溶融亜鉛による鋼の液体金属ぜい化割れの 応力集中部に対する影響*

菊池昌利** 家沢徹***

Effect of Stress-Concentration on Liquid Metal Embrittlement Cracking of Steel by Molten Zinc

by

Masatoshi KIKUCHI

(Technical Development Bureau, Tomoegumi Iron Works, Ltd., Tokyo)

and Tohru IEZAWA

(Welding Research Department, Tomoegumi R & D, Ltd., Tokyo)

Tensile tests were carried out in molten zinc by using both welded and machined specimens with a modified reinforcement in order to investigate the factors which influence the "Liquid Metal Embrittlement" (LME) crack initiation of steel by molten zinc, and the relations between the stress-concentration factor (K_t) and the nominal tensile stress levels (σ_e), at which the LME cracking initiates, were examined.

The steel pipe welded with several pieces of steel plates was dipped into the molten zinc and its thermal stress distribution was analysed by using the FEM. It was shown that the thermal stresses produced increased as the dipping speed decreased.

By using the results of the FEM analysis, the dipping speed at which a crack would occur at the toe of the welded bead was decided, and the dipping experiment was carried out at this speed. The main results obtained are as follows:

(1) The stress-concentration resulting from the shape of specimens was more influential than the metallurgical effect for the crack initiation of welded joints in molten zinc.

(2) The thermal stress occurred when the steel structural members were dipped into molten zinc, and it increased as the dipping speed decreased. Thus, the increase in dipping speed was effective to prevent crack initiation.

(Received June 3, 1981)

キー・ワード：破壊，液体金属ぜい化，溶接，応力集中，溶融亜鉛めっき

1 緒 言

鋼の溶接継手は母材に比べ溶融亜鉛による液体金属ぜい化の影響が顕著にあらわれるため、報告されているき裂発生事例も溶接部に多い^{1,2)}。溶融亜鉛中における溶接部の性能については先に報告したが、溶接継手部にき裂が発生する原因については、まだ研究されていない。そこでこれを明らかにするために、まず溶接継手試験片と機械加工による模擬余盛付試験片とを用い、溶融亜鉛中で引張試験を行い、応力集中部の応力集中係数 K_t と応力・変位曲線、およびき裂発生時の応力 σ_c との関係を求めることにした。

つぎに、鋼管溶接構造試験体を亜鉛めっきするため

に溶融亜鉛へ浸せきするときに発生する熱応力分布の時間的変化を有限要素解析によって求める。また、解析により熱応力に対する浸せき速度の影響を調べ、この結果を確認するための鋼管溶接構造試験体の浸せき実験に際し、カプセル型高温ゲージによる熱応力測定を行うことにした。試験体については、あらかじめ溶接継手部における K_t を求めておき、有限要素解析により、浸せき速度との関係においてき裂発生条件を求める。そこで、この浸せき速度で試験体を亜鉛中へ浸せきし、き裂が発生するかどうかを調べる。これらの結果から、従来解決されていなかった溶融亜鉛めっき時における鋼製品の液体金属ぜい化割れを防止する手段を見いだそうとするものである。

2 実験方法

2・1 引張試験

* 原稿受理 昭和56年6月3日

** 正会員 (株)巴組鉄工所技術開発本部 東京都江東区豊洲

*** (株)巴組技研溶接研究部 東京都江東区豊洲

リコンラバー、テフロンテープ、およびステンレス板で被覆した。これは、試験体とゲージの温度差を少なくするためである。試験体は亜鉛液面に対して 10° 傾斜させ、鋼管の両端部に取付けた金具をチェーンでつり、 460°C の溶融亜鉛中へ $V=800\text{ mm/min}$ の速度で浸せきした。そのとき同時にひずみ測定を行った。試験体が完全に浸せきして5分後に試験体の温度はほぼ一定となり熱応力も減衰するので、その時点で亜鉛浴より引上げた。めっきが完了した後約 60°C の温水中に沈めて冷却後、ひずみゲージ溶接箇所を 120 mm 角に切出し、溶融亜鉛に浸せきして動のみかけのひずみを測定し、ひずみの補正を行った。また、鋼管と鋼板の溶接端部を切出し、10%硫酸に浸せきして亜鉛を溶解し、き裂の有無を確認した。

