  $\eta$  に関しては、 $2.1$  以上及び  $1.5$  以下において割れが発生していないことが確認できる。

### 2.2.2 入熱量と表ビードおよび裏波ビードの関係

ここでは、割れとの関係が予想される表ビード及び裏波ビードと入熱量の関係について検討する。一般に表ビードおよび裏波ビードは Fig. 3 に示すように複雑な形状をしており、それらを定量的に扱うのは困難である。そこで表ビードの評価には Fig. 6 (a), (b) に示す溶接金属量  $S$  を採用し、裏波ビードの評価としては、(c) に示す裏波ビード脚長  $P_b$  を採用し整理を行った。その結果を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。Fig. 7 に示す結果より、溶接金属量  $S$  は約  $2900 \text{ J/mm}$  を境にして入熱量がそれより小さい場合には Type (a) のような形状となり、入熱量が約  $2900 \text{ J/mm}$  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った。また、割れの有無に着目すると、裏波ビードが十分に形成されている入熱量が  $2400 \text{ J/mm}$  以上の場合において、割れは発生していないことが確認できる。次に、Fig. 8 に示す結果から、入熱量  $Q \geq 1700 \text{ J/mm}$  の場合に裏波が形成され

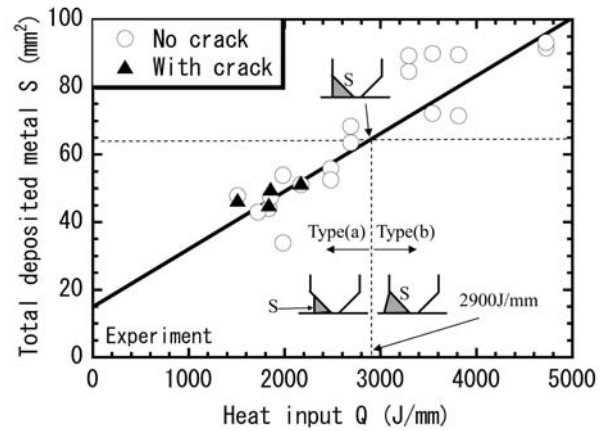


Fig. 7 Relationship between total deposited metal  $S$  and heat input  $Q$ .

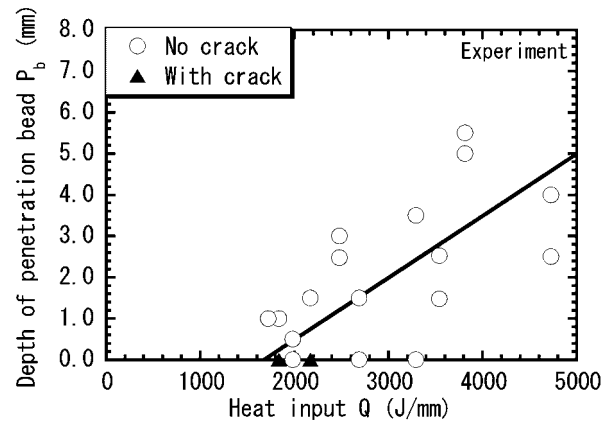


Fig. 8 Relationship between depth of penetration bead  $P_b$  and heat input  $Q$ .

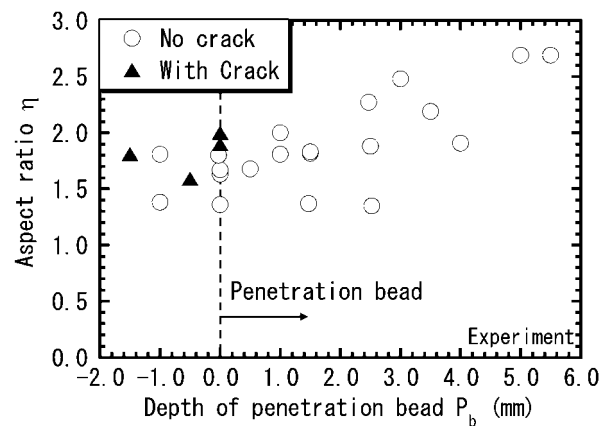


Fig. 9 Influence of ratio of penetration shape  $\eta$  and depth of penetration bead  $P_b$  on the formation of hot cracking.

