

レ型開先多層溶接における 折れ込み(フォールディング)発生機構の解明

間 瀨 秀里*・狩 峰 健一*

Formation Mechanism of Folding in Multi-Layer Welds with Single-Bevel Groove

Hidesato MABUCHI and Kenichi KARIMINE

Synopsis : Very small flaws are occasionally observed in the root of the penetration beads (uranami beads) of multi-layer welds with single-bevel groove. The formation mechanism of these flaws has been studied to elucidate whether the flaws are defects or not toward the increased severity of safety requirement under earth-wide environmental issues.

The results show that the flaw is not a weld crack but a folding to be grown up from a buckled weld zone at the root of non-symmetric throats in the first layer of penetration beads, where stresses are concentrated by the thermal contractions of weld metals after the second layers. It is demonstrated to prevent effectively the formation of foldings by the introduction of newly developed welding method.

Key words : folding ; multi-layer welds ; single-bevel groove ; penetration bead ; uranami bead ; the throat ratio of penetration bead ; weld root ; weld crack ; steel structure ; safety requirement.

1. 緒言

炭素鋼および低合金鋼の厚鋼板(板厚38mm以上)の溶接性の評価の一つとして用いるレ型開先多層溶接割れ試験法の解説には、ルート割れと紛らわしい溶接金属割れ状欠陥が説明されている¹⁾。

又、溶接構造物に対する非破壊検査技術の向上とあいまって、隅肉溶接のルート部に従来では検出されなかったような微小欠陥(細疵)が報告されている^{2,3)}。更に、Fig. 1 に示すようにレ型開先多層溶接における初層裏波ビードのルート止端部に発生した極めて微小な疵の観察結果がD.E. Williamsによって報告されている⁴⁾。観察した微小な疵はAWS D1.1等の検査基準⁵⁾に比べて十分小さいので、彼は本質的に溶接欠陥ではないと結論している。然し、これらの微小な疵の発生機構が未解明のため、本当に溶接欠陥でないかや有効な防止対策については明確にされていない。

一方、地球環境問題の深刻化に伴う大型鋼構造物に対する安全性の要求が厳格化する事を考慮すると、いかに微小な疵でも将来問題になる恐れがある。従って、それらが本当に溶接欠陥でないか否かを明らかにするためその発生機構の解明を試みた結果、微小な疵は割れ等の溶接欠陥ではなく折れ込み(以下、フォールディングと呼称)である事を明らかにするとともに、フォールディングの効果的な防止対策を確立した。

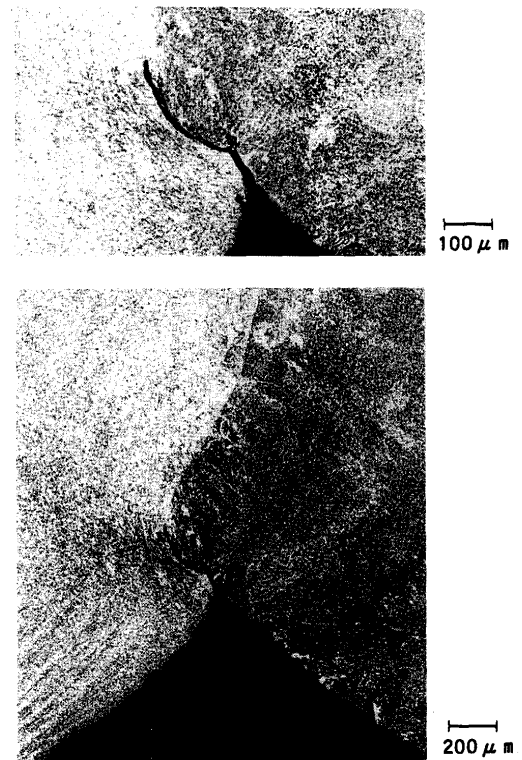


Fig. 1. An example of a very small flaw in the actual multi-layer welded joint with single-bevel groove.

