実橋におけるプレートガーダの溶接変形予測の研究*

青木尚夫**, 長井憲一** 桑島英明***, 渡辺正紀****

Estimation of Welding Deformations for Actual Plate Girders*

by Hisao Aoki**, Kenichi Nagai** and Hideaki Kuwajima***, Masaki Watanabe****

The present study is attempt to establish estimation system for welding deformation of plate girder used in bridge. Welding deformations for actual plate girders (12 members) are measured, and approximate analyses are conducted by inherent strain and elastic beam theory, furthermore, numerical estimation system is attempted using Fourier-series and analyzed results for welding deformations.

The main results are follows.

- (1) Longitudinal shrinkage and longitudinal bending deformation caused by 4 fillet welds to make-up I-section plate girder are indicated by uniform shrinkage strain for neutral axis and curvature, and they are affected welding sequence, each fillet weld, and correlated respectively by approximate linear regressions with parameters Q/A , $Q \cdot e/I$ (Q : welding heat input, A : area of section, e : moment arm, I : geometrical moment of inertia) for each fillet weld and welding sequence.
- (2) Distribution of deflection for a plate girder with varied sections along the longitudinal direction is estimated accurately by numerical analysis using above linear regressions and Fourier-series.

1. 緒 言

橋梁などにおけるプレートガーダを製作する場合, 高カボルト接合部の穿孔時期より, (i) 先孔方式, (ii) 後孔方式の2方法がある。先孔方式とは, 部材単体時に孔明作業を完了し, その後, 組立, 溶接を行うものであり, 後孔方式とは, 組立, 溶接による部材完成後に孔明けを行うものである。したがって, 前者は孔明作業が容易なため, 後者に比べ有利な工法と考えられる。

しかしながら, 拡孔を伴わない先孔フルサイズ方式の場合, 部材単体時に一連の溶接変形量を見込んで切断及び孔明を行うことになり, 部材寸法精度の確保には精度の良い溶接変形量予測式を確立することが必要となる。一方, 溶接変形に関する研究は古くから行われており, 近年では, 熱弾塑性有限要素法などによる過度的変形挙動を含めた解析例も報告されているが¹⁻³⁾, 実橋のプレートガーダにおける複雑な条件下の問題に直ちに適用したいものと考えられる。そこで, 本研究ではプレートガーダの一連の溶接工程のうち, ウェブとフラン

ジのI組すみ肉溶接による溶接変形について, 第一近似的に一次元固有ひずみ理論と梁理論による解析方法を研究し, これらを基に, 変断面部材を含めたプレートガーダの溶接変形量をコンピュータにより予測するシステム化の試みを検討することとした。

本報では, 実橋のプレートガーダ12部材についてI組すみ肉溶接の溶接変形を測定, 解析し, 部材剛性, 溶接条件及び溶接順序などを配慮した上記の予測システムの妥当性を検討した。

2. I組すみ肉溶接変形のパラメータ

プレートガーダの構成部材であるフランジとウェブをすみ肉自動溶接で組立てる場合に生じる溶接変形において, 部材長方向の収縮量ならびに縦曲り変形量に着目し, 一次元固有ひずみ理論と梁理論による近似的解析を行うこととした⁴⁾。すなわち, I組すみ肉溶接による収縮固有ひずみ g_z により, I断面プレートガーダがFig. 1に示すように曲がり変形を生じ, この場合, 平面保持の梁理論が成立つものと仮定する。Fig. 1において, y 軸まわりの曲率を $1/\rho_y$, x 軸まわりの曲率を $1/\rho_x$ とすると, 部材長方向のひずみ ϵ_z は中立軸の一樣ひずみを ϵ_N として次式で表わされる。

$$\epsilon_z = \epsilon_N + y/\rho_y + x/\rho_x \quad \cdots \cdots (1)$$

固有ひずみ理論により, 生じる応力 σ_z は次式とな

*原稿受付 昭和56年2月2日 (昭和54年度春季全国大会にて発表)

**正 員 トビー工業(株)技術研究所 Member, Topy Industries Limited.

*** トビー工業(株)技術研究所 Topy Industries Limited.

****名 誉 員 大阪産業大学 Honorary Member, Osaka Industries Unive.

Fig. 1 Longitudinal bending deformation of plate girder caused by inherent strain "gz" according to fillet welding.

