

アスファルト舗装の熱応力と変形の粘弾性解析

天野隆明¹・森吉昭博²・鏡慎³・笠原彰彦¹

¹ 学生員 北海道大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒060 北海道札幌市北区北13西8)

² フェロー会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科 (〒060 北海道札幌市北区北13西8)

³ 工博 旭川高専助教授 電気工学科 (〒070 北海道旭川市春光台)

アスファルト舗装の横断亀裂現象は早急な解明が望まれている。この問題を解明するには、舗装構造やアスファルト混合物の応力緩和性状の観点から舗装体の挙動を検討し、使用する混合物の選定をする必要がある。

本研究では、様々な舗装構造で、種々の応力緩和性状を有する混合物の熱応力とその変形について、粘弾性解析を行った。その結果、粘弾性解析による舗装体亀裂部における挙動は実際の観察事例とよく一致し、熱応力の大きさや亀裂部の変形特性はアスファルト混合物の応力緩和性状に依存すること、構造の違いにより発生する熱応力の大きさが違うこと等を明らかにした。

Key Words: viscoelastic analysis, thermal stresses, deformations, asphalt pavement

1. まえがき

アスファルト舗装の横断亀裂は寒冷地のみならず、わだち掘れ対策として粘度の高いアスファルトを用いるようになってきた温暖地にも最近数多く発生し、この現象は世界的にも早急な解明が望まれている重要なテーマの一つである^{1), 2)}。この現象は外気温の低下に伴いアスファルト混合物の応力緩和性状が悪化し、熱応力を舗装体の内部で吸収できなくなって、この熱応力がその混合物の破壊性状を超えたときに生ずると考えられる^{3), 4), 5)}。この他の熱応力増加の因子として、例えばアスファルトの性状、舗装構造等も考えられている^{6), 7)}。舗装構造に関しては、凍上防止用に断熱材が挿入された舗装や橋梁上の舗装と亀裂との関係や、アスファルトの性状の異なる舗装体の変形等については未だ十分に解明されていない⁸⁾。従って、アスファルト舗装の横断亀裂が防止できる舗装構造の選択および亀裂発生後のシール用材料の開発等の問題に対しても、この現象の早急な解明が望まれている⁹⁾。

アスファルト舗装の熱応力解析例としては、Monismith, 重松らの研究があるが、これは半無限体の一層系粘弾性解析であって、現実とはかなり異なっており、また亀裂発生後の舗装体の変形解析は全く行っていない^{10), 11)}。

本研究においては、各種のアスファルト混合物について引張の応力緩和試験を実施し、これらの値を用い

熱伝導方程式と有限要素法を利用して想定した舗装体の内部の熱応力と亀裂部の舗装体の変形について粘弾性解析を行った^{12), 13), 14), 15)}。この方法はアスファルト混合物の実測値の緩和弾性率と粘弾性理論の双方を用いて、粘弾性解析を行うためハイブリッドタイプの解析法と考えられる。解析の結果、アスファルト舗装に生じる熱応力および亀裂部の変形はアスファルト混合物の応力緩和現象と密接な関係があり、実際の現象とよく対応していることが明らかにされた。

2. 基本式

一般に非定常状態の熱伝導方程式は次式で表わされる。

$$\operatorname{div}(k \times \operatorname{grad} T) + q - c \times \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = 0 \quad (1)$$

ここで T , k , c および q はそれぞれ温度、熱伝導率、比熱および熱発生率を示す。境界条件については外部との境界で対流損失を仮定すると次式で表わされる。

$$k \times \operatorname{grad} T + \alpha_0 \times (T - T_1) = 0 \quad (2)$$

ただし、 T_1 , α_0 は外部温度並びに表面熱伝達率である。

式(1)と(2)を基にして汎関数を考え境界表面における単位面積当たりの熱流量を Q とすると、系全体のエネルギー x は次のようになる。

$$x = \int \left\{ \frac{1}{2} \times k \times (\text{grad}T)^2 - (q - c \times \frac{\partial T}{\partial t}) \times T \right\} dV \quad (3)$$

$$- \int Q \times T dS + \int \alpha_0 \times \left(\frac{1}{2} \times T^2 - T_1 \times T \right) dS$$

式(3)が最小となる条件より舗装体内部の温度を求め
る。

一方アスファルト混合物の応力～ひずみ関係が線
形で、時間温度の重ね合わせが可能であり、かつその
体積弾性率が一定で、等質等方性物質であると仮定し、
各要素の釣り合いの方程式をベクトル表示すると次の
ようである^{16),17),18),19)}。

$$\{K_1 + [G(0) - G(\xi_k - \xi_{k-1})] \times K_2\} \times d(t_k) \quad (4)$$

$$= F(t_k) + H(t_k) + V(t_k)$$

ここで G : 緩和弾性率 F : 力学荷重 t_k : 実時間

H : 熱荷重 V : 記憶荷重

$$K_1 = \Phi^T \times C \times \Phi$$

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

Φ は係数マトリクスで $\varepsilon(t_k) = \Phi \times d(t_k)$ を満たす。

(ε : ひずみ, d : 変位)

