

鋼床版橋におけるグースアスファルト打設時の 熱応力特性およびその評価法

THERMAL STRESS AND ITS EVALUATION TECHNIQUE IN STEEL-PLATE-DECK BRIDGES UNDER ASPHALT-MASTIC-SURFACING

熊谷洋司* 勝野寿男** 渡辺保之*** 依田照彦****
Yohji KUMAGAI, Hisao KATSUNO, Yasuyuki WATANABE and Teruhiko YODA

The purpose of this paper is to demonstrate an evaluation technique for thermal stress in steel-deck-plate bridges under asphalt-mastic surfacings, on the basis of numerical study of quasi-steady heat conduction problems.

The main conclusions obtained may be itemized as follows:

- 1) Compressive thermal stress in a steel-deck-plate at the first stage strip-like placement of asphalt-mastic surfacings plays a key role in the planning of asphalt-mastic system.
- 2) Maximum thermal stress occurs at the mid-span of steel-deck-plate bridges just after finishing the first stage strip-like placement of asphalt-mastic surfacings.
- 3) Residual deformation caused by asphalt-mastic surfacing is small and can be neglected in the case of camber adjustment.

1. まえがき

鋼橋における鋼床版面の舗装はクッカー車、フィニッシャー車と呼ばれる大型車輛を用い、その施工能力幅で図-1の如く橋面を分割し、橋軸方向に順次グースアスファルト材を打設していくのが一般的である。

このグースアスファルト材は初期打設温度が 230 (°C) にも達するため鋼桁に大きな鉛直方向変位を惹起するが、この変形はグース面の温度の降下に伴いグース打設前の状態に完全に復帰するものと考えられてきた。すなわちグース打設時応力として、熱応力、死荷重応力および打設車両による応力のすべてを考慮しても鋼桁は塑性域に達しないという仮定のもとに、設計段階におけるグース熱応力の照査および架設計画段階におけるグース熱応力の発生を抑える施工法の検討等はすべて省略されてきた。

最近グースアスファルトを打設した鋼床版橋のキャンバー不足の施工例が発生し、その原因としてグース打設時に発生する熱応力の作用が考えられた。このため鋼桁のグースアスファルトによる熱応力場の正確な把握が必要となったが、この点に関する研究報告は筆者らの知る限り文献5と文献6の実験報告をのぞいてほとんどないのが現状である。

そこで本研究においては、グース熱による鋼桁の温度分布特性および熱応力特性を数値解析により明らかにしたうえで、グース熱応力作用下でも鋼桁の一部が塑性域に達しない設計手法および施工法を提示するこ

- * 工修 三菱重工業(株)横浜製作所橋梁設計課 (☎ 231 横浜市中区錦町12番1号)
** 三菱重工業(株)横浜製作所橋梁設計課課長 (☎ 231 横浜市中区錦町12番1号)
*** 工修 三菱重工業(株)横浜製作所橋梁設計課 (☎ 231 横浜市中区錦町12番1号)
**** 工博 早稲田大学助教授 理工学部土木工学科 (☎ 160 東京都新宿区大久保3-4-1)

ととした。さらに設計条件、施工条件等で鋼桁の一部に塑性域が発生するのが不可避な場合について、弾塑性応力解析を実施して残留変形を把握し、この量を製作時の上越しキャンパーに反映すべきかどうかを検討した。

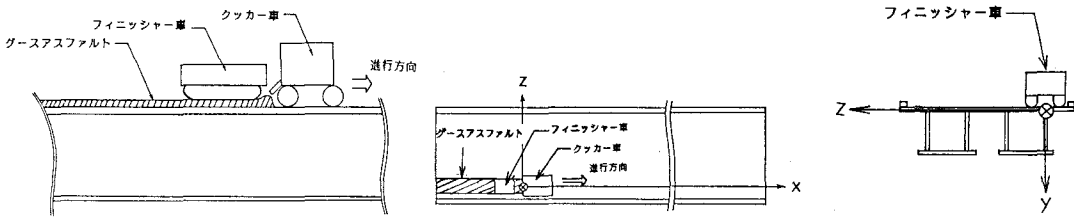


図-1 グースアスファルト打設要領

2. 解析仮定および解析手法

(1) 熱伝導解析

1) 解析モデル

グース打設中において、鋼床版部における施工幅内から施工幅外への熱の浸透深さは、グース施工幅に比較して小さいことが経験的に知られている。従って図-1に示すZ方向（橋軸直角水平方向）への熱伝導はないとの仮定のもとに解析の場を一つの施工幅のみに限定する。この施工幅（解析幅）の断面は、グース材、鋼床版フランジ、鋼桁ウェブ及び鋼桁下フランジとで構成されるものとし、リブ等への熱伝導は考えない。この仮定のもとでは熱伝導の場はX-Y面内の2次元問題に帰着される。

熱源はグース打設車輛（クッカー車）を点熱源とみなし、これが橋軸方向に等速度で橋面上を移動していくものとする。この場合車輛の速度は橋長に比べて十分小さく、ウェブ高も熱の浸透深さより大きいという仮定のもとに座標原点を常に点熱源とおくX-Y座標系を図-2のように設定すると、この場での熱の流れは時間に陽に依存しない、いわゆる準定常熱伝導場となる。

X方向の解析区間Lを、 $x > 0$ にはほとんど熱が流れないこと、 $x < 0$ ではある程度解析区間を大きくとれば準定常熱伝導場を反映出来るとしてLをスパン ℓ の8倍にとり $-L \leq x \leq 0$ で解析することとした。

