

V-22 舗装体の二次元の熱応力に関する研究 (第6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 正員 菅原照雄

1. まえがき

外気温の変動により生ずるアスファルト舗装の熱応力の値はすでに報告したごとく、舗装の横断方向および縦断方向共数学的に求めることが可能となり、粘弾性物体としてのアスファルト舗装が熱応力により破壊する状況についてのシミュレーションを行うこともできるようになった。これに伴い実際の現場で観察されている橋の上のアスファルト舗装では亀裂がほとんどないことや、路盤内に断熱材を挿入した場合は横断方向亀裂が多くなることなどが理論的に実証された。本研究はアスファルト層の材料性状やその厚みが異なったとき、外気温の変動が同一のとき舗装体内部に生ずる熱応力の相違や亀裂部分の舗装体の動きについて舗装体のモデルから検討したものである。

解析の結果、表層材の材料の性状の差が熱応力の値に著しく影響していること、また一度横断方向の亀裂が生じた舗装体の亀裂部の断面は外気温の変動のもとで V 字型に変化することが明らかにされた。

2. 解析法

長さ5Mのアスファルト舗装でアスファルト層の厚さが2cmの舗装構造モデルを図-1のように想定し、これを小さな三角形に分割し、この構造に有限要素法を適用した。入力として外気温は図-2舗装構成材料の物性は表-1、2を、アスファルト層の緩和弾性率は図-4を、またこれらのシフトファクターは図-5に示したものをそれぞれ使用した。舗装体の温度分布はアスファルト層20cm、上層路盤55cm、路床土40cmの舗装構造から表-1、2の物理定数と図-2の外気温と路床土の下面で3°Cの一定温度なる条件および舗装体の表面はニュートンクーリング状態と仮定して一次元熱伝導方程式より差分を用いて求めた。図および表中にみられる

記号は以下のことを意味する。AC-6:密粒アスコン(6%), KSS:細粒ギャップアスコン(7%)
亀裂の全くない箇所、KSL:細粒ギャップアスコン(7%) 亀裂の非常に多い箇所の切取供試体、KBS:粗粒アスコン(5.5%) 亀裂の全くない箇所の切取供試体

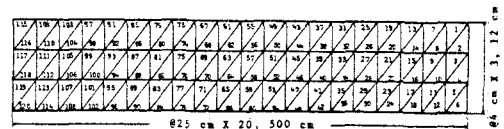


図-1 想定した舗装モデル

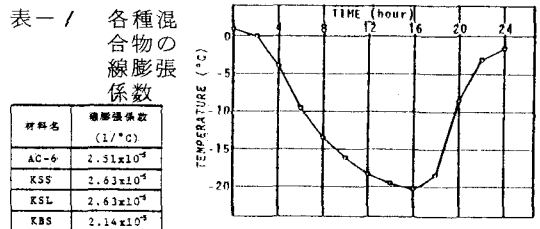


図-2 美美で観測された外気温

材料名	線膨張係数 (1/°C)
AC-6	2.31×10^{-5}
KSS	2.63×10^{-5}
KSL	2.63×10^{-5}
KBS	2.14×10^{-5}

各種混合物の線膨張係数

図-2の外気温は美美で昭和48年/2月6日から/2月7日にかけて観測されたものであり、表-2、図-4、5の緩和弾性率、シフトファクター等の値は実験から求めたものである。なお図-4に示す実線は実験値を、又破線はこの曲線をProny級数で近似したときの近似曲線をそれぞれ示す。

温度応力は2時間毎に舗装体温度をまず計算しこの値を用い、アスファルト混合物の応力・ひずみ関係が線形で、時間・温度の重ね合せが可能で、かつアスファルト層の体積弾性係数が一定で均質等方性物質であると仮定し、図-3に示す境界条件を考慮すると以下に示す各要

