

鉄骨 BOX 柱の角溶接時における傾度制御*

愛田 一雄*¹, 今井 純一*¹, 田村 武夫*¹
長縄 明大*¹, 柿元 真樹*², 宇野 壽郎*²

Inclination Control of Iron-Frame Box-Columns in Arc Welding

Kazuo AIDA, Junichi IMAI, Takeo TAMURA,
Akihiro NAGANAWA, Masaki KAKIMOTO and Toshiro UNO

Iron-frame box-columns are made by continuously welding steel plates. The inclination of the box-column must be kept constant under the deformation due to the thermal disturbance to maintain stable electric discharges. This is generally done by manipulating one of two oil hydraulic tandems which support the box-column. In this study, an automatic control method is proposed. An advantage of this control method is that it solves the problem of the detected variable differing from the controlled variable. All box-columns made using this automatic control method show satisfactory results both in external inspection and under ultrasonic inspection.

Key Words: Measurement and Control, Digital Control, Cascade Control, Shape Measurement, Thermal Deformation, Finite Element Method

1. ま え が き

鉄骨建造物の柱として使われる四面 BOX 柱は、鋼板の四隅を連続的にアーク溶接することによって作られている。溶接に際して重要なことは、放電が安定であることと、ビードが均一でかつビードに適度の余盛りをつけて強度が保証できることである。ビードの余盛り量は溶接速度に依存するが、BOX 柱の板厚に応じた適切な溶接速度は経験的にわかっている。放電の安定性とビードの均一性は、BOX 柱の溶接点での傾度に依存する。BOX 柱は溶接の経過時間とともに熱変形が進み、溶接点での傾度が変化する。したがって BOX 柱が熱変形をしても、溶接点での傾度を常に一定に保つことが必要である。

近年、鉄骨溶接の自動化は進歩しているが⁽¹⁾⁽²⁾、BOX 柱の傾度をフィードバック制御する研究はないようである。

本論文では、一つの自動制御方式を提案し、実機で制御を行い良好な結果が得られたので報告する。

以下、2章で溶接装置の概要を述べる。3章では制御に使われるセンサとその配置を説明し、4章で制御系を構成する。5章では、本研究の最大の焦点となる BOX 柱の熱変形を有限要素法によって解析し、その他の外乱の補正法についても述べる。6章では、5章の結果に基づき制御系を設計する。7章では、本研究で提案した制御法を用いて実機で行った実験とその結果の有効性について述べる。

2. 溶接装置の概要

溶接装置の模式図を図1に示す。BOX 柱は、仮溶接された状態で油圧タンDEM 1, 2間に置かれる。溶接機はプラットホームに設置されたレールに沿って、BOX 柱の鋼板厚さに応じた一定速度で左から右へ移動しながら連続溶接する。プラットホームは BOX 柱を挟んで両側にあり、それぞれに溶接機があって、BOX 柱上面の左右の開先に沿って左右同時に溶接する。

放電を安定させるため、溶湯は常に進行方向と逆方向に一定速度で流れるように、溶接点での BOX 柱の角度 $\theta(x)$ を一定に保たなければならない。この目標角度は BOX 柱の種類によっても異なるが、およそ 0.3° 近辺である。角度調整は油圧タンDEM 1あるい

* 原稿受付 1996年10月18日。

*¹ 正員, 新潟大学工学部 (〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。*² 藤木鉄工(株) (〒957-01 新潟県北蒲原郡聖籠町東港3-2265-6)。

は 2 を上下させることによって行われる。

溶接機の溶接ヘッドは可動であり、傾いセンサによって、BOX 柱との位置関係が検出され、上下、左右方向に自動制御されている。

実験に使用した装置の、溶接機と油圧タンデムの仕様を以下に略記する。

[溶接機]

名称：2 電極サブマージアーク溶接機
 型式：SWT-24 R, L 形(株式会社ダイヘン)
 溶接電流：最大 2 600 A
 使用ワイヤ径： $\phi 6.4$ mm
 溶接速度： $20 \sim 35 \times 10^{-2}$ m/min
 溶接ヘッド制御ストローク：上下軸 0.3 m
 左右軸 0.5 m

[油圧タンデム]

油圧シリンダ(1 タンデムに並列 2 基使用)：
 型式：F 7-1CA125B140B520-ABD-T(堀内機械)
 シリンダ径： $\phi 80$ mm
 ストローク：0.65 m
 油圧ポンプ：
 型式：SQP1-7-1C2-15(安川電機)