る。

$$\sigma_z = E(\epsilon_N + y/\rho_y + x/\rho_x - g_z) \quad \dots\dots(2)$$

ここで、プレートガーダに外力が作用していない条件式

$$\left. \begin{aligned} F &= \int \sigma_z dA = 0 \\ M_x &= \int \sigma_z y dA = 0 \\ M_y &= \int \sigma_z x dA = 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(3)$$

に (2) 式を代入し、プレートガーダの場合、 $1/\rho_x \Rightarrow 0$ と仮定して整理すると次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_N &= \left(\int g_z dA \right) / A \\ 1/\rho_y &= \left(\int g_z x dA \right) / I_y \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 A はプレートガーダの断面積、 I_y は y 軸まわりの断面 2 次モーメントである。一方、フランジとウェブのすみ肉溶接による固有ひずみ領域は断面積に比べて小さく、中立軸からすみ肉溶接部の重心位置までの距離をモーメントアーム e_x とし、また、固有ひずみ領域の大きさを入熱量 Q に近似的に比例すると仮定すると (4) 式は次式で表わされることになる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_N &= \alpha Q / A \\ 1/\rho_y &= \beta Q \cdot e_x / I_y \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(5)$$

ここで、 α 、 β は比例定数とする。部材長、断面形状の異なるプレートガーダの縦曲り量、縦収縮量 (部材長方向の収縮量) の溶接変形量を統一的に表わすには、縦曲り曲率 $1/\rho_y$ と中立軸の一樣ひずみ ϵ_N を用いることとし、(5) 式により、それぞれのパラメータを $Q \cdot e_x / I_y$ 、 Q/A で整理することとした。以後、 $1/\rho_y$ 、 I_y 、 e_x を $1/\rho$ 、 I 、 e と単に表記する。本節における解析理論に基づき、プレートガーダの実橋部材の I 組すみ肉溶接変形量の測定データを解析することとした。なお、溶接入熱量 Q として $60 EI/v$ (Joule/cm) を用いた。ここで、 E ; アーク電圧 (Volt)、 I ; 溶接電流 (Amp)、 v ; 溶接速度 (cm/min) である。

3. 測定方法

3.1 供試体と溶接方法

プレートガーダの I 組すみ肉溶接変形の測定に供した

Table 1 Sectional characteristics and welding conditions of plate girders.