2. 供試鋼および試験条件

供試鋼にはTMCP(加工熱処理: Thermo-Mechanical Control Process)製の490MPa級鋼材を用い, その化学成分をTable 1に示す。レ型開先多層溶接における初層裏波ビードのルート止端部に発生する微小な疵(折れ込み: フォールディング)を再現する平板組みによるレ型開先多層溶接試験(手動溶接)の試験体形状および寸法をFig. 2に示し, その標準の溶接条件をTable 2に示す。6層目を2パス振分け溶接とする6層7パスの多層溶接において, 各パスごとに3本の溶接棒を用いたビード継ぎによる溶接を行った。なお, 溶接棒は490MPa級鋼材用低水素系溶接棒L55SN(JIS Z3241 DL5016-4APO該当)であり, 350°Cの炉中で1時間以上保持し十分乾燥したものをを用いた。

多層溶接後に初層裏波ビードのマクロ組織観察およびミ

クロ組織観察により, ルート止端部近傍におけるフォールディングの発生状況を詳細に調査した。又, 溶接によるフォールディングの変化を観察するために, 6層目まで一層ごとに階段状に溶接して同様の調査を実施した。

更に, 初層溶接後に試験体の裏側にマイクروسコープ(倍率20倍)を設置して二層目以降の積層過程において, 初層裏波ビード部のルート止端部の変形挙動を録画しその観察を実施した。この録画再生画像において複数の基準点を標点としてFig. 3のように設定し, これらの標点間距離の変位を測定する事により, 初層裏波ビードの各位置における変位量とした。

3. 実験結果

3.1 フォールディングの再現と発生機構

Fig. 4にレ型開先多層溶接における初層裏波ビードのルート止端部に再現したフォールディングのミクロ組織写真を示す。Fig. 1に示す実構造物に発生した微小な疵とこの再現したフォールディングとは酷似しており, この小型溶接試験はフォールディングの再現試験として有効であると評価できる。

Fig. 5にマイクروسコープにより観察した初層裏波ビードの各位置における収縮変位量を示す。垂直側の変位は認め

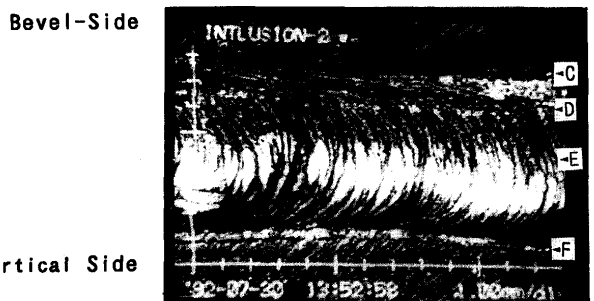
Table 1. Chemical compositions of steel plates used.

(mass %)							
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Remarks
0.09	0.23	1.40	.005	.001	0.17	0.27	TMCP

Table 2. The welding conditions of the standard method.

Layer	No of Pass	Electrode dia. (mm)	Current (A)	Volt (V)	Heat i/p (KJ/mm)
1st	1	3.2	120	23	1.6~2.2
2nd	1	4.0	160	24	2.4~3.0
3rd	1	4.0	160	24	3.0~3.8
4th	1	4.0	160	24	3.0~3.8
5th	1	5.0	250	25	2.5~3.3
6th	2	5.0	250	25	2.5~3.3

Remarks Preheat Temperature : 348°K
Interpass Temperature : 373~423°K



CD : Bead Root
CE : 1/2 Bead Width
CF : Full Bead Width

Fig. 3. An example of standard points in welded penetration beads to measure the thermal contraction.

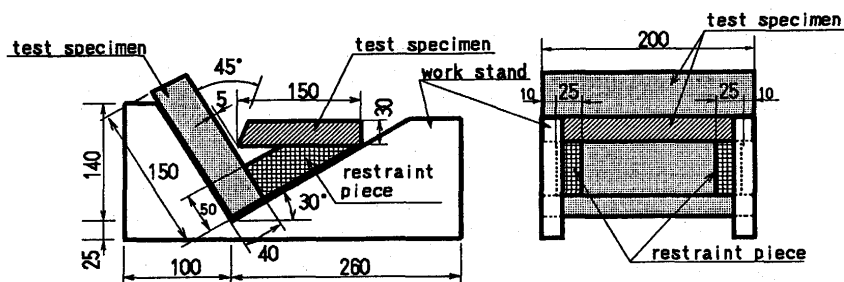


Fig. 2. Testing apparatus and its size of multi-layer welds with single-bevel groove to simulate a folding.

