研究論文

多層溶接継手の水素濃度分布におよぼす溶接諸条件の影響*

寺崎 俊夫** 山下 泰生*** 佐藤 邦彦****

Effect of Welding Conditions on Hydrogen Concentration Distribution in Multipass Welded Joint*

by Toshio Terasaki**, Yashuo Yamashita***, Kunihiko Satoh****

Hydrogen concentration distribution in multipass weld metal has been studied using hydrogen diffusion theory under various welding conditions. It is shown that hydrogen concentration distributions are predicted by means of parameters given by welding conditions, namely, heat input, plate thickness, weld metal width and so on. Influence of welding conditions on hydrogen concentration distributions is described.

1. 緒 言

構造物の大型化に伴い、厚板の多層溶接継手が多く用いられるようになり、厚板溶接に起因した低温割れ、すなわち、横割れの防止が溶接施工上の重要な問題となっている。横割れはルート割れと同様に熱サイクル後の水素濃度を低くすると防止できるため、予熱・パス間温度を比較的高くして熱サイクル後の水素濃度を減らす溶接施工法が一般に用いられている。しかし、溶接施工条件と水素濃度分布の関係を示した報告は少なく、両者の相関関係はあまり明らかにされていない。

本研究は多層突合せ継手の溶接金属内の水素濃度分布を対象として、水素濃度分布におよぼす溶接諸条件の影響を計算により検討したものである。

2. 計 算 方 法

多層溶接の水素拡散を厳密に解析するためには応力やひずみを考慮した数値解析法を用いる必要がある¹⁾。しかし、多層溶接では予熱・パス間温度によって溶接部は比較的高温に保持されるため、水素拡散におよぼす応力項、ひずみ項の影響はかなり小さいと考えられる^{2,3)}。したがって、多層溶接の溶接終了後にパス間温度まで冷

却したときの水素濃度分布を対象とする場合には濃度勾配のみによる水素濃度拡散理論を用いて解析してもよいと考えられる。

2.1 近似式

Fig. 1(a) に示す I 開先を対象として近似式を導く。Fig. 1(a) は板厚 h の板をのど厚 a まで溶接したときの水素濃度分布の計算を板厚 a の板と考えて解析することを示している。Fig. 1(b) は板厚 a の板のある領域 $\{x_1 < x < x_2, -b < y < b\}$ にのみ水素濃度 $C = C_0$ が存在する

Fig. 1 Schematic illustration used in calculation for hydrogen concentration distributions.

*原稿受付 昭和53年9月5日(昭和53年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 九州工大 Member, KIT

***学 生 員 大阪大学工学部 Student Member, Faculty of Engineering, Osaka University

****正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

初期条件で、境界条件 $x=0$, a で $C=0$ (自由表面の水素濃度は常に零) を満たす解が図に示す Sink と Source の水素源を鏡像法により配列した無限板により解析できることを示したものである⁴⁾。Fig. 1(b) より t 秒後の水素濃度分布 $C(x, y)$ は拡散定数 D が位置 (x, y) に関係なく一定ならば次式⁵⁾

$$C(x, y) = \frac{1}{4\pi Dt} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(u, v) \exp \left\{ -\frac{(x-u)^2 + (y-v)^2}{4Dt} \right\} dudv \quad \dots\dots(1)$$

ただし、

$$f(u, v) = \begin{cases} -C_0 & -x_2 + 2na \leq u \leq -x_1 + 2na, -b \leq v \leq b \\ C_0 & x_1 + 2na \leq u \leq x_2 + 2na, -b \leq v \leq b \\ (n = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, \infty) \end{cases}$$

を積分することより次のように与えられる。

$$C(x, y) = \frac{C_0}{4} \left[\Phi \left(\frac{b-y}{2\sqrt{Dt}} \right) + \Phi \left(\frac{b+y}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\left\{ \Phi \left(\frac{x_2 + 2na - x}{2\sqrt{Dt}} \right) - \Phi \left(\frac{x_1 + 2na - x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\} - \left\{ \Phi \left(\frac{-x_1 + 2na - x}{2\sqrt{Dt}} \right) - \Phi \left(\frac{-x_2 + 2nb - x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\} \right] \quad \dots\dots(2)$$

