

金沢工業大学 正 員 西田 進
金沢工業大学 学生員 ○星名 博文

1. まえがき

形鋼の残留応力分布とそのつり合い条件式は鋼構造部材の耐荷力解析を行なう際に必要であり、従来は残留応力の静的つり合いからつり合い条件式を導いていた。本研究は残留応力のなす仕事量の変分原理よりつり合い条件式を導き、従来の条件に加えてそれに関する条件が必要なことを明らかにする。また、残留応力測定データの蓄積をはかると共に、残留応力の実測値を用いてつり合い条件式の満足度を検討した。なお、記号は全て座屈解析に通常用いられるものを使い、その説明を割愛する。

2. 自己つり合い条件式

はり部材が静的つり合い状態にあるためには、部材に作用する力及びモーメントの和が零でなければならない。図-1に示すようなはりの固定直交座標系を設けると、この関係は次式として表わされる。

$$\sum F_x = \sum F_y = \sum F_z = 0$$

$$\sum M_x = \sum M_y = \sum M_z = 0$$

上式に部材軸方向の残留応力 σ_r を代入すると次の残留応力に関するつり合い条件式を得る。

$$N = \int_A \sigma_r dA = 0 \quad (1)$$

$$M_x = \int_A \sigma_r y dA = 0 \quad (2)$$

$$M_y = \int_A \sigma_r x dA = 0 \quad (3)$$

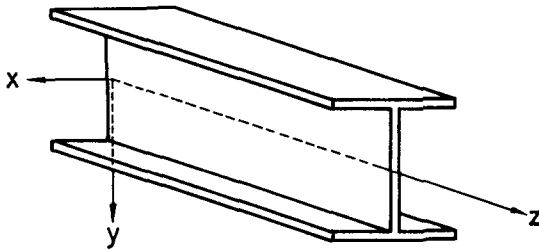


図-1 はりの固定直交座標系

さて、残留応力によりねじり変形 φ のみが生じたと仮定すると、その変位成分 u , v , w および軸ひずみは次式として表わされる。

$$u = -(y - y_s)\varphi, \quad v = (x - x_s)\varphi, \quad w = \omega_n \varphi \quad (4)$$

$$\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

式(4)を式(5)に代入すると次式のようにになる。

$$\epsilon_z = \omega_n \varphi'' + \frac{1}{2} \left\{ (y - y_s)^2 + (x - x_s)^2 \right\} \varphi'^2 \quad (6)$$

残留応力 σ_r 以外の全ての応力及び外力は零なることより、ひずみエネルギー U_r は次式となる。

$$U_r = \int_0^L \int_A \sigma_r \epsilon_z dA dz \quad (7)$$

上式の変位による変分 δU_r は次式で表わされる。

$$\delta U_r = \int_0^L \int_A \sigma_r \delta \epsilon_z dA dz \quad (8)$$

$$= \int_0^L \int_A \sigma_r \left[\omega_n \delta \varphi' + \left\{ (y - y_s)^2 + (x - x_s)^2 \right\} \varphi' \delta \varphi' \right] dA dz = 0$$

変分 $\delta \varphi'$ および $\delta \varphi$ は任意であることより、次の残留応力に関するつり合い条件式を得る。

$$M_\omega = \int_A \sigma_r \omega_n dA = 0 \quad (9)$$

$$K \varphi' = \int_A \sigma_r \left\{ (y - y_s)^2 + (x - x_s)^2 \right\} dA \varphi' = 0 \quad (10)$$

なお、残留応力のみ存在し外力は作用しないので $\varphi' = 0$, $K = \int_A \sigma_r \left\{ (y - y_s)^2 + (x - x_s)^2 \right\} dA \neq 0$ となる。また、残留応力分布の静的つり合い条件式(1), (2), (3)も式(9)と同様にひずみエネルギーの変分原理から導き出すことができる。

3. 実測値による検討

残留応力のなす断面力と式(11)で表わされる降伏断面力 ($\sigma_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$ とする) の比により, 残留応力分布のつり合い条件式の満足度を検討する。

$$\left. \begin{aligned} P_Y &= \sigma_y \cdot A, & M_{xY} &= \sigma_y \cdot W_x \\ M_{yY} &= \sigma_y \cdot W_y, & M_{\omega Y} &= \sigma_y \cdot I_{\omega} / ((\omega_n)_{\max}) \\ K_Y &= \sigma_y (I_x + I_y) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