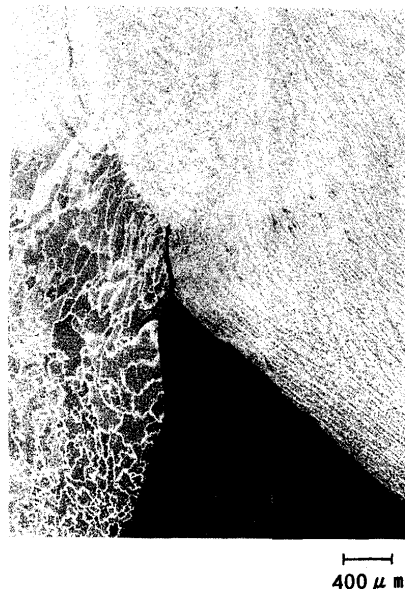


Fig. 4. The microstructures of a simulated folding.

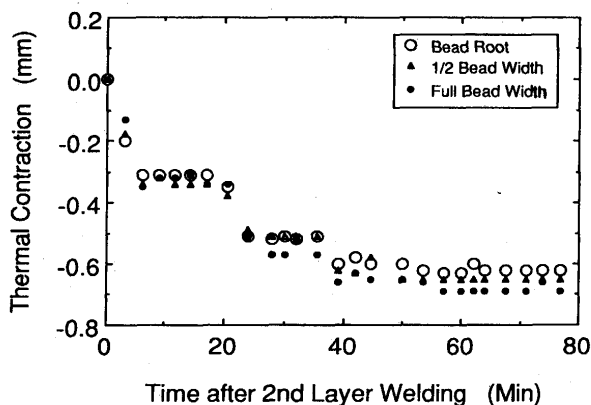


Fig. 5. Thermal contraction of welded penetration bead at the root of the first layer during welding after the second layers.

られず、ビード全幅および半幅の変位量はいずれもベベル側ルート止端部の局所的な変位量と一致している。更に、二層目溶接で最も大きな収縮変位を示し、三層目溶接から四層目溶接でも比較的大きな変位が認められるが、五層目溶接以降での変位は殆ど認められない。

Fig. 6 に階段状に 6 層目まで溶接した時のフォールディング長さの変化を示す。溶接層数の増加とともにフォールディングは明らかに進展しており、ルート止端部における変位量の観察結果とよく一致している。

Fig. 7 に裏波ビードの形成時に発生したスパッタがルート止端部に残留している場合のミクロ組織写真を示す。写真観察の結果ではルート止端部にフォールディングが全く発生していないが、これは二層目以降の溶接で発生した圧縮応力による塑性変形に対して、初層溶接で偶発的にルート止端部に残留したスパッタがストッパーの役割を果たして、

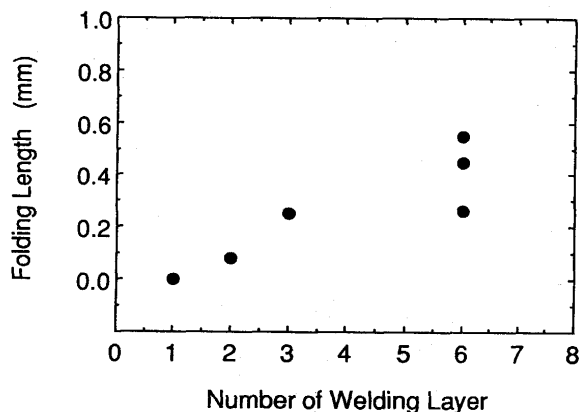


Fig. 6. Changes in folding length with increased welding layers.



Fig. 7. The microstructures at the root of penetration beads with a sputter in the first layer.