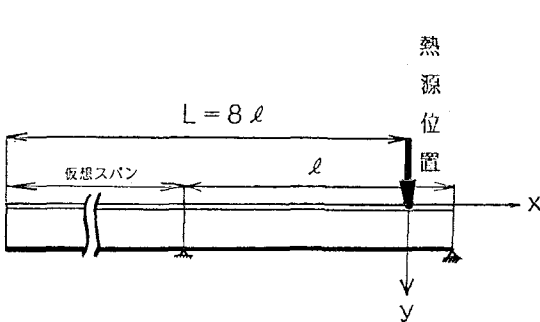


図-2(a) 解析区間

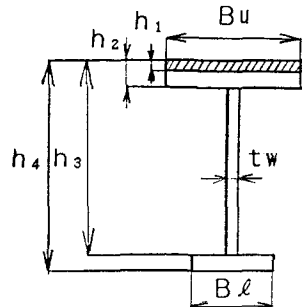


図-2(b) 断面図

図-2 解析モデル

2) 支配微分方程式および境界条件

文献1によれば、2次元準定常熱伝導場の支配微分方程式はウェブ面から空中への熱の伝達を考慮すれば以下の式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} k_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_1 \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \rho_1 C v_1 V_0 \frac{\partial T}{\partial x} &= 0 & (\text{グース部}) \\ k_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_2 \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \rho_2 C v_2 V_0 \frac{\partial T}{\partial x} &= 0 & (\text{鋼床版部および下フランジ部}) \\ k_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_2 \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \rho_2 C v_2 V_0 \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{2\beta t}{tw} T &= 0 & (\text{ウェブ部}) \end{aligned} \right\} (1)$$

境界条件は以下の様に設定する。 $x=0$ 、すなわち点熱源位置ではグース部、鋼桁部それぞれに初期温度を与え、 $x=-L$ では x 方向への熱の流れはないと設定する。 $y=0$ すなわちグース表面および $y=h_2$ の鋼床版表裏面では空中への熱の伝達を考慮し、 $y=h_3$ および $y=h_4$ の下フランジ表裏面はグース熱による温度の上昇は少ないとして空中への熱の伝達は考えない。さらに熱量の連続条件を考慮して、外部境界条件および内部境界条件を(2)式～(8)式で与える。

$$x=0 \text{ にて、 } T=T_1 \quad (\text{グース部}) \quad T=T_0 \quad (\text{鋼桁部}) \quad (2)$$

$$x=-L \text{ にて、 } \partial T / \partial x = 0 \quad (3)$$

$$y=0 \text{ にて、 } \partial T / \partial y = (\alpha_1 / k_1) T \quad (4)$$

$$y=h_1 \text{ にて、 } k_1 \partial T / \partial y = k_2 \partial T / \partial y \quad (5)$$

$$y=h_2 \text{ にて、 } Bu \cdot k_2 \partial T / \partial y + \alpha_2 T (Bu - tw) = tw k_2 \partial T / \partial y \quad (6)$$

$$y=h_3 \text{ にて、 } tw \partial T / \partial y = B\ell \partial T / \partial y \quad (7)$$

$$y=h_4 \text{ にて、 } \partial T / \partial y = 0 \quad (8)$$

ここに、
 T_1 : グース初期温度 (°C)
 T_0 : 外気温 (°C)
 Bu : 鋼床版部グース施工幅 (m)
 tw : グース施工幅内ウェブ厚 (m)
 $B\ell$: グース施工幅内下フランジ幅 (m)
 k_1 : グースアスファルトの熱伝導率 (joule / m · sec · °C)
 k_2 : 鋼の熱伝導率 (joule / m · sec · °C)
 ρ_1 : グースアスファルトの単位体積重量 (kg / m³)

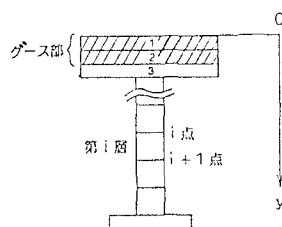
ρ_2 : 鋼の単位体積重量 (kg/m)
 Cv_1 : グースアスファルトの定容比熱 (joule / kg · °C)
 Cv_2 : 鋼桁の定容比熱 (joule / kg · °C)
 α_1 : グース面での熱伝達率 (joule / m · sec · °C)
 α_2 : 鋼床版部での熱伝達率 (joule / m · sec · °C)
 βt : ウェブ部での熱伝達率 (joule / m · sec · °C)
 V_0 : 熱源の速度 (m/sec)

3) 解析手法

有限帯板法の手法に従い、図-3のように桁断面を切り、あらかじめy方向の境界条件を満足したi点とi+1点での温度 T_i 、 T_{i+1} およびy方向への温度勾配 θ_i 、 θ_{i+1} を係数にもつ3次関数で第i層の温度場を近似すると(9)式が得られる。一方、 T_i および θ_i は境界条件(2)、(3)式を満足するような正弦関数の和で与えられるので、(10)式が得られる。

$$\begin{aligned}
 T = & T_i + \theta_i Y + (-3T_i + 3T_{i+1} - 2\theta_i H_i - \theta_{i+1} H_i) \frac{Y^2}{H_i^2} \\
 & + (2T_i - 2T_{i+1} + \theta_i H_i + \theta_{i+1} H_i) \frac{Y^3}{H_i^3} \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}
 T_i &= \sum A_{im} \sin \frac{\pi x (2m-1)}{2L} + T_1 \text{ (グース部)} \\
 T_i &= \sum A_{im} \sin \frac{\pi x (2m-1)}{2L} + T_0 \text{ (鋼桁部)} \\
 \theta_i &= \sum B_{im} \sin \frac{\pi x (2m-1)}{2L}
 \end{aligned} \right\} (10)$$



(10)式を(9)式に代入して、第i層の温度場を A_{im} 、 B_{im} の関数として表わし、(11)式を用いて A_{im} 、 B_{im} についての連立方程式を組立てて任意点での温度場を決定する。

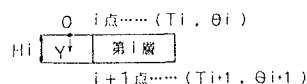


図-3 桁断面のメッシュ分割

$$\begin{aligned}
 & \int_{V_1} (k_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_1 \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \rho_1 Cv_1 V_0 \frac{\partial T}{\partial x}) \delta T dV \\
 & + \int_{V_2} (k_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_2 \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \rho_2 Cv_2 V_0 \frac{\partial T}{\partial x}) \delta T dV \\
 & + \int_{V_3} (k_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_2 \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \rho_2 Cv_2 V_0 \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{2\beta t}{tw} T) \delta T dV = 0 \quad (11)
 \end{aligned}$$

