

I — 2 舗装による鋼床版の熱応力の解析

北海道開発局土木試験所 正会員 浅野 基樹

同 上 正会員 吉田 紘一

1. はじめに

鋼橋が大型化するにしたいが、橋梁の軽量化を計るために鋼床版を用いるケースが増加して来ている。この鋼床版の舗装には、床版の変形に耐えられるグース・アスファルトを用いるのが一般的である。このグース・アスファルトは打設時の温度が230℃にも達し、鋼床版に大きな熱応力を発生させることになる。しかし、この熱応力は温度の降下とともに減少し、塑性域に達しないものとして設計・施工されて来ている。しかしながら、グース・アスファルトを施工した鋼床版橋においてキャンバー不足が発生し、この原因の一つとしてグース・アスファルト施工時の熱応力が考えられる施工例もある。この様な観点から鋼床版のグース・アスファルト舗装時の熱応力特性についての研究が必要であるが、これに関する研究はまだ少ない。

この問題は熱弾塑性の問題であるが、本研究では第一段階として弾性問題として取扱い、折板理論を用いた手法を示し、舗装による鋼床版熱応力特性について今までの研究では検討されていない断面形状に関して検討した。

また、本文で用いた折板の式は能町らがガラキン法を適用して導いた式に熱応力の項を加えた式を用いることとし、板の厚さ方向の温度変化は考慮しないものとした。

2. 折板理論の基本式

2-1 平面要素

2次元応力の問題に対してはすでに多くの研究成果があるが、ここでは応力とひずみの関係に熱ひずみの項を考慮して誘導することができる。

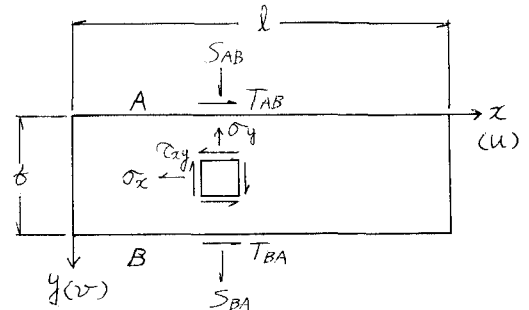


Fig - 1

Fig - 1 の様に平板要素に座標を取り、x 方向、y 方向の変位と応力をそれぞれ、 u 、 v 、 σ_x 、 σ_y 、剪断力を τ_{xy} とすると、x 方向、y 方向の力の釣合いは

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad (1) \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

平面応力状態における応力とひずみの関係式は温度ひずみの項を考慮すると次式の様になる

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \nu \frac{\partial v}{\partial y} - \alpha(H) \right), & \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \nu \frac{\partial u}{\partial x} - \alpha(H) \right) \\ \tau_{xy} &= G \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで α は熱膨張係数、 (H) は温度である。

変位を y 方向に線形分布すると仮定して、 $u = u_A(1-\eta) + u_B\eta$ 、 $v = v_A(1-\eta) + v_B\eta$ とおき、(1) 式と (2) 式に (3) 式を考慮してガラキン法を用いて解くと応力は次の様に求まる。

$$\{F_P\} = [K_P] \{U\} - \{H\} \quad (4)$$

但し

$$\{F_P\} = \{\dot{T}_{AB} \ S_{AB} \ \dot{T}_{BA} \ S_{BA}\}^T, \quad \{U\} = \{\dot{U}_A \ v_A \ \dot{U}_B \ v_B\}^T$$

$$\{H\} = Et \left\{ b \int_0^1 \dot{\Theta} (1-\eta) d\eta - \int_0^1 \Theta d\eta \quad b \int_0^1 \dot{\Theta} \eta d\eta - \int_0^1 \Theta d\eta \right\}^T$$

