- 2) H. Tada, P. Paris & G. Irwin; The Stress Analysis of Cracks Handbook, Del Research Corporation, 1973
- 3) 回転円板式高速衝撃試験機について: 船研報告, 第15巻, 第4号 (昭和53年7月)
- 4) 北村 茂, 中村正久, 呂 芳一: 溶接構造用鋼の引張破壊挙動における衝撃速度の影響, 船研報告, 第15巻, 第2号 (昭和53年3月)
- 5) 大塚昭夫, 西村誠二, 宮田隆司, 笠井 登: 予き裂端からの破壊発生におよぼすひずみ時効の影響, 日本造船学会論文集, 139 (1976), P, 275
- 6) J 積分破壊基準に関する研究: JI 委員会報告書, 日本溶接協会, 昭和54年2月
- 7) Rice, J.I., Paris, P.C. and Markle, J.G.: Some Further Results of J-Integral Analysis and Estimates, ASTM STP 536 (1973), p. 231

多層かど継手部の溶接割れに関する研究*

—サブマージアーク溶接と被覆アーク溶接の比較—

上田幸雄**, 福田敬二**, 西村岩夫***, 飯山英明***, 千葉尚道***

Weld Cracking in Mutipass Welded Corner Joint*

—Comparison of Submerged Arc Welding with Covered Arc Welding—

by Yukio Ueda**, Keiji Fukuda**, Iwao Nishimura***,
Hideaki Iiyama*** and Naomichi Chiba***

Lamellar tearing of opening type and root cracking occasionally occur in multipass welded corner joints.

In this paper, the influence of welding methods such as submerged arc welding (SAW) and covered arc welding (SMAW) is investigated on the occurrence of these weld cracks. The main results obtained in this study are as follows.

- (1) When SAW is applied, the transverse welding residual stress (σ_z) is less on the edge surface of the vertical plate and the lamellar tearing is less probable to occur in comparison with SMAW.
- (2) By SAW, σ_z induced at the root is less and root cracking is less probable to occur against SMAW.

Accordingly, in order to prevent occurrence of the weld cracks in multipass welded corner joints, it is effective to use SAW whose deposited metal weight per unit welding pass is large and which enables to fill up a given groove with smaller number of passes.

1. 緒 言

橋梁, 産業機械などで用いられているかど継手ではルート割れおよび溶接熱影響部から離れた位置で開口状のラメラテアが発生することがある。著者はこれに関連して一連の研究を行ってきた。まず初めに, 被覆アーク溶接の場合についてルート割れおよびラメラテア発生におよぼす曲げ拘束度の影響を調べ¹⁻³⁾, さらに, これらの割れ発生の力学的条件および防止対策の検討を行なった^{4,5)}。それによると, 曲げ拘束度が小さい場合には

ルート部には大きな引張残留応力が作用するためにルート割れが発生し, 曲げ拘束度が大きい場合には立板上端面に大きな引張残留応力が作用し開口状のラメラテアが発生することがある。このため, ルート割れ発生の可能性がある場合にはのど厚をできるだけ小さくするか適当な曲げ拘束度を与えること, 開口状ラメラテアの発生の可能性がある場合にはのど厚を小さくするかウェブ側に開先をとるかもしくはウェブをフランジより突出することなどによってこれらの割れ発生を防止できることを示してきた。

ところで, 一般的にサブマージアーク溶接は被覆アーク溶接に比べ入熱量が大きく, 1パス当りの溶着金属量が大きく, 所定の開先を少ないパス数(積層数)で溶接できる利点がある。

本報においては, サブマージアーク溶接の場合の多層

*原稿受付 昭和55年7月28日 (溶接構造研究委員会 (昭和55年6月) にて発表)

**正 員 大阪大学溶接工学研究所 Member, Welding Research Institute of Osaka University

***正 員 (株) 栗本鉄工所住吉工場 Member, Sumiyoshi Factory, Kurimoto Iron Works, Ltd.

Fig. 1 Apparatus for CJC-test

Fig. 2 View of CJC-test apparatus

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties

Material	Thickness (mm)	Chemical composition (wt %)											Y.P.	T.S.
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ceq	kg/mm ²	kg/mm ²
SM50B	40	0.12	0.45	1.46	0.021	0.018	0.015	0.026	0.018	0.001	0.061	0.39	40	53
Weld metal	—	0.078	0.36	1.54	0.019	0.009	0.063	0.025	0.021	0.001	0.014	0.36	50	58