Plate girder	Girder length (mm)	Height of girder (mm)	Sectional number	Sectional characteristics				Welding conditions					Welding sequence
				Section	Sectional length (mm)	Sectional area A (mm ²)	Geometrical moment of inertia I ($\times 10^8$ mm ⁴)	Moment arm e (mm)	Pass number	Welding current (Amp)	Arc voltage (Volt)	Welding speed (mm/min)	
A	8490	840	1	1	—	16760	2.04	ϵ_U 420 ϵ_L 420	1~4	270	30	350	S ₂
B	8490	840	1	1	—	16760	2.04	ϵ_U 420 ϵ_L 420	1~4	270	30	350	S ₂
C	8400	1200	1	1	—	32500	9.13	ϵ_U 600 ϵ_L 600	1~4	700	32	500	S ₁
D	8400	1200	1	1	—	32500	9.13	ϵ_U 600 ϵ_L 600	1~4	700	32	500	S ₁
E	13659	1600	1	1	—	25120	9.72	ϵ_U 920 ϵ_L 680	1,4 2,3	640 640	32 32	615 725	S ₁
F	8975	1600	3	1	1270	24550	9.44	ϵ_U 904 ϵ_L 696	1	640	32	615	S ₁
				2	4050	21120	7.41	ϵ_U 836 ϵ_L 764	2	640	32	725	
				3	3655	19000	6.04	ϵ_U 825 ϵ_L 775	4	640	32	615	
G	8225	1450	1	1	—	27430	9.47	ϵ_U 871 ϵ_L 579	1,4 2,3	700 700	34 34	600 700	S ₁
H	10313	1450	2	1	1187	27430	9.47	ϵ_U 871 ϵ_L 579	1 2	700 700	34 34	600 700	S ₁
				2	9125	24930	8.32	ϵ_U 845 ϵ_L 605	3 4	700 700	34 34	700 600	
I	8225	1450	1	1	—	27430	9.47	ϵ_U 871 ϵ_L 579	1,2 3,4	700 700	34 34	700 600	S ₂
J	10313	1490	2	1	1187	27430	9.47	ϵ_U 871 ϵ_L 579	1 2	700 700	34 34	700 700	S ₂
				2	9125	24930	8.32	ϵ_U 845 ϵ_L 605	3 4	700 700	34 34	600 600	
K	16110	2050	1	1	—	42450	29.6	ϵ_U 1256 ϵ_L 794	1,4 2,3	670 675	32 32	460 580	S ₁
L	11940	2050	3	1	1900	42450	28.6	ϵ_U 1256 ϵ_L 794	1,4 2,3	670 670	32 32	460 580	S ₁
				2	5750	34680	21.2	ϵ_U 1206 ϵ_L 844	1,4 2,3	670 670	32 32	710 710	
				3	4290	28320	15.5	ϵ_U 1055 ϵ_L 995	1,4 2,3	670 670	32 32	710 710

Fig. 2 Explanation of welding sequence S_1 and S_2 .

Fig. 3 Examples of measured locations by contact strain gage. (a) Plate girder E with equal section along the longitudinal direction. (b) Plate girder F with varied sections.

部材の断面性状ならびに溶接条件を Table 1 に示す。

Table 1 において、区間数というのは、部材長方向における桁断面剛性の変化区間を表わすものであり、例えば、区間数 1 とは部材長方向で断面変化のない等断面部材であり、区間数 3 とは部材長方向の 3 区間で異なった断面剛性を有する変断面部材である。また、4 箇所のすみ肉溶接施工順序により、溶接順序 S_1 と溶接順序 S_2 に区別し、それらの順序を Fig. 2 に示した。

なお、溶接法はサブマージーク溶接による水平すみ肉溶接施工であり、用いた溶接材料は 4.8mm 径の 50 キロ級高張力鋼用ワイヤと溶融形フラックスの組合せ (JIS YSF 52-W 41) を用いた。

3.2 溶接変形の測定方法

プレートガーダのように部材長が大きく、しかも、変断面部材のように部材長方向で剛性が変化する場合は部材長方向で変形挙動が相違するものと考えられる。

そこで、Fig. 3 に一例を示すように、部材長方向の数カ所において、標点距離 300 mm でコンタクトボールを打ち、押当て式ひずみ計 (コンタクトタイプ、最小目盛 1/1000 mm) により、桁高方向各位置における変位量分布を 4 箇所のすみ肉溶接終了ごとに測定した。

また、変断面部材については変断面区間ごとに測定し、変形挙動を照査することとした。なお、測定時の温度変化については、同材質、同標点間距離の補正ゲージにて測定値を補正した。さらに、縦曲り量については、

ダイヤルゲージ (最小目盛 1/100 mm) を利用したたわみ量測定装置を用いて、部材長方向のたわみ量分布を一部の供試体について測定し、後述する解析値ならびに予測値と比較することとした。

4 測定ならびに解析結果と考察

4.1 $1/\rho$ と ε_N とパラメータとの関係

2 節で述べたように、1 組すみ肉溶接による縦曲り量と縦収縮を $1/\rho$ と ε_N で表わすと、桁高方向の任意の位置における部材長方向のひずみ ε は次式で表わされる。

Fig. 4 Example of displacement distribution measured by contact strain gage. (Plate girder E)

Fig. 5 Correlation between average of absolute value of curvature ($|1/\rho|_{av}$) and parameter Qc/I .