表-2 舗装構成材料の物理性状

材料性状	表面熱伝達率 (kcal/m ² ·hr·°C)	熱伝達率 (kcal/m·hr·°C)	比熱 (kcal/kg·°C)	密度 (g/cm ³)	体積弾性係数 (kg/cm ²)	ポアソン比
Asphalt	5.0	0.9	0.21	2.3	1.94×10^4	0.35
Soil A (切込砂利)	—	2.1	0.29	2.0	—	—
Soil B (横土割明土、火山灰)	—	0.99	0.20	0.23	—	—
Soil C (路床土)	5.0	1.0	0.30	1.0	—	—

素の釣合の方程式
から計算すること
ができる。

$$(K_1 + [G(0) - G(\xi_k - \xi_{k-1})] K_2) q(t_k) = F(t_k) + H(t_k) + \nabla(t_k) \dots (1)$$

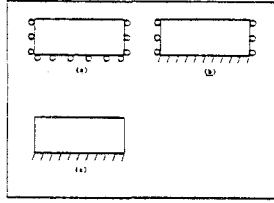


図-3 舗装構造モデルの境界条件

ここで G : 緩和弾性率 F : 力学的荷重

H : 温度荷重 ∇ : 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 $\epsilon(t) = \Phi q(t)$ をみたす (ϵ : ひずみ、 q : 変位)

$$K_2 = \frac{1}{6} \Phi^T \begin{bmatrix} -4 & 2 & 0 \\ 2 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} \Phi$$

$$C = \begin{bmatrix} K + \frac{4}{3} G(0) & K - \frac{2}{3} G(0) & 0 \\ K - \frac{2}{3} G(0) & K + \frac{4}{3} G(0) & 0 \\ 0 & 0 & G(0) \end{bmatrix}$$

(1) 式の q はシフト量であり、

$q = q(t) \int_0^t [10^6 T_m(t')] dt'$ であり、 $H = 3K \alpha T_m \Phi^T I$ である。

ここで T_m : 要素の重心 α : アスファルト混合物の線膨張係数 $I = [1 \ 1 \ 0]^T$

また(1)式における $\nabla(t_k)$ は G を $G(t) = A_0 + \sum_{j=1}^n A_j e^{-t/\tau_j}$ の形で近似すると次式で表現することができる。

$$\nabla(t_k) = -M \left(\sum_{j=1}^n A_j \alpha_{j,k} + \frac{1}{2} [G(0) - G(\infty) - \sum_{j=1}^n A_j e^{-\frac{(\xi_k - \xi_{k-1})}{\tau_j}}] \right) \epsilon(t_{k-1}) = M_P$$

$$\text{ここで } \alpha_{j,k} = e^{-\frac{(\xi_k - \xi_{k-1})}{\tau_j}} \left[(1 - e^{-\frac{(\xi_{k-1} - \xi_{k-2})}{\tau_j}}) \epsilon^*(t_{k-2}) + \alpha_{j,k-1} \right], \quad M = \frac{1}{3} \Phi^T \begin{bmatrix} -4 & 2 & 0 \\ 2 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix}$$

$$\alpha_{j,1} = \alpha_{j,2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \alpha_{j,3} = e^{-\frac{\xi_2}{\tau_j}} \left(e^{\frac{\xi_1}{\tau_j}} - 1 \right) \epsilon^*(0), \quad \epsilon^*(t_i) = (\epsilon(t_{i+1}) + \epsilon(t_i)) / 2$$

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。

$$\sigma(t_k) = S_1 + S_2 \epsilon(t_k) - 3K \alpha T_m I \dots (2)$$

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

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

以上の式において $f(t)$ の関数形は図-4から

$$f(t) = 0.000253T^2 + 0.1388T + 0.1568 \quad (AC-6), \quad f(t) = -0.00161T^2 + 0.1686T + 0.4250 \quad (KSL)$$