Table 2 Welding conditions for CJC-test

Welding process	Preheating temp.	Interpass temp.	Heat input	Build-up process
Submerged arc welding	50 °C	50 °C	1st pass 45 kJ/cm 2nd~4th pass 58 kJ/cm	

かど継手部での溶接割れ発生について被覆アーク溶接と対比しながら検討を行なった。ここではまず、かど継手溶接割れ試験 (CJC 試験)³⁾ によって種々の曲げ拘束度のもとで溶接割れ発生状況を調べた。次に、これら2つの溶接法による溶接割れ発生の力学的条件を検討するためにかど継手部での溶接残留応力を有限要素法に基づく熱弾塑性解析法⁶⁾ によって解析し、応力弛緩法 (分割法)⁷⁾ によって測定した。さらに、これら2つの溶接法ではルート部の溶込み形状が異なり応力集中の程度も異なるものと考えられるので、溶接残留応力におよぼす溶接パス数 (積層数) の影響をより簡明にするために平板の突合せ完全溶込み溶接部のルート部のない場合について溶接残留応力の測定を行なった。

2. かど継手溶接割れ試験

2.1 供試材料および実験方法

溶接割れ試験は Fig. 1 および 2 に示すかど継手溶接割れ試験 (CJC-test) 装置³⁾ を用いて行なった。Fig. 1 に示すように試験片は拘束距離 l の位置でローラーで拘束され、この位置で角変形が零となるような曲げ拘束度 (K_B) を受けるが、引張拘束度は零である。

実験に用いた鋼材は板厚 40 mm の 50 kg/mm² 級高張

力鋼で母材および溶接金属の化学成分と機械的性質を Table 1 に示す。溶接はサブマージアーク溶接 (SAW) で Table 2 に示す条件で行なった。使用した溶接材料の拡散性水素量は 3.0 cc/100 g (JIS 法による) である。また、のど厚 h_T は 20 mm と 30 mm で、それぞれの溶接層数 (パス数) は 3 層 (4 パス), 5 層 (7 パス) である。

試験片は溶接完了後 84 時間 (3 日半) 以上拘束状態におき、5 ~ 7 断面で溶接割れの観察を行なった。

2.2 実験結果

サブマージアーク溶接 (SAW) の場合の CJC 試験結果を被覆アーク溶接 (SMAW) の場合³⁾ と比較してまとめたものを Fig. 3 に示す。図に示すように、SAW においては $h_T = 30$ mm の $K_B = 0$ の場合の一部でルート割れの発生が認められた他はルート割れおよびラメラテアの発生は認められない。Fig. 4 にはマクロ写真の例を、Fig. 5 にはルート部付近の拡大写真を示す。本試験におけるルート部の溶込み形状はほとんどの場合は Fig. 5 (a) に示すように曲率半径が大きくなめらかな形状を示していたが、ルート割れの生じたものについてだけ Fig. 5 (b) に示すように曲率半径が小さいことが認められた。また、Fig. 5 (c) には比較のために SMAW の場合を示す。この SMAW の場合の溶け込み形状がフランジ側に偏り曲率半径が小さいことが認められる。

3. かど継手における溶接残留応力

3.1 解析および測定方法

溶接応力の解析は試験片で単位溶接長を取出し、そ

Fig. 3 Relation between weld cracking and intensity of bending restraint

Fig. 4 Macro photographs of weldments

Fig. 5 Macro photographs near root

Fig. 6 Mesh division for analysis

の横断面内で行なった。解析はサブマージアーク溶接 (SAW) でのど厚が 20 mm の場合で行ない、その積層法および入熱量は Table 2 に示したものである。

温度解析は各溶接パスとも瞬間熱源とし、溶接アークの熱効率を90%とし、三角形差分法を用いて行なった。解析に使用した要素分割を Fig. 6 に示す。

溶接応力の解析は有限要素法に基ずく熱弾塑性解析によって平面応力状態で前報¹⁾と同様な方法で行なった。

溶接残留応力の測定は溶接後の試験片の溶接線中央部を薄い層に溶接線と直角な面で切断し、その薄い層 (厚さ: 10 mm 程度) の試験片の立板上端面および断面内にひずみゲージ (直交2軸, ゲージ長: 2 mm) を貼り応力弛緩法 (分割法)²⁾ によって行なった。したがって、測定された応力は溶接線方向の応力を解放した後の平面応力状態の値である。

解析および測定は、曲げ拘束度が大きい $K_B=1000 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{mm} / \text{mm} \cdot \text{rad}$ ($l=56 \text{ mm}$, 以下 $K_B=1000$ と呼ぶ) の場合と、最も小さい $K_B=0$ (曲げ拘束なし, $K_B=0$) の場合で行なった。