ここに、 V_1 : 解析範囲となるグース部の体積 (m^3)

V_2 : 解析範囲となる鋼床版部および下フランジ部の体積 (m^3)

V_3 : 解析範囲となるウェブ部の体積 (m^3)

(2)弾塑性熱応力解析

1) 解析対象となる施工幅

本解析では、鋼床版に対し面外方向の鋼桁の剛性のみを考慮し、荷重系としては第一次施工幅分のグース熱荷重に限定しているが、以下にその根拠を示す。

鋼床版橋は主桁がI桁であれ箱桁であれ下横構がなく、横桁および横リブもI桁で構成されるので面内方向の剛性は鋼床版部と一本の主桁部のみで分担されるとして良い。主桁としてI桁を用いた場合の面内剛性は無視出来ることは明らかであり、箱桁系に関してもグース施工幅は2枚のウェブ間隔より広いことが通例であることを考えると、2枚のウェブ間の鋼桁の温度勾配は小さく、面内曲げによる熱応力は無視出来ることとなる。従ってグース熱に対する鋼床版橋の面内剛性は鋼床版部のみで受けもつとして良い。一方鋼床版部でのグース熱により発生する圧縮応力は、FEM解析結果から大きくないことがわかったため鋼床版橋の面内剛性を無視して解析するものとした。

鋼桁の代表的な断面での面外曲げに着目した応力分布を第一次施工完了時、第二次施工完了時についてそれぞれ示したのが図-4である。この図から、第二次施工による鋼桁の温度上昇は、第一次施工領域内の鋼床版フランジに対しては橋軸方向の圧縮応力を与え、第一次施工時の応力を打ち消す方向に作用する。

一方下フランジに注目すると、第二次施工時での応力は、第一次施工時の応力より曲げ変形が増大するのでより一層危険な状態となる。しかしながら、この応力は次章で示すごとく通常のグース打設法では、鋼床版部の最大温度が約 120 (℃) 程度であり、鋼床版橋の中立軸はウェブ高をHとすれば、ほとんどの場合ウェブ天場から 0.45 H 近傍にあるので、簡単な梁理論を用いて解析しても 3080 (kg/cm^2) 程度である。これに下フランジ死荷重引張応力として通常 800 (kg/cm^2) 程度が熱応力を打消す方向に作用するので下フランジが施工中に塑性応力に達するとは考えられない。ウェブに対しても同様な推察が可能である。それゆえ第三次施工以降の施工についても同様の議論が成り立つとすれば、第一次施工時での鋼床版部の応力が最大となる。

そこで第一次施工終了後、ただちに第二次施工が実施されるという仮定のもとで構造系に与える温度場を桁端から桁端までの第一次施工幅内の領域のみに限定し、鋼桁の熱応力特性を調べた。

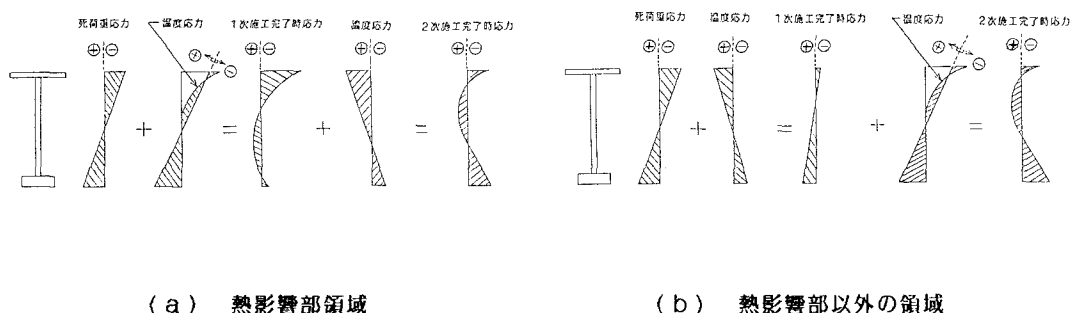


図-4 第一次施工時の桁断内応力分布

2) 構造モデル、荷重条件および境界条件の設定

鋼床版桁を以下のようにモデル化する。

鋼桁に発生するグース熱応力のなかで、梁としての曲げひずみと熱影響部の局所的な軸ひずみによる軸方向応力が支配的であると仮定すれば、箱桁とI桁との間に構造モデルとしての差異はなくなる。従って図-5に示すようにI断面の一主桁系に構造系を縮約できる。この時ウェブは実モデルのウェブと桁高を合わせウェブ総断面積が等しくなるように板厚を調整し、上下フランジに対しては、実モデルと曲げ剛性および中立軸の値が一致するように板幅を調整する。第一次施工幅内の断面もこれと同様な手法で構造系をモデル化する。さらにこれらの断面構成は橋軸方向に一定であると仮定した。

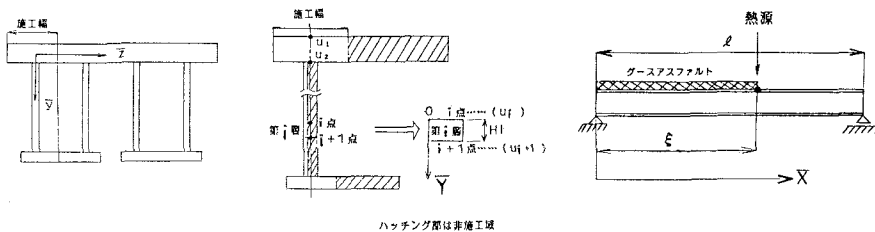


図-5 熱応力解析モデル

構造系に与える温度場は点熱源をスパンの20等分点に順次移動させ、その位置ごとに2.(1)で述べた手法で解析した温度場を与える。なお本解析での温度場は座標原点を熱源におく準定常状態であるので、熱源が移動しても熱源からの相対的位置が変わらなければ、そこでの温度場は同一となる。

