

東洋技研コンサルタント(株) 島田 功
大阪工業大学名誉教授 岡村宏一

1. はじめに: 薄肉鋼橋のパネルはリブ付き板で構成されることが多く、溶接長の長いリブを配置するために、独自の残留応力が発生する。このような初期不整は、薄肉構造の保有耐力に影響を及ぼすことが指摘されている。溶接長の長い代表的な長方形リブ付き板については、小松らの実験的な研究[1]が知られており、いくつかの代表的な例について実験により応力の流れの概要を定め、つり合い条件による照査によって分布幅を定めている。一方、溶接による熱応力の解析においては、広範な温度域にわたる急激な熱サイクルを受けるため、材料定数の温度依存性を考慮する必要がある。したがって、熱伝導解析は非定常な伝導解析となり、その温度変化による熱応力解析は、不均質熱弾塑性解析となる。このような問題の解法として、有限要素法、差分法などにもとづく数値解析法が展開されている[2]。しかし、本文で扱う、小松らが例示しているような細長い長方形断面リブが同時に細長いフランジに溶接されるリブ付き板の、不均質弾塑性解析は扱われていない。本文で扱う数値解析法は、フランジ、リブは薄板で構成されるものとし、溶接熱による温度分布を熱拡散方程式を差分法で解析して与える。溶接残留応力は、溶接部が熔融状態から固体に変化(600℃以下)した後の収縮過程で発生するものとした。温度降下の過程で、溶接方向ひずみが平面保持するものと仮定し、薄板の面内応力を逐次、弾塑性解析した。ここで、材料の温度依存性も考慮した。

2. 解式

(1) 薄肉平板の熱伝導

厚さ h (m)の板の温度 T (℃)に関する次の熱拡散式は次のようになる。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{2\alpha}{\lambda h} (T - T_f) + \frac{\rho C}{\lambda} \times \frac{\partial T}{\partial t} \quad (x-y \text{ 面}) \quad (1)$$

ここに、 T_f : 外気温度(℃), α : 熱伝達率(W/m²℃), λ : 熱伝導率(W/m℃), C : 比熱(J/kg℃), ρ : 密度(kg/m³)

(2) 平面ひずみ状態を仮定した薄肉平板の熱応力

溶接方向を y 方向とする。ここで、 $x-y$ 面の板(図-1)を考える。薄肉平板を対象としており、 $\sigma_z = 0$ とする。また、 y 方向には挙動が一定であり、 $\tau_{xy} = \tau_{zy} = 0$ とする。 y 方向のひずみは平面保持すると仮定し、次式で与える。

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{y0} + \phi_x \times x + \phi_z \times z \quad (2)$$

ここで、 y 方向の応力を積分したものは0であると、次式より ε_{y0} , ϕ_x , ϕ_z を決定する(全体座標系)。

$$\int \sigma_y dy A = 0, \quad \int \sigma_y \times x dA = 0, \quad \int \sigma_y \times z dA = 0 \quad (3)$$

y 方向の応力 σ_y および ε_x 等は、次のようにあらわされる。

$$\sigma_y = \nu \sigma_x + E(\varepsilon_y - \varepsilon_0 - \varepsilon_{yp})$$

$$\varepsilon_x = -\nu \varepsilon_y + (1 + \nu) \varepsilon_0 + \varepsilon_{xp} + \nu \varepsilon_{yp} + \frac{E_0}{E} C1 \quad C1: \text{積分定数}$$

$$\sigma_x = \frac{E_0}{1 - \nu^2} C1 \quad (4)$$

ここに、 ε_0 : 線膨張ひずみ、 ε_p : 塑性ひずみで、板厚方向に一定とする。 $E = E_0 + \Delta E$ (E_0 : 常温のヤング率)とおく。

塑性ひずみは、材料を弾完全塑性体とし、応力とひずみの関係は、Plandtle-Reussの方程式に支配されるものとし、次式より求める。降伏曲面を次のように定義する。

$$f_n = \frac{1}{Np^2} (Nx^2 + Ny^2 - NxNy) = 1$$

$$\dot{\varepsilon}_{xp} = \mu Np \frac{\partial f_n}{\partial Nx} \quad \dot{\varepsilon}_{yp} = \mu Np \frac{\partial f_n}{\partial Ny} \quad (5)$$