3.2 解析および測定結果

曲げ拘束度が大きい場合 ($K_B=1000$) の溶接線直角方向応力 (σ_x) のパス間温度における解析結果を Fig. 7 に示す。(ただし、4パスは室温における最終残留応力である) Fig. 7 (a) は立板上端面の分布で、トウから多少離れた位置にピークを有する分布をしており、そのピークは4パス目で最も大きな引張応力を示している。また、Fig. 7 (b) は立板の熱影響部に沿った σ_x の分布で、ルート部には常に大きな圧縮応力が作用している。

Fig. 8 には曲げ拘束度が小さい場合 ($K_B=0$) の σ_x の解析結果を示す。Fig. 8 (a) よりトウから多少離れた位置で比較的小さな引張応力が作用し、Fig. 8 (b) より、ルート部には常に小さい圧縮応力が作用している。

Fig. 9 には $K_B=1000$ および $K_B=0$ の場合の σ_x の解析結果と測定結果を示している。また、同図中には比較のために前報で行なった SMAW の場合の解析および測定結果も示している。図より、解析値と測定値はよく対応していることが認められる。SAW で $K_B=1000$ の場合、立板上端面の σ_x は引張で SMAW に比べ多少小さくなり、ルート部の σ_x は SMAW と同様に圧縮応力であることが認められる。一方、SAW で $K_B=0$ の場合、立板上端面の σ_x は SMAW と同様に小さく、ルート部の σ_x は SMAW では大きな引張応力であるの

Fig. 7 Transverse welding transient and residual stresses ($K_B = 1000 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{mm} / \text{mm} \cdot \text{rad}$)

Fig. 8 Transverse welding transient and residual stresses ($K_B = 0$)

とは反対に小さな圧縮応力になっていることが認められる。

4. 突合せ完全溶込み溶接部における溶接残留応力

4.1 実験方法

かど継手については前節でサブマージアーク溶接 (SAW) と被覆アーク溶接 (SMAW) での溶接線直角方向残留応力 (σ_x) の比較を行なったが、かど継手の部分溶込み溶接においては SAW と SMAW とでは Fig. 5

Fig. 9 Transverse welding residual stresses

に示したようにルート部の溶込み形状が異なり、応力集中の程度も異なるものと考えられる。したがって、ルート部の σ_x におよぼす溶接パス数 (積層数) のみの影響を定量的に調べるためには応力集中の差がない状態で比較検討することが必要である。

ここでは、ルート部などの応力集中部がない場合の平板の突合せ完全溶込み溶接部における溶接残留応力の測定を SAW と SMAW について行ない比較検討を行なった。

実験は外的拘束がない (引張および曲げ拘束度が零) の場合について行なった。ここで用いた鋼材および溶接材料は第2節の CJC 試験で用いたものと同一である。試験片形状を Fig. 10 に示すが、開先は U 形開先 (開先角度: 10° , ルート半径: 5 mm, SAW のルート面: 7 mm, SMAW のルート面: 2 mm) である。ここでは、裏あて材 (FAB-1) を用いた裏波溶接を Fig. 11 に示す条件で行なった。なお, SAW と SMAW の場合ともそれぞれの板厚に対して入熱量の総和はほぼ同一である。各パス溶接後角変形量の測定を行なった。

溶接完了後、試験片の表・裏面のビードを平滑に仕上げ応力集中部を取除いた。溶接残留応力の測定は第3節で述べたと同様な方法によって行なったので測定された応力は溶接線方向の応力を解放した後の平面応力状態の値である。

Fig. 10 Test specimen for measuring welding residual stresses

Fig. 11 Welding conditions for measuring welding residual stresses

Fig. 12 Relation between angular distortion and welding passes

4.2 実験結果

各溶接パスごとの角変形量の測定結果を Fig. 12 に示す。図より、SAW の場合は SMAW に比べ 1 パス当り

Fig. 13 Transverse welding residual stresses ($h=20$ mm)

Fig. 14 Transverse welding residual stresses ($h=30$ mm)

の角変形量は大きい、溶接完了後の最終角変形量は小さいことが認められる。

σ_x の測定結果を Fig. 13 および 14 に示す。Fig. 13 は板厚 (h) が 20 mm の場合で、板表面 ($Y=0$) での σ_x 分布はトウから多少離れた位置でピークを有する分布をしているが、この σ_x のピーク値は SAW の場合の方が SMAW に比べ多少小さいことが認められる。ルート部 ($X=0$; $Y=20$ mm) の σ_x は SMAW では大きな引張応力であるが、SAW では小さな圧縮応力であることが認められる。

