多層かど継手部の溶接割れに対する力学的考察*

上田 幸雄**, 福田 敬二**, 西村 岩夫***
飯山 英明***, 千葉 尚道***

Dynamical Characteristics of Weld Cracking in Multipass Welded Corner Joint*

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, a relation between the occurrence of these weld cracks and the intensity of bending restraint is examined with the aid of the CJC-test. Furthermore, welding residual stresses in corner joints are analyzed and measured. Dynamical conditions for the occurrence of these weld cracks are investigated.

The summary of the results obtained from this study are as follows.

- (1) In the case where the intensity of bending restraint is large: The lamellar tearing of opening type occurs at the position about 10 mm away from the toe, but root cracking does not occur. Large tensile welding residual stresses are induced on the edge surface of the vertical plate at the position about 10 mm away from the toe, but large compressive stresses are induced near the root.
- (2) In the case where the intensity of bending restraint is small: The lamellar tearing does not occur but root cracking occurs. Tensile stresses on the edge surface are less than those in the case of the intensity of bending restraint being large, but very large tensile stresses are induced near the root.

Accordingly, the tendency of the occurrence of weld cracking in multipass welded corner joints is closely related to welding residual stress distribution, and can be explained well from the dynamical point of view.

1. 緒 言

橋梁や産業機械などにおいては厚板のかど継手が用いられることがある。この継手では多層溶接によってルート割れの他に熱影響部から離れた位置で開口状の割れが発生することがある。この割れはテラス・ウォールの階段状を示しており、ここではこの種の割れをラメラテアと呼ぶ。

これらの開口状のラメラテアやルート割れは継手の力学的状態の相違により全く異なった位置で割れが発生しており、この問題に対する力学的検討はその割れ発生機構を把握する上で重要である。しかし、これまでそのような面からの研究はあまりなされておらず、これらの割れ発生に対する力学的条件が明確にされていない。

本報告においては、まず、実験によって種々の外的拘

束(曲げ拘束^{1,2)})の下で多層かど継手部での割れ発生状況を調べた。さらに、溶接部に生じる過渡および残留応力を有限要素法に基づく熱弾塑性解析法³⁻⁶⁾によって解析し、残留応力を応力弛緩法(分割法)によって測定した。これらの実験および解析によって、割れ発生機構を究明し、その力学的条件の検討を行なった。

2. 実験方法および結果

2.1 実験方法

本報告においては、かど継手部でのラメラテアとルート割れ発生を同時に調査できる「かど継手溶接割れ試験装置(Corner Joint Weld Cracking Test Apparatus, CJC-test apparatus)⁷⁾」と呼ぶ装置を用いて実験を行なった。この試験装置を Fig. 1 に示す。図に示すように試験片は拘束距離 l の位置でローラーによって拘束されているため、この位置で角変形が零となるような曲げ拘束を与えるが、引張拘束度は零である。曲げ拘束度 K_B の算定式を同図中に示す。

実験に用いた鋼材は板厚 40 mm の 50 kg/mm² 級高張

*原稿受付 昭和52年6月2日(昭和52年度春季シンポジウムにて発表)

**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 Member, Kurimoto Iron Works, Ltd.

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties

Material	Thick. (mm)	Chemical composition (wt %)											Y.P. kg/mm ²	T.S. kg/mm ²
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ceq		
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 M.	—	0.075	0.55	0.96	0.011	0.007	0.014	0.020	0.019	0.001	0.008	0.26	48	56

Table 2 Welding conditions

Welding process	Preheating temp.	Interpass temp.	Heat input	Build-up process
Covered arc welding	50 °C	50 °C	22000J/cm	ht=20mm

Fig. 1 Apparatus for CJC-test

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。溶接は被覆アーク溶接で Table 2 に示す条件で行なった。使用した溶接棒は棒径 5 mm で水素レベル H は 10 cc/100 g と一部 4 cc/100 g のものである。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 5 層 (9 パス), 8 層 (19 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 断面で溶接割れの観察を行なった。

溶接熱サイクルの測定は Fig. 1 に示すように溶接線中央部の立板上端面で熱電対を用いて行なった。

溶接残留応力の測定は溶接完了後溶接線中央部を薄い層 (厚さ 9 mm 程度) に溶接線と直角な面で切断し、その層の立板上端面と横断面内にひずみゲージを貼り応力弛緩法 (分割法) によって行なった。したがって、測定される応力は平面応力状態の値である。