ることが分かる。これらの結果から、少々ばらつきは認められるものの、入熱量  $Q$  と溶接金属量  $S$  及び裏波ビード脚長  $P_b$  の間に、図中の実線で示されるような直線で表現できる関係が認められる。そこで、第 4 章以降の計算における、溶接金属量  $S$  および裏波ビード脚長  $P_b$  としては、Fig. 7 および Fig. 8 に示される実線上の値を用いることにした。

### 2.2.3 溶け込み形状のアスペクト比 $\eta$ と裏波ビードが割れに及ぼす影響

Fig. 9 に溶け込み形状のアスペクト比  $\eta$  と裏波ビード脚長

$P_b$ が割れに及ぼす影響を示す。縦軸は溶け込み形状のアスペクト比 $\eta$ を示し、横軸は裏波ビード脚長 $P_b$ を示す。同図より、裏波の発生を意味する $P_b > 0$ においては、割れが発生していないことが確認できる。逆に割れが発生している場合には、ルート部の溶け込みが不足し裏波が形成されていないか、または、ほとんど形成されないことが確認できる。また、溶け込み形状のアスペクト比 $\eta$ に関しては、その値が2.0より大きな場合において割れは発生していないことが確認できる。この事は、従来から狭開先溶接法等で指摘されている“溶け込み形状のアスペクト比が大きいほど割れが発生しやすい”という実験結果<sup>2)</sup>と異なる傾向を示している。

3. 温度依存型界面要素を用いた高温割れ解析法

3.1 溶接高温割れの力学モデル

梨形ビード割れは、高温割れの一種であり、溶接により加熱された溶融金属部が凝固・収縮する際に発生すると言われている。そこで、本研究では、梨形ビード割れの発生を解析するために、温度依存型界面要素<sup>2-4)</sup>を用いた溶接高温割れ解析法（以後、高温割れ解析法と称す）を用いた。この手法では、BTR（高温凝固脆性温度域）における材料の脆化を表面エネルギー $\gamma$ と界面強度 $\sigma_{cr}$ の温度依存性を用いて表している。

3.2 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時には、表面エネルギー $2\gamma$ 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になっていると仮定した。このような性質を示すポテンシャル関数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エネルギー $\phi$ は次式で表される。

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

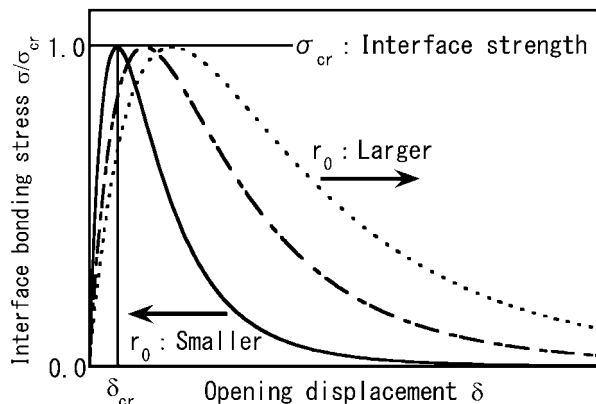


Fig. 10 Stress-opening displacement curves of interface element.