Fig. 14 は $h=30$ mm の場合で, 板表面 ($Y=0$) での σ_x は $h=20$ mm の場合に比べ多少大きく, σ_x のピーク値は SAW の場合の方が SMAW に比べ多少小さいことが認められる。また, ルート部 ($X=0$; $Y=30$ mm), の σ_x は $h=20$ mm の場合に比べ大きく, SAW の場合の方が SMAW に比べ多少小さいがいずれの場合も大きな引張応力であることが認められる。

また, 板表面での σ_x 分布のピークの位置は SAW の場合の方が SMAW に比べ多少トウから離れることが認められる。

5. 考 察

まず, 多層かど継手部での開口状ラメラテアの発生について考察する。Fig. 3 に示した CJC 試験結果によると, 被覆アーク溶接 (SMAW) においては曲げ拘束度が大きくなると開口状ラメラテアが発生するが, サブマージアーク溶接 (SAW) においてはこの実験の範囲では発生は認められなかった。応力的にみると, Fig. 9, 13 および 14 に示したように SAW における立板上端面の溶接線直角方向残留応力 (σ_x) は SMAW の場合より減少していることが認められる。すなわち, SAW の場合の方が SMAW に比べ開口状ラメラテアが発生し難いことを示している。

次に, 多層かど継手部でのルート割れ発生について考察する。Fig. 3 に示した CJC 試験結果によると, SAW においては曲げ拘束度 (K_B) が零でのど厚 (h_T) が 30 mm の一部の場合においてのみルート割れが発生しており, 同一のど厚においては SAW の場合の方が SMAW に比べルート割れが発生し難い。応力的にみると, まず, Fig. 9, 13 および 14 に示したように, SAW の場合のルート部の σ_x はのど厚が 20 mm (3 層溶接) では小さな圧縮応力で, のど厚が 30 mm (5 層溶接) では大きな引張応力であるが SMAW の場合に比べ多少小さい。さらに, Fig. 5 に示したように, SAW の場合の方が SMAW に比べルート部の曲率半径が大きいことが多く, 応力集中の程度も小さい傾向が認められる。これら 2 つの点から SAW の場合の方が SMAW に比べルート割れが発生し難いものと考えられる。

しかし, SAW の場合において, Fig. 14 に示したように $K_B=0$ で $h=30$ mm でのルート部の σ_x は大きな引張応力であり, また, SAW のかど継手において $K_B=0$ で $h_T=30$ mm でのルート部の σ_x の測定結果は 37 kg/mm² 程度の大きな引張応力であった。これらのことから SAW で $K_B=0$ の場合, ルート部の σ_x は溶接パス数 (積層数) によって圧縮応力から引張応力へと大きく変化するが, その応力の符号の逆転は積層数が 4 層前後

のところであると考えられる。したがって, SAW においても K_B が小さい場合, のど厚が大きくパス数 (積層数) が多くなると, ルート部に引張応力が作用し, 溶込み形状によっては応力が集中し, ルート割れが発生する可能性があるものと考えられる。

以上述べたように, 入熱量が大きく 1 パス当りの溶着金属量が大きく溶接パス数 (積層数) が少なく溶接できる SAW の場合の方が SMAW に比べ, σ_x が小さく, 溶接割れが発生し難いものと考えられる。

また, 著者らがさきに報告⁸⁾ したように, 多層かど継手部での開口状ラメラテアおよびルート割れ発生に対しては, 拡散性水素量および予熱・パス間温度の影響は比較的小さく, 溶接による熱応力・ひずみが支配的要因であると考えられる。本報においても上述のように, 溶接割れ試験結果は応力的な観点からよく説明できる。

6. 結 言

本研究においては多層かど継手部での開口状ラメラテアおよびルート割れ発生に関して, サブマージアーク溶接 (SAW) と被覆アーク溶接 (SMAW) の場合について比較検討を行なった。

得られた結果の主なものを以下に要約して述べる。

(1) SAW の場合は SMAW に比べ, 立板上端面での溶接線直角方向残留応力 (σ_x) は小さく, 開口状ラメラテアが発生し難い。(Fig. 3 および 9 参照)

(2) SAW の場合は SMAW に比べ, ルート部の σ_x は小さく, ルート部の溶込み形状もなめらかなことが多く応力集中も小さいため, ルート割れが発生し難い。(Fig. 3, 5, 9, 13 および 14)