Fig. 6 Correlation between average of longitudinal strain at neutral axis ($\varepsilon_{N av.}$) and parameter Q/A .

$$\varepsilon = \varepsilon_N + (1/\rho) \cdot y \quad \dots\dots(6)$$

ここで、 y は中立軸からの桁高方向の距離であり、 $1/\rho$ は下フランジ側が凹になれば負とし、凸になれば正とする。コンタクトボールによる変位量分布の測定結果の一例を Fig. 4 に示すが、これらの測定データから、(6) 式における ε_N 、 $1/\rho$ を最小 2 乗法により、各すみ肉溶接終了ごとならびに各測定位置ごとに算出した。

これらの算出された ε_N と $1/\rho$ を変断面ごとに平均し、平均曲率の絶対値 $|1/\rho|_{av.}$ と中立軸の平均一樣ひずみ $\varepsilon_{N av.}$ と (5) 式のパラメータ $Q \cdot e/I$ 、 Q/A との相関を溶接順序 S_1 、 S_2 で示したのが Fig. 5 ならび Fig. 6 である。

これらの結果より、溶接順序 S_1 の曲率変化は 1 組すみ肉溶接の溶接回数の増加につれ、その変化度合が小さくなり、また、溶接順序 S_2 では 2 回目と 3 回目の曲率変化が溶接順序 S_1 に比べ逆転する傾向が認められる。これらの傾向は中立軸の一樣ひずみについても同様なことといえる。このように、プレートガーダの I 組すみ肉溶接のパス数の増加に伴う曲率変化度合の減小や溶接順序の違いによる逆転現象の原因として、溶接回数の増加につれ曲げ剛性が増加すること、また、溶接残留応力と熱応力の相互干渉などによるものと考えられる^{1,2)}。

Fig. 7 Comparison between experimental value and calculative value for deflection distribution by 4 fillet welds. (Plate girder H)

なお、図中の式は各すみ肉溶接終了ごとの直線回帰式を示したものである。

4.2 縦曲り量分布

部材長方向の曲率分布が既知であれば、たわみの基礎方程式により、部材長方向のたわみ量分布が算出される⁵⁾。

$$\delta(x) = \left\{ \frac{1}{L} \int_0^L \frac{L-\xi}{\rho(\xi)} d\xi \right\} x - \int_0^x \frac{x-\xi}{\rho(\xi)} d\xi \quad \dots(7)$$

(7) 式における、 L は部材長であり、 $\delta(x)$ は部材長方向で x の距離におけるたわみ量である。なお、 $\rho(\xi)^{-1}$ は各測定位置ごとに最小 2 乗法により算出した $1/\rho$ を階段関数として与え、(7) 式による縦曲り量分布を電算にて算出した。このようにして求めたすみ肉溶接の各溶接回数ごとの縦曲り量分布の解析値と 3. 2 項に述べたダイヤルゲージによる実測値との比較の一例を供試体 H について示したのが Fig. 7 である。この図より、両者は比較的良好一致を示し、このことから、I 組すみ肉溶接による部材長方向の曲率変化分布を前もって把握し得れば、縦曲り量分布を予測し得ることが示唆される。

5. 溶接変形量の予測システム

通常のプレートガーダの多くは、部材長方向の数カ所で変断面を有し、このような、変断面部材を含めた溶接

Fig. 8 Representation of stepwise curvature change for longitudinal direction.

Fig. 9 Flowchart of estimation system of deflection distribution for build-up plate girder.