$$[K_P] = \begin{pmatrix} -\frac{Gt}{b} + \frac{N}{3} D^{(2)} & \left(\frac{Gt}{2} - \nu \frac{N}{2b}\right) D^{(2)} & \frac{Gt}{b} + \frac{N}{6} D^{(2)} & -\left(\frac{Gt}{2} + \nu \frac{N}{2b}\right) D^{(2)} \\ \frac{Et}{b} - \frac{Gb}{3} D^{(2)} & -\left(\frac{Gt}{2} + \nu \frac{N}{2b}\right) & -\frac{Et}{b} - \frac{Gb}{3} D^{(2)} & \left(\frac{Gt}{2} - \nu \frac{N}{2b}\right) D^{(2)} \\ \text{Symm} & & & \\ -\frac{Gt}{b} + \frac{N}{3} D^{(2)} & -\left(\frac{Gt}{2} - \nu \frac{N}{2b}\right) D^{(2)} & \frac{Gt}{b} + \frac{N}{6} D^{(2)} & -\left(\frac{Gt}{2} + \nu \frac{N}{2b}\right) D^{(2)} \\ \frac{Et}{b} - \frac{Gb}{3} D^{(2)} & -\left(\frac{Gt}{2} + \nu \frac{N}{2b}\right) & -\frac{Et}{b} - \frac{Gb}{3} D^{(2)} & \left(\frac{Gt}{2} - \nu \frac{N}{2b}\right) D^{(2)} \end{pmatrix}$$

上式中・はxに関する一度微分、また $D^{(2)}$ は $\frac{\partial^2}{\partial x^2}$ を表す。

2-2 平板要素

板の板厚方向の温度変化を考えないものとする。平板要素では温度の項は発生しないので従来から用いられてきた式と一致する。

Fig-2の様に座標系を取り、たわみwのy方向分布を3次式で仮定すると

$$w(\eta) = w_A f(\eta) + \theta_A g(\eta) + w_B f(1-\eta) - \theta_B g(1-\eta) \quad (5)$$

ただし

$$f(\eta) = 1 - 3\eta^2 + 2\eta^3, \quad g(\eta) = \eta - 2\eta^2 + \eta^3$$

これを用いて平板の微分方程式にガラーキン法を用いて解くと

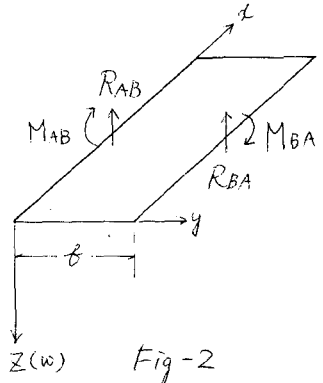
$$\{F_B\} = [K_B] \{W\} \quad (6)$$

ただし

$$\{F_B\} = \{R_{AB} \ M_{AB} \ R_{BA} \ M_{BA}\}^T, \quad \{W\} = \{w_A \ \theta_A \ w_B \ \theta_B\}^T$$

$$[K_B] = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \begin{pmatrix} \frac{12}{b^3} - \frac{12}{5b} D^{(2)} + \frac{13}{35} b D^{(4)} & \frac{6}{b^2} - \left(\frac{1}{5} + \nu\right) D^{(2)} + \frac{11}{210} b^2 D^{(4)} \\ \frac{4}{b} - \frac{4}{15} b D^{(2)} + \frac{1}{105} b^3 D^{(4)} & \dots \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -\frac{12}{b^3} + \frac{12}{5b} D^{(2)} + \frac{9}{20} b D^{(4)} & \frac{6}{b^2} - \frac{1}{5} D^{(2)} - \frac{13}{420} b^2 D^{(4)} \\ -\frac{6}{b^2} + \frac{1}{5} D^{(2)} + \frac{13}{420} b^2 D^{(4)} & \frac{2}{b} + \frac{D^{(2)}}{15} - \frac{1}{140} b^3 D^{(4)} \\ \frac{12}{b^3} - \frac{12}{5b} D^{(2)} + \frac{13}{35} b D^{(4)} & -\frac{6}{b^2} + \left(\frac{1}{5} + \nu\right) D^{(2)} - \frac{11}{210} b^2 D^{(4)} \\ \frac{4}{b} - \frac{4}{15} b D^{(2)} + \frac{1}{105} b^3 D^{(4)} & \dots \end{pmatrix}$$