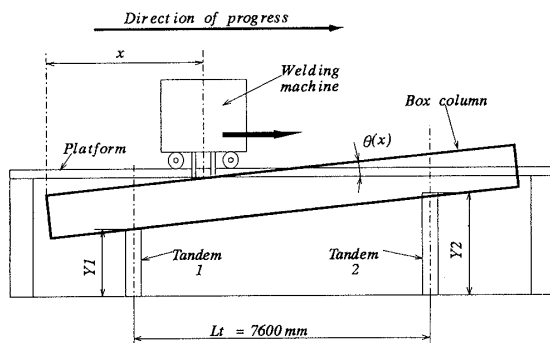


Fig. 1 Schematic view of continuous arc welding equipment

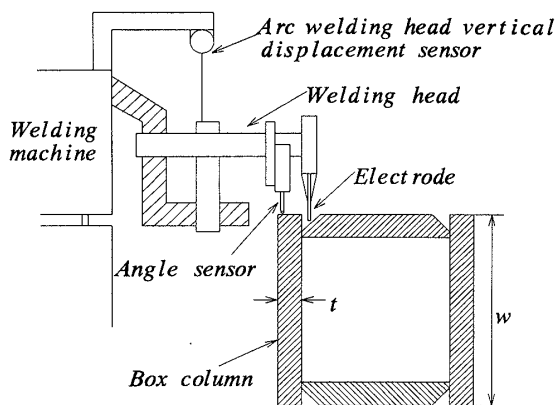


Fig. 2 Arrangement of sensors

油圧：14 MPa

吐出量：31.4 l/min

3. センサとそれらの配置

制御に使用するセンサは、BOX 柱の傾度を測定する角度センサ、溶接ヘッドの上下変位を測定する溶接ヘッド変位センサおよびタンデムの変位を測定するタンデム変位センサである。これらのセンサのうち前者の配置を図 2 に示す。

角度センサは、2 個の接触式変位センサを 100 mm 間隔に固定したものとし、検出角度 $\theta_s(x)$ はそれらの変位差から

$$\theta_s(x) = \tan^{-1}(\text{変位差}/100)$$

として求める。ここで x は溶接点の移動距離である。この角度センサは溶接ヘッドに取付け、傾度は BOX 柱の縦板上部で検出する。また電極との位置関係は、センサ中心部で、先行電極から 405 mm 先行している。制御量である溶接点での傾度が検出できなかった理由は、溶接点後方はかなり高温で、かつフラックスが存在するが、これを避けて角度センサを溶接ヘッドに取付けるにはこの配置しかなかったためである。

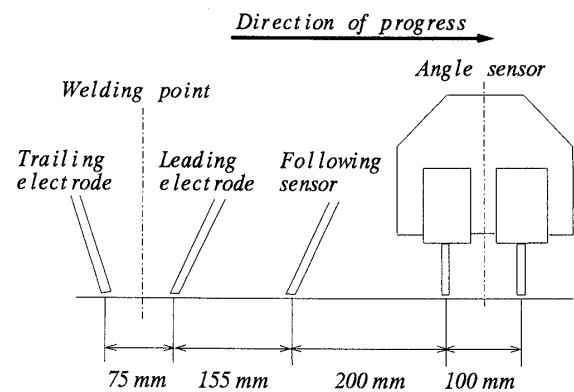
このように、センサ角度 $\theta_s(x)$ は制御量の溶接点角度 $\theta(x)$ とは異なるので、制御方法に工夫が必要となる。

溶接ヘッド変位センサはワイヤ式リニヤエンコーダを用いており、溶接機本体と溶接ヘッドの間に取付けて、溶接ヘッドの溶接機本体からの変位 $z(x)$ を検出する。これは溶接ヘッドの上下変位をそのストローク内に収めるために使われる。

タンデム変位センサもワイヤ式リニヤエンコーダを用いており、タンデム変位の制御に使われる。

ここで使用した三つのセンサの仕様を以下に示す。

[角度センサ]



二つの変位センサの差分演算方式であり、使用した変位センサは

- 名称：リニヤゲージ
- 型式：LG-1030(株式会社ミットヨ)
- ストローク：30 mm
- 最小表示量：10 μm
- 指示精度：8 μm

[溶接ヘッド変位センサ]

- 名称：ワイヤ式リニヤスケール
- 型式：D-540(武藤工業株式会社)
- ストローク：0.3 m
- 出力パルス数：2.5 mm^{-1}

[タンデム変位センサ]

- 名称：ワイヤ式リニヤスケール
- 型式：D-1250(武藤工業株式会社)
- ストローク：1 m
- 出力パルス数：5.0 mm^{-1}

使用したセンサはすべてデジタル方式である。この方式を採用した理由は、計算機を用いてデジタル制御することにもよるが、もう一つの理由は、溶接電源のトランスから強力な電磁波が発生し、アナログ方式ではこれをノイズとして拾う危険性があったからである。当初、角度センサに非接触式の電磁センサを試用してみたが、これをあきらめたのもこの理由による。

4. 制御系の構成

4.1 ブロック図 制御系のブロック図を図3に示す。

[記号説明]