変形量の予測システムを検討した。なお、プレートガタの溶接変形量のうち、中立軸の一樣収縮量は次式で、

$$\Delta L_N = \int_0^L \varepsilon_N(x) dx \quad \dots\dots (8)$$

比較的容易に予測し得るものとし、ここでは、縦曲り量分布の予測システムを提示した。(8)式の ΔL_N は中立軸の縦収縮量であり、 $\varepsilon_N(x)$ は部材長方向の中立軸の一樣ひずみ分布である。

5.1 階段的変断面部材の縦曲り量の解法

変断面部材の1組すみ肉溶接による曲率変化量は変断面区間ごと、各すみ肉溶接終了ごと、また、溶接順序によって相違し、それぞれ、Fig. 5に示した直線回帰式に従うものとする。このように、変断面区間ごとに異なった曲率分布を呈する縦曲り量の近似計算をフーリエ級数により試みたものである。この方法は、著者の一人が、外力が作用する場合の任意の変断面を有する梁および柱の問題における解法例⁶⁾を外力の作用していない溶接変形の問題に適用したものである。すなわち、Fig. 8に示すように、ある基準曲率を ρ_0^{-1} とすると変断面部材の曲率を次式で表わす、

Table 2 4 models for numerical analysis calculation.

Model	Members length (mm)	Sectional number	Section	Sectional length (mm)	Numerical moment of inertia I (10 ⁸ mm ⁴)	Moment arm e (mm)	Welding conditions Welding current (Amp)	Welding speed (mm/min)	Welding sequence LF, Lower flange UF, Upper flange
1 (Pair girders)	8975	3	1	1270	9.44	640	32	615	1 LF
			2	4050	7.41	640	32	725	2 UF
			3	3655	6.04	640	32	725	3 LF
2	8975	3	1	1270	9.44	640	32	615	1 LF
			2	1270	7.41	640	32	725	2 UF
			3	6435	6.04	640	32	725	3 LF
3	8975	3	1	1270	20.00	640	32	615	1 LF
			2	4050	9.00	640	32	725	2 UF
			3	3655	4.00	640	32	725	3 LF
4	8975	3	1	1270	9.44	640	32	615	1 LF
			2	4050	7.41	640	32	725	2 UF
			3	3655	6.04	640	32	725	3 LF

Note: Hatched parts show changed condition comparative Model 1

$$\frac{\rho^{-1}}{\rho_0^{-1}} = H_0 + \sum_1^{\infty} \left\{ H_m \cos \frac{m\pi}{l} x + K_m \sin \frac{m\pi}{l} x \right\} \quad \dots (9)$$

これを、たわみの基礎方程式に代入すると次式となる。

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} = \rho_0^{-1} \left[H_0 + \sum_1^{\infty} \left\{ H_m \cos \frac{m\pi}{l} x + K_m \sin \frac{m\pi}{l} x \right\} \right] \quad \dots\dots (10)$$

上式を2回積分し、 $x=0$, l で $y=0$ とすると縦曲り量 y は次式で表わされる。

Fig. 10 Estimated deflection distribution.

Fig. 11 One example of comparison between experimental value and estimated value of deflection distribution.

$$y = \rho_0^{-1} \left[\frac{1}{2} H_0 x^2 + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{-l^2}{(m\pi)^2} \right\} H_m \cos \frac{m\pi}{l} x + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{-l^2}{(m\pi)^2} \right\} K_m \sin \frac{m\pi}{l} x - \frac{x}{l} \left\{ \frac{1}{2} H_0 l^2 + \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{l}{m\pi} \right)^2 H_m \left\{ 1 - (-1)^m \right\} + \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{l}{m\pi} \right)^2 H_m \right\} \right] \quad \dots (11)$$

この (11) 式を用いた変断面部材の縦曲り量分布を算出するフローチャートを Fig. 9 に示した。(11) 式の数値計算は解の収束性をみて m を設定した。使用した計算機は FACOM230 である。