作用荷重は死荷重として等分布荷重をスパン全体に一樣に与え、活荷重として打設車輛による集中荷重を考える。このうち集中活荷重については、これらの車輛が施工中停止することがあるという不確定要因があり取扱いが難しいが、ここでは3.で述べるごとく、鋼床版部での最大熱圧縮応力の発生位置がスパンセンターにあることから、スパンセンターで等価な応力が発生するよう集中荷重を等分布荷重に置換することとした。また鋼床版部では、これら打設車輛による版としての応力も無視し得ない。従ってこの分だけ分布活荷重を割り増して載荷することとした。

境界条件として単純桁の境界条件を用いるが、これに点熱源前方で熱応力が発生しないという条件を付け加え、2.(2)3)で決定する変位関数に反映させる。

3) 定式化

構造モデルに与える変位場として橋軸方向変位 u および鉛直変位 w を設定する。 u は第一次施工幅（熱影響部）とそれ以外の部分とに分け、それぞれが橋軸水平方向（ Z 方向）に一定値を持つものとする。熱伝導解析に用いた手法を用い、桁断面を図-5のようにメッシュ分割し、第 i 層の変位場を u_i と u_{i+1} を係数とする1次関数で代表させる。一方 w に対しては梁理論に従い熱影響部であるか否かにかかわらず桁断面内では一定とする。

領域1を第一次施工幅部以外の領域、領域2を第一次施工幅部のうち点熱源の後方（ $x \leq \xi$ ）の領域、領域3を第一次施工幅部のうち点熱源の前方（ $x > \xi$ ）の領域として、 i 点での変位場を次頁の式で与える。

$$w = \sum W_m \sin \left(\frac{m\pi \bar{x}}{\ell} \right) \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} u_i &= \sum U_{im} \cos \left(\frac{m\pi \bar{x}}{\ell} \right) & (\text{領域 1}) \\ u_i &= \sum U_{im} \cos \left(\frac{m\pi \bar{x}}{\ell} \right) - \frac{\alpha T_{i0}}{2\xi} \bar{x}^2 + \alpha T_{i0} \bar{x} & (\text{領域 2}) \\ u_i &= \sum U_{im} \cos \left(\frac{m\pi \bar{x}}{\ell} \right) + \frac{\alpha T_{i0}}{2} \xi & (\text{領域 3}) \end{aligned} \right\} (13)$$

ここに、 T_{i0} は $\bar{x}=0$ における i 点での温度(℃)を示し、 α は鋼の線膨脹率(1/℃)とする。

i 層内の変位場で U については線形変位場を $\bar{x}-\bar{y}$ 座標系で考え、以下の(14)式に(13)式を代入して求める。 w については(12)式をそのまま用いる。

$$u = u_i + (u_{i+1} - u_i) \frac{\bar{y}}{H_i} \quad (14)$$

i 層内のひずみの場は軸方向線形ひずみ $\varepsilon \bar{x}$ 、および $\bar{x}-\bar{y}$ 面内の線形ひずみ $\gamma \bar{x}\bar{y}$ を(15)、(16)式で与え、これに対応する応力場をポアソン比を無視して(17)、(18)式で与える。

$$\varepsilon \bar{x} = \partial u / \partial \bar{x} \quad (15) \quad \gamma \bar{x}\bar{y} = \left(\frac{\partial u}{\partial \bar{y}} + \frac{\partial w}{\partial \bar{x}} \right) \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma \bar{x} &= E \partial u / \partial \bar{x} \quad (\text{領域 1 および 領域 3}) \\ \sigma \bar{x} &= E (\partial u / \partial \bar{x} - \alpha T) \quad (\text{領域 2}) \end{aligned} \right\} (17) \quad \tau \bar{x}\bar{y} = G \gamma \bar{x}\bar{y} \quad (18)$$

ここに、 E はヤング率であり、 G はせん断弾性係数である。

熱源の位置をスパンの n 等分点とし、この時の温度関数分布を熱伝導解析結果から与え、(17)式を用いて応力場を決定する。次に熱源の移動ステップごとに仮想仕事の原理を適用し、(19)式のごとく定式化して W_m 、 U_{im} を決定する。

$$\begin{aligned} & \int_{V_1} \sigma \bar{x} \delta \varepsilon \bar{x} dV + \int_{V_2} \sigma \bar{x} \delta \varepsilon \bar{x} dV + \int_{V_3} \sigma \bar{x} \delta \varepsilon \bar{x} dV \\ & + \int_{V_1} \tau \bar{x}\bar{y} \delta \gamma \bar{x}\bar{y} dV + \int_{V_2} \tau \bar{x}\bar{y} \delta \gamma \bar{x}\bar{y} dV + \int_{V_3} \tau \bar{x}\bar{y} \delta \gamma \bar{x}\bar{y} dV \\ & - \int P \delta w d\bar{x} = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

ここに、 V_1 は領域1の、 V_2 は領域2の、 V_3 は領域3の体積を示し、 P は等分布荷重を示す。

塑性時の残留変形 W_y の解析は、以下に述べる手法で行なう。FEM解析によればせん断応力は小さいので、塑性の判定は、せん断応力の塑性に対する影響は少ないものとし、垂直降伏応力 $\sigma_y = 2400$ (kg/cm^2) で評価する。次に点熱源の移動ステップごとに、グース熱応力下で鋼桁の一部が σ_y に達する最小外荷重強度 P_y を求め、 $(P - P_y)$ を増分法により、塑性領域を(19)式から除去しつつ塑性たわみを求める。この塑性たわみと弾性たわみとの差を W_y とし、熱源の移動ステップごとにこの解析を繰り返し ΣW_y を求め、これを残留変形と定義する。

