

# IV-13 舗装体の二次元の熱応力に関する研究(第3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 梁井一郎  
 北海道大学 工学部 学生員 橋本 慎  
 北海道大学 工学部 正員 菅原照雄

## 1. まえがき

アスファルト舗装体内部に生ずる温度応力を解析する研究はなから行なわれていたが、アスファルト層を粘弾性体として扱った例は一次元的なものに限られていた。二次元的な研究例は全く存在しない。これはアスファルト層を二次元の粘弾性物体と考えるとその解析が非常に困難となり、この解析法の存在しない、R.R.のようである。筆者らはこれに對して、アスファルト層を有するある舗装モデルを考え、これに有限要素法を適用し、アスファルト層内部に生ずる温度応力を試算した。計算に用いた舗装のモデルは図-1

に、材料の物理性値は表-1および図-3.4に、また外気温は図-2に示す。舗装の境界条件は両端部および舗装層が変化する側部でも方向に自由、x方向に固定、舗装底面ではこの逆とした。

## 2. 解析法

アスファルト混合物の応力、ひずみ 図-4 シフトファクターと温度との関係  
 み関係の線型で、時間、温度の重ね合せが可能で、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、各要素の釣合の方程式はベクトル表示すると次のようである。

$$(K_1 + \{G(0) - G(t_n - \delta_{n-1})\} K_2) \phi(t_n) = F(t_n) + H(t_n) + W(t_n) \quad \dots (1)$$

ここで  $G$ :緩和弾性率、 $F$ :力学的荷重、 $H$ :温度的荷重、 $W$ :記憶荷重

$$K_1: \phi \text{ に対する } K_2: \frac{1}{\delta} \text{ に対する } \begin{bmatrix} -4 & 2 & 0 \\ 2 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} \phi, \quad t_n: \text{時間}$$

$\phi$  は係数マトリックスで  $\phi(t) = \phi \otimes(t)$  と表す。( $\phi$ :ひずみ、 $\otimes$ :変位)

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

| 物理定数<br>材料名     | 熱膨張係数<br>( $\text{Kcal/m}^2\text{sec}^2$ ) | 熱伝導率<br>( $\text{Kcal/m}^2\text{sec}$ ) | 比熱<br>( $\text{Kcal/kg}^\circ\text{C}$ ) | 密度<br>( $\text{g/cm}^3$ ) | 弾性係数<br>( $\text{kg/cm}^2$ ) | 緩和係数<br>( $\text{sec}$ ) | ポアソン比 |
|-----------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|-------|
| アスファルト          | 5.0                                        | 0.9                                     | 0.21                                     | 2.3                       | $K=1.94 \times 10^5$         | $2.51 \times 10^5$       | 0.35  |
| コンクリート          | 5.0                                        | 1.7                                     | 0.30                                     | 2.4                       |                              |                          |       |
| Soil A<br>(粘土質) |                                            | 2.1                                     | 0.20                                     | 2.0                       |                              |                          |       |
| Soil B<br>(砂質)  |                                            | 0.99                                    | 0.20                                     | 0.95                      |                              |                          |       |
| Soil C<br>(砂質土) | 5.0                                        | 1.0                                     | 0.30                                     | 1.0                       |                              |                          |       |
| 白線              | 0.5                                        |                                         |                                          |                           |                              |                          |       |

表-1 舗装体の構成材料の材料物性

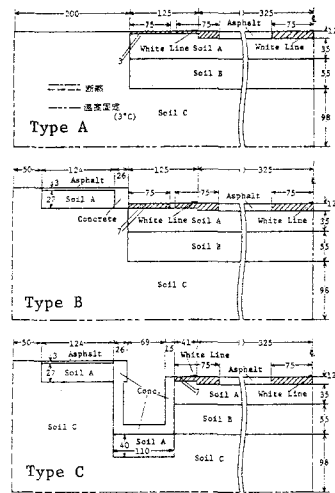


図-1 想定した3種の舗装モデル

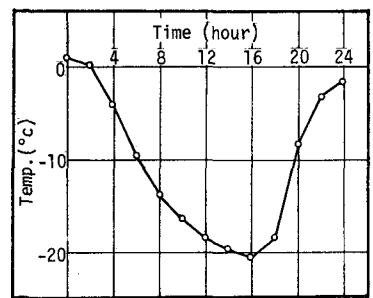


図-2 美々子観測された外気温(48.12.6~12.7)