フォールディングの発生を防止したものと考えられる。

ここでFig. 8 に示すように、運棒法から $ab \leq cd$ となるためレ型開先多層溶接の初層裏波ビードにおける垂直側開先面ののど厚に対する斜め側開先面ののど厚の割合を左右のど厚比(The Throat Ratio of Penetration Beads)と定義する。フォールディング支配因子について詳細に解析した結果、この左右のど厚比の影響が最も顕著である事が判明した。

Fig. 9 に示すように、標準溶接(Table 2 参照)におけるフォールディング長さは左右のど厚比と強い相関を持ち、初層裏波ビード形状の非対称性がフォールディングの発生に大きな影響を与える事が分かる。

以上の組織観察およびマイクロスコープによる観察結果を総合すると、このフォールディングは割れ等の溶接欠陥ではなく、初層裏波ビード形状の非対称性に起因して、第二層目以降の溶接金属の凝固または熱収縮による圧縮応力

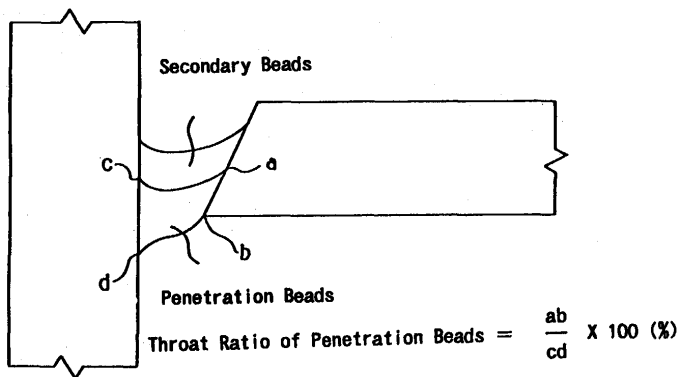


Fig. 8. The definition of the throat ratio of penetration beads.

Table 3. The welding conditions of the newly developed method.

Layer	No of Pass	Electrode dia. (mm)	Current (A)	Volt (V)	Heat i/p (KJ/mm)
1st	1	3.2	120	23	2.0~2.4
2nd	2	3.2	120	23	0.7~1.2
3rd	2	3.2	120	23	0.7~1.2
4th	1	4.0	160	24	2.0~2.8
5th	1	5.0	250	25	2.3~3.0
6th	2	5.0	250	25	2.5~3.3

Remarks Preheat Temperature : 348°K
Interpass Temperature : 373~423°K

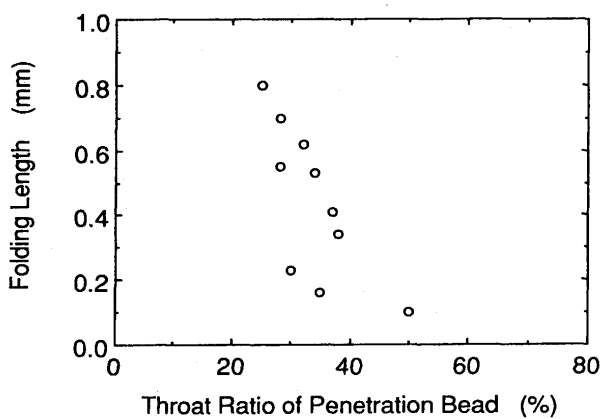


Fig. 9. The influence of the throat ratio of penetration beads on folding length in the standard method.

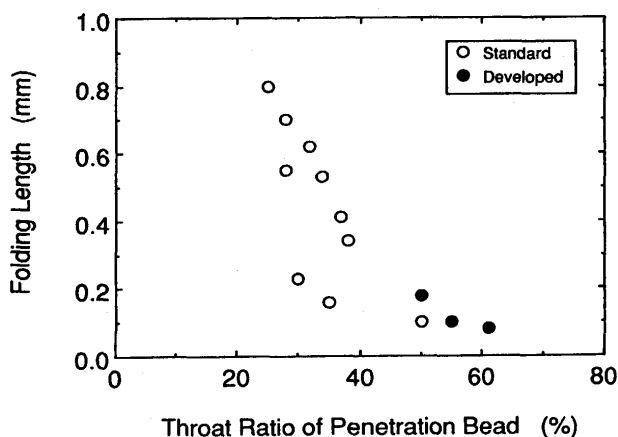


Fig. 10. The influence of the throat ratio of penetration beads on folding length in the newly developed method compared with the standard method.