ここで、 $\delta$ は割れの開口量であり、定数 $\gamma$ 、 $n$ 及び $r_0$ はポテンシャルを規定するパラメータである。特に、 $\gamma$ 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、本研究では $\gamma$ のみが温度依存性を有すると仮定した。なお、各パラメータの力学的意味に関する説明は、文献<sup>4)</sup>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 $\phi$ の割れ開口量 $\delta$ に関する微分 $d\phi/d\delta$ 、すなわち、

$$\sigma = \frac{\partial\phi}{\partial\delta} = \frac{4\gamma n}{r_0} \left\{ \left( \frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^{n+1} - \left( \frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^{2n+1} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

は、割れ表面に作用する単位面積あたりの結合力を表す。また、開口変位 $\delta$ と結合応力 $\sigma$ の関係を Fig. 10 に示す。同図に示されるように、 $r_0$ は寸法パラメータであり、 $r_0$ が大きい時には、界面が破断する際の開口変位が大きくなる。

さらに、表面エネルギー $\gamma$ が温度依存性を示すと仮定して、BTR 温度幅を定義したものが Fig. 11 である。BTR 温度幅とは、材料が凝固時に脆化する温度域である高温脆化温度域を示し、本研究では、この高温脆化を力学的にとらえ、BTR において材料の降伏応力 $\sigma_y$ が界面強度 $\sigma_{cr}$ より大きく割れが発生する可能性がある、すなわち $\sigma_y > \sigma_{cr}$ と仮定した。なお、Fig. 11 の場合の BTR 温度幅は、1350℃～1450℃である。

4. 梨形ビード割れの解析

4.1 T継手試験片の解析モデル

本章では、冶金的パラメータおよび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。高温割れ解析においては、割れの進展方向に対して非常に小さな要素分割を必要とするため、今回の解析対象に対して3次元解析法を適用するのは現実的でない。そこで、本解析にお

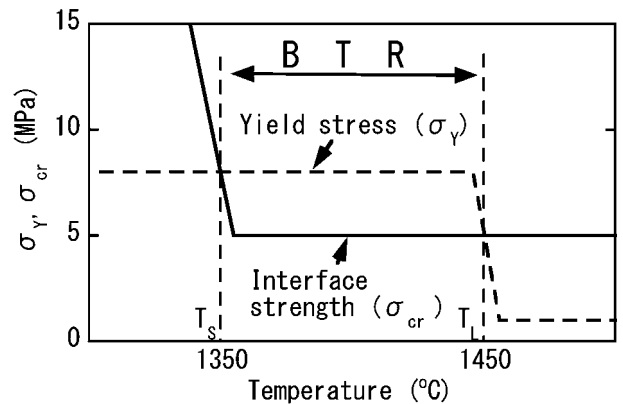


Fig. 11 Temperature dependent yield stress  $\sigma_y$  and critical stress  $\sigma_{cr}$  of interface element.

いては、2次元平面ひずみ状態を仮定し、溶接線と垂直方向の断面内に発生する割れを解析対象とした。解析に用いた要素分割図を Fig. 12 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。同図は、溶接金属が丁度、ウェブ部材の表面まで満たされた場合に相当する。また、割れは開先中心線上に発生すると仮定し、その部分に温度依存型界面要素を配置した。

Fig. 12 (b) 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、裏波量に応じてダミー要素と通常要素を切り替えることで、裏波脚長を容易に変化可能とした。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した。また、入熱密度は一様と仮定した。なお、本研究で実施された解析は2次元平面ひずみ解析であるため、解析対象断面が溶接方向前後部から受ける熱影響、変形、応力およびそれらに起因する拘束状態を考慮することはできない。そこで B 部に対し、溶接方向前後部による拘束を模擬した仮想拘束部を設置した。

Fig. 13 に溶接金属量と裏波ビード脚長の異なる6つのモデルを示す。各モデルは図題に示す各入熱量に対応しており、溶接金属量および裏波脚長は Fig. 7 および Fig. 8 中の実線に対応した値を用いた。すなわち、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。なお、ビード表面を含めた解析対象試験体表面全体を熱伝達表面と定義し、溶接方向前後部は断熱条件と仮定した。