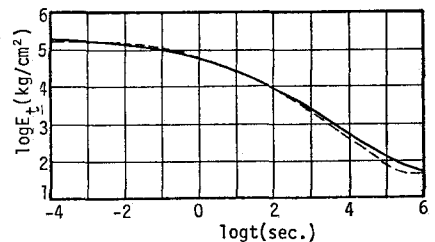


図-3 アスファルトコンクリートの緩和弾性率とその近似曲線

$$\theta \text{ はシフト量で } \theta = \theta(t) = \int_0^t \alpha [T_m(t')] dt', \quad 1H = 3K \propto T_m \Phi^T II$$

ここで  $T_m$ : 要素の重心の温度,  $\alpha$ : 線膨張係数,  $II = [1 \ 1 \ 0]^T$   
 メーリー項  $\nabla(t_k)$  は  $G \in G(t) = A_0 + \sum_{j=1}^3 A_j e^{-\frac{t}{\tau_j}}$  の形で近似すると次式で表現できる。

$$\nabla(t_k) = -IM \left( \sum_{j=1}^3 A_j \alpha_{j,k} + \frac{1}{2} [G(0) - G(\infty) - \sum_{j=1}^3 A_j e^{-\frac{(t_k - t_{k-1})}{\tau_j}}] \Phi(t_{k-1}) \right) = IM P$$

$$\text{ここで } \alpha_{j,k} = e^{-\frac{(t_k - t_{k-1})}{\tau_j}} \left[ \left( 1 - e^{-\frac{(t_k - t_{k-1})}{\tau_j}} \right) \Phi^*(t_{k-2}) + \alpha_{j,k-1} \right], \quad \alpha_{j,1} = \alpha_{j,2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\alpha_{j,3} = e^{-\frac{t_3}{\tau_j}} (e^{\frac{t_3}{\tau_j}} - 1) \Phi^*(0), \quad IM = \frac{1}{3} \Phi^T \begin{bmatrix} -4 & 2 & 0 \\ 2 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix}, \quad \Phi^*(t_i) = \frac{\Phi(t_{i+1}) + \Phi(t_i)}{2},$$

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。

$$\sigma(t_k) = \mathbb{B}_1 + \mathbb{B}_2 \Phi(t_k) - 3K \propto T_m II \quad \text{----- (2)}$$

$$\text{ここで } \sigma = [\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \tau_{xy}]^T, \quad \Phi = [\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \gamma_{xy}]^T, \quad \mathbb{B}_1 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -4 & 2 & 0 \\ 2 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} P,$$

$$\mathbb{B}_2 = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -4 & 2 & 0 \\ 2 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} [G(0) - G(t_k - t_{k-1})] + C$$

以上の式において  $\Phi(t)$  の関数形は図-2 から  $\Phi(t) = -0.000253 T^2 - 0.138815 T - 0.15678$  が、 $\tau_j$  は  $G(t)$  は Prony 級数と図-3 から以下の式が得られた。 $G(t) = 11 + 1.2404 e^{-10^3 t} + 8.6105 e^{-10^7 t} + 50.653 e^{-10^8 t} - 4.3921 e^{-10^{10} t} + 586.92 e^{-10^{12} t} + 2656.3 e^{-10^{14} t} + 13782 e^{-10^{16} t} + 16818 e^{-10^{18} t} + 48305 e^{-10^{20} t} + 32065 e^{-10^{22} t} + 71504 e^{-10^{24} t} - 17833 e^{-10^{26} t}$   
 3. 計算結果および考察