5.2 数値解析計算

前項に述べた予測システムによる数値解析計算を Table 2 に示す 4 モデルについて行った。すなわち、モデル 1 を供試体 F の区間 3 の変断面部材とし、これを基準として、モデル 2 は変断面区間長比率を 1 : 1 : 5 に変化させたものである。モデル 3 は断面 2 次モーメント比率を 1 : 0.4 : 0.2 に大きく変化させ、さらに、区間 1 の断面 2 次モーメントを $2.0 \times 10^{10} \text{ mm}^4$ とモデル 1 のほぼ 2 倍とした。モデル 4 は溶接順序を S_2 とした場合である。

これらの 4 モデルについて、Fig. 9 に示したフローチャートにより数値計算した結果を Fig. 10 に示す。これらの図より、変断面剛性比率を大きく変えたモデル 3 ではゆがんだ縦曲り変形を生じることが顕著に認められる。また、溶接順序 S_2 としたモデル 4 については、最

後の 4 回目のすみ肉溶接完了後の残留縦曲り量が溶接順序 S_1 のモデル 1 に比べ大きくなることなどをこの数値解析計算により明らかにした。

5.3 予測システムの評価

Fig. 9 に示した予測システムの妥当性を評価するため、供試体 H (溶接順序 S_1)、供試体 J (溶接順序 S_2) について、ダイヤルゲージによる縦曲り量分布の実測値と予測値を比較することとした。すなわち、Fig. 11 に示すように両者は比較的良く一致し、ほぼ、所期の目的を達したものである。

6. 結 論

プレートガーダの I 組すみ肉溶接時の溶接変形量を実橋 12 部材で測定し、一次元固有ひずみ理論ならびに梁理論により解析し、さらに、これらを基にした溶接変形予測システムを検討した結果、次の結論を得た。

1. 部材長、断面性状などが異なるプレートガーダの縦曲り量、縦収縮量の溶接変形量を統一的に表わすには、曲率 $1/\rho$ と中立軸の一樣ひずみ ϵ_N で整理すると便利である。
2. 一次元固有ひずみ理論ならびに梁理論に基づき、 $1/\rho$ と ϵ_N のそれぞれのパラメータ $Q \cdot e/I$, Q/A を導びいた。
3. プレートガーダの I 組すみ肉溶接による $1/\rho$ と ϵ_N の変化度合はすみ肉溶接の溶接回数の増加につれ小さくなり、また、溶接順序によっても変形挙動が異なる。
4. 変断面部材を含めたプレートガーダの I 組すみ肉溶接による縦曲り量分布について、フーリエ級数を用いた予測システムを提示し、4 モデルの数値解析計算を試み、変断面剛性比率、溶接順序などの縦曲り量分布への影響などを明らかにした。
5. 上記の予測システムを実橋部材に適用した結果、縦曲り量分布の予測値と実測値は比較的良く一致し、ほぼ、所期の目的を達したものと考える。

参 考 文 献

- 1) 辻, 山口; “縁を溶接した帯板に生ずる応力と縦曲り変形”, 西部造船会会報, 第 42 号 46 年 7 月, 245~254
- 2) 辻, 山口; “帯板の縦曲り変形におよぼす熱サイジングの相互干渉について”, 西部造船会会報, 第 46 号, 48 年 3 月, 173~184
- 3) 佐藤, 寺崎; “構造用材料におよぼす溶接諸条件の影響”, 本誌, 45-4 (1976), 302-308
- 4) 渡辺, 佐藤; 溶接力学とその応用, 朝倉書店 (1965), 142-153
- 5) 湯浅; 材料力学, コロナ社 (1967), 158-177
- 6) 渡辺; “階段式可変断面を持つ梁と柱の解法”, 造船協会会報, 第 74 号 (1944), 1-15