ここに、 μ : 塑性流れ係数

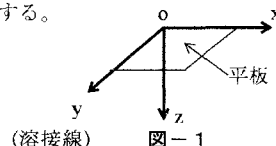


図-1

Isao SHIMADA, Hirokazu OKAMURA

3. 解析モデル

図-2に示す平リブの要素を採りあげた。

図-3には、鋼材の温度依存特性を示した。

4. 解析結果

(1) 温度分布：式(1)を差分法で解く。

溶接速さを150mm/分とし、溶接点の温度は1500℃とした。母材内の温度分布線を図-4に示す。

4に示す。

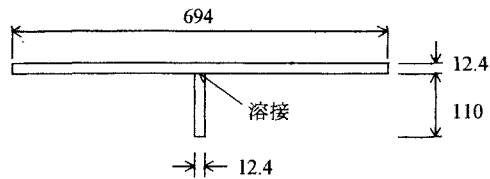


図-2 解析モデル(材質：HT60) [1]

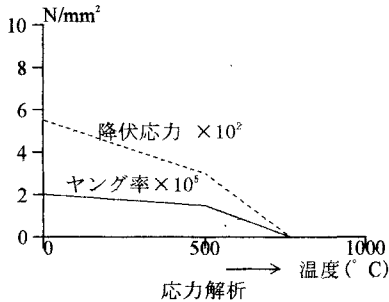
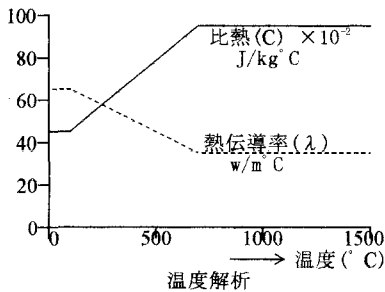


図-3 材料の温度依存特性 [2]

これらの結果より、溶接線に直交する方向の温度分布を次のように与えた。

$$T = T_0 - ax^2 \quad (6)$$

ここに、 T_0 :溶接線上の温度(°C) x :溶接線からの距離(mm)である。係数 a は、

$$a = 0.633 \times 10^{-2} + 0.275 \times 10^{-4} T_0 + 0.455 \times 10^{-7} T_0^2$$

(2) 溶接残留応力

溶接部に最初に600℃の熱を与え、以後、熱伝導の過程で残留応力が発生するものとし、溶接部の温度を50℃ずつ逐次冷却させ、溶接部が0℃になるまで弾塑性解析を行った。フランジおよびリブの溶接残留応力(溶接方向応力)の解析結果を図-5に示す。また、小松等の実験結果[1]も測定値として併記した。溶接線近傍は引っ張り状態になり溶接線から7mm程度離れると圧縮状態になっている。このような現象は実測結果とも一致している。図-6は、溶接線上応力の経緯を示したものである。

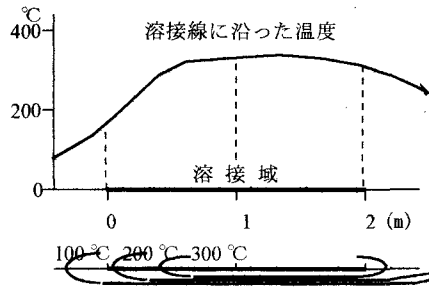


図-4 温度分布(溶接開始より27分後)

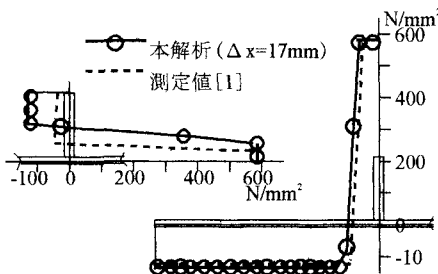


図-5 溶接残留応力(σ_y)

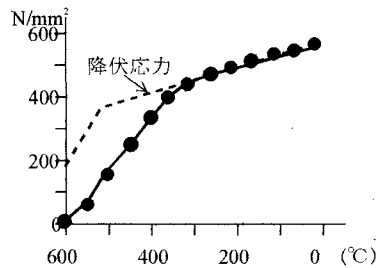


図-6 溶接線上の応力(σ_y)

参考文献

- 1] 小松定雄、牛尾正之、北田俊行：補剛板の溶接残留応力および初期たわみに関する実験的研究、土木学会論文報告集、第265号、PP.25～35、1977。
- 2] 上田幸雄、福田敏二、中長啓治：初層すみ肉溶接における残留応力と割れの形態について、溶接学会誌、第44巻第3号、PP.74～81、1975。