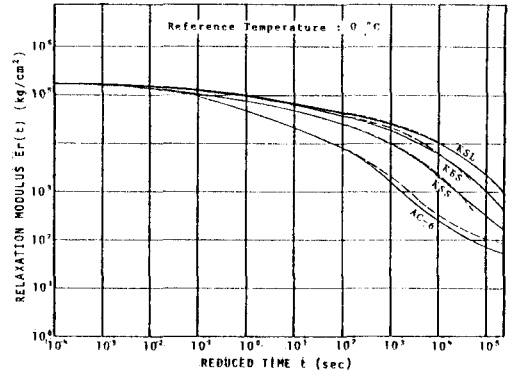


図-4 各種混合物のマスターカーブ

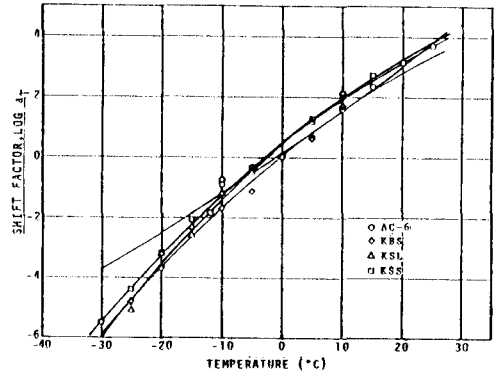


図-5 各種混合物のシフトファクター

$$f_1(t) = -0.00122T^2 + 0.1630T + 0.4925 \quad (\text{KSS}), \quad f_1(t) = -0.00122T^2 + 0.1632T + 0.03285 \quad (\text{KBS})$$

また $G(t)$ はProny級数を利用すると図-4から次式が求められる。

$$G(t) = 11 + 1.2404e^{-10^2 t} + 8.6105e^{-10^2 t} + 50.65e^{-10^2 t} - 4.8921e^{-10^2 t} + 5.8698e^{-10^2 t} + 2656.3e^{-10^2 t} + 13782e^{-10^2 t} + 16818e^{-10^2 t} + 48305e^{-10^2 t} + 32065e^{-10^2 t} + 71504e^{-10^2 t} - 17833e^{-10^2 t} \quad (\text{AC-6})$$

$$G(t) = 1.0 + 10.06e^{-10^2 t} + 42.913e^{-10^2 t} + 285.7e^{-10^2 t} + 1938.6e^{-10^2 t} + 11347.0e^{-10^2 t} + 16312.2e^{-10^2 t} + 21564.8e^{-10^2 t} + 26267.2e^{-10^2 t} + 49230e^{-10^2 t} - 1802e^{-10^2 t} + 40207e^{-10^2 t} + 571e^{-10^2 t} \quad (\text{KBS})$$

$$G(t) = 1.0 + 29.7e^{-10^2 t} + 44.9e^{-10^2 t} + 477.4e^{-10^2 t} + 4639.9e^{-10^2 t} + 15551.5e^{-10^2 t} + 14037.1e^{-10^2 t} + 14794.1e^{-10^2 t} + 32914.4e^{-10^2 t} + 20823.6e^{-10^2 t} + 60749.3e^{-10^2 t} - 30531.9e^{-10^2 t} - 32640.4e^{-10^2 t} \quad (\text{KSL})$$

$$G(t) = 1.0 + 4.34e^{-10^2 t} + 14.11e^{-10^2 t} + 76.12e^{-10^2 t} + 727.8e^{-10^2 t} + 4192.5e^{-10^2 t} + 14521.3e^{-10^2 t} + 19699.6e^{-10^2 t} + 28835.9e^{-10^2 t} + 31109.7e^{-10^2 t} + 43764.4e^{-10^2 t} + 22825.8e^{-10^2 t} - 459.4e^{-10^2 t} \quad (\text{KSS})$$