なお、材料は完全弾塑性体とし、解析では除荷過程を考慮している。

3. 解析結果にみる鋼床版桁の熱伝導

および熱応力特性

(1) 熱伝導解析と実験結果との比較

我々は、1982年三菱重工業(株)の工場内の橋梁でグースアスファルト打設時の温度計測を実施した。この時の打設要領を図-6に示す。

本解析手法の妥当性を見るべく解析結果と実験結果を比較したものが図-7である。ここに横軸は熱源と計測点との相対距離を示す。結果を比較すると両者はおおむね良く一致しており本解析で用いた手法で鋼床版桁のグース熱伝導特性の把握が出来ることがわかる。

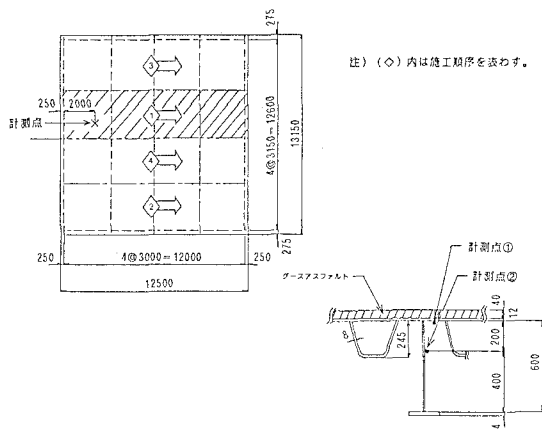


図-6 グース打設実験要領図

(2) 施工幅と桁断面内温度分布、 応力分布との関係

桁のディメンジョンを一定とし、施工幅のみを変えた表-1のケース4, 6, 9についての桁断面内温度分布と応力分布を第一次施工幅内の鋼床版フランジ断面積を鋼桁総断面積で無次元化した A_{fu}/A のパラメーターで整理したのが図-8 (a) である。

この図中温度分布については実線で、応力分布については破線で示したが、温度分布についてはパラメーターで整理出来る程の差異はみられなかった。

図-8 (b) は鋼床版部に発生する最大熱応力を A_{fu}/A のパラメーターで整理したものである。この結果より以下のことがわかる。

- 1) 断面内の温度分布は施工幅によらない。
- 2) 鋼床版上フランジ表裏面の温度、熱応力の大きさに差異はない。

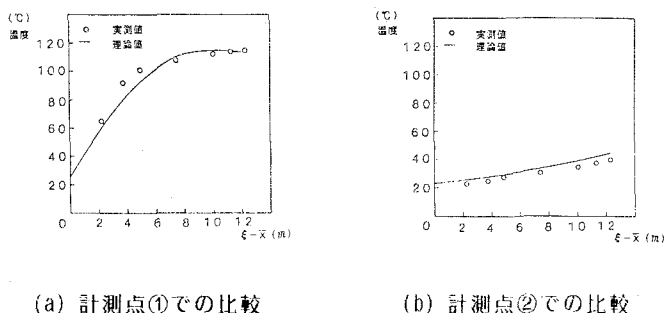


図-7 温度場の実験結果と数値解析結果との比較

3) ウェブへの熱伝導浸

透深さ h_a は60 (cm) 程度であり、ウェブの温度分布は、鋼床版下面から h_a に放物線形状ですりついている。

4) 断面内の応力分布は鋼床版部が圧縮、ウェブ上部の熱影響部が引張、ウェブの非熱影響部および下フランジは負の曲げモーメントを受ける梁のような挙動を示す。

5) Afu/A と、鋼床版部に発生する最大圧縮応力との間には線形関係があり、 Afu/A が小さい程、すなわち施工幅がせまい程大きな熱圧縮応力が鋼床版部に生じる。

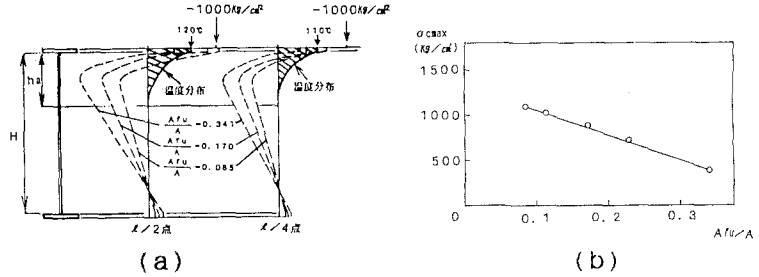


図-8 施工幅と鋼桁断面内温度分布および熱応力との関係

(3) 熱源からの橋軸方向への熱の伝導および

鋼床版熱応力の橋軸方向への分布特性

表-1の全ケースについての解析結果を図-9および図-10に模式的に表わし、この結果をもとに考察する。

図-9の実線は鋼床版部の温度分布 T を、熱源からの距離のパラメーター ($\xi - \bar{x}$) で表したものである。図-9のハッチング領域は、鋼床版での最大圧縮熱応力発生位置 $\bar{x}$ を縦軸では熱源の位置 ξ で無次元化し、横軸ではこの時の熱源位置 ξ をスパン l で無次元化したもので表わしている。

図-10は、縦軸に鋼床版部に発生する圧縮熱応力分布を各解析ケースでの最大圧縮熱応力で無次元化し、横軸に対応する熱応力照査点位置をスパン l で無次元化して示し、鋼床版部熱応力の橋軸方向への分布を表している。

以上の結果より次のことがわかる。

- 1) グース熱により橋軸方向へ伝わる鋼床版部の温度は熱源の後方に対しほぼ直線的に増加し熱源後方20 (m) 程度で最大温度 120 (°C) に達し、以後漸減する。
- 2) 鋼床版に発生する熱応力の分布は、熱源を支点とみなし熱源後方の支点とで構成される単純桁に分布荷重が作用した時の曲げモーメントの分布に類似する。
- 3) 熱源の位置を固定すれば、鋼床版部での最大熱応力の発生位置は端支点から熱源までの位置の約半分のところにあるが、打設の初期の段階ほど端支点側による。これは打設初期段階ほど、温度分布が端支点側にかたよるためと思われる。
- 4) 鋼床版に発生する最大応力は1次打設完了時にスパンセンターで発生する。