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

ξ はシフト量で

$$\xi_k = \xi(X, t) = \int_0^t (1/[A_T \times T(X, t')]) dt'$$

$$H = 3 \times K \times \alpha \times T_m \times \Phi^T \times I$$

ここで T_m : 要素の重心の温度 α : 線膨張係数

K : 全体コンダクタンスマトリックス

$$I = \{1 \ 1 \ 0\}^T$$

メモリー項 $V(t_k)$ は G を $G(t) = A_0 + \sum_{j=1}^{j=12} (A_j \times e^{-t/\tau_j})$

の Prony 級数の形で近似すると次式で表現できる。

$$V(t_k) = -M \times \left(\sum_{j=1}^{j=12} A_j \times a_{j,k} \right)$$

$$+ \frac{1}{2} \times [G(0) - G(\infty) - \sum_{j=1}^{j=12} A_j \times \exp(-\frac{\xi_k - \xi_{k+1}}{\tau_j})] \quad (5)$$

$$\times \varepsilon(t_{k-1})) = -M \times P$$

ここで

$$a_{j,k} = \exp(-\frac{\xi_k - \xi_{k-1}}{\tau_j})$$

$$\times [(1 - \exp(-\frac{\xi_{k-1} - \xi_{k-2}}{\tau_j}) \times \varepsilon^*(t_{k-2}) + a_{j,k-1}]$$

$$a_{j,1} = a_{j,2} = \{0 \ 0 \ 0\}^T$$

$$a_{j,3} = \exp(-\frac{\xi_2}{\tau_j}) \times ((\exp(\frac{\xi_2}{\tau_j}) - 1) \times \varepsilon^*(0))$$

$$M = \frac{1}{3} \times \Phi^T \times \begin{bmatrix} -4 & 2 & 0 \\ 2 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\varepsilon^*(t_j) = \frac{\varepsilon(t_{j+1}) + \varepsilon(t_j)}{2}$$

式(4)を全要素について組み立てて全節点の変位を求
め、次式から要素毎の熱応力を2時間毎に計算する。

$$\sigma(t_k) = S_1 + S_2 \times \varepsilon(t_k) - 3 \times K \times \alpha \times T_m \times I \quad (7)$$

ここで

$$\sigma(t_k) = \{\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{xy}\}^T$$

$$\varepsilon(t_k) = \{\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{xy}\}^T$$

$$S_1 = (\Phi^T)^{-1} \times M \times V(t_k)$$

$$S_2 = \frac{1}{6} \times \begin{bmatrix} -4 & 2 & 0 \\ 2 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix}$$

$$\times [G(0) - G(\xi_k - \xi_{k-1})] + C$$

3. 実験方法

実験に用いたアスファルト混合物の供試体は、屋内
で作成したものと現場から切取ったものの2種類であ
る。作成したアスファルト混合物の配合は、密粒度ア
スファルトコンクリート (アスファルト量 6%, 最大
粒径 13 mm) で、使用アスファルトの針入度は 92,
軟化点は 46.3°Cである (以下この混合物は AC-6 と呼

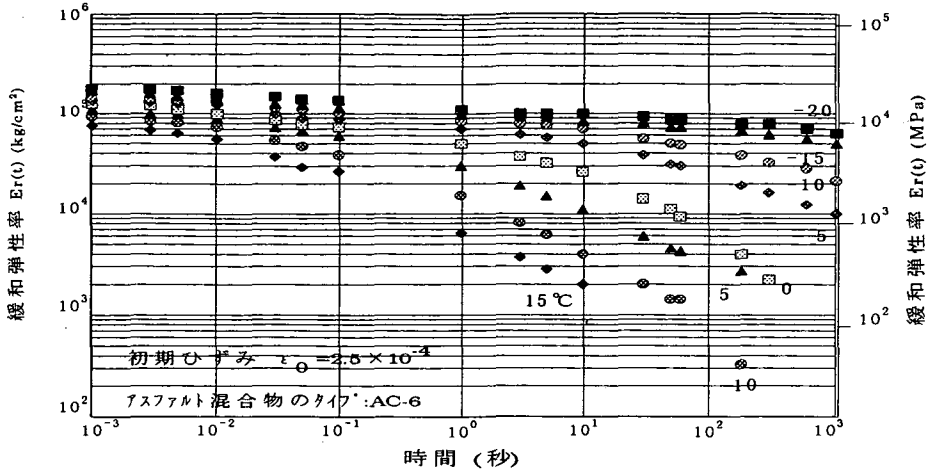


図-1 試験温度毎の緩和弾性率

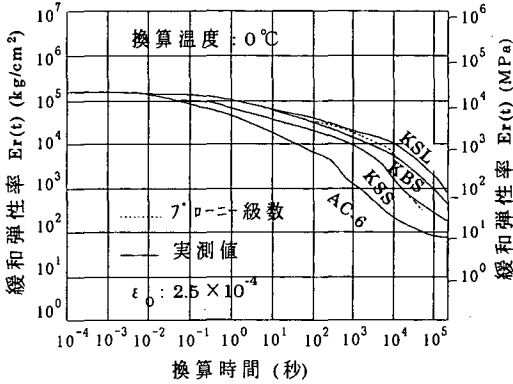


図-2 各種混合物のマスターカーブ

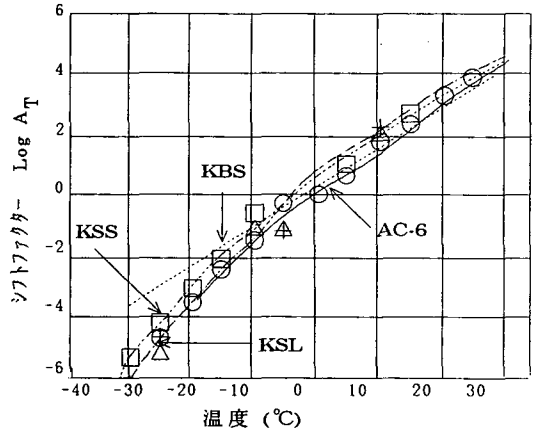


図-3 各種混合物のシフトファクター

ぶ)。室内作成の供試体の作成法は筆者が既に発表した方法と同一である²⁰⁾。現場から採取した混合物は、国道で横断亀裂の多い箇所(昭和52年施工,以下この混合物はKSLと呼ぶ)と少ない箇所(昭和52年施工,以下この混合物はKSSと呼ぶ)合計2箇所の表層用混合物と後者の基層用混合物である(以下この混合物はKBSと呼ぶ)²¹⁾。表層用混合物の配合は細粒度ギャップアスファルトコンクリート(アスファルト量7%)で、回収アスファルトの針入度は80,軟化点は49.0°Cである。