ただし、 $\begin{cases} \text{考慮すべき } n \text{ の範囲は誤差関数 } \Phi(z) \text{ が } z \geq 2 \\ \text{で 1 となることより式(2)の } \{ \} \text{ の中が零} \\ \text{となるため} \\ (-4\sqrt{Dt} - x_2)/2a < n < (4\sqrt{Dt} + x_2 + a)/2a \\ \text{となる。} \end{cases}$

式(2)は式(1)において x 方向、 y 方向の拡散を単独に解析した解の積として表わされる。そこで、多層継手の水素濃度分布は以下に示すように板厚方向のみの 1 次元解析を最終パスまで解析した解と母材方向のみの 1 次元解析を板厚方向拡散終了後に行った解の積で与えられると仮定した。

板厚方向のみの 1 次元解析は Fig. 1(c) に示すように 1 層当りの平均のど厚増加量 h_w を細かく M 分割し、この細分割部 x_{Ij} (添字 I は第 I 層を示し、添字 j は I 層の j 番目の要素を示す) の水素濃度 C_{Ij} を一定と考えて誤差関数より求めた。したがって、第 L 層まで溶接したときの第 I 層内の j 番目の要素の水素濃度 C_{Ij} は Fig. 1(b), 式(2)と同様な考えより次式で与えられる。

$$C_{Ij} = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \frac{C_{lm}}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\left\{ \Phi \left(\frac{-A_{lm} + h_w/M + 2na - x_{Ij}}{2\sqrt{\Sigma D \Delta t}} \right) \right\} \right] \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 $\begin{cases} A_{lm} = h_w \left(l - 1 + \frac{m-1}{M} \right) \\ x_{Ij} = h_w \left(I - 1 + \frac{2j-1}{2M} \right) \quad a = Lh_w \\ C_{lm} = \text{第 } L \text{ 層を溶接する直前の第 } l \text{ 層 } m \text{ 番} \\ \text{要素の水素濃度} \end{cases}$

C_{Ij} : 第 L 層を溶接した後の第 I 層 j 番要素の水素濃度

$\Sigma D \Delta t$: 第 L 層を溶接したときの熱サイクルと拡散定数の積分 $\int D dt$ (t : 冷却時間) より決まる値で熱因子と言われている。今後 $\int D dt$ を $\Sigma D \Delta t$ で表わす。

次に、母材方向 (y 方向) の 1 次元拡散を考慮する。総パス数 $N (=h/h_w)$ で溶接したとき第 I 層溶接部は各パスでの 1 パス当りの熱サイクルが等しい場合には $(N - I + 1)$ 回の熱サイクルを受けるため、熱因子として $\Sigma D \Delta t \times (N - I + 1)$ ($=\Sigma D \Delta t$ とする) を受け、第 I 層部の水素は母材方向へ熱因子 $\Sigma D \Delta t$ に応じた分だけ拡散する。したがって、板厚方向・母材方向の拡散を考慮した後の水素濃度は次式で与えられる。

$$(C_{Ij})^N = \frac{1}{2} \left\{ \Phi \left(\frac{b-y}{2\sqrt{Dt}} \right) + \Phi \left(\frac{b+y}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\} (C_{Ij})^N \quad \dots\dots(4)$$

ただし、 $(C_{Ij})^N$: 板厚方向の 1 次元拡散により最終パスまで溶接したときの水素濃度 (式(3)より導かれる)

$(C_{Ij})^N$: 母材方向の拡散を考慮した 2 次元拡散後の水素濃度

式(4)より x 軸上 ($y=0$) の水素濃度分布は式(3)を補正係数 $\Phi(b/2\sqrt{Dt})$ で補正すればよいことがわかる。また、式(3), (4)より多層溶接の水素濃度分布は各パスでの熱サイクルが等しい場合には、パラメータ $\Sigma D \Delta t/h_w^2$, b/h_w , a/h_w (又は h/h_w) で規定されることがわかる⁶⁾。