- $\theta_d(x)$ ：溶接点目標角度 $^\circ$
- $\theta(x)$ ：溶接点角度 $^\circ$

- $\theta_r(x)$ ：センサ点目標角度 $^\circ$
- $\theta_s(x)$ ：センサ角度 $^\circ$
- $\theta_f(x)$ ：移動平均角度 $^\circ$
- $\Delta\theta(x)$ ：センサ点目標角度の補正値 $^\circ$
- $\Delta\theta_R(x)$ ：レール外乱の補正角度 $^\circ$
- $\theta_e(x)$ ：センサ点角度誤差 $^\circ$
- θ_t ：タンデム間角度 $^\circ$
- Y_{r1} ：タンデム1の目標変位 m
- Y_{r2} ：タンデム2の目標変位 m
- Y_1 ：タンデム1の変位 m
- Y_2 ：タンデム2の変位 m
- U_1 ：タンデム1の制御信号 1/s
- U_2 ：タンデム2の制御信号 1/s
- $z(x)$ ：溶接ヘッドの上下変位 m
- L_t ：タンデム間距離 m
- x ：溶接点の移動距離 m

制御は計算機を用いたデジタル制御方式で行う。サンプリング時間を測定と制御に分けて、それぞれ τ_m, τ_c とし

$$\tau_c = m\tau_m$$

とする。ここで、 m は $m > 1$ の整数である。

j, k をそれぞれ制御開始時からの測定、制御のサンプリング回数とすると、 x と j, k の間には次の関係が成立する。

$$x = vj\tau_m = vkt_c \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

v ：溶接速度 m/s

本章では x の関数を j, k の関数として表現する。

4.2 角度制御系 溶接点角度 $\theta(k)$ が制御量である。溶接点の目標角度 $\theta_d(k)$ は k に依存せず定値とする。 $\theta_r(k)$ はセンサ点の目標角度であり、

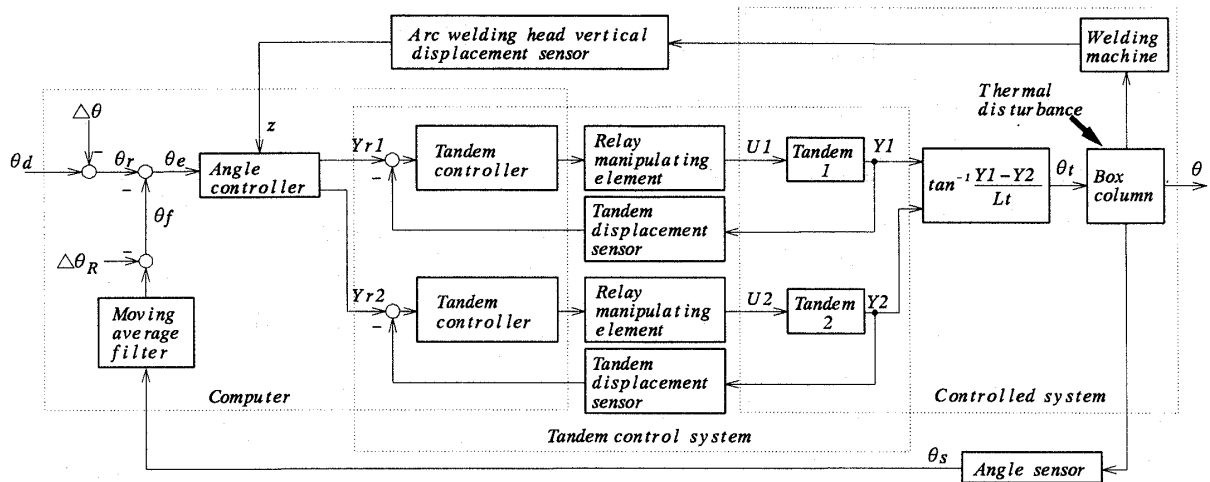


Fig. 3 Block diagram of control system

$$\theta_r(k) = \theta_a(k) - \Delta\theta(k) \dots\dots\dots (2)$$

とする。ここで、 $\Delta\theta(k)$ は溶接点とセンサ点が異なることによるセンサ点目標角度の補正值であり、有限要素法による BOX 柱の熱変形シミュレーションにより求める。これについては 5 章で述べる。

センサ角度 $\theta_s(j)$ は BOX 柱の縦板上面で検出しているため、検出面の凹凸による高周波外乱が重畳している。これをセンサ外乱と呼ぶ。また、角度センサが溶接ヘッドに取付けられ、溶接機がレール上を移動するために、レールの真直からのずれによる角度変動も重畳している。これを $\Delta\theta_R(k)$ とし、レール外乱と呼ぶ。これらの外乱の影響を軽減するため、まず $\theta_s(j)$ を移動平均フィルタに通してセンサ外乱の影響を軽減し、その出力からあらかじめ測定された $\Delta\theta_R(k)$ を差し引くことにした。この結果を移動平均角度と呼び、 $\theta_r(k)$ とする。