3 実験結果および考察

3.1 引張試験結果

溶融亜鉛中における引張試験結果を応力集中係数 K_t との関係において調べた。ここで、 K_t は西田の(1)、(2)式より求めた。

$$K_t = 1 + \frac{1 - \exp\{-0.90\sqrt{(B+2h)/2h}(\pi-\theta)\}}{1 - \exp\{-0.45\pi\sqrt{(B+2h)/2h}\}} \times (\alpha_1 - 1) \quad (1)$$

$$\alpha_1 = 1 + \left\{ \frac{1}{2.8(2h+B)/B-2} \times \frac{h}{\rho} \right\}^{0.65} \quad (2)$$

$K_t=2.0$ の模擬余盛付試験片による引張試験結果を Fig. 4 に示す。室温と高温空気中での伸びはほぼ

Fig. 4. Stress-elongation curves of tensile tests of the welded bead-shape, machined specimens. The stress-concentration factor (K_t): 2.0.

Fig. 5. Photograph of the tensile testing specimen in molten zinc, which was machined into the same shape as the welded bead specimen.

等しいが溶融亜鉛中では同温空气中に比べ、応力、変位とも低い位置で破断している。 $K_t=1.0$ の平滑材の場合に比べて $K_t=2.0$ では、空气中室温および 450°C いずれも破断時の変位は81%に減少し、亜鉛中では65%に減少しており、応力集中の影響が大きくあらわれた。 $K_t=2.0$ の模擬余盛付試験片の亜鉛中での引張破断写真を Fig. 5 に示すが、き裂は応力集中部から発生し、斜め方向に進展して破断している。き裂は4箇所すべての切欠き部から発生している。また、同一試験片に対する室温および 450°C 空気中での破断位置はすべて模擬余盛以外の箇所であった。亜鉛中では液体金属ぜい化が、特に引張応力の高い応力集中部に顕著にあらわれる。模擬余盛付試験片による溶融亜鉛中での引張試験結果を Fig. 6 に示す。 $K_t=1.0$ は平滑材であり、 K_t が大きくなるに従い、破断時の変位が減少している。突合せ溶接継手による引張試験結果を Fig. 7 に示す。ばらつきはあるが、模擬余盛付試験片の場合と同様な結果が得られ、いずれも形状による影響が大きいことがわかる。

Fig. 6. Effect of stress-concentration factor (K_t) of machined specimens on stress-elongation curves in molten zinc.

Fig. 7. Effect of stress-concentration factor (K_t) of welded specimens on stress-elongation curves in molten zinc.

Fig. 8. Results of tensile tests of machined specimens unloaded at various tensile stress levels in molten zinc.

Fig. 9. Relation between stress-concentration factor (K_t) and crack initiating stress (σ_c) in molten zinc.

つぎに、溶融亜鉛中でのき裂発生応力 σ_c を除荷法により求めた。Fig. 8 にその結果の 1 例を示す。これは L-55 を用いて溶接した十字すみ肉継手試験片 10 本について行った試験結果で、 $K_t=1.6$ のとき $\sigma_c=38.5$ kgf/mm² が得られた。また、YM-26 を用いた十字すみ肉溶接継手試験片 10 本について行った試験結果では、 $K_t=1.9$ のとき $\sigma_c=35.0$ kgf/mm² が得られた。 $K_t=1.0$ の平滑材については先に報告した⁵⁾ように、ほぼ最大引張応力負荷時にき裂が発生することがわかっており、今回の実験結果から $\sigma_c=45$ kgf/mm² となる。そこで、 K_t と σ_c との関係を図示すると Fig. 9 のようになり、 $K_t=2.0$ 近傍までは K_t が増加するにつれて σ_c は直線的に減少している。