引張の応力緩和試験用の供試体は、いずれの混合物も30×30×5cmの供試体より2.5×2.5×15cmの大きさに六面カットされたものである。応力緩和試験は容量500kgf(49.5MPa),変形量±5cm,最小変形量±1/1000mmの一軸圧縮引張両用の試験機を用いた。応

力緩和試験は-30°C~25°Cの間で行い、この供試体の変形量は荷重計,フレーム,治具等の変形を十分補正した値を用いた。荷重の短時間領域の測定はデジタルメモリを用い、長時間領域では一般の自動平衡型記録計を用いた。この際アンプおよび記録計のドリフトは十分に補正した。また実験は初期ひずみ 2.5×10^{-4} の条件下で行った。

アスファルト混合物の緩和弾性率は、ある時間における応力を初期ひずみ量で除した値と定義した。各温度毎に求められた各種アスファルト混合物の緩和弾性率~時間曲線のうち、AC-6の結果を代表例として図-1に、またこのような緩和弾性率~時間曲線に対して温度~時間換算則を適用して得られた各種アスファルト混合物の緩和弾性率のマスターカーブを図-2に、このときのシフトファクターを図-3に示す。

表-1 プローニ級数によるマスターカーブ

$$G(t) = 1.0 + 27.9e^{-\frac{t}{10^{-1}}} + 45.0e^{-\frac{t}{10^{-2}}} + 477.4e^{-\frac{t}{10^{-3}}} + 464.0e^{-\frac{t}{10^{-4}}} + 1551.5e^{-\frac{t}{10^{-5}}} \\ + 14037.1e^{-\frac{t}{10^{-6}}} + 14794.1e^{-\frac{t}{10^{-7}}} + 32914.4e^{-\frac{t}{10^{-8}}} + 20823.6e^{-\frac{t}{10^{-9}}} + 60749.3e^{-\frac{t}{10^{-10}}} \\ + 30531.9e^{-\frac{t}{10^{-11}}} + 32640.4e^{-\frac{t}{10^{-12}}}$$

KSL (表層材, 亀裂少ない箇所)

$$G(t) = 1.0 + 4.3e^{-\frac{t}{10^{-1}}} + 14.1e^{-\frac{t}{10^{-2}}} + 76.1e^{-\frac{t}{10^{-3}}} + 727.8e^{-\frac{t}{10^{-4}}} + 4192.5e^{-\frac{t}{10^{-5}}} \\ + 14521.3e^{-\frac{t}{10^{-6}}} + 19699.6e^{-\frac{t}{10^{-7}}} + 28836.0e^{-\frac{t}{10^{-8}}} + 31110.0e^{-\frac{t}{10^{-9}}} + 43764.4e^{-\frac{t}{10^{-10}}} \\ 22825.8e^{-\frac{t}{10^{-11}}} - 459.4e^{-\frac{t}{10^{-12}}}$$

KSS (表層材, 亀裂多い箇所)

$$G(t) = 1.0 + 10.1e^{-\frac{t}{10^{-1}}} + 42.9e^{-\frac{t}{10^{-2}}} + 285.7e^{-\frac{t}{10^{-3}}} + 1038.6e^{-\frac{t}{10^{-4}}} + 11347.0e^{-\frac{t}{10^{-5}}} \\ + 16312.2e^{-\frac{t}{10^{-6}}} + 21564.8e^{-\frac{t}{10^{-7}}} + 26267.2e^{-\frac{t}{10^{-8}}} + 49230.1e^{-\frac{t}{10^{-9}}} - 1802.1e^{-\frac{t}{10^{-10}}} \\ + 40207.8e^{-\frac{t}{10^{-11}}} + 571.1e^{-\frac{t}{10^{-12}}}$$

KBS (基層材, 亀裂少ない箇所)

$$G(t) = 11.0 + 1.2e^{-\frac{t}{10^{-1}}} + 8.6e^{-\frac{t}{10^{-2}}} + 50.6e^{-\frac{t}{10^{-3}}} - 4.9e^{-\frac{t}{10^{-4}}} + 587.0e^{-\frac{t}{10^{-5}}} \\ + 2653.3e^{-\frac{t}{10^{-6}}} + 13782.0e^{-\frac{t}{10^{-7}}} + 16818.0e^{-\frac{t}{10^{-8}}} + 48305.0e^{-\frac{t}{10^{-9}}} + 32065.0e^{-\frac{t}{10^{-10}}} \\ + 71504.0e^{-\frac{t}{10^{-11}}} - 17833.0e^{-\frac{t}{10^{-12}}}$$

AC-6 (表層材, 屋内供試体)

表-2 アスファルト混合物の線膨張係数 (1/°C)

KSL	2.63×10^{-5}	$\text{Log} A_T = 0.00161 \times T^2 - 0.169 \times T - 0.425$
KSS	2.63×10^{-5}	$\text{Log} A_T = 0.00122 \times T^2 - 0.163 \times T - 0.493$
KBS	2.14×10^{-5}	$\text{Log} A_T = 0.122 \times T^2 - 0.163 \times T - 0.0329$
AC-6	2.51×10^{-5}	$\text{Log} A_T = 0.000253 \times T^2 - 0.139 \times T - 0.157$