角度コントローラは、センサ点角度誤差 $\theta_e(k) [= \theta_r(k) - \theta_f(k)]$ と溶接ヘッド上下変位差 $z_e(k) [= z(0) - z(k)]$ の符号の組合せによって操作すべきタンデムを選択しながら、下記制御アルゴリズムによりタンデム 1, 2 の目標変位 $Y_{r1}(k)$, $Y_{r2}(k)$ を演算する。

[角度コントローラの演算アルゴリズム]

$$\text{if } (z_e(k) \leq 0 \text{ and } \theta_e(k) \leq 0) \\ \text{or } (z_e(k) \geq 0 \text{ and } \theta_e(k) \geq 0)$$

then

$$Y_{r2}(k) = K_p Y_e(k) + K_I \sum_{i=0}^k Y_e(i) \dots\dots\dots (3)$$

else

$$Y_{r1}(k) = -K_p Y_e(k) - K_I \sum_{i=0}^k Y_e(i) \dots\dots\dots (4)$$

where

$$Y_e(k) = \{\tan(\theta_r(k)) - \tan(\theta_f(k))\} L_t$$

制御則は、角度誤差をタンデム変位誤差 $Y_e(k)$ に換算しているが、PI 制御の形である。移動平均フィルタを通してセンサ外乱の影響は除去しきれないので微分動作は採用しなかった。制御パラメータ K_p , K_I の設計は 6 章で述べる。

4.3 タンデム変位制御系 タンデム変位制御系の具体的なブロック図を図 4 に示す。タンデム 1, 2 の制御系は同じであり、図 4 では変数の添字 1, 2 は除

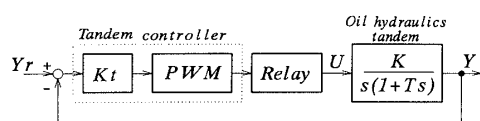


Fig. 4 Tandem control system

いてある。

タンデムコントローラでタンデム変位誤差 $[= Y_r(k) - Y(k)]$ を比例演算した後パルス幅変調し、リレーを介して油圧電磁弁を開閉している。制御パラメータ K_t の設計は 6 章で述べる。

以上のように、本制御系はカスケード制御で構成されている。

5. 外乱の評価と補正

本制御系に加わる大きな外乱は、センサ外乱、レール外乱および熱外乱である。以下に、それぞれの評価とその軽減法、補正法について述べていく。

5.1 センサ外乱 これは BOX 柱の縦板上面の凹凸によって生ずる外乱である。

図 5 は、溶接をしないで溶接機を走らせ、測定サンプリング時間 $t_m = 4s$ で測定した角度センサ出力 $\theta_s(j)$ にレール外乱補正を加えた結果を、BOX 柱の 5.8m 区間記録したものである。表面粗さによる高周波成分とうねりがあり、 $\pm 0.08^\circ$ 程度の変動幅をもっている。

この外乱の高周波成分の影響を軽減するため、次のような移動平均フィルタを導入する。

$$\theta_f(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \theta_s(k-i) \dots\dots\dots (5)$$

n を大きくすると平滑化は進むが位相が遅れる。この両者を勘案して検討した結果、本研究では $n = 20$ を採用した。

5.2 レール外乱 $\Delta\theta_R(x)$ これは角度センサが溶接機の可動部分の溶接ヘッドに取付けられ、溶接機がレール上を走行するために、レールの真直からの変動が角度センサに及ぼす外乱である。

図 6 はレール位置と溶接機の傾き角の関係を示している。レール位置 100 mm 間隔で溶接機の角度を水準器で測定したものである。レールは欠損部もあり、

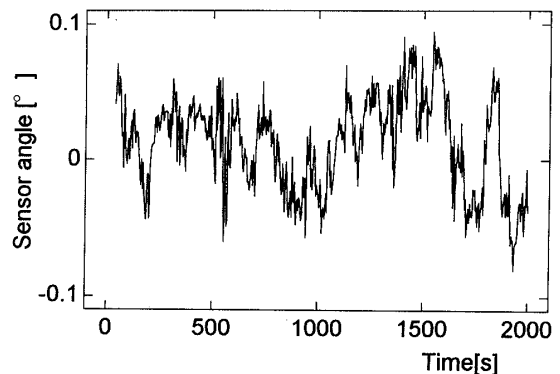


Fig. 5 Sensor disturbance

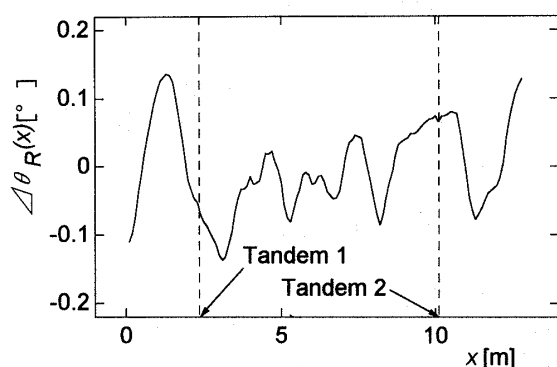


Fig. 6 Rail disturbance

変動は大きいところで、 $\pm 0.1^\circ$ を超えている。

制御時におけるレール外乱による補正值は、 $\Delta\theta_R(x)$ の内挿値を使い、式(1)を使って $\Delta\theta_R(k)$ に変換したものをを用いた。