#### a. 水平応力と経過時間との関係

図-5~7 は各舗装モデルの表面近くの水圧応力と時間との関係を示す。ここで白い三角印は中心線より 19 cm 離れた地点、白い四角印は外側線の白線の内側から 6.5 cm 離れた地点、白い丸印は中心線より 69 cm、黒い三角印は中心線の白線の下部、および黒い四角印は外側線の白線の下部を各々示す。これより最大の引張応力が発生するのはどのタイプの舗装構造でも中心線から 19 cm 離れた地点となることになり、最大の圧縮応力が発生するのはどのタイプの舗装構造でも外側線の白線より内側に 6.5 cm 離れた地点となる。A タイプの外側線の白線より内側に 6.5 cm 離れた地点の応力を除けば、一般にどのタイプの舗装構造でも水平応力の時間変動およびその大きさはほぼ同一と考えてもよい。しかし、どの舗装構造でも最低温度で必ずしも水平応力が最大とはならず、温度勾配の大きな所で大きいことは注目に値する。最大圧縮応力も最大値となる 24 時間で最大とならず 22 時間で最大となる。これらの現象はアスファルト混合物が粘弾性体であり、かつ舗装体の温度が外気温の変動より若干遅れて変動するためにも生ずるものと考えられる。

また白線の下部の水平応力は引張および圧縮ともに小さいのに対し、中心線の白線の内側や外側線の内側では引張応力も圧縮応力もかなり大きな値となることが認められる。

#### b. 水平応力の分布

図-8, 11, 14 はタイプ A の舗装構造、図-9, 12, 15 はタイプ B の舗装構造および図-10, 13, 16 はタイプ C の舗装構造の温度分布と経過時間と場所ごとに整理したものである。ここで図-8, 9 および 10 は各舗装体に最大の水平応力が生じたときの応力分布を示している。これより、図-1 の中心線を含む斜線部の各舗装モデルのアスファルト層内に生ずる応力分布およびその大きさはほぼ同一である。またタイプ A および B の構造で舗装厚の薄い路肩部分の水平応力は表面近くではほぼ同じである。これに対し、外側線付近の水圧応力の分布はタイプ B および C がほぼ同じなのに対し、タイプ A のそれはこれらと比較して著しく異なる。ここで前二者の断面変化部では、

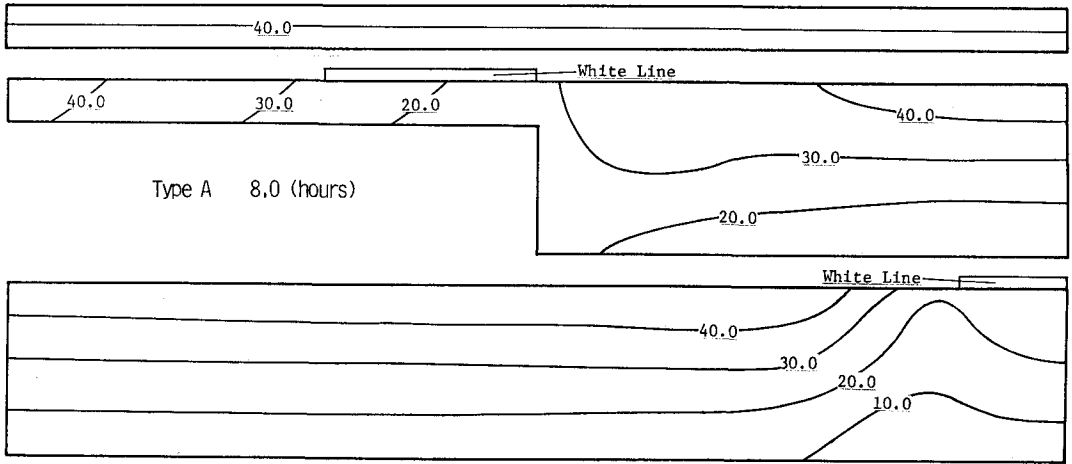


図-8 タイプAの鋪装構造の8時間後の水平応力の分布 (単位:  $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