$\text{Log} A_T$: シフトファクター (基準温度 0°C) T : 温度 (°C)

表-3 各種材料の性状²⁹⁾

材料	熱伝導率 k (J・m ⁻¹ ・k ⁻¹)	比熱 c (J・kg ⁻¹ ・k ⁻¹)	密度 ρ (kg・m ⁻³)	熱伝達率 α (J・m ⁻² ・k ⁻¹)
表層材	1.0	880	2300	5.8
コンクリートスラブ	1.9	1300	2400	5.8
基層材	2.4	840	2000	—
路盤材	1.0	840	1400	—
断熱材	0.035	1100	30	—
白線(外側)	—	—	—	(5.8)*

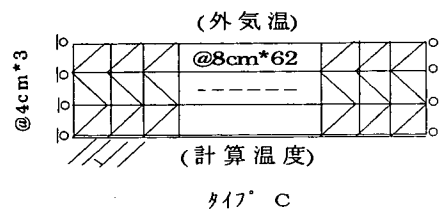
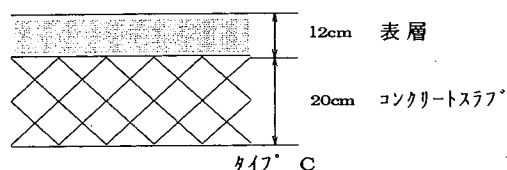
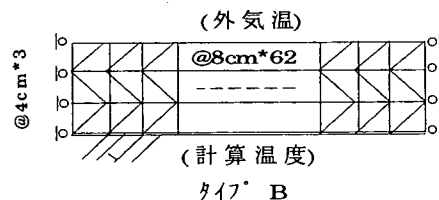
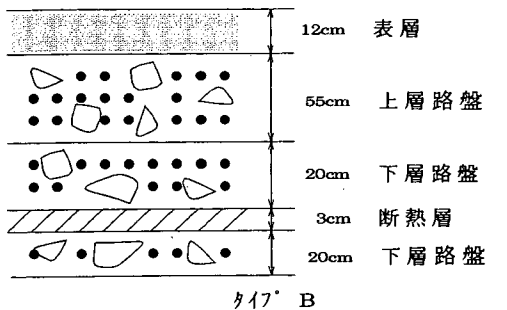
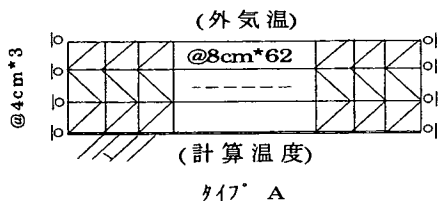
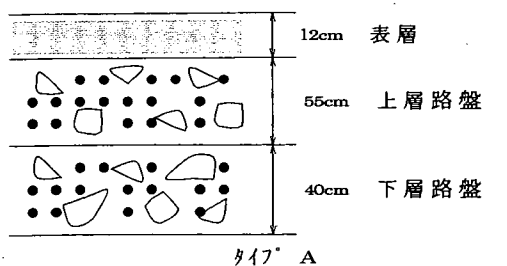
*: 推定値

図-2 の緩和弾性率～時間曲線のマスターカーブは計算の簡素化を図るため、Zak らの提案している Prony 級数での近似を試み²²⁾、その結果を表-1 に示す。図-2 は、このとき得られた近似曲線(点線)と実測値(実線)の一部を示す。明らかに実測値と近似曲線は、広範囲な時間領域にわたり比較的良好一致している。

実験より求めたシフトファクターは、表-2 に示し

(1) 混合物の線膨張係数の測定

各混合物の線膨張係数は 2.5×2.5×26cm の棒状供試体の表面に標点(距離 20cm)張り付け、この供試体を一定温度のメタノール媒体の低温槽に投入し、供試体が一定温度になったときコンタクトゲージを用いて 1/1000mm 単位で標点間距離を求め、この値より



(a)

(b)

図-4 構造の断面と境界条件

また、各材料の特性値を表-3に示す。

(2) 計算に用いたアスファルト舗装の構造並びに境界条件

計算に用いたアスファルト舗装の構造を図-4(a)に、境界条件を図-4(b)に示す。温度条件は、表面では図-5に示した外気温とし、下面は1次元で計算した温度とし、さらに側面は断熱状態とした。

4. 表計算結果および考察

(1) 一層系のアスファルト舗装

まず、亀裂の発生においてアスファルト混合物の性状、特に各種混合物における応力緩和性状がいかんかに亀裂発生に関与するかを調べた。図-4(タイプ A)の舗装構造でアスファルト層の応力緩和性状が異なる場合、外気温の変動(図-5)によるアスファルト層の表面から深さ4cmの位置に生じた水平方向の熱応力の時間変化を図-6に示す。これよりアスファルト舗装の横断亀裂の原因とみられる熱応