5・3 熱外乱 これは溶接時に発生する熱によってBOX柱が変形し、溶接点の傾度に変動を与える外乱である。この変動は制御によって抑えることができるが、本制御では溶接点とセンサ点が異なるため、両点での角度差を把握する必要がある。また、角度コントローラの制御パラメータの設計も、熱変形を考慮して行う必要がある。

このことから、有限要素法による熱変形シミュレーションを行い、詳細に検討することにした。

5・3・1 熱変形シミュレーション 計算機はCONVEXを使い、ソフトウェアMARCで計算した。

シミュレーションで仮定した条件を以下に示す。

BOX柱の形状： $0.7w \times 0.7w \times 12.3Lm$

板厚： $t=55\text{ mm}$

熱伝達率： $2.33 \times 10^{-5}\text{ w}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})$

熱伝導率： $7.44 \times 10^{-2}\text{ w}/(\text{mm} \cdot \text{K})$

比熱： $0.49\text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$

線膨張係数： $11.0 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$

ポアソン比： 0.3

密度： $7.86 \times 10^{-3}\text{ g}/\text{mm}^3$

縦弾性係数： 205.8 GPa

初期温度： $20\text{ }^\circ\text{C}$

周囲温度： $20\text{ }^\circ\text{C}$

溶接速度： $2.9\text{ mm}/\text{s}$

溶接機出力： 59 kW

ただし、熱物性値は常温の値を用いた。

図7に要素分割図を示す。溶接機は左右にあり同時に溶接をするので、対称と考えて縦断面で2分割し、片側のみを計算した。下板を省略したのは、要素数が多くなり、計算時間が膨大になるのを避けるためであ

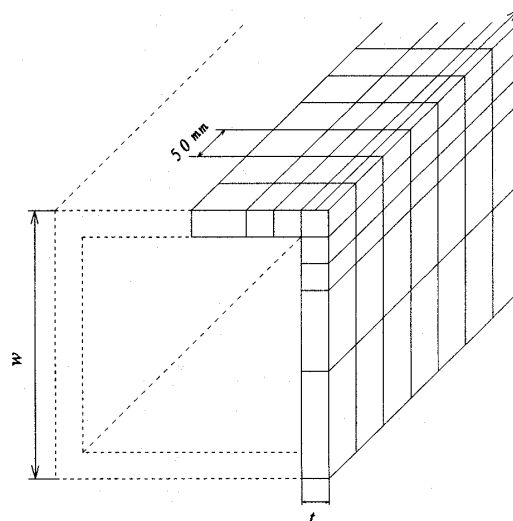


Fig. 7 Cross-sectional view of elements division

る。下板の温度上昇は少なく熱変形に対する剛性もほとんど縦板に依存するので、下板を省略したことによる計算誤差は小さいと考えられる。要素数と節点数は

要素数： 2460

節点数： 5437

である。

シミュレーションは熱伝導と熱応力解析の連成で行われる。まず熱伝導解析では、溶接機の二つの電極が75 mm間隔であることから、熱源は縦板上面の隣合った2要素に分割して入り、これが溶接速度で移動するものとして温度解析を行った。また熱応力解析では、垂直方向はタンデム1, 2上の要素接点変位を拘束するが、水平方向はタンデム2上のみ要素接点変位を拘束し、タンデム1上では拘束がないとして熱変形を求めた。

熱源の移動とともに、高温部は熱源近傍を尾を引く形で広がっていき、BOX柱の下部や熱源の前方にはそれほど温度上昇をしないことがわかった。なお、溶接時に熱源から少し離れた2, 3箇所BOX柱の温度を実測し計算結果と比較することによって、本シミュレーションの熱伝導解析に用いられた仮定条件が妥当であることを確認した。

熱伝導解析結果を基に行った熱応力解析による熱変形シミュレーションの結果を、図8に示す。変位は20倍に拡大して示してある。溶接を開始するとすぐに変形が始まり、溶接終了時にはほぼ対称な弓形となる。反りの大きさは最大で77 mmになっている。この変形量も溶接時のBOX柱の実測値とほぼ一致し、熱応力解析における仮定条件の妥当性が確認できた。