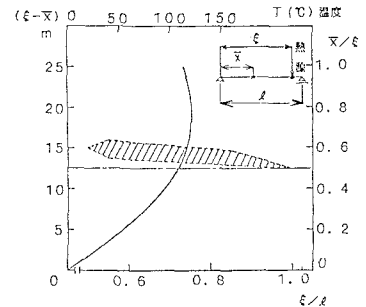


図-9 橋軸方向の熱伝導特性
および鋼床版部最大応力発生位置

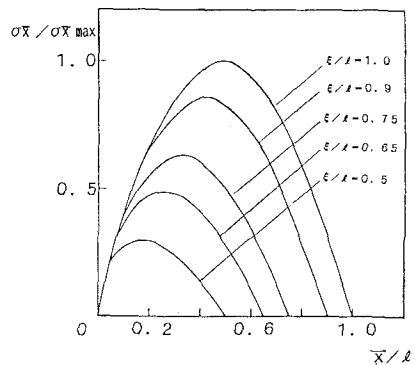


図-10 熱源の位置による
打軸方向鋼床版部熱応力分布図

(4) 鋼床版に発生する最大応力とスパン及び桁高との関係

桁高をパラメーターとした表1のケース1～5ととスパンをパラメーターとしたケース4及び18～21のそれぞれに対し、鋼床版部の最大熱応力を示したのが図-11および図-12である。このうちケース1～5については、桁高だけの影響を見るために、4.で述べる熱応力パラメーターで補正している。これらの結果から鋼床版部に発生する最大熱応力の桁高及びスパンに対する依存度が小さいことがわかる。

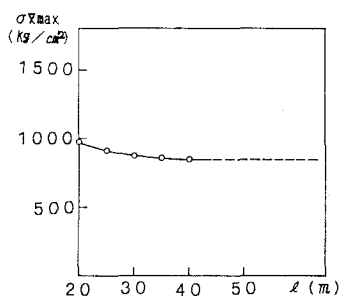


図-11 最大鋼床版部熱応力とスパンとの関係

なお本解析に用いた諸定数を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 K_1 &= 1.05 \text{ (joule / } m \cdot \text{sec)} \\
 K_2 &= 67.8 \text{ (joule / } m \cdot \text{sec)} \\
 \rho_1 &= 2300 \text{ (kg / } m^3) \\
 \rho_2 &= 7850 \text{ (kg / } m^3) \\
 C v_1 &= 882 \text{ (joule / kg} \cdot ^\circ\text{C)} \\
 C v_2 &= 477 \text{ (joule / kg} \cdot ^\circ\text{C)} \\
 \alpha_1 = \alpha_2 = \beta t &= 5.0 \text{ (joule / } m^3 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C)} \\
 V o &= 0.011 \text{ (m / sec)} \\
 t w &= 10 \text{ (mm)} \\
 T_1 &= 230 \text{ (} ^\circ\text{C)} \\
 T_0 &= 0 \text{ (} ^\circ\text{C)}
 \end{aligned}$$

(ただし、3. (1) についてのみ22.5 (°C))

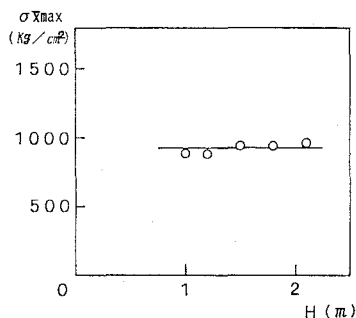


図-12 最大鋼床版部熱応力と桁高との関係

グース厚: 80(mm)

(ただし3. (1) についてのみ 40(mm))

$$\begin{aligned}
 E &= 2.1 \times 10^6 \text{ (kg / cm}^2) \\
 G &= 8.07 \times 10^5 \text{ (kg / cm}^2) \\
 \alpha &= 12 \times 10^{-6} \text{ (/ } ^\circ\text{C)}
 \end{aligned}$$

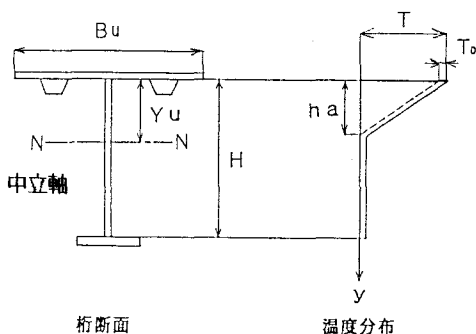


図-13 鋼桁断面温度分布の理想モデル

4. グース熱応力の評価

(1) 弾性設計法

1) 熱応力パラメーターの設定

文献2では、鋼床版断面内での温度分布が図-13のようにあたえられる場合、桁の断面が保持されるという仮定のもとに、断面内の軸力と曲げモーメントの釣合のみから設計熱応力を算出して良いとしている。しかしこの解法では温度分布は、橋軸方向に一定とし、また鋼桁のせん断変形を無視しているため、3.(3)で示したような熱応力は発生しないこととなる。そこで本手法では文献2で算出される熱拘束ひずみと鋼床版に発生する最大圧縮応力とは線形関係が成立するととして、新に熱応力パラメーター K を下記のごとく設定した。

文献2による鋼床版部の圧縮応力は以下の式で表わされる。

$$\sigma \bar{x} = E \alpha T (1 - K_1) \quad (20)$$

ここで熱ひずみ拘束項は以下の式である。

$$K_1 = \frac{Afu + ha \cdot tw / 2}{A} + \frac{Yu^2 Afu + ha \cdot tw (Yu - ha / 3) / 2}{I} \quad (21)$$