次に解析に用いた材料定数の温度依存性を Fig. 14 に示す。ただし、図中の物理定数は以下の通りである。

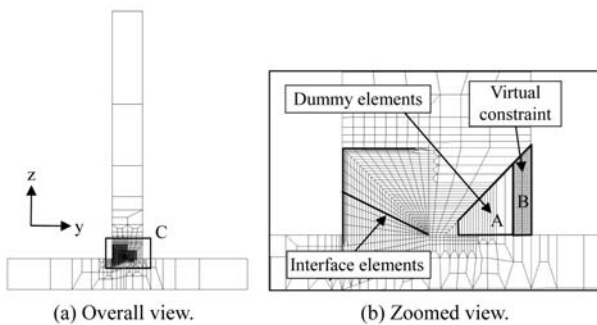


Fig. 12 FE mesh divisions.

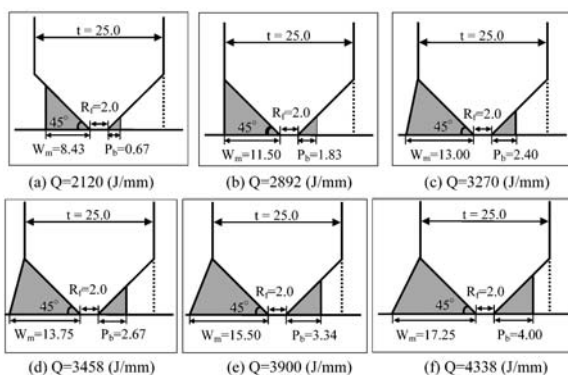


Fig. 13 Schematic illustration of weldmetal and penetration bead.

E: ヤング率,  $\sigma_v$ : 降伏応力,  $\nu$ : ポアソン比,  $\alpha$ : 線膨張係数, c: 比熱,  $\rho$ : 密度,  $\lambda$ : 熱伝導係数,  $\beta$ : 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。

### 4.2 熱伝導解析結果

入熱量による影響について検討するため、前節で示した6通りの入熱量の場合を対象に熱伝導解析を実施した。なお、熱効率については、実験における溶融面積と解析結果から得られる溶融面積がほぼ一致するように、0.9と仮定した。その結果を最高到達温度の分布で整理したのが Fig. 15 である。実験および解析で用いた材料の融点は約 1450℃ であるため図中の 1450℃ 以上の部分は溶け込み形状を表している。なお、本研究に用いるような2次元解析では、加熱領域や加熱時間により溶け込み形状が変化すると考えられるので、本研究では、実験結果として得られる溶け込み形状と、解析結果として得られる溶け込み形状がほぼ一致するように、加熱領域および加熱時間を調整した。

### 4.3 溶接高温割れ解析のための諸パラメータについての検討

温度依存型界面要素法を用いた高温割れ解析において、

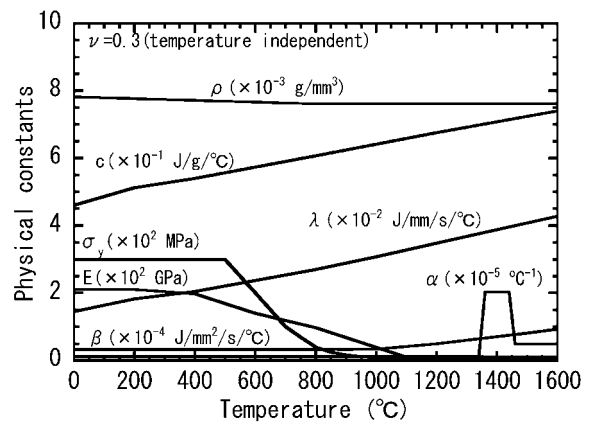


Fig. 14 Temperature dependent physical constants.