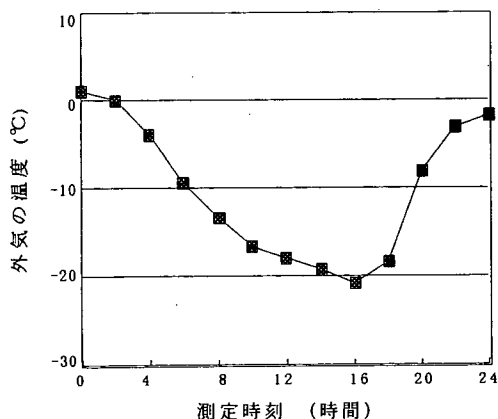


図-5 外気温の測定結果

計算により求めた。各混合物の線膨張係数は表-2に示す。

表-4 亀裂端部における舗装表面の残留変形量

1層目 (2層目)	8h		24h		(8h)-(24h)		緩和のランク	熱応力温度 (°C)
	応力	変形量	応力	変形量	応力	変形量		
	(MPa)	($\times 10^{-2}$ mm)	(MPa)	($\times 10^{-2}$ mm)	(MPa)	($\times 10^{-3}$ mm)		
KSL	1.4	1.9	-1.0	2.4	2.4	5.4	④	-27.7
KSS	1.1	2.0	-0.9	2.7	2.0	7.4	②	-32.5
KBS	0.9	1.7	-0.7	2.3	1.6	5.9	③	-27.5
AC-6	1.0	2.0	-0.8	2.8	1.8	8.2	①	-29.5
KSL+(KBS)	1.3	2.0	-0.5	2.9	1.7	8.9	④+③	
KSS+(KBS)	1.1	1.9	-0.8	2.4	1.8	5.0	②+③	
AC-6+(KBS)	1.0	1.8	-0.8	2.2	1.8	4.0	①+③	
KBS+(KSL)	0.9	1.7	-0.6	2.0	1.5	3.1	③+④	
KBS+(KSS)	0.9	1.8	-0.6	2.5	1.5	7.3	③+②	
KBS+(AC-6)	0.9	1.8	-0.6	2.7	1.5	9.1	③+①	

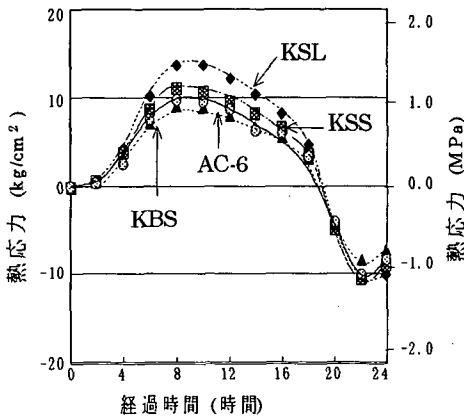


図-6 舗装体表面における熱応力の計算値

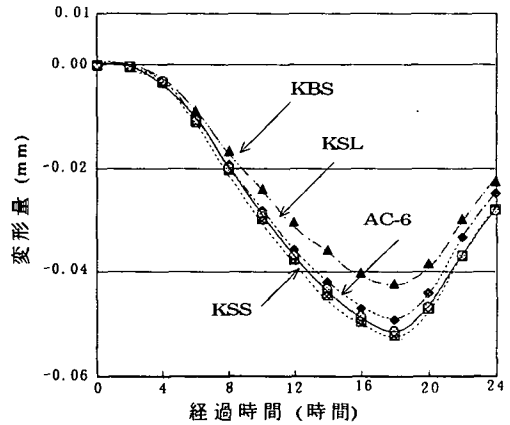


図-7 舗装体表面における変形量の計算値

力は、同一線膨張係数の混合物 (KSS と KSL) でも図-2 より応力緩和性状が悪いほど大きい。また、この箇所の熱応力の極大値 (8 時間経過) も線膨張係数の値より、むしろ応力緩和性状の影響が大きいように思われる。この結果アスファルト舗装の横断亀裂を防止するためには、応力緩和性状の良いアスファルトを用いた混合物を表層材として使用することが重要であるといえよう。

次に、横断亀裂は一度発生すると年々その幅を拡大することが観察されていることから、その動きがアスファルト混合物の応力緩和性状といかに関与するかを調べた。横断亀裂が生じた舗装を想定し、そのアスファルト層の表面の亀裂部端部表面の動きを図-7 に示す。図より、亀裂表面の動きは、本研究の計算条件

において収縮している。その収縮量は気温の下降、上昇に追従するように、大きくなったり、小さくなったりしている。本研究の場合では、0 時間経過時と 24 時間経過時の気温がさほど違ってないにもかかわらず、変形量においては違いが生じ、元の状態に戻っていないことが示された。従って亀裂部は、冬期間において日々の気温変動によりその間隔が拡大したと思われる。一方、この亀裂部の変形においてアスファルト混合物の応力緩和性状がいかに関与するかを調べるため、舗装表面の温度が同一となった 8 時間経過時と 24 時間経過時の変形量の差を各種アスファルト混合物について求めた。その変形量の差を残留変形量と称し、表-4 に示した。この表中の応力緩和のランク