2.2 近似式による計算結果の妥当性の検討

Fig. 2 はパラメータ $\Sigma D \Delta t/h_w^2 = 0.24$, $b/h_w = 1$ の条件下で計算したときの 2 次元有限差分 (FDM) (実線) と近似式(3) (破線) 近似式(4) (一点鎖線) による水素濃度分布の計算結果を示している。図の縦軸は図中に示すように板厚方向座標 x を平均のど厚増加量 h_w で割った値 x/h_w であり、横軸は初期水素濃度 C_0 で水素濃度 C を除した値 C/C_0 である。FDM による計算では板厚 50 mm, 開先幅 10 mm の I 開先を $h_w = 5$ mm, 熱因子

Fig. 2 Comparison of results calculated by FDM analysis and equations (3), 4 (4).

Fig. 3 Comparison of the experimental results with calculated results.

$\Sigma D\Delta t = 0.06 \text{ cm}^2$ の条件で行った。(溶接熱源を瞬間線熱源とした) Fig. 3 より近似式(4)と FDM の結果はほぼ一致していることがわかる。

Fig. 3 は岩井⁷⁾の実験結果と近似式(4)の計算結果(実線)を比較したものである。(図中の破線は近似式(3)より求めた計算結果である) 岩井は SAW で板厚 55 mm, 100 mm の板を 1 層 2 パス, 入熱 40 kJ/cm, 層間温度 175°C, 200°C で溶接し最終溶接終了後にパス間温度に冷却した時点で水冷して残留水素濃度を求めている。計算で用いた各変数の値は実験値より $h_w = 6.8$ ($=55/8$ 層), $b = 10$ ($h = 55$), $b = 14$ ($h = 100$) とし, 予熱・パス間温度 θ_i より次項で示す式(5), (6)を用いて, $\Sigma D\Delta t = 0.051$ ($h = 55$, $\theta_i = 175$), $\Sigma D\Delta t = 0.048$ ($h = 100$, $\theta_i = 175$), $\Sigma D\Delta t = 0.066$ ($h = 55$, $\theta_i = 200$), $\Sigma D\Delta t = 0.060$ ($h = 100$, $\theta_i = 200$) とした。なお, 計算では $\Sigma D\Delta t$ は 1 層当りの値を用いなければならぬので, 2 パス 1 層の熱因子として, 上記 $\Sigma D\Delta t$ の 2 倍の値を用いた。岩井の実験では C_0 は未知なので, 予熱・パス間温度 175°C, 板厚 100 mm の実験値と計算値が一致するように C_0 を決定し, その C_0 を用いて板厚 55 mm, の実験値および $\theta_i = 200^\circ\text{C}$ で $h = 100$, 55 の実験値をプロットしている。図より近似式(4)を用いて計算した結果と実験値はよく一致していることがわかる。なお, 他の研究者の実験値と計算値の比較も行い, 近似式(4)の有効性を確認している⁶⁾。

3. パラメータによる水素濃度分布の整理

3.1 溶接諸条件と熱因子 $\Sigma D\Delta t$ の関係

多層溶接における板厚方向の水素濃度分布を決定するパラメータは $\Sigma D\Delta t/h_w^2$, h/h_w , b/h_w であることを前節で示した。 h_w , h , b は開先形状, 入熱条件により求められるが, 熱因子 $\Sigma D\Delta t$ は 1 パス当りの熱サイクルが与えられないと求められない。この熱サイクルについての報告はあまりないので入手できるデータを参考にし, 次式で近似した。

$$\theta - \theta_0 = (Q/c\rho h\sqrt{4\pi k t} + \theta_i - \theta_0)\exp(-\alpha^2 t) \quad \dots\dots(5)$$

Fig. 4 Relationship between thermal factor $\Sigma D\Delta t$ and welding conditions (thickness h , heat input Q , preheat and interpass temperature θ_i).

