

V-10 舗装体の二次元の熱応力に関する研究(第5報)

北海道大学 工学部 正員 森吉昭博
 北海道大学 工学部 正員 深井一郎
 北海道大学 工学部 学生員 織笠光明
 北海道大学 工学部 正員 菅原照雄

1. まえがき

アスファルト舗装に横断方向亀裂が生ずる現象が最近各地で報告されている。この現象は特に寒冷地の舗装に多くみられるものの、コンクリートや鋼橋上のアスファルト舗装ではほとんど見受けられない。この現象が、外気温の変動に伴い、アスファルト舗装体内部に生ずる熱応力により発生することがすでに確認されていることから、これら橋の上のアスファルト舗装体の内部には一般道路部のそれよりも小さな熱応力しか発生していないことが予想される。本研究はコンクリート橋上のアスファルト舗装体の内部に発生する熱応力を長さ5m、アスファルト層の厚み12cm、コンクリートスラブ厚20cmの場合について2次元の応力計算した結果について報告する。計算に用いた材料の物理定数は表-1および図-2、ろに、また外気温は図-1にそれぞれ示す。舗装の境界条件は舗装の両端部で厚さ方向および橋軸方向でともに自由とし、コンクリートスラブ底面では橋軸方向で自由、厚さ方向は固定とした。

2. 解析法

想定したコンクリート橋上のアスファルト舗装に対してコンクリートスラブと共に小さな三角形要素に分割し、これに図-1の外気温を用いて両面よりニュートンクーリング状態を再現し、かつ時間間隔を30分とし、その間温度が線型変化と考え、補間を行い、この橋の内部の温度分布は差分を用いて計算する。この時生ずる熱応力はアスファルト混合物の応力・ひずみ関係が線型で、時間・温度の重ね合わせが可能で、かつその体積弾性係数が一定で均質等方性物質であると仮定すると、以下に示す各要素の釣合の方程式から計算可能である²⁾

$$(K_1 + (G(0) - G(\infty) - G_{k1}))K_2) \delta(t_k) = F(t_k) + H(t_k) + V(t_k) \dots (1)$$

ここで G : 緩和弾性率, F : 力学的荷重, H : 温度的荷重

V : 記憶荷重, $K_1: \phi^T C \phi$, t_k : 実時間

ϕ は係数マトリックスで $E(t) = \phi \delta(t)$ をみたす

(E : ひずみ, δ : 変位)

$$K_2 = \frac{1}{8} \phi^T \begin{bmatrix} -4 & 2 & 0 \\ 2 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} \phi$$

$$C = \begin{bmatrix} K + \frac{1}{3}G(0) & K - \frac{2}{3}G(0) & 0 \\ K - \frac{2}{3}G(0) & K + \frac{1}{3}G(0) & 0 \\ 0 & 0 & G(0) \end{bmatrix}$$

	熱膨張係数 ($Kcal/m^3 \cdot ^\circ C$)	熱伝達率 ($Kcal/m^2 \cdot hr$)	比熱 ($Kcal/kg \cdot ^\circ C$)	密度 (g/cm^3)	弾性係数 (kg/cm^2)	熱膨張係数 ($1/^\circ C$)	ポアソン比
アスファルト	5.0	0.9	0.21	2.3	$K = 1.14 \times 10^5$	2.5×10^{-5}	0.35
コンクリート	5.0	1.7	0.30	2.4	$K = 3 \times 10^5$	1×10^{-5}	0.2