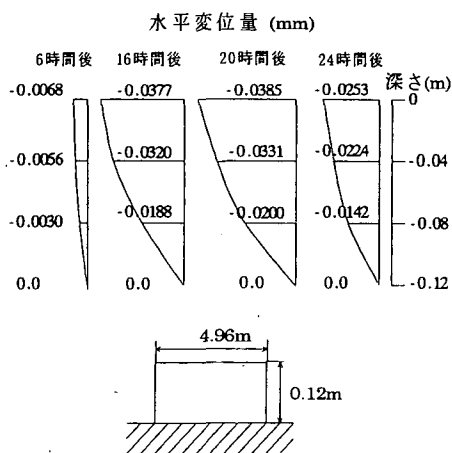


図-8 水平変位量の時間変化

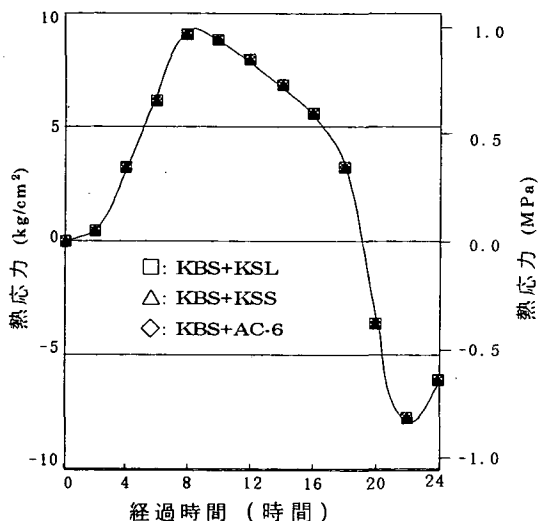


図-10 2層系モデルにおける熱応力の計算結果

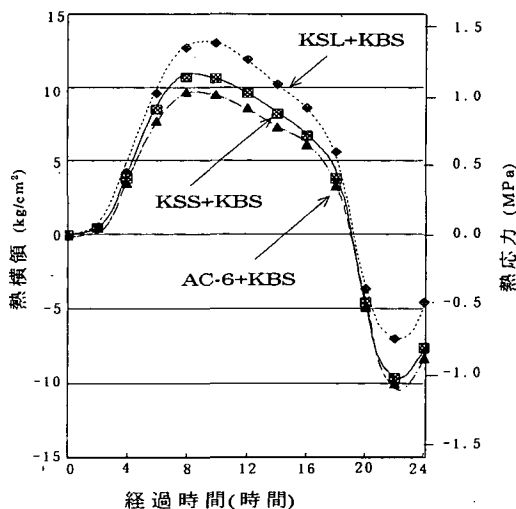


図-9 2層系モデルにおける熱応力の計算結果

とは図-2で応力緩和の著しい順を番号で表したものであり、また熱応力破壊温度とはアスファルト混合物について両端固定の状態での冷却速度、初期温度 10°Cでアスファルト混合物の熱応力試験を実施し、アスファルト混合物が破壊したときの温度のことである。表-4より、残留変形量の大きさの順序は応力緩和性状の良い順と一致し、それは熱応力破壊温度の低い順とやや対応している。一層系での舗装体の亀裂部上部の残留変形量は上部に発生している熱応力の値に反比例しているように思われる。

以上のことより、一層系の舗装体における粘弾性解

析によると、亀裂の発生を防止するには応力緩和性状の良いアスファルト混合物を使用すべきである。しかし、この場合一度発生すると亀裂部の幅の拡大は早いと考えられ、舗装体全体への影響が懸念されるという相反した結果がえられた。

最後に亀裂部の形状について調べた。

図-8は図-4(タ17 A)の舗装構造で外気温が図-5のように変動した場合の横断亀裂部の舗装体の変形状況を示す。図より各深さにおける水平方向の動きは、表面での場合と同様である。しかし、その変位量は深くなるに従い、小さくなっている。これより横断亀裂部の形状はV字型のような形²³⁾になると容易に推察できる。また、鉛直方向の変位量を16時間経過時に調べた。端部より8cm離れた平面を基準にとると、端部が14 μm、端部より4cm離れた個所で10 μmとそれぞれ高くなっていた。これより横断亀裂の端部表面付近では盛り上がった形状になると推測できる。このような形状について Haas, Rix らが、横断亀裂の形状を現場で測定した結果、路盤が水の浸透により落ち込まない時は上記推測したような形状であったと報告している。粘弾性解析の結果を用いた推測と一致する^{24),25)}。このような形状は横断亀裂が生じても路盤に水が浸透しない場合に多いが、一般には横断亀裂部で舗装が局部的に落ち込むことが多い²⁶⁾。

(2) 二層系のアスファルト舗装

表層が4cmで残り8cmが基層と考え、これらの層の材質が異なる場合の表層の熱応力を図-9,10に示

経過時間(時間)	1.0	3.0	5.0	7.0	9.0	11.0	13.0	15.0	17.0	19.0	21.0	23.0
断熱層有り	0.0511	0.1120	0.1190	0.1085	0.0910	0.0455	0.0315	0.0140	0.0385	0.0665	0.0910	0.0700
断熱層無し	0.0511	0.0980	0.1050	0.0826	0.0840	0.0420	0.0280	0.0105	0.0350	0.0630	0.0791	0.0616

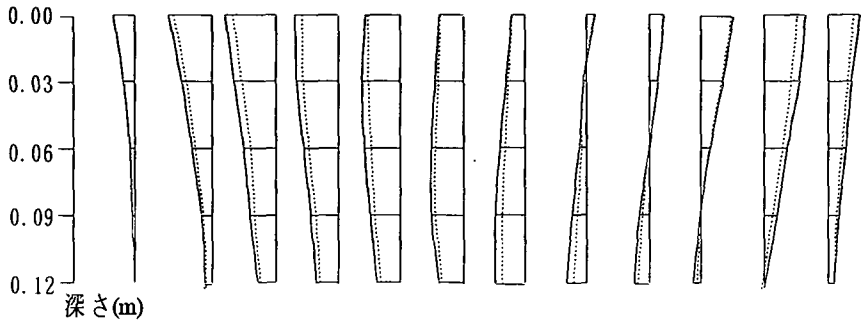


図-11 水平方向に発生した熱応力の計算結果

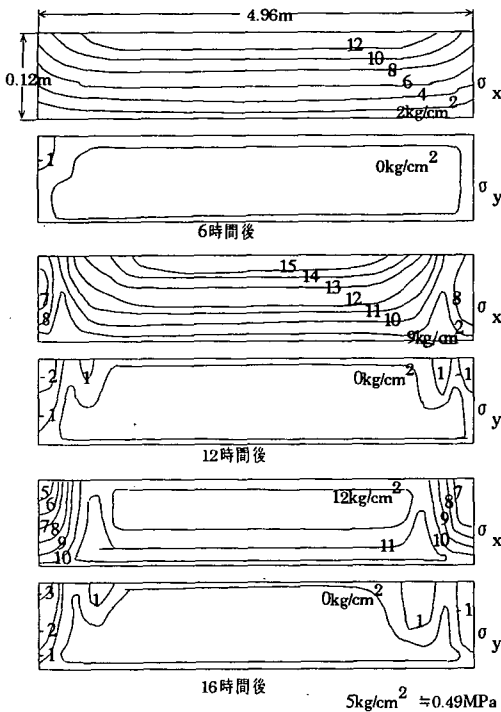


図-12 アスファルト層内に発生した熱応力の分布

す。

図-9 は表層材の材質が変化し、基層材料の性質が一定の場合の熱応力を、また図-10 は基層材を表層材として用いた場合の結果をそれぞれ示す(図-2 参照)。これより、表層材の熱応力の値は基層材の材質には一