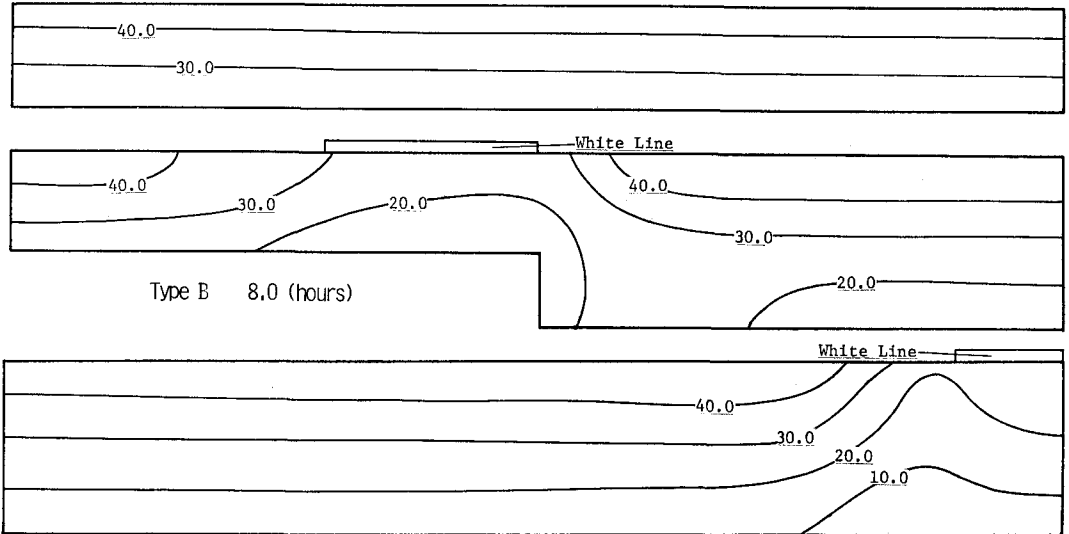


図-9 タイプBの鋪装構造の8時間後の水平応力の分布 (単位:  $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

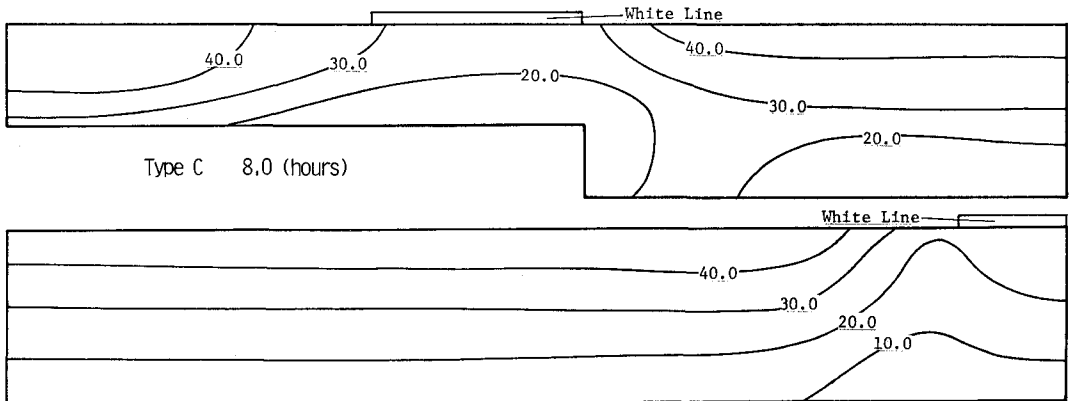


図-10 タイプCの鋪装構造の8時間後の水平応力の分布 (単位:  $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