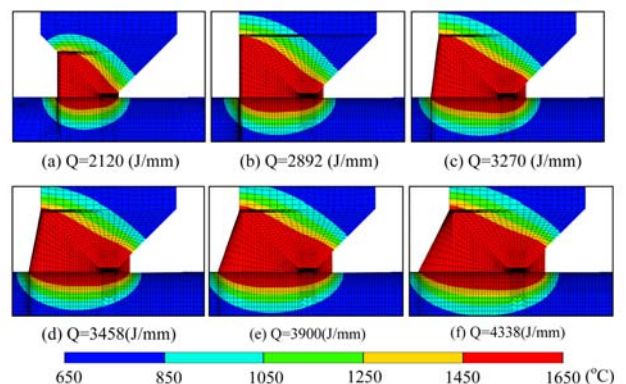


Fig. 15 Maximum temperature distribution of weld bead.

現象を定量的に予測するためには、冶金的なパラメータである寸法パラメータ  $r_0$ 、BTR 温度幅、および 2 次元解析のために仮定された仮想拘束部の剛性  $E_0$  を決定する必要がある。これらのパラメータを決定する方法について以下で検討を行う。

BTR 温度幅は、Trans-Varestraint 試験などを実施し、割れが発生する温度域を測定することにより決定することができる。本研究における BTR 温度幅は、1350℃ から 1450℃ までの 100℃ と仮定した。

次に、寸法パラメータ  $r_0$  と仮想拘束部の剛性  $E_0$  の決定方法について検討する。寸法パラメータ  $r_0$  は、過去の研究<sup>3,4)</sup>により、割れ易さを決めるパラメータであることが示されている。一方、今回導入した仮想拘束部は、前述の通り、溶接方向前後部からの 3 次元的な拘束の影響を模擬しており、その値が大きいくほど、溶接金属部への拘束が大きくなり、割れが発生し易くなると推察できる。ただし、実際には、溶接方向前後部から受ける溶接部近傍の拘束状態は非常に複雑なため、仮想拘束部の剛性  $E_0$  によりそれらの状態を完全に表現するのは困難である。そこで、本研究では、別途実施した解析結果を基に、仮想拘束部のおおよその剛性  $E_0$  を決定した上で、割れ易さの指標である寸法パラメータ  $r_0$  の値を実現現象と合致するように設定することで、本研究の主たる目的である、溶接条件や溶け込み形状等が割れに及ぼす影響について検討できるようにした。すなわち、寸法パラメータは  $r_0=0.115$  mm、仮想拘束部のヤング率は  $E_0=1$  GPa を基本条件として用いた。次節では、これらの値の妥当性について検証する。

#### 4.4 寸法パラメータ $r_0$ が割れに及ぼす影響

Fig. 16 に寸法パラメータ  $r_0$  が割れに及ぼす影響を示す。横軸は寸法パラメータ  $r_0$  を示し、縦軸は入熱量  $Q$  を示す。図中の  $r_0$  は 0.085 mm～0.125 mm の範囲内で 5 通りに変化させた。また、図中の○印は割れが発生しない条件を示し、▲印は梨形ビード割れが発生する条件を示している。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、図中の  $r_0=0.115$  mm の場合に注目すると、 $Q=2120$  J/mm の場合のみで梨形ビード割れが発生し、それより大きな入熱量  $Q$  の場合には、割れが発生していないことが確認できる。この結果は、Fig. 4 に示す実験結果の傾向と一致すると言える。なお、 $r_0=0.095$  mm および  $Q=3270$  J/mm の場合においては、割れ発生傾向の強い条件領域にもかかわらず割れは発生して無いが、この理由としては、割れの発生が、入熱量だけではなく、溶け込み形状などのその他の因子にも影響されることを示している。

ここで示したように、一連の実験およびそれに対応した高温割れ解析を実施することにより、割れ発生条件が実験結果に対応する寸法パラメータ  $r_0$  を決定することができ、その値を用いることで、他のパラメータの影響についても