5.3.2 センサ点目標補正角度 $\Delta\theta(x)$ 図9は熱変形による BOX 柱の溶接点角度 $\theta(x)$, センサ角度 $\theta_s(x)$ および両者の角度差 $\Delta\theta(x)$ を示している。 x が小さいときに $\theta(x)$ が突変している。これは角度の算出を熱源直後の隣合った2要素の変位から求めたが、熱源供給直後は局所的な熱膨張によって局所的に角度がついた結果であり、大局的にみれば変化がないと考えて差し支えない。

この図によると、 $\theta(x)$ は熱源がタンデム1の地点までにあるときはわずかに負の定値であり、タンデム1の地点を過ぎるとほぼ二次曲線的に減少していく。 $\theta_s(x)$ も同じ傾向を示すが、 $\theta_s(x)$ は $\theta(x)$ より少し大きく、両者の角度差 $\Delta\theta(x)$ は x に依存せずほぼ定値

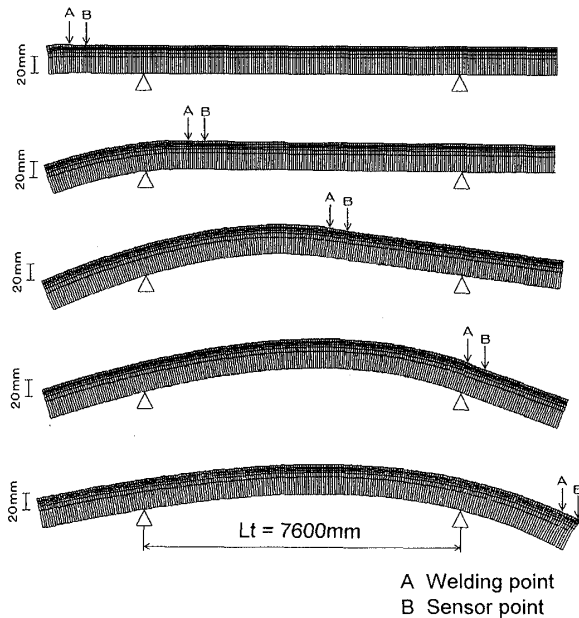


Fig. 8 Thermal deformations of a BOX column in FEM simulation

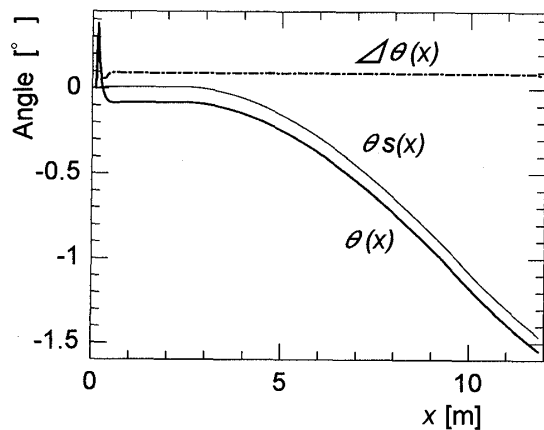


Fig. 9 Welding point angle $\theta(x)$, sensor angle $\theta_s(x)$ due to thermal disturbance and correction angle $\Delta\theta(x)$

となった。この計算は BOX 柱の種類を変えて数通り行ったがその傾向は全く変わらず、ただ $\Delta\theta(x)$ の大きさのみが若干異なる結果を得た。このことから $\Delta\theta(x)$ は定値とし、式(2)からセンサ点角度の目標値 $\theta_r(x)$ も定値とする。

6. 制御パラメータの設計

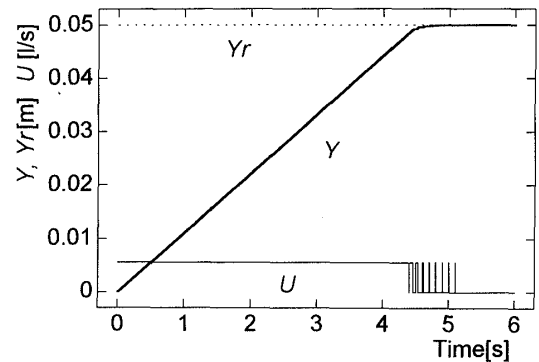
6.1 タンデムコントローラ 図4のタンデム変位制御系において、パルス幅変調 PWM は、最小パルス幅 10 ms のパルスが発生できるように設計した。

油圧タンデムの操作は、下部シリンダへの圧油の供給と排出を電磁弁の切替えによって行っている。したがってピストンの上昇、下降速度は BOX 柱を搭載していない無負荷時でも異なり、また BOX 柱搭載時はその重量によっても異なる。