ここに、 Afu ：熱影響部の鋼床版フランジ断面積

A ：鋼床版断面の総断面積

I ：鋼床版断面の断面2次モーメント

ここに熱応力パラメーター K を(22)式で設定し、鋼床版部の最大発生熱応力を(23)式で与えるものとする。

$$K = C_1 - C_2 K_1 \quad (22)$$

$$\sigma_{x \max} = E \alpha (T - T_0) K \quad (23)$$

表-1 解析ケースの諸定数(弾性解析)

NO	H(m)	L(m)	A(cm ²)	Afu/A	INA(m ⁴)	KI	$\sigma \bar{x}$ (kg/cm ²)
1	1.0	30.0	0.4265	0.2503	0.1026	0.4799	700
2	1.2	30.0	0.3163	0.2342	0.1044	0.4674	729
3	1.5	30.0	0.2303	0.2040	0.1086	0.4392	760
4	1.8	30.0	0.1882	0.1703	0.1148	0.4018	875
5	2.1	30.0	0.1669	0.1370	0.1234	0.3587	966
6	1.8	30.0	0.1882	0.3406	0.1148	0.7709	394
7	1.8	30.0	0.1882	0.2270	0.1148	0.5249	718
8	1.8	30.0	0.1882	0.1135	0.1148	0.2788	1020
9	1.8	30.0	0.1882	0.0851	0.11148	0.2173	1082
10	1.8	30.0	0.1270	0.1196	0.0647	0.3476	1003
11	1.8	30.0	0.2493	0.1961	0.1649	0.4268	817
12	1.8	30.0	0.3104	0.2118	0.2149	0.4413	783
13	1.8	30.0	0.3715	0.2223	0.2649	0.4598	761
14	1.8	30.0	0.1882	0.1703	0.0603	0.2638	1061
15	1.8	30.0	0.1881	0.1703	0.1015	0.3248	958
16	1.8	30.0	0.1882	0.1703	0.1141	0.4816	787
17	1.8	30.0	0.1882	0.1702	0.1019	0.6471	604
18	1.8	20.0	0.1882	0.1703	0.1148	0.4018	969
19	1.8	25.0	0.1882	0.1703	0.1148	0.4018	907
20	1.8	35.0	0.1882	0.1703	0.1148	0.4018	859
21	1.8	40.0	0.1882	0.1703	0.1148	0.4018	853

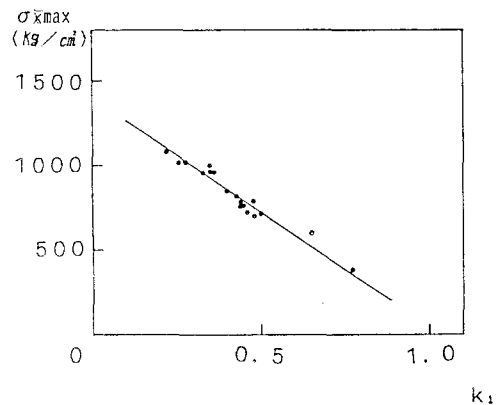


図-14 鋼床版部最大熱応力と K_1 との関係

注) 文献2の原式は(21)式の Yu の代わりに $Yu + t fu / 2$ の項を入れているが、本研究では式の煩雑さを避けるため鋼床版フランジ厚 $t fu$ の項を抜いた。

2) 熱応力パラメーターKの決定

ha は3. で述べた如く桁のディメンジョンによらず 600 (mm) 程度であるので、 $h_a = 0.6 (m)$ と設定し、表-1 に示す全ケースで K_1 を算出した。

このパラメーター K_1 と鋼床版部最大熱圧縮応力との関係を整理したのが図-14 である。この図から K と K_1 との間には線形関係がおおむね成立していると判断できる。したがって、

$$K = 0.463 - 0.449K_1 \quad (24)$$

とおけることがわかる。

3) 弾性設計法

前述した結果をふまえ弾性設計法の手法を以下に述べる。ただし鋼床版の材質が41材以外はこの検討は不要である。

- ① 鋼床版橋の架設地点とグース打設時期を決め T_0 を設定する。
- ② グース打設車輛の幅を設定する。
- ③ 桁の断面性能から K_1 の最小値を決定する。
- ④ (24) 式から K を求め (23) 式に代入して σ_{xmax} 算出する。
- ⑤ グース打設車輛による最も危険な状態での鋼床版圧縮応力 σ_1 を決定する。
- ⑥ (25) 式を満足するよう、グース打設幅と桁の断面性能を変化させる。

$$\sigma_{xmax} + \sigma_1 < \sigma_y = 2400 (kg/cm^2) \quad (25)$$

4) 上越し製作キャンバーの必要性

表-2 で示す全ケースについて弾塑性解析を実施した。塑性残留変形量の解析結果を表-3 に示す。表-2 中 σ_1 は等分布荷重により鋼床版部に発生した最大圧縮応力を解析結果よりピックアップしたもので、 Kcr は鋼材の一部に塑性領域が発生し始める熱応力パラメーターであり、 K に関する塑性判定値である。すなわち、(26) 式で定義する Kcr より K が大きくなると鋼桁に塑性域が発生することを示す。表-3 で示す W_0 は等分布荷重により発生するスパンセンターでの最大たわみ、 W_y は第1次施工完了時の残留たわみを示す。