3 全体構造の計算

折板の組合せからなる全体構造に対しては折板の節点における、剪断力、 y 方向力、 z 方向力、モーメントの釣合いと変位の連続性により全体の剛性マトリックスを作成することができ、これにフーリエ変換を適用して各変位を求めることができる。

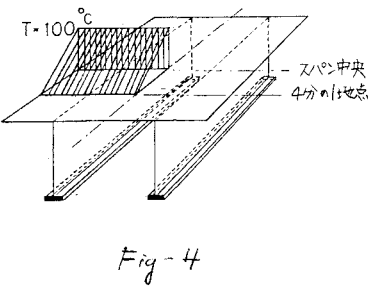
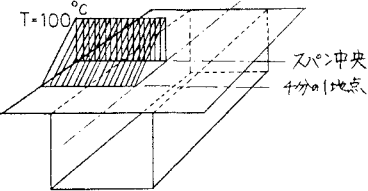
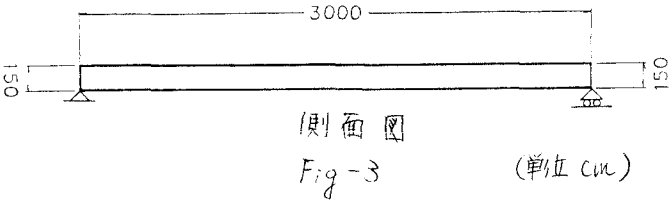
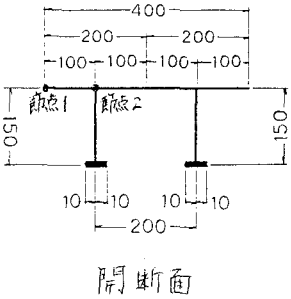
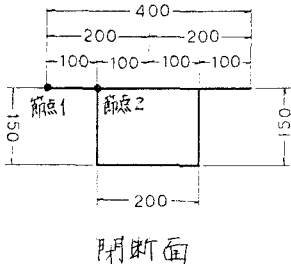
3. 数値計算例

3-1 諸元

数値計算は F i g - 3 に示す様に同じ曲げ剛性を有する閉断面桁と開断面桁に発生する熱応力について行った。

桁の諸元は、スパン $l=30\text{m}$ 、桁高 $h=150\text{cm}$ 、幅 $b=400\text{cm}$ 、箱桁底面幅 200cm 、開断面主桁間隔 200cm 、下フランジ幅 20cm 、開断面下フランジ厚 5cm 、その他の部分の板厚 1cm 、弾性係数 $E=2.1 \times 10^6$ 、ポアソン比 $\nu=0.20$ 、剪断弾性係数 $G=8.75 \times 10^5$ 、熱膨張係数 $\alpha=1.2 \times 10^{-5}$ 、である。また、スチフナー等の影響を考慮し橋軸直角方向の断面 2 次モーメントを橋軸のその 3000 倍にしている。

作用させる温度分布は F i g - 4 に示す様に、スパン中央から 4 分の 1 地点まで片側について三角形に分布させた。中央部での温度は $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ である。



3-2 計算結果

$l=13.5\text{m}$ 地点におけるたわみの分布を F i g - 5 に示す。閉断面では、ほとんど左右対称にたわんでいるが、開断面ではたわみが左右で大きく異なるのがわかる。また、同地点での応力分布を F i g - 6 に示す。熱膨張による圧縮応力 $\sigma_x = E \times \alpha \times T = 2066 \text{ kg/cm}^2$ を考えるとこの値との差 $\sigma_x = 2066 - 617 = 1249 \text{ kg/cm}^2$ 及び $\sigma_x = 2066 - 615 = 1251 \text{ kg/cm}^2$ が応力として節点 3 に作用することになる。図には示されていないが中央点近傍 $l=14.7\text{m}$ では両断面とも $\sigma_x = 2646 - 1134 = 1512 \text{ kg/cm}^2$ の応力が計算された。