2.2 実験結果

溶接割れを観察した結果、開口状のラメラテアとルート割れが認められた。これらの割れの例を Photo. 1, 2 に示す。また、種々の曲げ拘束度の下で行なった CJC 試験結果をラメラテア、ルート割れそれぞれの平均割れ深さと曲げ拘束度の関係で整理したものを Fig. 2 に示す。

Photo. 1 Macrograph of lamellar tearing ($h_T=30$ mm) **Photo. 2** Macrograph of root cracking ($h_T=20$ mm) **Fig. 2** Relations between intensity of bending restraint and weld cracking

す。図より、曲げ拘束度が大きい領域でラメラテアが、小さい領域でルート割れが発生していることが認められる。

したがって、かど継手部に発生する溶接割れは曲げ拘束条件に密接に関連しているものと考えられる。

開口状のラメラテアの発生位置を变量とした度数分布を Fig. 3 に示す。溶接によって立板の開先側の板表面は溶込むために溶接終了後のトウの位置は元の立板表面から平均して 4 mm 程度板厚中央部に寄ることが認められた。したがって、板厚中央は Fig. 3 に示すようにトウから 16 mm 程度の位置になる。Fig. 3 より、開口状のラメラテアの発生位置はトウから 10 mm 程度離れたところで平均値を示しており、この位置は溶接熱影響部でもなく、板厚中央でもないことが認められる。

Fig. 3 Frequency distribution histogram with respect to location of lamellar tearing

Photo. 3 Sulphur print of steel plate used

ラメラテアの発生は鋼材のサルファの分布状態に影響されるものと考えられる。⁸⁻¹⁰⁾ 本試験に用いた鋼材のサルファプリントを Photo. 3 に示す。写真より、この鋼材では表面部に比べ内部の方に伸長した MnS 系介在物が平均的に多く存在していることが認められる。

なお、溶接熱サイクル測定結果と溶接残留応力測定結果は後の解析結果と比較して示す。

3. 熱弾塑性応力解析

3.1 解析条件

前節の実験結果から判るようにかど継手部に発生する

溶接割れに直接影響を与える応力成分は溶接線直角方向のものである。そこで、本報告では単位溶接長を取り出し、試験片横断面内を解析した。解析はのど厚が 20mm 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、熱効率を 80% 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. 4 に示す。なお、物理定数の温度依存性は文献¹¹⁾ による。

Fig. 4 Mesh division for analysis

得られた温度解析結果と Fig. 5 に示す材料の機械的性質を用いて熱弾塑性応力を平面応力状態で解析した。また、多層溶接においては単層の場合と異なり、すでに溶接によって応力を有している領域が後続の溶接によって剛性を失ない、応力を一度解放することがあるが、この現象は解析に考慮されている。⁵⁾

Fig. 5 Temperature dependencies of mechanical properties

外的拘束条件として、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, $K_B=0$) の場合を選び、この両者の条件下で解析を行なった。

3.2 解析結果

まず、温度の解析結果と実験結果の比較を行なう。

Fig. 6 は立板のトウ付近における各パスの溶接熱サイクル、Fig. 7 は立板上端面の温度分布の例を示す。これらの図より冷却過程の熱サイクルおよび温度分布の解析値と測定値はよく対応しており、解析条件およびその結果がほぼ妥当なものと考えられる。

Fig. 6 Weld thermal cycles

Fig. 7 Temperature distributions on edge surface of vertical plate

次に、溶接応力の解析結果を示す。Fig. 8 は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値 (但し、9パスのみ室温) を示す。Fig. 8 (a) は立板上端面の分布で4層目 (第6パス) から5層目 (第9パス) にかけてトウから少し離れた位置で大きな引張応力が作用している。また、Fig. 8 (b) は立板の熱影響部に沿った応力分布を示しており、ルート付近には2パス目以後常に圧縮応力が作用している。

Fig. 9 は $K_B=0$ および $K_B=1000$ の場合の溶接線直角方向残留応力 (σ_x) の解析値と測定値を示している。図より、 $K_B=0$ の場合は立板上端面の応力は $K_B=1000$

Fig. 8 Transverse welding transient and residual stresses ($K_B=1000 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{mm}/\text{mm} \cdot \text{rad}$) (a) at $Y=0$ (b) at $X=0$