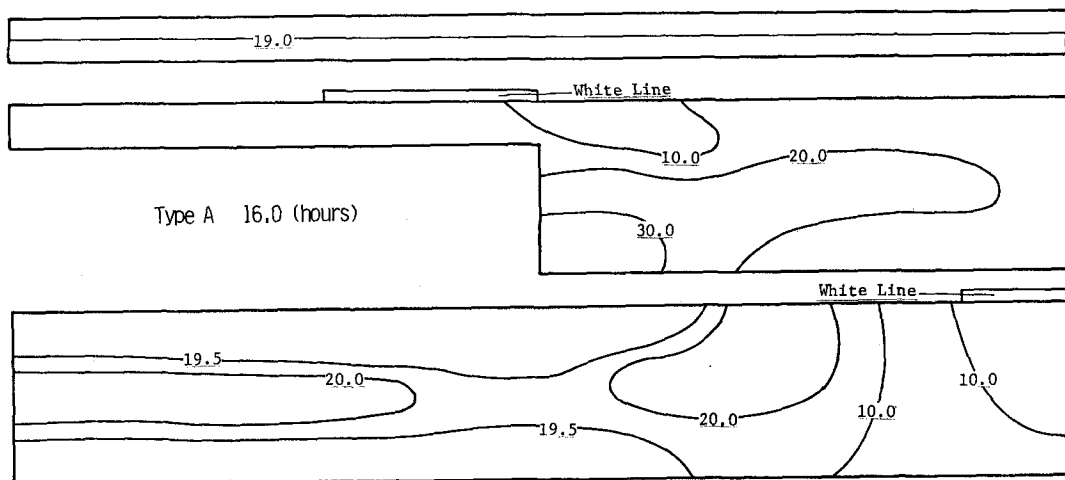


図-11 タイフAの舗装構造の16時間後の水平応力の分布 (単位:  $\text{Kg/cm}^2$ )

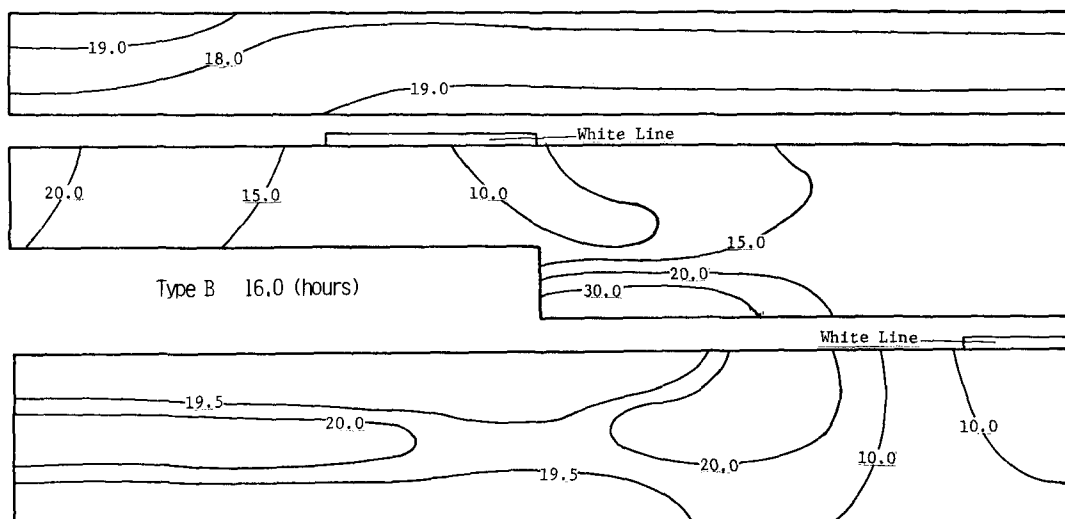


図-12 タイフBの舗装構造の16時間後の水平応力の分布 (単位:  $\text{Kg/cm}^2$ )