3・2 鋼管溶接構造試験体の熱応力解析

Fig. 3 に示すようにして溶融亜鉛中へ浸せきされつつある試験体の熱応力分布とその変化を求めるために、有限要素法を用いた。解析は先に報告した⁹⁾ように、各要素が亜鉛中へ浸せきされた後の経過時間 t から各要素の温度を求め、その値をインプットして計算した。解析は Fig. 3 に示すように浸せき速度 $V=800$ mm/min, 5 500 mm/min の二とおりについて、それぞれの浸せき位置①～⑬および①～⑥の 20 ケースについて、時系列的に行った。液体金属ぜい性化割れは、鋼に溶融亜鉛が接触した状態で引張応力がはたらいたときに

Fig. 10. Tensile thermal stress distribution obtained by the FEM.

発生するので、有限要素解析結果から試験体外面の引張応力分布を求め、Fig. 3 における $V=800 \text{ mm/min}$ のときの浸せき位置⑨における分布を Fig. 10 (a)に、 $V=5500 \text{ mm/min}$ の浸せき位置③における引張応力分布を Fig. 10 (b)に示した。解析結果から明らかに、浸せき速度が速い場合には熱応力が著しく低下することがわかる。 $V=800 \text{ mm/min}$ の場合、浸せき位置⑩で一部分に最大 $\sigma=42.7 \text{ kgf/mm}^2$ の引張応力がはたらき、 $V=5500 \text{ mm/min}$ では、浸せき位置③において最大引張応力 $\sigma=6.7 \text{ kgf/mm}^2$ が発生する。すなわち浸せき速度が6.9倍になって最大引張応力が1/6.4に減少する。また、すべての解析結果を調べてみると、試験体は浸せきされるに従い、あらゆる箇所に引張応力が順次発生することがわかった。鋼管と鋼板との溶接端部には、応力集中することが考えられるので、各浸せき速度に対して、鋼板隅部 (Fig. 10 (a)のA部) の主応力変化の解析結果を Fig. 11 に示した。これは浸せき速度 $V=800 \text{ mm/min}$ における Fig. 3 の浸せき位置⑧、⑨、および⑩に対するものであり、⑨の位置で最大引張応力 $\sigma=34.9 \text{ kgf/mm}^2$ がはたらくことがわかる。これに対し、 $V=5500 \text{ mm/min}$ の場合は浸せき位置④で最大引張応力 3.2 kgf/mm^2 が発生するにすぎない。

つぎに、分割要素の大きさの影響を調べるために、Fig. 12 に示すように要素Aの大きさと要素Aにはたらく公称応力 σ との関係を有限要素法により解析して検討を加えた。要素Aの形状を $l_2/l_1=1.5$ として、試験体の浸せき位置を Fig. 3 における $V=800 \text{ mm/min}$ の場合の⑨について計算した。また試験体の形状・寸法は Fig. 3 に示すものと同一とした。 $l_1=70, 103.2$ 、および 150 mm の場合についての計算結果から l_1 と

Fig. 11. Thermal stress variation at the corner part of welded steel plate in the case where dipping speed (V) is 800 mm/min .

Fig. 12. Shape of the element which is the corner part of welded steel plate.

Fig. 13. Relation between nominal tensile stress (σ) and length (l_1) of the element located at the corner of the welded steel plate.

σ との関係を示す。図から l_1 が約 100 mm 以上であれば σ が減衰し、 l_1 の大きさによる影響をほとんど受けないが、 l_1 が 100 mm よりも小さくなるに従い、 σ は著しく増大する。したがって、このように有限要素解析により公称応力 σ を求めて、き裂の発生を評価する場合には、 $l_1 > 100 \text{ mm}$ とすることが必要である。