3. 計算結果および考察

3.1 亀裂部の水平方向変位

アスファルト舗装に一度横断方向の亀裂が生ずると、この舗装構造は図-3の(c)の状態にあると考えられる。この舗装構造モデルについて図-2の外気温や各種の材料性状を入力し、アスファルト層が一種類の混合物だけから成り立っている場合、舗装体の水平方向変位をこの構造の表面端部について求めると図-6のような結果が得られた。

外気温は24時間経過時に -1.6°C と初期温度 0.9°C に近づいているにもかかわらず、表面端部の水平方向変位はどの混合物でも30/1000mm程度回復しないに残っていること、また外気温が低下するに伴い、アスファルト舗装端部の水平方向変位は著しく収縮することは明らかである。ここで収縮量の絶対値は図-4に示したアスファルト混合物の緩和弾性率の形の位置とは直接関係はないが、混合物の配合により著しくその動きが異なる。ここでは応力緩和性状が悪く、かつアスファルト混合物の線膨張係数の大きなもの程この水平方向の動きが大きい傾向にあるように思われる。図-7は密粒アスコンでアスファルト層全体が成り立っている場合、図-3の(c)

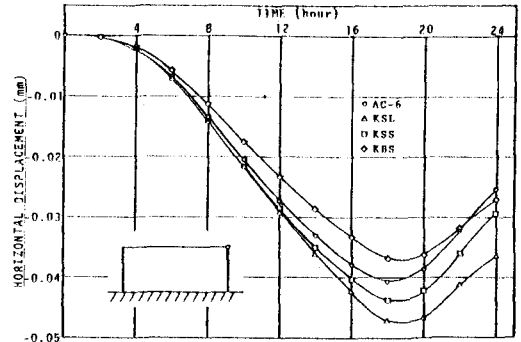


図-6 舗装表面端部の水平方向変位と時間との関係

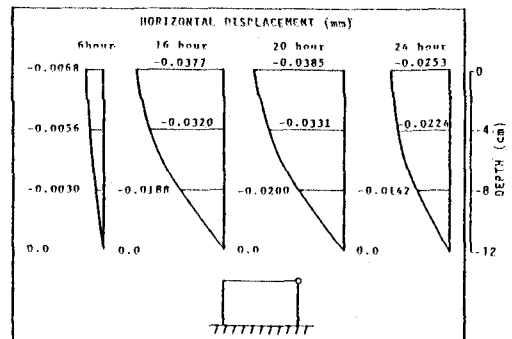


図-7 舗装の深さ方向の水平方向変位

の境界条件のもとで舗装端部の水平方向変位を深さと時間をパラメータにして整理した結果である。図-6と同様、図-2の外気温で最低温度に達する時間で舗装表面の端部の水平方向変位は極大値とはならず、若干その時間が遅れること、亀裂部の動きが実際の現場で観測されている状態と同じようにV字型となること、また外気温がほぼ同じとなる6時間と20時間の水平方向変位を比較すると時間の経過と共に収縮変形が次第に進行していくことは明らかである。

3.2 舗装体内の熱応力

図-3の舗装構造モデル(a)、(b)および(c)についてアスファルト層上層部の熱応力を計算により求めた結果は図-8に示す。ここでは材料性状のみがファクターとなっているが、この場合はこれらの境界条件の相異が熱応力の値に何ら影響を与えていないことを示している。

図-8では図-3の(c)の状態における舗装表面中央部(丸印部)に生ずる熱応力と経過時間との

関係を示している。ここにおいても応力緩和性状が悪く、かつアスファルト混合物の線膨張係数の大きいものは引張応力が大きくなることは明らかである。

図-9～11は図-3の(c)の状態ではアスファルト層が表層4cm、基層が8cmの場合と単一の混合物でアスファルト層が12cmの場合、舗装体内に生ずる熱応力と時間との関係を図中に示す丸印部の箇所において比較したものである。

図-9にみられるごとく、表面に近い部分に生ずる熱応力は表層、基層と異なる混合物を組み合わせた方が引張応力の発生している時間が短いため有利であるが、反面、圧縮応力がこの場合は他の場合よりも大きくなる。