検討することが可能となる。

### 4.5 溶接諸条件が割れに及ぼす影響

#### 4.5.1 入熱量と溶け込み形状のアスペクト比の影響

第 2 章では、入熱量  $Q$  と溶け込み形状のアスペクト比  $\eta$  が割れに及ぼす影響について実験結果を基に検討を行った。本項では、これに対応した溶接条件を用いて高温割れ解析を実施した。その結果を Fig. 17 に示す。左図は、各入熱量に対応した変形図および最高到達温度分布を示し、右図はそれぞれの入熱量に対応した溶け込み形状を示している。ここで示した解析結果における溶接金属量および裏波量の値は、Fig. 7 および Fig. 8 中の直線上の値を用いているため、実験結果との間に少々のばらつきが認められるが、両者は概ね一致していると考えられる。なお、ここで示した 6 条件の中で、最も入熱量の小さい  $Q=2120$  J/mm の場合のみにおいて、図中に示すような梨形ビード割れが発生した。

次に、入熱量  $Q$  および溶け込み形状のアスペクト比  $\eta$  が割れに及ぼす影響について調べた結果を Fig. 18 に示す。この結果とそれに対応した実験結果である Fig. 4 を比較すると、Fig. 18 に示す計算結果におけるアスペクト比  $\eta$  の方が実験結果に比べ相対的に小さいが、アスペクト比  $\eta$  が大きい場合、および入熱量  $Q$  が大きい場合に割れが発生していない点において、両者は良好に対応していると言える。なお、計算結果においては、図中 (a), (b) で示される入熱量  $Q=2892$  J/mm および  $Q=3270$  J/mm の場合において、割れが発生しているが、この理由については、次項で詳しく説明する。

#### 4.5.2 裏波ビード脚長の影響

Fig. 18 を裏波ビード脚長  $P_b$  で整理した結果を Fig. 19 に示す。縦軸は溶け込み形状のアスペクト比  $\eta$  を示し、横軸は裏波ビード脚長  $P_b$  を示す。この結果より、1 ケースだけ例外は認められるものの、裏波ビード脚長  $P_b$  がゼロより大きい、すなわち裏波ビードが発生した場合に割れは認められ

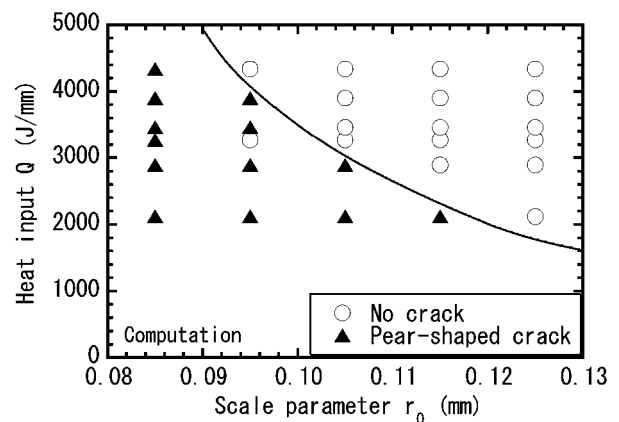


Fig. 16 Influence of heat input  $Q$  and scale parameter  $r_0$  on the formation of hot cracking.