Fig. 9 Transverse welding residual stresses (a) at $Y=0$ (b) at $X=0$

の場合に比べ小さく, ルート部付近には大きな引張応力が作用している。

4. 考 察

溶接線直角方向残留応力 (σ_x) の解析結果と測定結果には Fig. 9 に示したように差が認められる。実験では立板上端面はガス切断されているので溶接による残留応力の他にこのガス切断による残留応力が存在するものと考えられる。ガス切断による残留応力の測定結果を Fig. 10 に示す。図より, 板厚中央部 ($X=10\sim 30$ mm) でのガス切断面の残留応力は 10 kg/mm^2 程度であることが認められる。したがって, この値を考慮すると残留応力の解析結果と測定結果はよく対応しているものと考えられる。また, Fig. 9 で $X=2 \text{ mm}$; $Y=0$ と $X=0$; $Y=2 \text{ mm}$ での σ_x の測定値に差が認められるが, これに関しても上述のガス切断残留応力による差と考えられる。

Fig. 10 Residual stresses due to gas cutting (at $Y=0$)

立板上端面の溶接残留応力は Fig. 8 (a), 9 (a) に示したようにトウから少し離れた位置にピークを有する分布をしている。溶接による収縮はX方向とY方向の成分からなるが, 前者による応力は溶接部から離れるにしたがって減少する。後者は立板上端面で局部曲げ変形を与え, 溶接部付近に圧縮, トウから離れた位置で引張の応力を作るものと考えられる。これらによって, 上述の残留応力分布を形成するものと考えられる。

$K_B=1000$ のように曲げ拘束度が大きい場合, Fig. 8 (b), 9 (b) に示したように, ルート部付近の溶接線直角方向応力 (σ_x) は大きな圧縮であり, ルート割れが発生し難いことを示している。これに対し, Fig. 8 (a), 9 (a) に示した立板上端面の σ_x は大きな引張であり, トウから少し離れた位置でかなり大きな値を示し, 開口状ラメラテア発生の危険性があることを示している。

他方, $K_B=0$ のように曲げ拘束度が小さい場合, 上述の場合 ($K_B=1000$) とは異なり, ルート部付近の過渡応力は常に引張で, 立板熱影響部に沿う残留応力分布 (Fig. 9 (b)) は解析値, 測定値ともルート部付近でかな

りの応力集中を受けている。これとは逆に, 立板上端面の残留応力分布 (Fig. 9 (a)) は $K_B=1000$ の場合に比べかなり小さい。したがって, K_B が小さい場合, 上述の K_B が大きい場合と全く逆の傾向で, ルート割れ発生の危険性がきわめて大きいトウから離れた位置での開口状のラメラテア発生の危険性がないことを示している。

以上のことを実験的にみると, Fig. 2 に示したように, ルート割れ, ラメラテア発生に対しそれぞれルート割れ発生限界曲げ拘束度 (K_{ber}^L), ラメラテア発生限界曲げ拘束度 (K_{ber}^R) が存在し, K_{ber}^L より小さい K_B でルート割れが発生し, K_{ber}^R より大きい K_B で開口状のラメラテアが発生する。

開口状ラメラテアの発生位置の平均値は Fig. 3 に示したように熱影響部でもなく, 板厚中央でもなく, トウから 10 mm 程度離れたところである。これは前述の立板上端面の残留応力はトウから 10 mm 程度離れた位置でかなり大きな引張応力を示していることとラメラテア発生に影響をおよぼすと考えられる伸長した MnS 系介在物が鋼材の内部に多く存在することによるものと考えられる。

このように, かど継手部に生ずる溶接残留応力分布はその曲げ拘束度の違いによりきわめて著しい変化を示し, 割れ発生の位置を大きく変える。このため, この種の継手の溶接割れの問題では溶接残留応力あるいは曲げ拘束度は割れ発生に影響をおよぼす重要な因子であると考えられる。

5. 結 言

かど継手部を多層溶接すると開口状のラメラテアおよびルート割れが発生する可能性がある。

本報告においては, これに関連して, まず実験により曲げ拘束度 (K_B) とこれらの割れとの関係を明らかにした。次に, 有限要素法に基づく熱弾塑性解析法によってこの継手に生ずる過渡および残留応力を解析し, 応力弛緩法 (分割法) によって残留応力の測定を行なった。これらにより, かど継手部に発生する開口状のラメラテアとルート割れ発生に対する曲げ拘束条件の相連の影響について検討を行なった。