ただし θ : 溶接金属の温度 / θ_0 : 空気温度 ($=20^\circ\text{C}$ とした)
 Q : 単位溶接長当りの入熱 c : 比熱 ρ : 密度
 k : 熱拡散率 $\alpha^2 = 2 \times 10^{-3}/h$: 熱放散の係数

拡散定数 D は次のように設定した。

$$\left. \begin{aligned} \theta \geq 500^\circ\text{C} & D = 1.51 \times 10^{-2} \exp(-11970/RT) \\ 500 > \theta \geq 200 & D = 1.40 \times 10^{-3} \exp(-3200/RT) \\ \theta < 200 & D = 0.12 \exp(-7820/RT) \end{aligned} \right\} \dots\dots(6)$$

ただし, $T = 273 + \theta$ R : 気体定数

式(5), (6)より熱因子 $\Sigma D\Delta t$ と溶接諸条件の関係が求められる⁶⁾。Fig. 4 に 1 例を示す。Fig. 4 の $\Sigma D\Delta t$ の積分区間として $1,000^\circ\text{C} \sim \theta_i$ を用いたが, 積分区間として $500^\circ\text{C} \sim \theta_i$ を用いても $\Sigma D\Delta t$ はほとんど変化しなかった。式(5), (6)より, 板厚, 予熱・パス間温度, 入熱が与えられると熱因子 $\Sigma D\Delta t$ が求められる。

3.2 パラメータによる水素濃度分布の整理

近似式(3), (4)より水素濃度分布は板厚方向の 1 次元拡散での水素濃度分布を基礎にして, 補正係数を掛ければよいことが示された。このため, 板厚方向の 1 次元拡散(近似式(3))での水素濃度分布がパラメータで整理で

Fig. 5 Approximate solid line of hydrogen concentration distribution calculated by equation (3).

Fig. 6 Effect of parameters $\Sigma D\Delta t/h^3w$, h/hw on feature points x_1 , x_2 or x_2' , and maximum hydrogen concentration C_{max} .

きれば、溶接諸条件の情報より式(4)を使って、残留水素濃度分布が予測できるようになる。Fig. 5 は近似式(3)の1次元拡散の水素濃度分布(破線)と台形近似した折れ線を示している。図より破線は折れ線でおおむね近似されていることがわかる。折れ線は破線において最高水素濃度の位置(C_{max} , x_2)と水素濃度がほぼ一定値になる位置 x_1 (その点の水素濃度を C_{max} と仮定する)を用いて台形近似したものである。

Fig. 6 は折れ線近似した特徴点の位置 x_1 , x_2' ($=h-x_2$)

Fig. 7 Effect of preheat and interpass temperature θ_i on maximum hydrogen concentration.

Fig. 8 Effect of plate thickness h on maximum hydrogen concentration.

x_2), 最大水素濃度 C_{max} におよぼすパラメータ $\Sigma D\Delta t/h^2w$, h/hw の影響を示している。図より熱因子 $\Sigma D\Delta t$ が大きくなったり、平均の厚増加量 hw が小さくなると、パラメータ $\Sigma D\Delta t/h^2w$ が大きくなると、 C_{max} は急激に低下し C_{max} の位置 x_2 は最終パス表面から板厚内部に入ることがわかる。また、Fig. 6(c) より約5層以上溶接する ($h/hw \geq 5$) と C_{max} はほぼ一定値になっていることがわかる。

Fig. 6, 式(4)を用いると溶接諸条件から溶接金属内の板厚方向 (x 軸上) の水素濃度分布が簡単な計算により求められる。

4. 水素濃度分布におよぼす溶接諸条件の影響

(1) 予熱・パス間温度の影響

Fig. 7 は予熱・パス間温度 θ_i が水素濃度の最大値 C_{max} におよぼす影響を示している。 C_{max} は Figs. 4, 6 (eqs., (3), (4), (5), (6)) を使用して, $h=100$ mm, $2b=20$ mm, $hw=5$ mm, $Q=20, 40, 60$ kJ/cm, $\theta_i=20 \sim 200^\circ\text{C}$ の計算条件で行った。図より θ_i を増加させると急激に C_{max} が低下することがわかる。

Fig. 9 Effect of increment of throat depth per unit pass h_w on maximum hydrogen concentration

Fig. 10 Effect of weld metal width $2b$ on maximum hydrogen concentration.