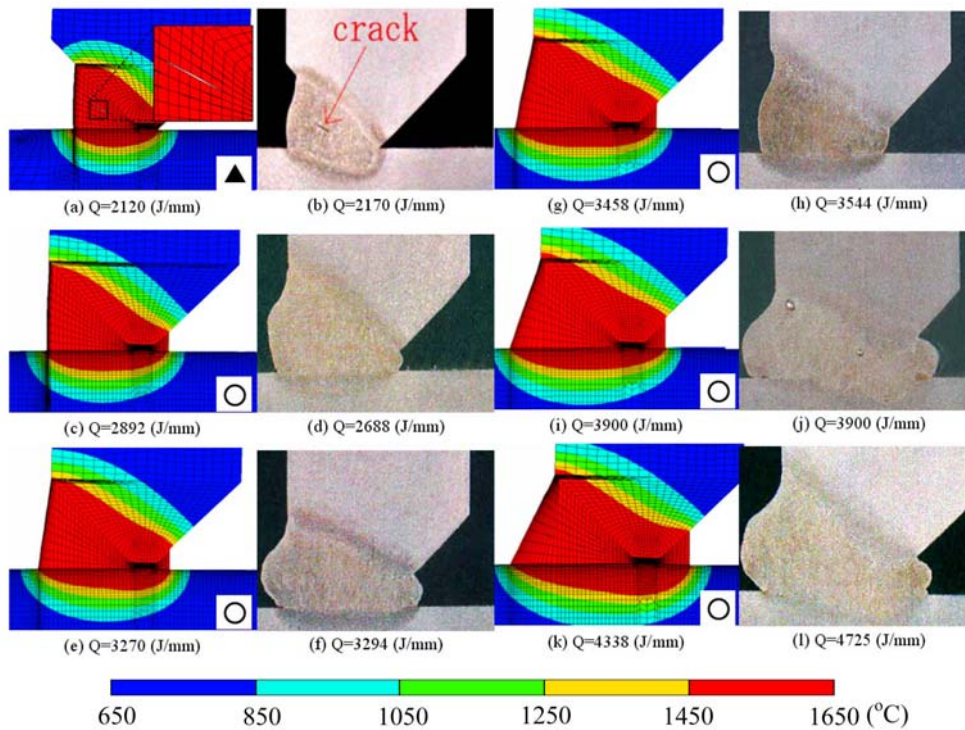


Fig. 17 Maximum temperature distribution and deformation with hot cracking and macroscopic photos of transverse cross section.

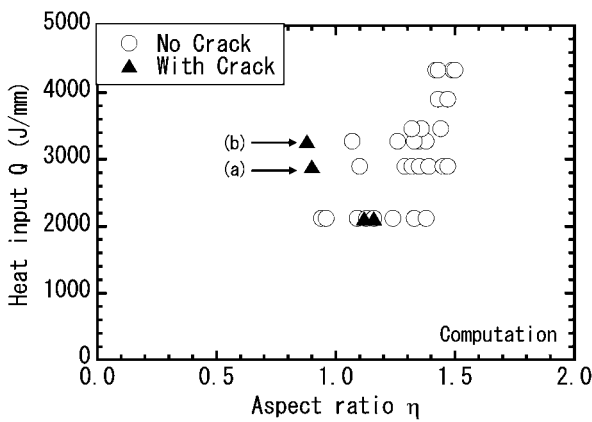


Fig. 18 Influence of heat input  $Q$  and aspect ratio of penetration shape  $\eta$  on the formation of hot cracking.

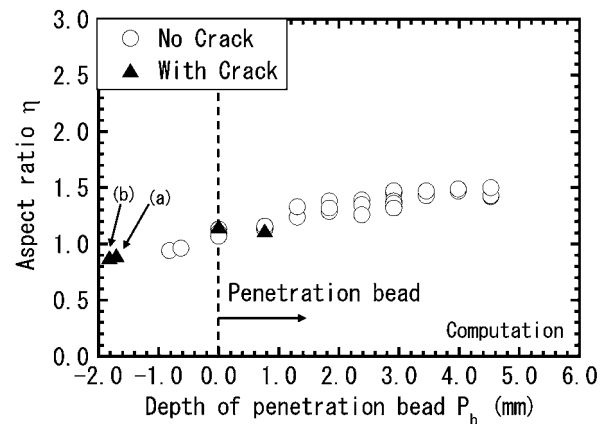


Fig. 19 Influence of aspect ratio of penetration shape  $\eta$  and penetration bead  $P_b$  on the formation of hot cracking