表-2 弾塑性解析ケースの諸定数

NO	H(m)	A (cm ²)	Afu/A	INA(m ⁴)	K	Kcr	K-Kcr	$\sigma_1 (kg/cm^2)$
1	1.0	0.3385	0.0609	0.0800	0.4034	0.3244	0.0790	1419
2	1.0	0.4165	0.0624	0.1000	0.4042	0.3257	0.0785	1415
3	1.2	0.3587	0.1195	0.1200	0.3535	0.2900	0.0635	1529
4	1.2	0.3042	0.0580	0.1000	0.4039	0.3228	0.0812	1424
5	1.2	0.3587	0.0598	0.1200	0.4044	0.3237	0.0807	1421
6	1.2	0.3587	0.0598	0.1200	0.4044	0.3237	0.0807	1421
7	1.2	0.3587	0.1195	0.1200	0.3535	0.2563	0.0972	1625
8	1.5	0.2852	0.1089	0.1399	0.3571	0.2857	0.0714	1536
9	1.5	0.2501	0.0524	0.1199	0.4050	0.3181	0.0869	1438
10	1.5	0.2853	0.0545	0.1399	0.4053	0.3198	0.0856	1433
11	1.5	0.2852	0.0545	0.1399	0.4053	0.3198	0.0856	1433
12	1.8	0.2431	0.0485	0.1598	0.4071	0.3548	0.0523	1327
13	1.8	0.2431	0.0485	0.1598	0.4071	0.3151	0.0920	1447
14	1.8	0.2431	0.0485	0.1598	0.4071	0.3151	0.0920	1447
15	1.8	0.2431	0.0970	0.1598	0.3622	0.2735	0.0887	1573
16	1.8	0.2431	0.0970	0.1598	0.3622	0.2391	0.1231	1677
17	1.8	0.2187	0.0463	0.1398	0.4070	0.3062	0.1008	1474
18	1.8	0.2431	0.0485	0.1598	0.4071	0.3085	0.0986	1467
19	1.8	0.2431	0.0485	0.1598	0.4071	0.3151	0.0920	1447
20	2.1	0.2355	0.0444	0.1997	0.4094	0.3059	0.1035	1475

表-3 死荷重たわみと残留たわみの関係

NO	H(m)	W0(mm)	Wy(mm)	Wy/W0
1	1.0	143	0.30	0.00210
2	1.0	250	0.90	0.00360
3	1.2	224	0.40	0.00179
4	1.2	120	0.05	0.00042
5	1.2	209	0.30	0.00144
6	1.2	322	1.40	0.00435
7	1.2	239	3.30	0.01381
8	1.5	180	0.70	0.00389
9	1.5	95	1.30	0.01354
10	1.5	168	1.80	0.01071
11	1.5	258	2.10	0.00814
12	1.8	74	0.80	0.01081
13	1.8	140	4.20	0.03000
14	1.8	309	10.60	0.03430
15	1.8	152	4.70	0.03092
16	1.8	162	5.30	0.03272
17	1.8	81	1.00	0.01235
18	1.8	142	5.40	0.03803
19	1.8	216	6.40	0.02963
20	2.1	188	2.40	0.01277

$$E \alpha (T - T_0) Kcr + \sigma_1 = \sigma_y \quad (26)$$

結果から判断すると、残留たわみ量（ W_y ）の最大値は死荷重最大たわみ量（ W_0 ）の 3.8%（ケース18）であり、きわめて小さい。これは熱応力の分布が桁の曲げモーメント分布に類似するため、塑性域の発生がスパンセンターの鋼床版部の一部に限られるためと推察される。従って、熱応力が塑性に達する場合でも製作キャンバーは考慮しなくても良いことになる。しかしながら $K > Kcr$ となり鋼桁に塑性領域の発生が予想される場合には、十分な施工管理を実施してグースアスファルトを打設しなければならない。

5. 結論

本論文の結論を以下にまとめる。

- (1) グースアスファルトによる鋼桁の温度分布は、準定常場の熱伝導方程式で解析できることが確認された。
- (2) 通常のグースアスファルト打設法によれば、鋼床版桁の最大温度は 120（℃）程度であり、その位置は熱源の後方約 20（ m ）程度の鋼床版面である。また鋼床版表裏面の温度差はほとんどなく、ウェブの熱の浸透深さは約 600（ mm ）である。
- (3) グースアスファルト打設を計画するうえで最も危険な熱応力は第一次打設時での施工幅内の鋼床版に生じる圧縮熱応力である。
- (4) 打設幅内の鋼床版熱応力に着目すると、橋軸方向への応力の分布は熱源と熱源後方の支点で構成される単純桁に等分布荷重を与えた時の曲げモーメント分布図と類似している。この時鋼床版部の熱応力の最大値は鋼桁スパンセンターで生じる。
- (5) 鋼床版に生じる最大圧縮熱応力はグース打設幅が小さいほど大きく、桁高及びスパンに依存しない。
- (6) 鋼床版に生じる最大圧縮熱応力は施工幅、桁の総断面積、断面 2 次モーメントおよび中立軸の位置で決定される熱応力パラメーター K と外気温 T_0 とで表わされる。また最大熱圧縮応力は外気温が 0（℃）の場合でも 1200～1300（ kg/cm^2 ）である。
- (7) グース打設による塑性残留変形の惹起を許さない場合は（25）式で照査を行なう。
- (8) 塑性変形の惹起が考えられる場合、すなわち $K > Kcr$ となる時でも、その残留変形は小さく製作キャンバーとして考慮する必要はない。ただしグース打設車輛をスパンセンター近傍で停止させるような施工管理は避けるべきである。

6. おわりに

本研究に引き続き、1985年に本理論の検証実験を予定し、理論の整合性を確認するつもりでいる。

最後に本研究をまとめるにあたり、三菱重工業（株）横浜製作所中島正道氏に御助力をいただいたことに感謝する。

参考文献

- 1) 佐藤邦彦, 上田幸雄, 藤本二男: 溶接変形・残留応力, 溶接全書3, 産報出版, 1979.
- 2) 本州四国連絡公団: 鋼床版設計要領(案), 鋼床版現場溶接施工標準(案), 海洋架橋調査会, P P. 17~18, 1980
- 3) Y. C. ファン(大橋義夫, 村上澄夫, 神谷紀生共訳): 個体の力学理論, 培風館, 1970.
- 4) 日本鉄鋼協会: 鉄鋼便覧, 丸善株式会社, 1962.
- 5) 本莊清司, 彦坂照, 村上隆之: 鋼床版連続箱桁橋の熱応力について, 土木学会第36回年次学術講演会講演概要集第1部, P P. 153~154, 1981.
- 6) 金井道夫, 平山伸司: 鋼床版橋の温度分布とその影響, 土木技術資料V01.25 No.8, P P. 21~26, 1980.