か³のど厚の小さい方の裏波溶接ビードのルート止端部に集中して、その結果発生する座屈が溶接層数の進行とともに進展した折れ込みであると結論できる。

3・2 フォールディングの防止対策

上述したフォールディングの発生機構を考慮するとその防止対策には次の3点が有効と考えられる⁹⁾。①第二層目以降における溶接金属による圧縮応力の低減または分散、②その圧縮応力に耐えうる初層裏波ビードのルート止端部のど厚の付与、③ルート止端部における応力集中を緩和する初層裏波ビード形状の非対称性の改善。

従って、②の観点から初層裏波溶接の入熱を増加させ、①の観点から第二層目および第三層目における溶接入熱を低減する一層2パスの振分け溶接を採用するフォールディング防止法を開発した。Table 3に開発法の溶接条件を示す。開発法によるフォールディングの抑制試験結果(●印)を標準の溶接条件による試験結果(○印)と比較してFig.10に示す。

本研究により新たに開発したフォールディングの防止法では、初層裏波ビードのど厚が増加するとともに、二層目振分け溶接により初層裏波ビードのルート止端部にお

る溶込み量が減少する結果、左右のど厚比が安定して50%~60%に改善されている。従って、上述した①、②および③の複合効果によって、開発法を用いるとフォールディングの発生が効果的に防止される事が確認された。

4. 考察

4・1 フォールディング支配因子の詳細検討

Fig.10からフォールディングの発生には左右のど厚比と二層目以降の溶接入熱の影響、即ち二層目以降の溶接金属による溶着量の大小の影響が大きい事が分かる。

そこで、左右のど厚比に影響する因子について更に検討した結果、開先ギャップ量の影響が最も大きい事が判明した。二層目以降の溶接入熱が異なる標準の溶接条件と開発法の溶接条件で層別して、左右のど厚比に及ぼす開先ギャップ量の影響をFig.11に示す。

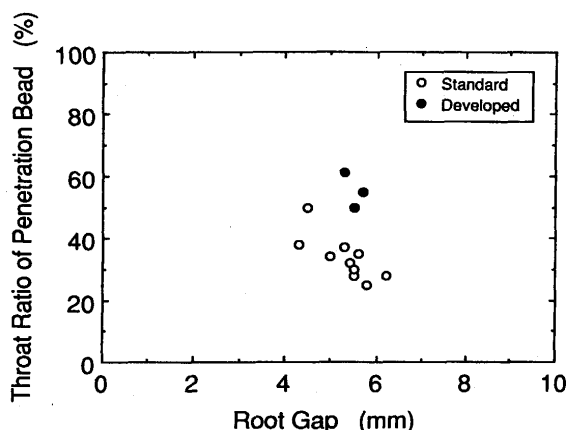


Fig. 11. The influence of the root gap on the throat ratio of penetration beads in the standard method compared with the newly developed method.

開先ギャップ量が大きくなるにつれて、左右のど厚比は低下して非対称性は大きくなっている。これはレ型開先の形状では初層裏波ビードがもともと非対称であるが、開先ギャップ量が大きくなると初層ビード形状が扁平になってビード厚が相対的に薄くなるために、非対称性がより助長されるものと考えられる。

更に、同一の開先ギャップ量で比較すると、開発法の左右のど厚比は標準の溶接条件に比べて格段に大きくなっている。これは初層溶接入熱の増加により裏波ビードのど厚が増加して初層溶接時の左右のど厚比が改善するとともに、小入熱となる二層目振分け溶接の適用により初層ビードのルート止端部の溶込み量が減少する結果、二層目溶接後の左右のど厚比が大きくなって、実質的な初層裏波ビード形状の非対称性が大幅に改善されたからと考えられる。

尚、鋼材のフォールディング発生に及ぼす影響を念のため調査したが、明確な影響は認められなかった。これは熱影響部における高温強度の鋼材による変化が溶接金属の凝固または熱収縮に起因する圧縮応力に比較して小さいためと考えられる。