ない事が確認できる。この結果は、第 2 章 Fig. 9 で示した実験結果と同様の傾向である。この理由としては、裏波ビードが発生することで、溶接金属部が溶接ルート部から受ける拘束が低下するためと考えられる。したがって、Fig. 18 および Fig. 19 (a), (b) のケースのように、溶け込み不良などで、裏波が十分に形成されない場合において梨形ビード割れが発生する可能性が高いと考えられることから、大電流パルス MAG 溶接法において割れを防止するためには、裏波ビードが出るように溶接ルート部を十分に加熱することが重要であると結論づけられる。一方、小熱量の場合においても、十分な裏波が得られるならば割れは発生し難い傾向にあると考えることができる。

本項で考察した内容は、これまで、狭開先溶接等で指摘

されてきた、“溶け込み形状のアスペクト比が大きいほど割れが発生しやすい” という知見<sup>2)</sup>とは逆の傾向を示すが、この傾向は、裏波が発生する完全溶け込み溶接ゆえの優位性を示している。このことは、深い溶け込みが得られる溶接法、例えば、レーザー溶接法や電子ビーム溶接法においても同様の結果が得られる可能性を示唆するものであり、今後の検証を待ちたい。

## 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、温度依存型界面要素を用いた溶接高温割れ解析を実施し、割れに及ぼす諸因子の影響について検討を行った結

果、以下の結論を得た。

1. 温度依存型界面要素を用いた溶接高温割れ解析により、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を再現することができた。
  2. 溶接高温割れ解析法を用いることで、梨形ビード割れに及ぼす諸因子の影響について検討できること確認し、その手順を示した。
- 実験およびそれに対応した溶接高温割れ解析を実施した結果、以下の結論を得た。
3. 割れへの影響の大きな因子として、入熱量  $Q$ 、溶け込み形状のアスペクト比  $\eta$ 、および裏波ビード脚長  $P_b$  が挙げられる。
  4. 今回実施した実験および解析において、入熱量が 2400 J/mm 以上且つ裏波ビード脚長が 1 mm 以上ある場合には、割れが発生し難いことを確認した。
  5. 梨形ビード割れを防止するためには、裏波ビードを発生させることが効果的であることが分かった。そのため、施工時においては、十分な入熱を溶接ルート部に与え、裏波ビードを大きく形成させることが重要であると考えられる。

## 謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金（若手研究 (B)、課題番号 16760655）の援助で行った。ここに感謝の意を表します。

また、研究当時、大阪府立大学 大学院生であった野田裕久君には解析の際に御協力頂き、感謝申し上げます。

## 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) 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)
  - 3) 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)
  - 4) 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)
  - 5) 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)
  - 6) SENDA Tomio, MATSUDA Fukuhisa, TAKANO Genta, WATANABE Kiyoshi, KOBAYASHI Tadaaki and MATSUZAKA Takeshi: Fundamental Investigations on Solidification Crack Susceptibility for Weld Metals with Trans-Varestraint Test, Trans. of the Japan Welding Society, Vol.2 (1971) No.2, pp.141-162.
  - 7) SENDA Tomio, MATSUDA Fukuhisa, TAKANO Genta: Studies on Solidification Crack Susceptibility for Weld Metals with Trans-Varestraint Test (2): Investigation for Commercially Used Aluminum and Aluminum Alloys, Vol.42 (1973) No.1, pp.48-56.
  - 8) Yoshida Toshiro, Abe Takeshi, Onoue Hisahiro: On the Study of Restraint and Residual Stress due to Welding on Erecting Butt Joint of Ship's Hull (Report No.1): Relation between restraint and residual welding stress obtained by the new experimental "Restrained-Joint" method proposed by the authors (1960) pp.223-237.
  - 9) Ueda Yukio, Fukuda Keiji, Kim You Chul, Koki Ryoichi: Characteristics of Restraint Stress-strain of the Slit Weld in a Finite Rectangular Plate and the Significance of Restraint Intensities as a Dynamical Factor, (1982) pp.636-643.