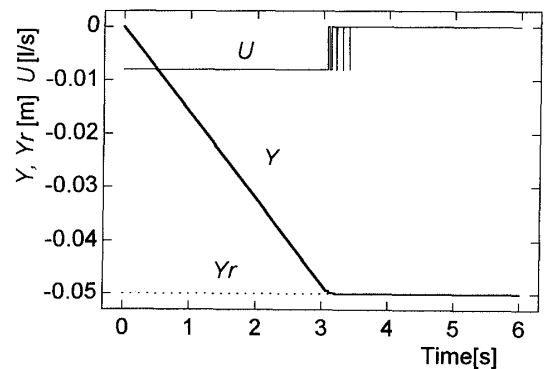
図4の油圧タンデムの伝達関数で、ゲイン K と時定数 T を、質量 1.38×10^3 kg の BOX 柱を搭載しているときのピストンの上昇、下降速度の実測値、シリンダの断面積などから

ピストン上昇時:

$$K=10.0 \text{ m}^{-2}, T=7.15 \times 10^{-4} \text{ s}$$



(a) ascent



(b) descent

Fig. 10 Step responses of tandem displacement control system

ピストン下降時：

$$K=16.0 \text{ m}^{-2}, T=2.35 \times 10^{-4} \text{ s}$$

のように決定し、この数値を用いて数値シミュレーションにより比例制御パラメータ K_i を $K_i=40$ と決定した。このときの $Y_r=\pm 0.05 \text{ m}$ のステップ状変化に対するタンデム変位の応答を、それぞれ図 10(a), (b) に示す。

BOX 柱の重量負荷のために、上昇時に比べて下降時の速度が大きいことがわかる。このように BOX 柱の質量の変化は応答速度に影響を及ぼすが、 K_i は $K_i=40$ の固定値のままでも、応答性能にはそれほど大きな影響を及ぼさない。

6.2 角度コントローラ 式(3), (4)の制御則における制御パラメータ K_p, K_i をセンサ外乱および熱外乱を考慮して設計する。

図 5 のセンサ外乱と図 9 の熱外乱によるセンサ角度の和を、式(5)の移動平均フィルタ ($n=20$) を通過させた出力を $\theta_n(k)$ とする。この外乱 $\theta_n(k)$ を使って数値シミュレーションにより制御パラメータ K_p, K_i を設計し、 $K_p=1, K_i=1$ と決定した。

図 11(a), (b) はそれぞれ、P 動作、PI 動作の制御結果を示している。 $\theta_f(k)$ が制御出力である。P 動作

のときは、時間が経過するにつれて熱外乱の影響により定常偏差が生じる傾向を示すが、PI 動作にするとそれが解消されている。

7. 実験および結果

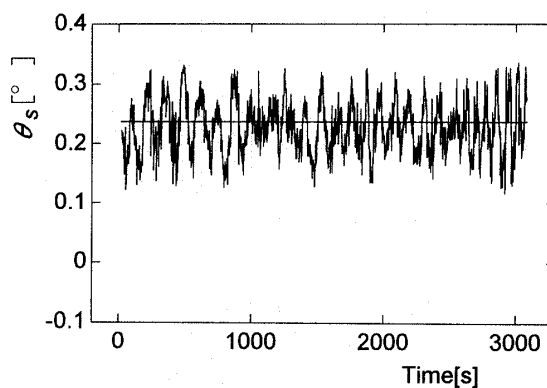
数種類の BOX 柱で実験を行ったが、本稿では次に示す実験条件で行った結果を記載する。

[実験条件]