表-1 舗装体の構成材料の材料物性

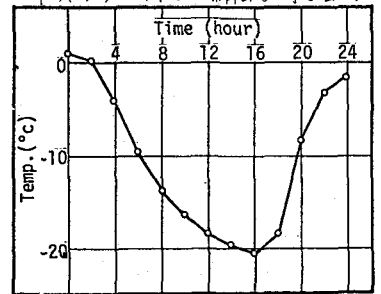


図-1 美々で観測された外気温

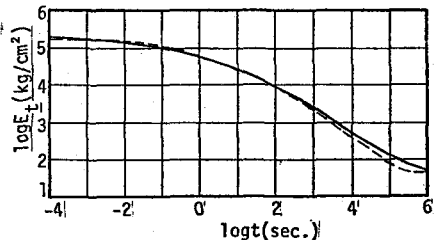


図-2 アスファルトコンクリートの緩和弾性率とその近似曲線

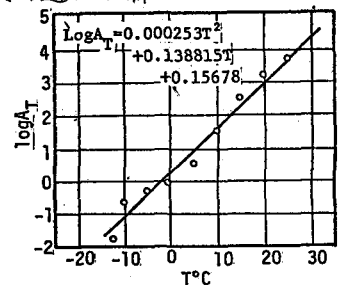


図-3 シフト量と温度との関係

(1)式の φ はシフト量であり、 $\varphi = \varphi(t) \int_0^t [T_m(t')] dt'$ 、であり $H = 3K \alpha T_m \Phi^T \Pi$ である。

ここで T_m : 要素の重心の温度、 α : 線膨張係数、 $\Pi = [1 \ 1 \ 0]^T$
 また(1)式における $V(t_k)$ は G を $G(t) = A_0 + \sum_{j=1}^8 A_j e^{-\frac{t}{\tau_j}}$ の形で近似すると次式で表現できる。

$$V(t_k) = -M \left(\sum_{j=1}^8 A_j \Delta_{j,k} + \frac{1}{2} [G(0) - G(\infty) - \sum_{j=1}^8 A_j e^{-\frac{(t_k - t_{k-1})}{\tau_j}}] E(t_{k-1}) \right) = M_P$$

$$\text{ここで } \Delta_{j,k} = e^{-\frac{(t_k - t_{k-1})}{\tau_j}} \left\{ \left(1 - e^{-\frac{(t_k - t_{k-1})}{\tau_j}} \right) E^*(t_{k-2}) + \Delta_{j,k-1} \right\}, M = \frac{1}{3} \Phi^T \begin{bmatrix} -4 & 2 & 0 \\ 2 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix}$$

$$\Delta_{j,1} = \Delta_{j,2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \Delta_{j,3} = e^{-\frac{t_3}{\tau_j}} (e^{\frac{t_3}{\tau_j}} - 1) E^*(0), E^*(t_i) = \frac{E(t_{i+1}) + E(t_i)}{2}$$

式(1)を全要素について組み立てて全節点の変位を求め、次式から要素毎の応力を計算する。

$$\sigma(t_k) = S_1 + S_2 E(t_k) - 3K \alpha T_m \Pi \text{ ----- (2)}$$

$$\text{ここで } \sigma = [\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \tau_{xy}]^T, E = [E_{xx} \ E_{yy} \ E_{xy}]^T, S_1 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -4 & 2 & 0 \\ 2 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} P$$

$$S_2 = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -4 & 2 & 0 \\ 2 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} [G(0) - G(t_k - t_{k-1})] + C$$

以上の式において $f(t)$ の関数形は図-3から

$$f(t) = -0.000253 T^2 - 0.138815 T - 0.15678$$

また $G(t)$ は Prony 級数と図-2から

$$G(t) = 11 + 1.2404 e^{-10^{-1}t} + 8.6105 e^{-10^{-2}t} + 50.65 e^{-10^{-3}t} - 4.8921 e^{-10^{-4}t} + 5.86.98 e^{-10^{-5}t} \\ + 2656.3 e^{-10^{-6}t} + 13782 e^{-10^{-7}t} + 16818 e^{-10^{-8}t} + 48305 e^{-10^{-9}t} + 32065 e^{-10^{-10}t} \\ + 71504 e^{-10^{-11}t} - 17833 e^{-10^{-12}t}$$

が各々得られた。

アスファルト層の内部に生ずる熱応力の計算には(1)式の $f(t_k)$ 項のみを省略するのに対し、コンクリートスラブのそれは(1)式で $f(t_k) = 0$ 、 $G(0) - G(t_k - t_{k-1}) = 0$ 、 $V(t_k) = 0$ とおくことにより、求められる。

3. 計算結果および考察

図-4は橋軸方向および厚さ方向に生ずる引張応力が最大の値を有する個所の応力と時間との関係を示す。 σ_x は橋の左端より1.4m程度離れたアスファルト舗装表面付近の応力であり、一方のは橋の両端より40cm程度離れたアスファルト舗装表面付近の応力である。 σ_y は図-1より、外気温が最低温度を示す時間において極大値となるのではなく、9時間経過時に極大値を示す。これは外気温の温度勾配と密接な関係にあると思われる。またこの値はすでに述べた報文の結果と比較すると、入力のデータが同じにもかかわらず、一般道路部の値のほぼ半分位である。