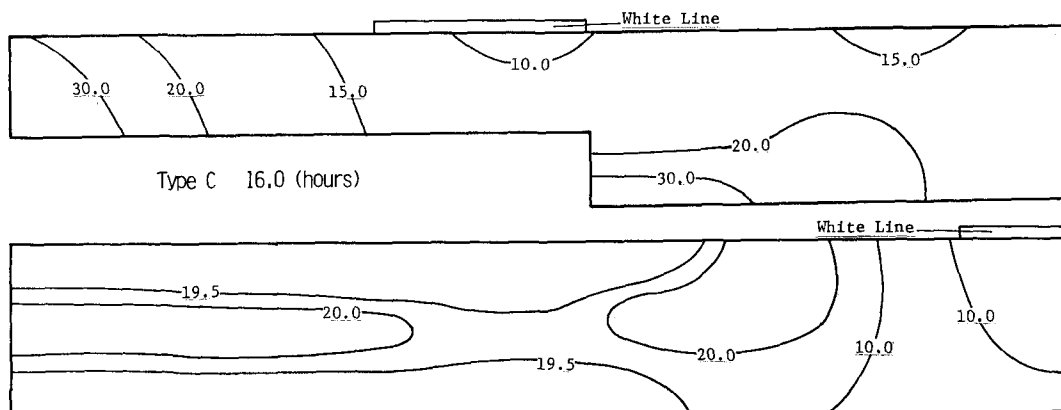


図-13 タイフCの舗装構造の16時間後の水平応力の分布 (単位:  $\text{Kg/cm}^2$ )

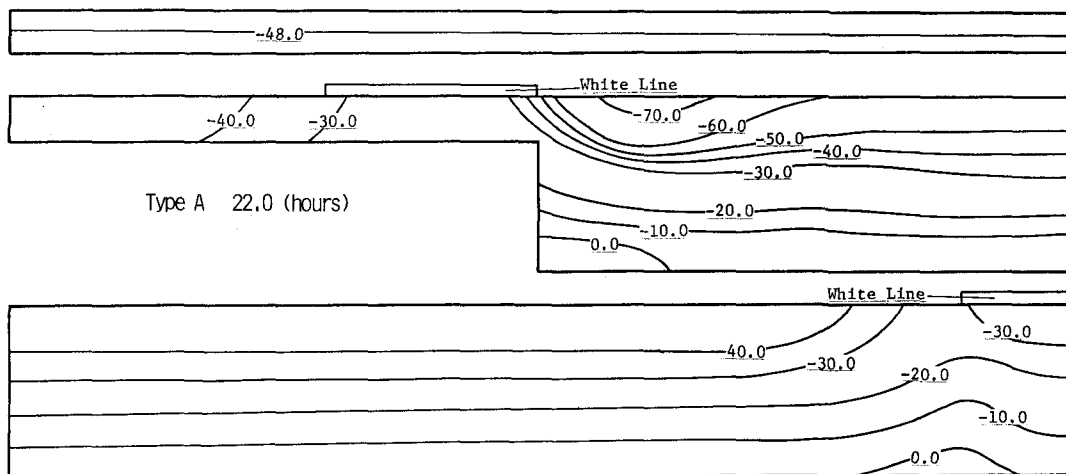


図-14 タイプAの舗装構造の22時間後の水平応力の分布 (単位:  $\text{kg/cm}^2$ )