4.2 フォールディングの特徴

Fig. 1およびFig. 4に示すフォールディングの特徴の第一は明らかな塑性変形を伴っている事であり、第二はルート止端部を起点として折れ込みが発生して裏波ビードの溶接金属表面と鋼材の熱影響部が密着している事である。この塑性変形部を液体窒素温度で破断した破面を観察した結果、ルート止端部で溶接金属表面と鋼材熱影響部が折れ込んで密着する時に発生した圧着痕跡が観察された⁷⁾。

Fig. 7に示した残留スパッタによるフォールディングの噛み止めでは塑性変形が全く認められない事と併せて、塑性変形の発生理由は先に述べたフォールディングの発生機構とも良く一致している。

又、Fig. 12に示すように初層裏波ビードの裏波形状がフォ

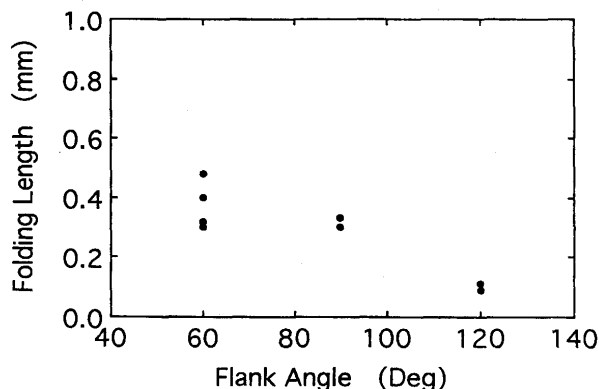


Fig. 12. The influence of the flank angle of penetration beads on folding length in the standard method.

ールディングの発生に幾何学的な形状効果を及ぼし、同一溶接条件では初層裏波ビードのルート止端部における止端仰角が大きいほどフォールディングの発生は抑制される。

尚、このフォールディングの発生機構を考慮すると、フォールディングはレ型開先多層溶接に特有な現象ではないものと考えられる。即ち、開先形状から初層裏波ビード形状の非対称性はレ型開先の場合に大きくなりやすいが、突合せ溶接でも目違いがある場合や開先に対する溶接棒の角度によっては初層裏波ビード形状が非対称になりうる。従って、フォールディングは初層裏波ビードの形状が非対称な場合の多層溶接に共通して発生する現象であると結論される。

5. 結論

レ型開先多層溶接における初層裏波ビードのルート止端部には微小な疵が観察される場合がある。この微小な疵の発生機構を解明した結果、これは割れ等の溶接欠陥ではなく初層裏波ビード形状の非対称性に起因して、第二層目以降の溶接金属の凝固または熱収縮による圧縮応力がのど厚の小さい方の裏波溶接ビードのルート止端部に集中して、その結果発生する座屈が溶接層数の進行とともに進展した折れ込み(フォールディング)である事を明らかにした。

又、フォールディング発生の主な支配因子は左右のど厚比(初層裏波溶接ビードの非対称性)、二層目溶接金属の溶接入熱(溶着量)、開先ギャップ量、止端仰角であるとともに、鋼材の影響は全くない事が判明した。

更に、フォールディングの発生機構の解明によって、その効果的な防止対策を確立するとともにフォールディングはレ型開先に限らず多層溶接に共通して発生する現象である事も明らかにした。

尚、本研究を進めるに当たり有益な助言を戴いた新日本製鐵(株)鉄鋼研究所奥村誠博士及び河野六郎氏(現鉄構海

洋事業部)に深く感謝致します。

文 献

- 1) 日本溶接協会規格：レ型開先多層溶接割れ試験方法(WES 1105-1985)
- 2) 栗山良員, 河野武亮, 村山武弘, 中西保正：石川島播磨技報, 17 (1977) 3, 267.
- 3) 辻 勇, 小川量也：溶接学会誌, 44 (1975), 601.
- 4) D.E.Williams: An End User's Experience with TMCP Structural Steels and CTOD Pre-qualification, Intn'l Symp. on Low-Carbon Steels for the 90's, TMS, (1993), 531.
- 5) American Welding Society: Structural Welding Code-Steel, AWS D1.1, 13th Edition, AWS, (1992)
- 6) 間瀬秀里・奥村 誠・狩峰健一：例えば, 特開平06-254675
- 7) 奥村 誠・間瀬秀里・狩峰健一：私信