一方 σ_y の値は経過時間と共に若干ながら次第に増加する傾向にあるものの、その値は σ_x に比較して著しく小

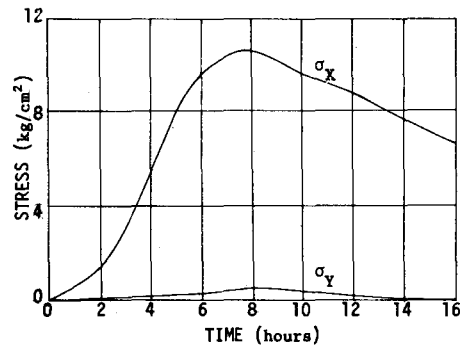


図-4. 橋軸方向(x 方向)と厚さ方向(y 方向)の応力と時間との関係

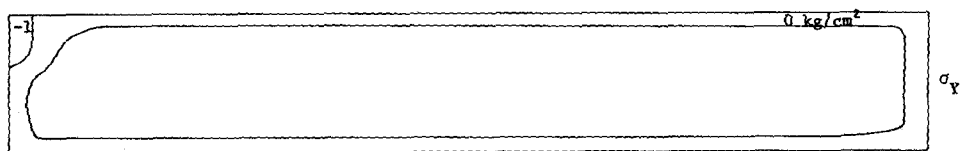
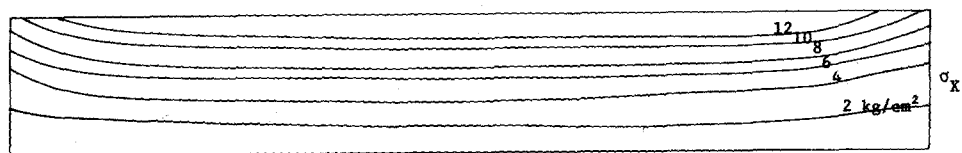


図-5 6時間後のアスファルト舗装内部に生ずるσxおよびσyの分布

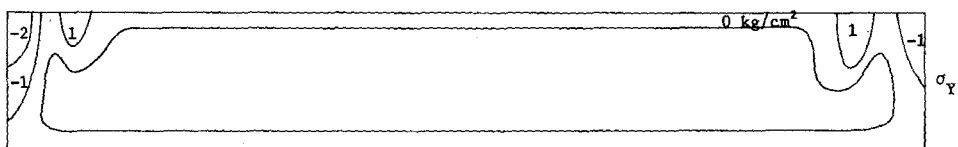
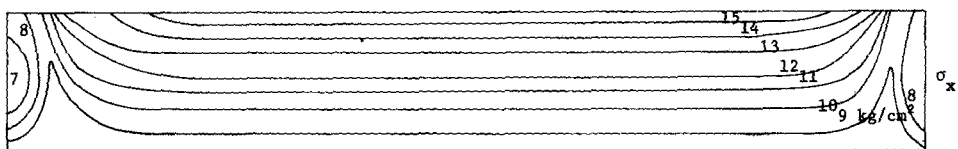


図-6 12時間後のアスファルト舗装内部に生ずるσxおよびσyの分布

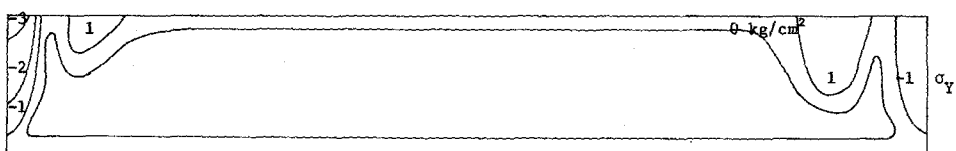
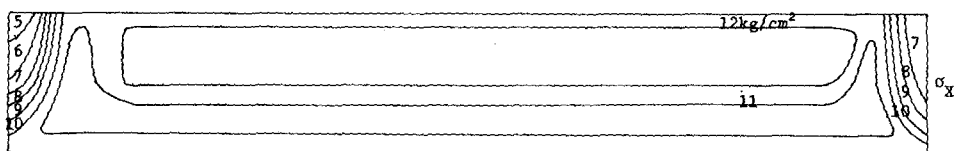