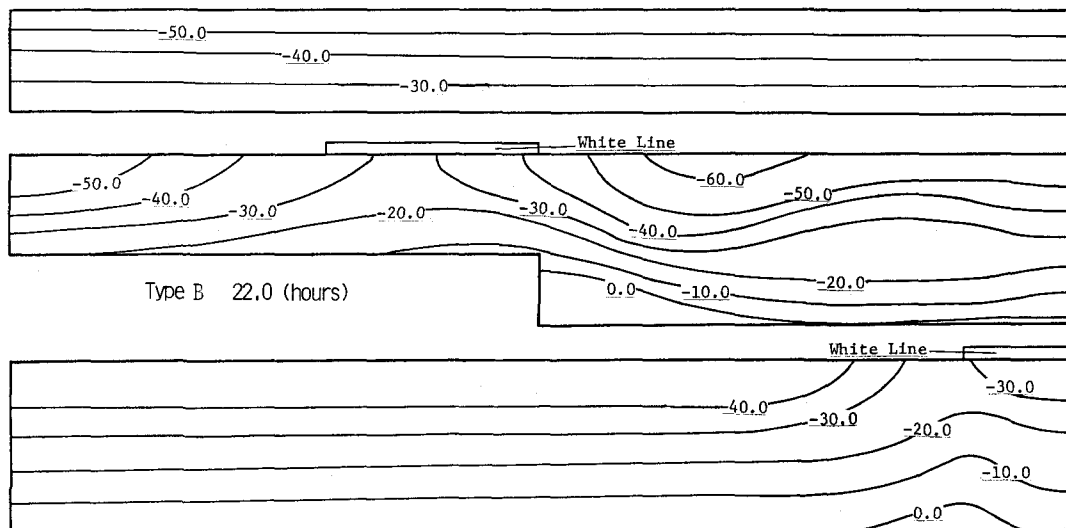


図-15 タイプBの舗装構造の22時間後の水平応力の分布 (単位:  $\text{kg/cm}^2$ )

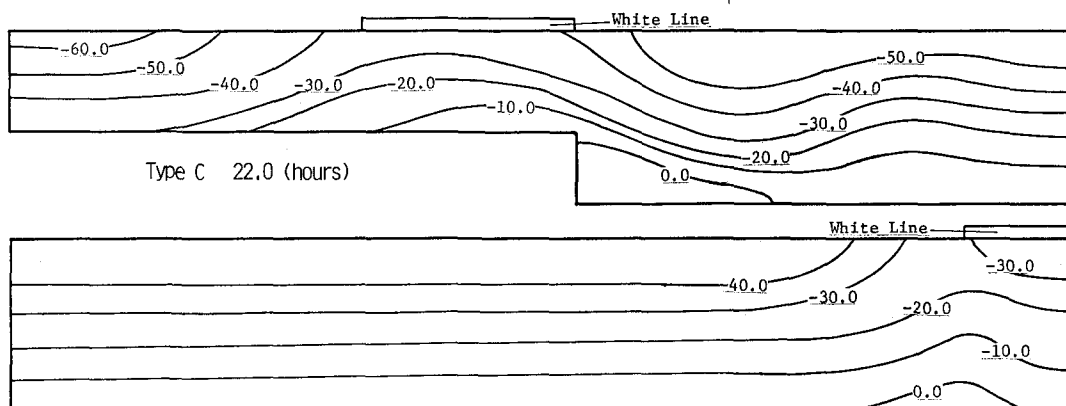


図-16 タイプCの舗装構造の22時間後の水平応力の分布 (単位:  $\text{kg/cm}^2$ )

曲げ作用を受けているように思われる。

図-11, 12 および13は最低温度を示すときの各舗装モデルの水平応力分布を示す。中心線付近および69cm離れた応力分布は舗装のモデルに関係なくほぼ同一であるが、断面変化部のそれは舗装のタイプにより異なる。

図-14, 15 および16は水平の圧縮応力が最大となるときの各舗装構造のアスファルト層内の温度分布を示す。ここでも中心線付近の圧縮応力は舗装のタイプに依存しないものの、断面変化部の応力分布は舗装のタイプにより異なり、特にタイプAの舗装構造ではこの付近に他の構造のものよりかなり大きな圧縮応力が舗装の表面付近に生ずる。