(3) SAW で曲げ拘束度 (K_B) が小さい場合, ルート部の σ_x はパス数 (積層数) が少ないと圧縮応力を示すが, パス数が多くなると大きな引張応力となる。このため, のど厚が大きくパス数が多くなると溶込み形状によってはルート割れが発生する可能性がある。(Fig. 3, 5, 9, 13 および 14)

以上述べたように, 多層かど継手部において溶接割れ発生を防止するためには, 被覆アーク溶接を用いるよりも, 1 パス当りの溶着金属量が大きく少ないパス数 (積層数) で溶接可能なサブマージアーク溶接を用いる方が有効であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 佐藤邦彦, 西村岩夫, 飯山英明, 千葉尚道, 長谷部茂雄, 別所清, 松井繁朋, 堀川浩甫: 大形溶接構造物の溶接割れに関する研究 (その 6), JSSC, 11-118 (1975), 29-35
- 2) 佐藤邦彦, 松井繁朋, 西村岩夫, 飯山英明, 千葉尚道: 多層溶接の割れにおよぼす曲げ拘束度の影響について, 溶接学会誌, 45-1

- (1976), 952-960, Trans. JWS, 8-1 (1977) 42-49
- 3) 上田幸雄, 西村岩夫, 飯山英明, 千葉尚道; かど継手部のラメラテアおよびブルート割れ発生におよぼす曲げ拘束度の影響, 溶接学会誌, 46-7 (1977), 408-415, Trans. JWS, 8-2 (1977), 150-157
- 4) 上田幸雄, 福田敬二, 西村岩夫, 飯山英明, 千葉尚道; 多層かど継手部の溶接割れに対する力学的考察, 溶接学会誌, 48-1 (1979), 34-39, Trans. JWS, 8-2 (1977), 138-142
- 5) 上田幸雄, 西村岩夫, 飯山英明, 千葉尚道, 福田敬二; 多層かど継手部のラメラテア発生防止に関する研究, 溶接学会誌, 48-7 (1979), 525-531, Trans. JWS, 9-2 (1978), 128-133
- 6) 上田幸雄, 山川武人; 有限要素法による熱弾塑性挙動の解析, 溶接学会誌, 42-6 (1973), 567-577, Trans. JWS, 2-2 (1971), 90-100
- 7) 渡辺正紀, 佐藤邦彦; 溶接力学とその応用, 朝倉書店, 1965, 332-350
- 8) 上田幸雄, 西村岩夫, 飯山英明, 千葉尚道; かど継手部のラメラテアおよびブルート割れ発生・伝播挙動, 溶接学会誌, 49-9 (1980), 621-628

—— 溶 接 学 会 講 座 ・ 講 習 会 及 び 学 習 図 書 案 内 ——

〔Ⅰ〕講座・講習会

- 溶接技術基礎講座
溶接関連分野技術者及びフレッシュマン等を対象に溶接工学と技術の基本をわかり易く解説する。
毎年6月, 東京で開催
- 溶接工学夏季大学
溶接専門技術者を対象に溶接工学の基礎講義と工場見学を実施する。
毎年7月, 大阪(阪大)で開催(大阪大学溶接工学教室後援)
- 工高教員のための溶接工学夏期講座
工業高校教員のための研修講座(実習を含む)
毎年7月又は8月大阪(阪大)で開催
- 溶接技術講習会
一般技術者を対象に, プロフェッショナルな課題について講義及び討論を行う。
年度内1~2回, 東京及び大阪で開催

〔Ⅱ〕学習用図書

- 新版溶接技術入門
溶接施行技術者をこころざす人のための入門書
溶接学会編, 産報出版発行 定価 1,600円

2. 溶接工学の基礎(仮題)

大学・高専及び他専門分野技術者向溶接工学の標準教科書

溶接学会溶接教育委員会編, 丸善発行
(昭和56年度中に発行予定)

3. 溶接学会技術資料—JWS Bulletin—

溶接技術者向け, 溶接技術に関する資料を逐次刊行する。

生々文献サービス発行

No. 1 鋼材の溶接割れ(低温割れ) 定価 3,000円
鈴木春義 著

No. 2 鋼溶接部の熱ひずみ脆化(レビュー)
定価 3,000円

日本溶接協会HES委員会編

No. 3 溶接冶金レビュー(上) 定価 4,000円

No. 4 同 上(下) 定価 4,000円

溶接学会溶接冶金研究委員会編

No. 5 溶接部の超音波探傷試験ハンドブック

定価 2,000円

国際溶接学会(IIW)編(日本語版)

No. 6 実験溶接工学 定価 4,000円

大阪大学溶接工学教室編