中間部に生ずる熱応力の値はKBSの混合物で表層および基層の両層が成りたっている場合と表層がAC-6、基層がKBSの各混合物から成りたっている場合のものが全く同一となり、中間部に生ずる応力は表層材よりも基層材の性状に依存していることを図-10は示している。この傾向は図-11の下層部の応力の結果とほぼ同一であり、下層部の応力も表層材よりも基層材の性状に依存している。

4. 結論

- 1) アスファルト舗装に横断方向亀裂が生ずるとその目地部はV字型に変形が進行する。
- 2) アスファルト層を層状にすると単一の混合物の場合よりもどの深さにおいても熱応力の値は小さくなる傾向にある。
- 3) アスファルト舗装の横断方向の亀裂現象に対しては舗装の境界条件よりも材料性状の影響の方が大きいように思われる。
- 4) アスファルト層に生ずる熱応力の大きさは基層部においては表層材の材料性状にほとんど依存しないように思われる。

本研究の計算にあたって高松康広君の協力を得た。ここに感謝の意を表する。

なおこれらの計算には北海道大学大型計算機HITAC-200Hを使用した。

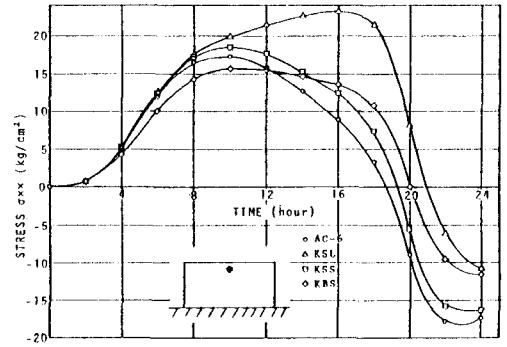


図-8 単一混合物の熱応力と時間との関係

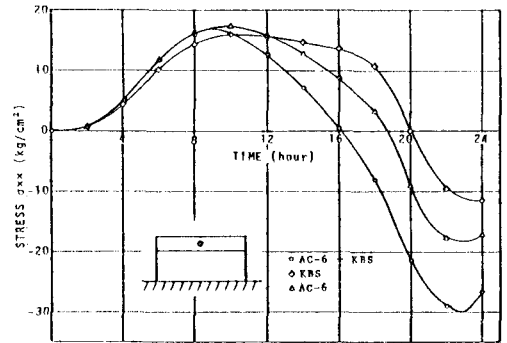


図-9 舗装表層部の熱応力と時間との関係

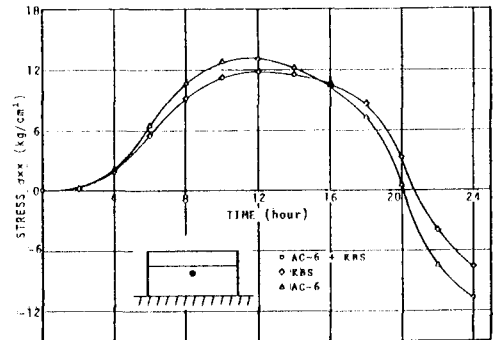


図-10 舗装中層部の熱応力と時間との関係

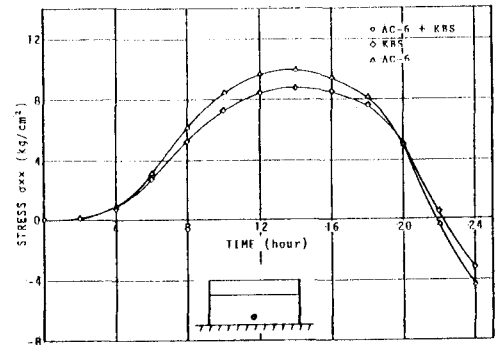


図-11 舗装下層部の熱応力と時間との関係