#### 4. 結論

以上の結果から得られた結論を要約すると以下のとおりである。

1. 外気温が最低温度のとき舗装体に最大の引張応力が作用するのではなく、最大の引張応力が生ずる時間は外気温の勾配に依存すると思われる。
2. 外気温の上昇に伴い、舗装体内部に圧縮応力が生ずる。
3. 外気温が同一でも舗装のタイプにより、アスファルト層内に生ずる水平応力の大きさやその分布は若干異なる。
4. 舗装の厚みが変化する外側線付近には舗装のタイプに関係なく、大きな水平応力が発生するように思われる。
5. 今後アスファルト層の境界条件や材料物性などに構造厚を変化させて応力計算を行い、これらの結果と現場の結果との相関をとる必要がある。

本研究の計算にあたり、須川順次君の協力を得た。ここに感謝の意を表す。なお計算は北大大型計算機FACOM Z30-75を使用した。

#### 参考文献

1. J. L. White ; Finite Elements in Linear Viscoelasticity, Proc. 2nd Conf. on Matrix Methods in Structural Mech. AFFDL-TR-68-150

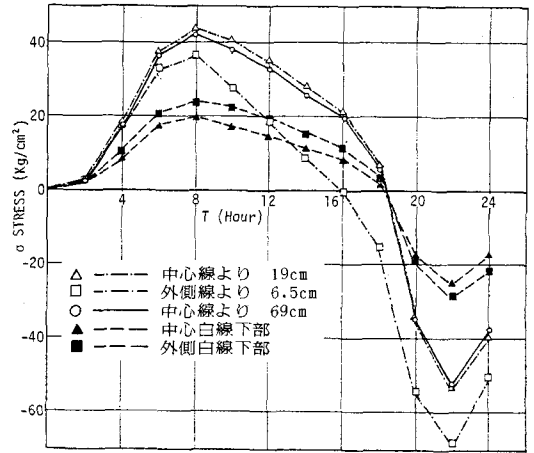


図-5 タイプAの舗装構造の水平応力の変化

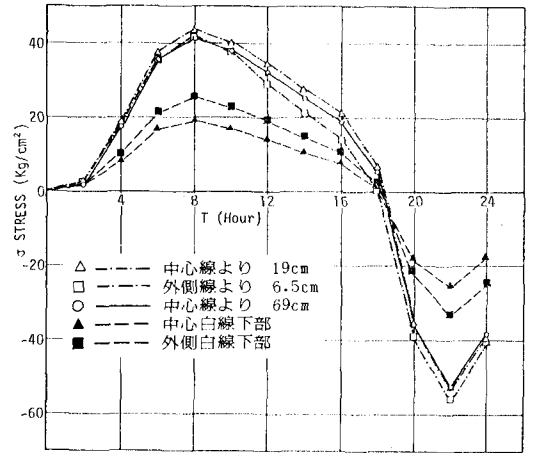


図-6 タイプBの舗装構造の水平応力の変化

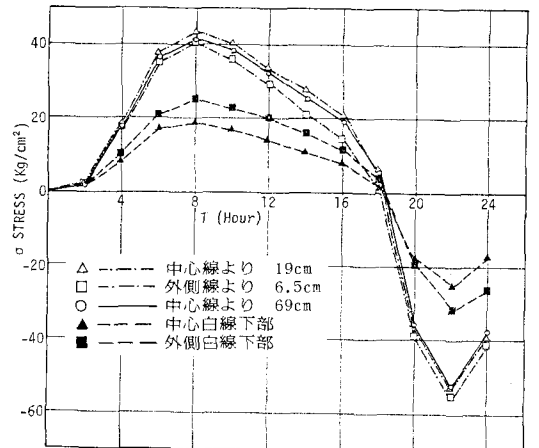


図-7 タイプCの舗装構造の水平応力の変化