図-7 16時間後のアスファルト舗装内部に生ずるσxおよびσyの分布

図-5~7 はアスファルト層内部に生ずる熱応力を、のごとに整理し、経過時間毎に各応力を等応力線図で表わした結果である。これよりアスファルト層内部にはひび引張応力のみが生じ、この応力とコンクリートスラブの内部に発生する圧縮応力とが釣合っていることがうかがえる。(コンクリートスラブ内に生ずる圧縮応力は最大で16kg/cm²なのでここでは省略した。) 外気温は16時間経過時に最低の温度に達するが、ののの時間変化でも示したごとく、各要素の応力もこの時間において最大の応力とならない。ひびは時間に関係なくアスファルト舗装表面近くにおいて大きいものの、その値は両端部に近づくにつれ小さくなる。また、経過時間が短いときののの深さ方向の応力差は大きいものの、16時間経過時のその差は著しく小さくなる。このことは外気温の温度変化が大きい場合、深さ方向の応力変化が著しいものの、外気温の変化が小さくなるとアスファルト混合物の応力緩和性状がその威力を発揮するため深さ方向の応力に差がなくなりほぼ均一な応力場になることを示している。一方のひびは経過時間にはほぼ無関係にはほぼ一定値となり、その値は0に近い。

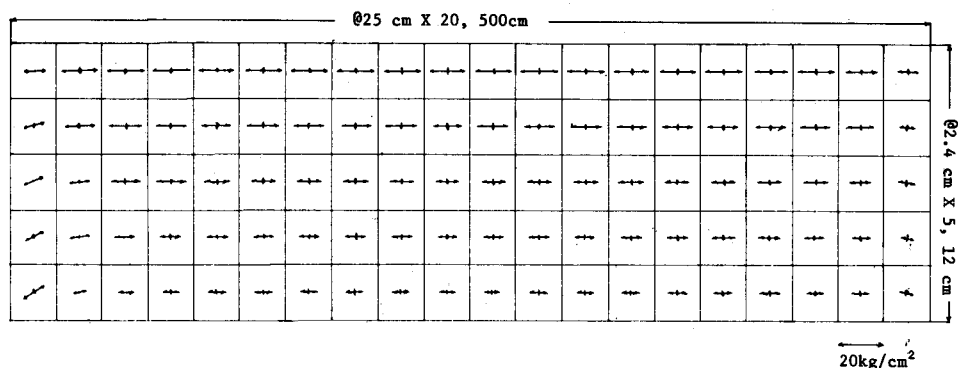


図-8 10時間経過時のアスファルト舗装内部の主応力とその方向

図-8 は10時間経過時にアスファルト舗装内部に生ずる主応力の大きさとその方向を示す。主応力の方向は橋の中央部付近ではほぼ水平であるが、橋の両端部では若干コンクリート割れに向いている。

4. 結論

以上で得られた結論を要約すると以下のとおりである。

- 1) コンクリートスラブ上のアスファルト舗装の内部に生ずる熱応力は一般道路部より著しく小さい。
- 2) 橋の両端部において橋軸方向の応力は著しく小さいものの、端部より1.4 m位離れるとその応力はほぼ一定値となる。
- 3) 水平方向の応力分布は外気温の変化に著しく左右される。
- 4) アスファルト舗装の内部に生ずる深さ方向の応力はほぼ0である。
- 5) 外気温が最低のときにアスファルト層内部に生ずる熱応力は極大値とならない。

本研究の計算にあたり鷺巣慎君、岩井雅和君の協力を得た。ここに感謝の意を表す。なおこのためは北大大型計算機 HITAC M-200 を使用した。

参考文献

1. 森吉、深井、鷺巣 菅原 : 舗装体の二次元の熱応力に関する研究(第3報)。土木学会北海道支部論文報告集、第35号、1978、P 317~322

J.L.White: Finite Elements in Linear Viscoelasticity, Proc.2nd Conf. on Matrix Methods in Structural

Mech. AFFDL-TR-68-150