部を除いてほとんど依存せず、一層系の舗装体の熱応力の値とほぼ同一である。この結果は Moore らが報告した横断亀裂は表層材として用いたアスファルトの応力緩和性状に支配されるという実験結果に対応している²⁷⁾。

一方、表-4 より残留変形量は基層材の材質が一定の場合、応力緩和性状の悪い混合物の方が大きく、表層材の材質が一定の場合で基層材のような材質を使用した場合、下層材の応力緩和性状の良い混合物の方が横断亀裂部の変形量は大きい。

上記解析結果の前者は、一層系の解析と逆の結果となっている。通常の舗装体における各層は表層、基層と構成されており、表層・基層の材料による挙動の違いおよび各材料の応力緩和性状を加味すると、二層系の解析結果が有効であると考えられる。よって、通常の舗装体の表層には応力緩和性状の良い混合物を用いることが亀裂発生防止となると結論できる。

(3) 断熱材が路盤内に挿入された舗装

断熱材を挿入した車道部、歩道部で発生した横断亀裂の原因を調べるため、図-11 は図-5 の Type B の舗装構造で断熱材が挿入された場合とされない場合の深さ方向の熱応力を示す。この図より断熱材が挿入された場合の深さ方向の熱応力は、通常の舗装構造と比較して2割程度大きくなる。この原因は断熱材が挿入されることにより、下方から上方への熱の移動がほとんどなく、断熱材より上の方のアスファルト層の温度が挿入しない場合より 2~3°C 計算上でも低くなり、同一の舗装構造でも断熱材がある場合の舗装は外気温がその分だけ低くなることに対応するので、舗装全

体の熱応力が大きくなるためと考えられる。舗装の温度が2~3℃異なるだけで、アスファルトの針入度級が一つ変化するほどその影響が大きいこと、また現地でも同一舗装構造でも周囲の環境が同一でも舗装温度が異なり、アスファルト舗装の横断亀裂の数が異なることがすでに確認されている²⁸⁾。一般に凍上しやすい箇所では不整凍上により曲げ作用でアスファルト舗装の縦方向に亀裂が発生するのに対して、断熱材が挿入された道路では凍上は防止できるものの、アスファルト層の応力分布が一様となり、熱応力が大きくなる。そのため引張応力が大きくなり、アスファルト舗装の性質がコンクリート舗装のそれと似てくるため横断亀裂が多くなると考えられる。

(4) 橋梁上の舗装の場合

図-12は図-5の外気温が作用したときのコンクリート床版上のアスファルト舗装の内部に生ずる熱応力を示す。このモデルにおける境界条件は上面、下面は外気温と接し、両端はローラー支持としている。一般道路部のアスファルト舗装の内部に生ずる熱応力と比較して、その値はその1/3程度と小さい。この原因は外気温が変動した時コンクリート床版とアスファルト舗装が両面から冷やされかつ一体となって収縮するためと考えられる。このため実際の橋梁上のアスファルト舗装はほとんど横断亀裂は見られない。

本研究はアスファルト舗装の低温時における応力や変形特性について述べているが、この手法は高温時の流動に対しても適用できる可能性があり、また粘弾性体と弾性体との複合体や外気温、ヒータおよび車両の三つが同時に変化する場合のアスファルト舗装体の挙動の解析にも有用と思われる。機会があればいずれ発表したいと考えている。

5. 結論

以上の結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) アスファルト層の一層系および二層系のアスファルト舗装に生ずる熱応力の大きさや横断亀裂後における舗装表面端部の変形特性はアスファルト混合物の応力緩和性状や線膨張係数の大きさに依存する。
- (2) アスファルト舗装の横断亀裂部の変形はアスファルト層より下面の層が変形しない場合、時間経過と共に亀裂部はV字状に開きながら次第に亀裂部は表面端部付近で若干盛り上がった形状となる。
- (3) アスファルト舗装の路盤に断熱材が挿入されるとそれが挿入されない舗装体より大きな熱応力

が発生する。

- (4) 橋梁部のアスファルト舗装に生ずる熱応力は一般道路部のそれより著しく小さい。
- (5) アスファルト舗装の亀裂部の変形特性は熱応力のシミュレーション結果と実際のアスファルト舗装^{24,25,26,27)}では非常に良い対応関係にあるように思われる。