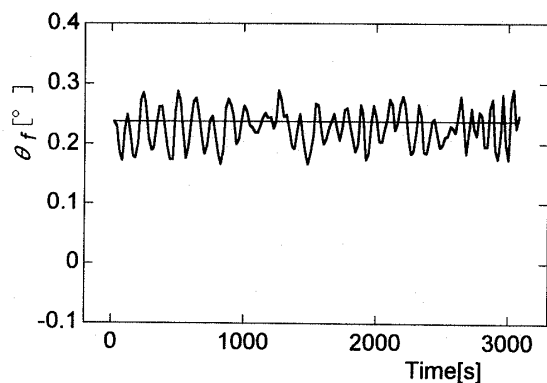
BOX 柱形状：0.7 w×0.7 w×12.3 Lm

厚さ： $t=55 \text{ mm}$

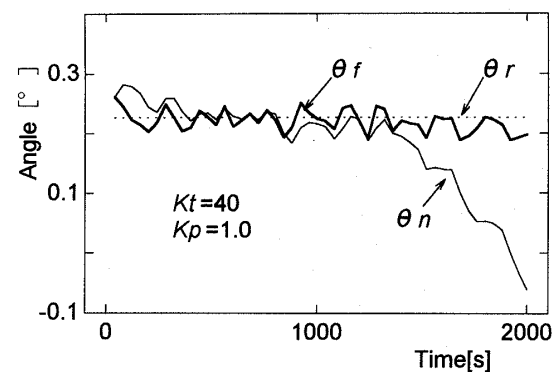
溶接速度：2.9 mm/s



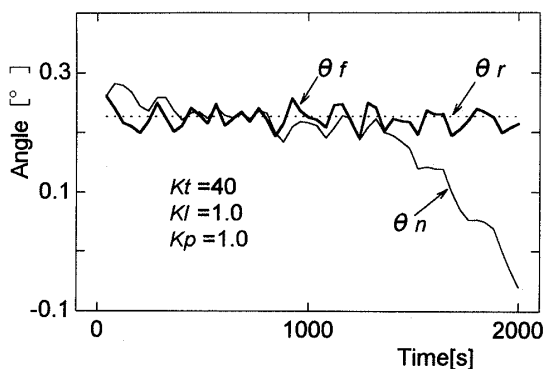
(a) Sensor angle $\theta_s(k)$



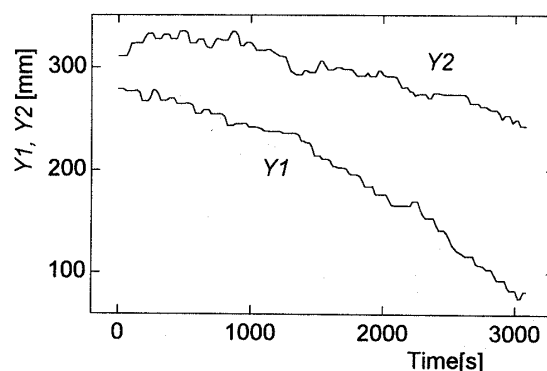
(b) Moving average filter angle $\theta_f(k)$



(a) P control



(b) PI control



(c) Tandem displacements Y_1 and Y_2

Fig. 11 Numerical simulations of control

Fig. 12 Experimental results of control

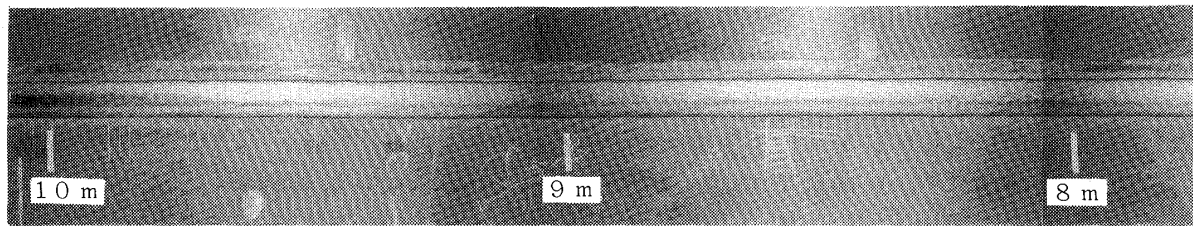


Fig. 13 Welded surface

測定サンプリング時間： $\tau_m=2$ s

制御サンプリング時間： $\tau_c=20$ s

移動平均フィルタ： $n=20$

センサ点目標角度： $\theta_r(k)=0.235^\circ$

BOX 柱の種類による溶接点の目標角度は、経験的にわかっている。センサ点目標角度 $\theta_r(k)$ は、その値よりわずかに大きく設定した。

図 12(a), (b) および (c) に、それぞれセンサ角度 $\theta_s(k)$ 、移動平均角度 $\theta_f(k)$ 、およびタンデム変位 $Y_1(k)$ 、 $Y_2(k)$ を示す。

図 13 は溶接部を 1 m 間隔で写真撮影したものの一部を示したものである。

図 12 から、センサ外乱の影響は移動平均フィルタを通過させても除去しきれないため、 $\theta_f(k)$ で $\pm 0.06^\circ$ 程度の変動幅をもつが、平均的に $\theta_r(k)$ に追従しており、制御量である溶接点での角度 $\theta(k)$ はほぼ定値に制御されていたと考えられる。このことは、図 13 に示すように、溶接結果のビードの均一性からも確認できた。

8. あとがき

BOX 柱の四隅を連続アーク溶接するときの BOX

柱傾度をフィードバック制御する一方法を提案した。

制御系はカスケード結合とし、マイナーループのタンデム変位制御系とメインループの角度制御系で構成されている。検出量と制御量が異なるため、BOX 柱の熱変形を有限要素法で解析し、これに基づいて制御系を設計した。

数種類の BOX 柱で、実機により実験をしたが、すべて安定した制御結果を得ることができた。また、溶接部の外観検査、超音波探傷検査とも良好であった。

最も苦労したのは、角度センサとして何を使い、それをどこに取付けるかという問題である。この検討に本研究の大半の期間を費やしたが、それでも、制御量と異なる信号の検出、センサ外乱およびルール外乱等の問題が派生した。これらに対する軽減法や補正法を取入れたが、予想以上に大きかったのがルール外乱であり、このさらに正確な補正法を検討するのが今後の課題である。

文 献

- (1) 柴田泰, 鉄骨におけるアーク溶接自動化技術の現状と課題, 溶接学会誌, 62-6(1993), 442-447.
- (2) 中山繁・田中将基, 最新の溶接ロボット技術, 溶接学会誌, 64-6(1995), 437-441.