(2) 板厚の影響

Fig. 8 は $h_w = 5$ mm, $2b = 20$ mm, $\theta_i = 150^\circ\text{C}$, $Q = 40$, 80 kJ/cm の条件で $C_{\max}$ におよぼす母材の板厚 h の影響を示している。図より h が増加すると $C_{\max}$ が増加することがわかる。この原因は Fig. 4 に示すように h が大きくなると熱因子 $\Sigma D\Delta t$ が低下することにある。

(3) 平均のど厚増加量 h_w の影響

Fig. 9 は $C_{\max}$ におよぼす平均のど厚増加量 h_w の影響を示している。計算は $h = 100$ mm, $2b = 20$ mm, $\theta_i = 150^\circ\text{C}$, $Q = 40, 60$ kJ/cm の条件で行われた。図より h_w が増加すると $C_{\max}$ が急激に増加することがわかる。一般に溶接法が異なると比溶着熱 H (cal/g) が異なり, $h_w (=Q/2b\rho H)$ が H に応じて変化する。したがって, Fig. 9 の横軸は比溶着熱 H の逆数となり, C_0 が同じ溶接法では H が大きい溶接法の方が $C_{\max}$ が小さくなる。

(4) 開先幅の影響

Fig. 10 は $C_{\max}$ におよぼす開先幅 $2b$ の影響を示している。計算条件は $h = 100$ mm, $Q = 40$ kJ/cm, $\theta_i =$

Fig. 11 Effect of overlap length l on maximum hydrogen concentration.

200 $^\circ\text{C}$, 溶着金属量 $2bh_w = 50, 100$ (mm 2) である。図によると $2b = 5 \sim 15$ mm に $C_{\max}$ の最大値が存在する。この理由は $2b \leq 5$ のときは y 方向 (母材方向) の水素拡散が有効に作用して, $C_{\max}$ が低下すること, $2b \geq 20$ mm のときは h_w が減少して, $\Sigma D\Delta t/h_w^2$ が大きくなって, 表裏面への x 方向の水素拡散が有効に作用することの2つの原因にある。

(5) 溶け込み深さの影響

これまでの計算は溶け込み深さが零であるとして行っている。本項では水素濃度分布におよぼす溶け込み深さの影響を調べた。

Fig. 11 (a) は板厚 50 mm の板を $h_w = 5$ mm, $\Sigma D\Delta t = 0.05$ cm 2 の条件で, 図中に示すように第 k パスと第 $(k-1)$ パスの重ね幅 l (溶け込み深さに相当) を変化させて, 近似式 (3) の1次元拡散したときの水素濃度分布を示している。図より重ね l は水素濃度 C に大きな影響を与えることがわかる。図中の破線は $l = 0$ の最高水素濃度 $(C_{\max})_{l=0}$ と $l = h_w/2$ の最高水素濃度 $(C_{\max})_{l=0.5h_w}$ を一致させる比を求め, この比を $l = 0$ の水素濃度に掛けて求めている。破線と $l = h_w/2$ の曲線より, 重ね l は水素濃度 C に影響するが, 水素濃度分布にあまり影響しないことがわかる。Fig. 11 (b) は重ね l が最高水素濃度 $(C_{\max})_l$ におよぼす影響を示している。

Figs. 4, 6, 11 (b) より溶け込み深さと溶接諸条件の情報より水素濃度分布が予測できる。

5. 結 論

(1) 最終溶接終了後の水素濃度分布を計算する近似式 (4) を導いた。そして, 板厚方向の1次元拡散理論解 Fig. 6 と母材方向拡散の補正係数の積により (式 (4) 参照), 最終溶接終了後の水素濃度分布が得られるようにした。