圧延H形鋼の測定結果は図-2に示すように分布形はほぼ対称であり, 表-1に示すようにつり合い条件式をほぼ満足している。溶接H形鋼の場合は, 分布形はほぼ対称であるが, 軸力および曲げの比が大きい。

圧延溝形鋼の測定結果は図-3に示すようにフランジとウェブの接合部より少し離れた位置により大きな引張残留応力が現われている。表-1より溝形鋼の実測値はつり合い条件式をほぼ満足しているものと思われる。

溶接Z形鋼の測定結果は図-3に示すように, 鋼板のガス切断による引張残留応力がフランジ端部にも現われ, 分布形はほぼ対称となり, 表-1に示すようにつり合い条件式をほぼ満足しているものと思われる。なお, 零なる条件を必要としない

K値はいずれの断面形に対しても有限な値となっている。残留応力分布の全測定数は20体あり, これについては当日発表します。

4. 簡単な残留応力分布モデル

残留応力分布の自己つり合い条件式を満足する最も簡単な圧延タイプの分布モデルを図-4に示す。

図はフランジとウェブの接合部の引張残留応力を基準とし, フランジ端部およびウェブ中央部の圧縮残留応力の比を断面形の対称性より, (a)は式(1)のみを, (b)は式(1)と(3), (c)は式(1)と(9)を用いて求めたものである。

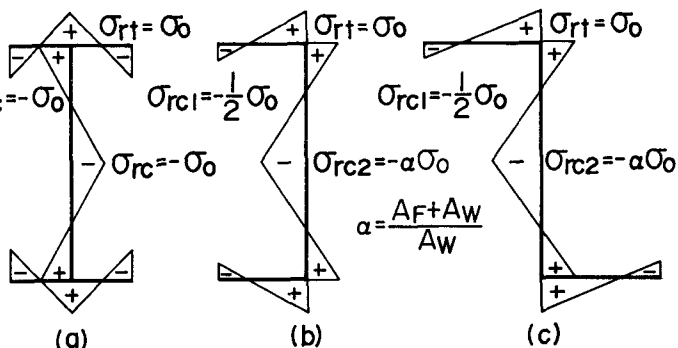


図-4 圧延形鋼の残留応力分布モデル

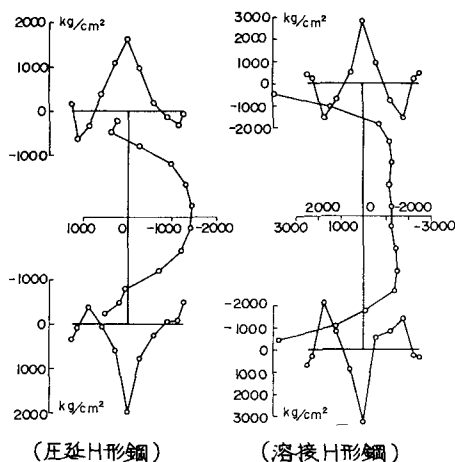


図-2 圧延および溶接H形鋼の残留応力分布

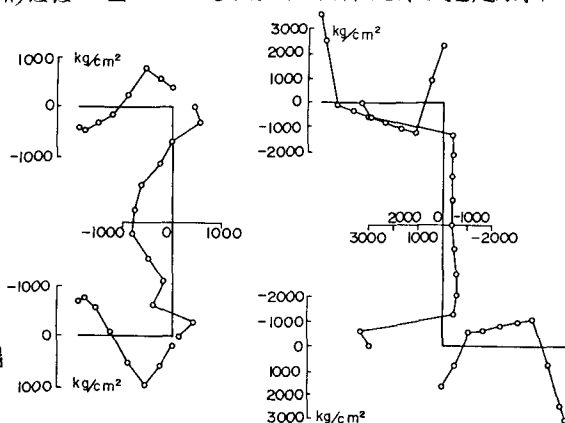


図-3 圧延溝形, 溶接Z形鋼の残留応力分布

表-1 残留応力のなす断面力と降伏断面力の比(%)

	$\frac{N}{P_Y}$	$\frac{M_x}{M_{xY}}$	$\frac{M_y}{M_{yY}}$	$\frac{K}{K_Y}$	$\frac{M_{\omega}}{M_{\omega Y}}$
圧延 H	-0.58	0.15	-1.40	10.17	0.76
溶接 H	-6.34	-2.32	-3.14	5.40	0.50
圧延 ㄱ	-0.40	-1.41	2.51	4.99	-1.86
溶接 Z	1.44	1.20	1.67	8.52	-1.08