得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1) 曲げ拘束度が大きい場合, かど継手溶接割れ試験 (CJC 試験) の結果によると, トウから 10 mm 程度離れた位置で開口状のラメラテアが発生するが, ルート割れは発生しない。(Fig. 2, 3) このことを応力的にみると, 立板上端面の溶接線直角方向の残留応力 (σ_x) はトウから 10 mm 程度離れた位置でかなり大きな引張応力であるが, ルート部付近には逆に大きな圧縮応力が働いている。(Fig. 8, 9)

(2) 曲げ拘束度が小さい場合, CJC 試験結果によると, 開口状のラメラテアは発生しないが, ルート割れが発生する。(Fig. 2) 応力的には, 立板上端面の σ_x は K_B が大きい場合に比べ低下するが, ルート部付近には大きな引張応力が働いている。(Fig. 9)

以上述べたように, 多層かど継手部での溶接割れ発生の傾向は溶接残留応力分布と良く対応しており, 力学的な観点からよく説明できることが明らかになった。

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, 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, 45-11 (1976), 952-960, Trans. JWS, 8-1 (1977), 42-49
- 3) Y. Ueda and T. Yamakawa; Analysis of Thermal Elastic-Plastic Stress and Strain during Welding by Finite Element Method, Trans. JWS, 2-2 (1971), 90-100
- 4) 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
- 5) 上田幸雄, 高橋英司, 福田敬二, 中長啓治; 極厚板の多層突合せ溶接における過渡および残留応力, 溶接学会誌, 44-6 (1975), 466-474, Trans. JWRJ, 3-1 (1974), 59-67
- 6) Y. Ueda, E. Takahashi, K. Fukuda, K. Sakamoto and K. Nakacho; Transient and Residual Stresses from Multi-pass Weld in Very Thick Plates and Their Reduction from Stress Relief Annealing, Proceeding of Third International Conference on Pressure Vessel Technology, Japan, 1977, 925-933
- 7) 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), 122-129
- 8) 金沢正午, 山戸一成, 井上尚志, 橋本勝邦; ラメラテアの発生要因について, 溶接学会誌, 45-2 (1976), 128-135
- 9) J. C. M. Farrar, R. E. Dolby and R. G. Baker; Lamellar Tearing in Welded Structural Steels, Weld. J., 48-7 (1969), 274S-282S
- 10) D. N. Elliott; A Fractographical Examination of Lamellar Tearing in Multirun Fillet Welds, Metal Const., 1-2 (1969), 50-57
- 11) 上田幸雄, 福田敬二, 劉人傑; スリット溶接による残留応力の発生機構に関する研究, 溶接学会誌, 44-7(1975), 580-587

国際溶接会議 (IIW) 第 XIII 委員会文献集 (1977年度版)

(略称: IIW-XIII. 1977版)

編集: 日本溶接会議 (JIW) 第 XIII 委員会 発売: 生々文献サービス

● 新 刊 案 内

FATIGUE TESTING (疲労試験) をテーマとする, IIW 第 XIII 委員会文献集1977年度版は, 年次大会に各国から提出された溶接継手および母材の疲労試験関係の論文, 調査報告, 討議記録等49点を収録してあります。なお, 日本から提出された文献につきましては, 著者より各50部の寄贈を受けましたので, その費用は頒価に入れておりません。

■体裁 A4版, 青焼複写等, クロス巻上製本, 860頁英文, ■頒価 22,000円 (送料共) ■申込先 生々文献サービス (溶接学会文献サービス係) ☎151 東京都渋谷区千駄ヶ谷3-3-4 電話 03・478・4062

■送金方法 現金書留・小切手は申込先へ。銀行振込は三菱銀行新宿支店「生々文献サービス」(当座) No. 9202993 へお願いします。■配本方法 11月末日迄のお申込みに対しては12月下旬配本。それ以降は, 翌月下旬の配本になります。■発行部数 50部 (先着順)

生々文献サービス出版物 申 込 書 年 月 日

書 名	IIW-XIII, 1977版	部数	部
		頒価	円
申込者			
	☎ 電話	内 線	
通信欄			

受付番号		請求書	月 日	領収書	月 日	発送日	月 日
------	--	-----	-----	-----	-----	-----	-----