節点 1 と 2 における、温度によるたわみと σ_x の分布を F i g - 7 に示す。温度分布に付随して応力も増加しているのがわかる。また、たわみも温度作用部で大きいのがわかる。

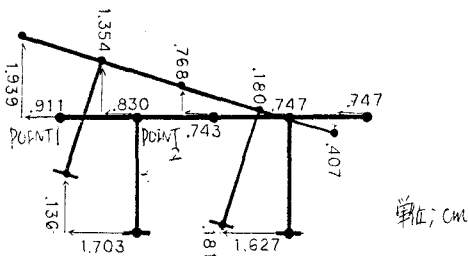
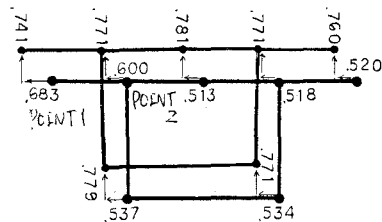


Fig-5

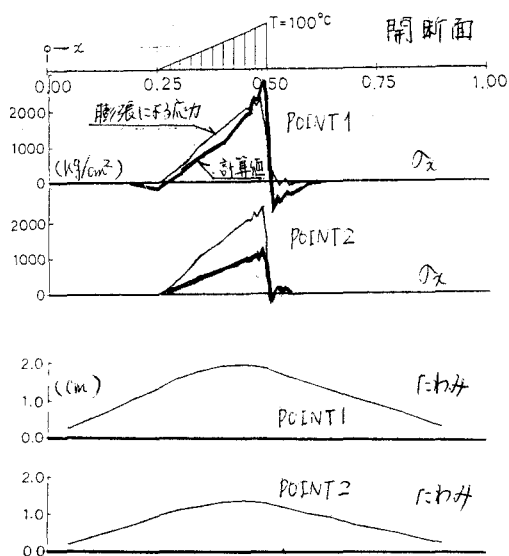


Fig-7

参考文献

- 1) 能町 純雄：剛なダイヤフラムで等区画に分けられる薄肉長方形箱桁の曲げねじりについて：土木学会論文報告集 第146号 1967年
- 2) 能町 純雄、角田与史雄、岸 徳光：移動荷重による矩形板の解析：土木学会北海道支部論文報告集 昭和50年度
- 3) 能町 純雄、吉田紘一：断面変形を考慮した曲線箱桁の応力解析：土木学会論文報告集 第187号 1971年

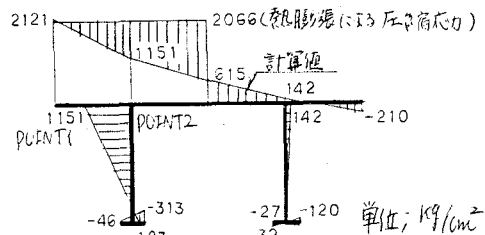
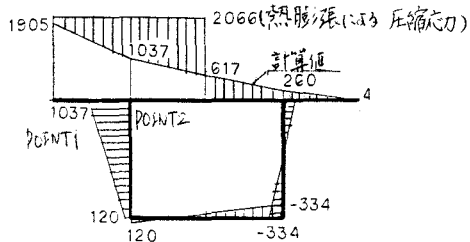


Fig-6

4. まとめ

今回の報告では、鋼床版の熱応力問題を弾性問題として扱い、折板理論を用いた手法を示し、閉断面と開断面について計算を行った。その結果、今回の計算の断面では 1500 kg/cm^2 以上の応力が発生することがわかった。実橋の鋼床版では板厚の違いやウリブ等が存在し今回の計算結果で論ずることはできないが、実橋では死荷重等で既に応力が作用している状態にさらに温度応力が作用するため、局部的に短時間であっても許容応力を越える可能性があることがわかった。また、今回の例では両断面による熱応力分布の違いはほとんどなかったが、たわみについて見れば両断面で著しくその特徴が異なり、連続桁などの場合にはその影響が応力分布に違いを生じさせることが予想される。今後計算方法を改良し、実橋により近い断面の計算をする必要があろう。