3.3 鋼管溶接構造試験体の浸せき実験結果

鋼管溶接構造試験体を溶融亜鉛へ浸せきするとき、熱応力が大きくなり、応力集中係数 K_t が大きい場合にはき裂が発生する可能性があるため、解析の結果大きい熱応力が発生する箇所、すなわち、Fig. 10 (a)のA部における溶接ビードトウ部の θ 、 θ をシリコンバー法により予め測定して、(1)、(2)式により K_t を求めた結果、 $K_t=2.0$ が得られた。その試験体を Fig. 3 に示す姿勢に保ち、 $V=800 \text{ mm/min}$ の速度で溶融亜鉛中へ浸せきした。そのときひずみ測定を行った後、動のみかけのひずみを補正し、熱応力に換算した結果と熱応力の解析結果とを Fig. 14 に示す。図から全体として解析値と実験値とはかなりよく対応することがわかる。解析値と実験値に差があるのは、解析においては分割要素の中央部の応力が得られるのに対し、実験では分割要素のやや端部に近い位置にひずみゲージを溶接したためと考えられる。そこで、Fig. 11 によれば、浸せき位置⑨において板端の溶接部近傍に 34.9

Fig. 14. Results of thermal stress variation obtained by the FEM and experiment.

Fig. 15. Photograph of the crack initiated at the toe of the corner part of the plate welded steel pipe.

kgf/mm² の引張応力がはたらくことになり、板端の溶接 ビードトウ部で $K_t=2.0$ が得られているので、Fig. 9 によれば、 $V=800$ mm/min の浸せき速度で板端溶接部にき裂が発生するものと考えられる。実験の結果、Fig. 15 に示すように、この溶接ビードトウ部からき裂が発生した。また、 $V=5500$ mm/min の場合の解析では、鋼板端部の引張応力は 3.2 kgf/mm² しか発生せず、 $K_t=2.0$ としてもき裂発生の可能性がないことがわかる。また、実験においても $V=5500$ mm/min の場合には、き裂の発生がなかった。

4 結 言

SM 50 A 鋼を用いて応力集中部を有する溶接継手試験片と機械加工による模擬余盛付試験片について、溶融亜鉛中で引張試験を行い、応力集中係数 K_t と応力・変位曲線およびき裂発生応力 σ_c との関係を調べた。また、鋼管溶接構造物を溶融亜鉛へ浸せきするときの熱応力変化を有限要素法により解析し、試験体の応力集中部の K_t との関連においてき裂発生の条件を求め、この実験によりき裂の発生を確認し、以下の結論を得た。

(1) 溶接継手試験片を溶融亜鉛中で引張ると、ビードトウ部からき裂が発生するが、発生条件は溶接によ

る金属的な効果よりも形状による応力集中の影響が支配的である。

(2) 応力集中係数 K_t の増加に伴い、引張破断時の変位が減少し、 $K_t=2.0$ では $K_t=1.0$ の平滑材に対し、約50%となる。

(3) $K_t=1.0\sim 2.0$ の範囲では、き裂発生応力 σ_c は K_t の増加に伴い、ほぼ直線的に減少し、 $K_t=2.0$ では $K_t=1.0$ に対して σ_c の値が約 10 kgf/mm² 少くなる。

(4) 鋼管溶接構造試験体を溶融亜鉛中へ浸せきするときの熱応力変化を有限要素法により求め、 K_t との関係において理論的に求めたき裂発生条件は、実験結果とよく一致する。

(5) 浸せき速度を速くすると熱応力が減少し、き裂発生防止に有効である。

終りに、本研究のためにご指導を賜った東京工業大学の中澤一教授および応力集中部の測定法についてご助言を賜った金属材料技術研究所の太田昭彦氏に深甚なる謝意を表します。

(昭和56年5月19日 日本材料学会第30期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 稲垣博巳, ぶれいず, **49**, 27 (1980).
- 2) 松下幸正, 七沢和男, 大型亜鉛めっき鋼構造物に関する調査報告書, 65 (1979), 亜鉛めっき鋼構造物研究会
- 3) 菊池昌利, 家沢 徹, 材料, **30**, 187 (1981).
- 4) 菊池昌利, 家沢 徹, 材料, **30**, 562 (1981).
- 5) Kikuchi, M., Proc. 23rd Jap. Cong. Mat. Res., 143 (1980).
- 6) 金井健二, 非破壊検査, **29**, 11 (1980).
- 7) 菊池昌利, 非破壊検査, **29**, 544 (1980).
- 8) 西田正孝, “応力集中”, p. 632 (1969) 森北出版