(2) 多層突合せ溶接の水素濃度分布は熱サイクル, 板

厚 h 平均のど厚増加量 h_w , 開先幅 $2b$ より決まるパラメータ $\sum D\Delta t/h_w^2$, h/h_w , b/h_w によって決定される。

(3) 水素濃度分布におよぼす溶接諸条件の影響をまとめると次のようになる。

④ 予熱・パス間温度 θ_i は最高水素濃度 $C_{\max}$ の低減に有効である。

⑤ 板厚が厚くなると $C_{\max}$ は漸増する。

⑥ 平均のど厚増加量 h_w が増すと $C_{\max}$ は急激に増加する。

⑦ 開先幅 $2b$ は $C_{\max}$ に影響を与える。

⑧ 溶け込み深さ l は $C_{\max}$ に大きな影響を与えるが、水素濃度分布の形にはあまり影響を与えない。

参考文献

- 1) 佐藤, 寺崎, 山下: 単層溶接部の局所集積水素濃度におよぼす溶接諸条件の影響, 本誌, Vol. 48 (1979), No. 7
- 2) 百合岡他: 鋼中水素拡散と集積の数値解析および溶接部への応用, 本誌, Vol. 43 (1974), No. 9
- 3) O'M. Bockris, W. Beck et al.: The Effect of Stress on the Chemical Potential of Hydrogen in Iron and Steel, ACTA Met. Vol. 19 November 1971
- 4) 安藤: 抵抗溶接の熱伝導, 大阪大学講義資料 (1958)
- 5) 川下: 熱伝導論, オーム社
- 6) 佐藤, 寺崎, 山下: 多層溶接の水素濃度分布について WD-29-77, WM-677-78
- 7) 高橋, 岩井: 厚板突合せ溶接部のビード割れに関する研究, 溶接学会全国大会, 第21集

構造用高張力鋼 (50, 60および80キロ級) の 電子ビーム溶接性に関する研究 (第6報)*

荒田吉明** 松田福久** 柴田 泰*** 小野凱久*** 玉置光男*** 藤平正一郎***

Mechanical Properties on Electron Beam Welds of Constructional High Strength Steels (Report VI)*

by Yoshiaki Arata**, Fukuhisa Matsuda**, Yutaka Shibata***

Yoshihisa Ono***, Mitsuo Tamaoki***, Shouichiro Fujihira***

The existence of the unusual fracture path transition phenomenon in Charpy impact test specimen had been already found out on the electron beam (EB)-weld metals of constructional high strength steels in the previous report. Then in this report, the occurring possibility of such "fracture path transition phenomenon" and its mechanism were theoretically studied by means of the stress analysis in static load for the bending model of impact test specimen of EB-weld metal using finite element method (FEM). The stress analysis was performed on the bending model for HT50 and 80 weld metals of 12 and 40 KJ/cm weld heat inputs. The remarkable conclusions are as follows;

(1) As compared the distribution of plastic zone in the model specimen for EB-weld metal between 12 and 40KJ/cm weld heat inputs, the remarkable large extensions of the plastic zone were observed in the part of base metal near the fusion boundary (Bond) in case of the former model specimen. From this results it is presupposed that the fracture path of this impact test specimen has a chance to deviate into base metal side in case of the weld metal of low weld heat input.

(2) It was expected that the fracture path transition has a tendency to occur with a decrease of the bead width in the test specimen d_B and with an increase of the hardness in the weld metal Hv_w as a result of the comparison for the variation of the plastic strain at the base metal near the fusion boundary ($\bar{\epsilon}_{p,B}$) and the center of weld metal ($\bar{\epsilon}_{p,w}$) from V-notch bottom in the model specimen between 12 and 40KJ/cm EB-weld metals.

*原稿受付 昭和53年3月31日 (昭和53年度春季全国大会にて発表)

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

***正 員 (株)片山鉄工所技術開発部 Member, Katayama Iron Works, Ltd., Department of Research and Development