謝辞 : 本研究での有限要素法に関しては本学電気工学科故深井一郎教授に大変お世話になった。ここに御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Symposium Non-Traffic Load Associated Cracking of Asphalt Pavements, *Proc. Association of Asphalt Paving Technologists*, pp.239-357, 1966.
- 2) 堀田宣道, 蜂谷剛省 : 寒冷地舗装のひび割れ-凍結防止法および温度応力の影響-, 舗装, 第22巻, 2号, pp.3-9, 1987.2.
- 3) 森吉昭博 : アスファルト混合物の熱応力破壊, 石油学会誌, 第31号, 第2巻, pp.172-175, 1988.3.
- 4) 八谷好高, 福手勤, 佐藤勝久 : 老化に伴うアスファルトコンクリートの性状変化, 運輸省港湾技術研究所報告, 第22巻, 2号, pp.268-287, 1983.6.
- 5) 森吉昭博, 藤原正浩 : アスファルト混合物の熱応力挙動に関する研究, 土木学会論文集, 第396号, V-9, pp.129-134, 1988.6.
- 6) 森吉昭博, 菅原照雄 : アスファルト混合物の熱応力に関する研究(第2報), 第14回日本道路会議論文集, pp.247-248, 1981.
- 7) Moore, B.K., Kennedy, T.W. and Haas, R.C.G. : Use of Statistically Designed Experiments in Asphalt Research, *Canadian Technology Asphalt Association*, pp.229-311, 1970.
- 8) Oosterbaan, M.D. and Leonards, G.A. : Use of Insulating Layer to Attenuate frost Action in Highway Pavement, *H.R.R.* No.101, pp.11-27, 1975.
- 9) 森吉昭博, 助川信行, 久下晴巳 : クラックシール材「常温硬化型アスファルト系乳剤」の特性, 第18回日本道路会議論文集, pp.742-743, 1989.
- 10) Monismith, C.L., Secor, G.A. and Secor, K.E. : Thermal induced Stresses and Deformations in Asphalt Concrete, *PAAPT*, pp.248-285, Vol.34, 1965.
- 11) 重松和男, 楢原健, 内藤匠 : アスファルトフェーシング工法の開発研究(その4) - フィルダム表面アスファルト遮水壁の温度応力について -, 鹿島建設技術研究所年報, 第21号, pp.27-42, 1980.
- 12) 森吉昭博, 深井一郎, 鷹巢慎, 菅原照雄 : 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集, pp.317-322, 1978.
- 13) 深井一郎, 森吉昭博, 菅原照雄: 舗装体の二次元の熱応力に関する研究 (第 4 報), 土木学会北海道支部論文集, pp.323-326, 1979.
- 14) 森吉昭博, 深井一郎, 織笠光明, 菅原照雄: 舗装体の二次元の熱応力に関する研究 (第 5 報), 土木学会北海道支部論文集, pp.327-330, 1979.
- 15) 森吉昭博, 深井一郎, 菅原照雄: 舗装体の二次元の熱応力に関する研究 (第 6 報), 土木学会北海道支部論文集, pp.505-508, 1979.
- 16) White, J.L. : Finite Elements in Linear Viscoelasticity, *Pro.2nd Conf. on Matrix Methods in Structure Mech. AFFDL-TR-68-150*, pp.489-516, 1968.10.
- 17) 田中豊喜: 有限要素法による線形粘弾性体の応力解析, 日本鋼構造協会第 3 回大会研究集会マトリックス構造解析講演論文集, pp.422-429, 1970.5.
- 18) Zienkiewicz, O.C. Watson, M. and King, I.P. : A Numerical Method of Visco-elastic Stress Analysis, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.10, 1968.10.
- 19) 草間孝志, 三井康司, 吉田俊弥: 数値ラプラス逆変換法による線形粘弾性解析, 土木学会論文集報告集, 第 292 号, pp.41-52, 1979.12.
- 20) 5)ibid
- 21) 森吉昭博, 久保宏, 菅原照雄: アスファルト舗装の横断亀裂に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, pp.513-516, 1980.
- 22) Zak, A.R. : Structure Analysis of Realistic Solid-Propellant Materials, *Journal of Spacecraft*, Vol.5, No.3, pp.270-275, 1968.3.
- 23) Haas, R.C.G. : The Low-Temperature Behavior of Flexible Pavement Surfaces, *Canadian Technology Asphalt Association*, pp.201-246, 1968.
- 24) Canadian Good Road Association Ad Hoc Committee on Low-Temperature Behavior of Flexible Pavements : Low-Temperature Pavement Cracking in Canada, The problem and its Treatment, *Convention Proceeding of Canadian Goods Roads Association*, pp.69-122, 1970.
- 25) Rix, H.H. : Vertical Movement and Crack-Width Changes on Highway Pavement Surfaces, pp.253-270, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.6, No.253, 1969.
- 26) 森吉昭博: 舗装上を走行する車両の加速度に関する研究, 第 18 回日本道路会議論文集, pp.542-543, 1989.
- 27) 7)ibid
- 28) 天野隆明, 徳光克也, 小笠原章, 笠原彰彦, 森吉昭博: アスファルトおよびアスファルト混合物のぜい化点, 石油学会誌, 第 39 巻, 第 5 号, 1996.
- 29) 豊島真樹, 山村義秀, 佐藤実: 凍上対策工法としての断熱工法および水工法について, 第 19 回北海道開発局技術研究発表資料, 1976.

(1996. 1. 5 受付)

VISCOELASTIC ANALYSIS OF THERMAL STRESSES AND DEFORMATION IN ASPHALT PAVEMENTS

Takaaki AMANO, Akihiro MORIYOSHI, Shin KAGAMI and Akihiko KASAHARA

Transverse cracking is most important problem in cold regions and it must be solved earlier. We should select the asphalt mixture in asphalt pavement considering with pavement structure and relaxation of asphalt mixture for this problem.

This paper describes the viscoelastic analysis of thermal stresses and deformation for various structures in asphalt pavement. In this study, it is concluded that thermal stresses and deformations depend upon the types of pavement structure and asphaltic mixture, and the estimated thermal stresses are good correlation with the results of the thermal fracture test for asphaltic mixture.