

# アスファルト混合物層の温度分布と設計ひずみ

西山 大三<sup>1</sup>・尾本 志展<sup>2</sup>・祁 相輝<sup>3</sup>・松井 邦人<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 Ph.D. 株式会社 NIPPO 技術研究所 (〒140-0002 東京都品川区東品川3-32-34)

E-mail: nishiyama\_taizou@nippo-c.jp

<sup>2</sup>正会員 工博 株式会社 NIPPO 技術研究所 (〒140-0002 東京都品川区東品川3-32-34)

<sup>3</sup>学生会員 東京電機大学大学院 理工学建設環境工学専攻 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

<sup>4</sup>フェロー会員 Ph.D. 東京電機大学教授 理工学部建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

アスファルト舗装は気象変化の影響を大きく受けることが知られている。特にアスファルト混合物層の剛性は非常に温度に敏感であり、その荷重分散性能が大きく変化すると思われる。そこで、本研究では東京気象台で観測した1年間の気象データを用いて数値シミュレーションを行い、まずアスファルト舗装内部の非線形温度分布を予測した。この温度分布から平均的な舗装温度に対応するアスファルト混合物層の剛性(ヤング係数)を有する舗装モデルとアスファルト混合物層を細分割してその温度分布に対応した剛性を有する舗装モデルにおいて、設計ひずみを求め、両方法の疲労破壊輪数の違いを明らかにしている。

**Key Words :** *thermal analysis, thermal variation in depth, stiffness variation in depth, number of wheel passing causing failure*

## 1. はじめに

舗装の設計は経験的設計法から理論的設計に移行する方向にある。舗装を理論的に設計するためには交通荷重と環境因子の影響による舗装構造の応答を求めることが必要となる。環境因子の影響には、温度変化により材料が伸縮(ひずみ)する直接的に影響する因子と、温度や水分の変化により材料特性に影響する間接的な因子がある。本研究では、間接的な温度変化の影響に注目している。

アスファルト舗装は日々の気象の変化に曝されており、アスファルト混合物層の温度は常に一様ではなく深さ方向に変化している。したがって、アスファルト混合物層の剛性も変化する。しかし、舗装構造解析を行うとき、アスファルト混合物層を細分化して深さ方向に弾性係数を変化させると、計算量が多くなってしまう。そのため、ある着目点での温度とその温度に対応する弾性係数を用いて解析することが一般的である。その着目点は通常アスファルト混合物層の層厚を  $H$  とすると、表面から  $H/2$  あるいは  $H/3$  の深さである。

本研究では、1年間の気象データを用いて行った温

度解析結果から、平均気温の一番低い1月、一番高い8月、その中間の4月に注目して深さ方向の弾性係数の変化が、アスファルト混合物層下面のひずみと路床上面のひずみに及ぼす影響を検討している。

温度変化に伴い温度応力も発生することも予測されるが、温度変化が1日の周期で変化することとアスファルト混合物層の粘弾性特性を合わせて考えると、温度応力は荷重により発生する応力と比べて小さいことが予測されるので、その影響については今後検討する。

## 2. 舗装の温度解析

舗装の温度分布を求めるために、舗装内部の温度分布を支配する方程式として、式(1)の一次元熱伝導方程式を用いた。深さ方向の温度分布に主点をおいているため、最もシンプルなモデルである一次元モデルを採用した。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

ここで、 $T(z,t)$  は温度[°C]、 $\rho$  は密度[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]、 $C$

は比熱[J/(kg·K)],  $k$  は熱伝導係数[W/(m·K)],  $z$  は深さ[m],  $t$  は時間[h]である。

自然環境下に暴露されている構造物は、さまざまな気象因子の影響を受ける。そのため、温度解析を行う上で、舗装表面で式(2)の境界条件を考慮しなければならない。

$$k \frac{\partial T}{\partial z} + q_{cov} + q_{sol} + q_{rad} + q_{evp} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $q_{cov}$  : 顕熱輸送量[W/m<sup>2</sup>],  $q_{sol}$  : 正味全天日射量[W/m<sup>2</sup>],  $q_{rad}$  : 正味赤外放射量[W/m<sup>2</sup>],  $q_{evp}$  : 潜熱輸送量[W/m<sup>2</sup>]である。

顕熱輸送量は大気温度  $T_a$  と舗装表面温度  $T_s$  を用いて

$$q_{cov} = h(T_a - T_s) \quad (3)$$

ここに、熱伝達係数  $h$  は舗装面1 m上の風速  $v$  を用いて次式から計算している<sup>1)</sup>。

$$h = 2.6 + 4.5v \quad (4)$$

気象庁の風速データは一般に高い位置で測定している。

そこで、高さ  $H$  の風速  $V_H$  と高さ  $H_B$  の風速  $V_{HB}$  の関係を表す近藤の変換式<sup>2)</sup>

$$V_{HB} = V_H \times \frac{\ln(H_B/Z_0)}{\ln(H/Z_0)} \quad (5)$$

を用いて、舗装面上1 mの風速  $v$  を求めている。 $Z_0$  は粗度係数であり、実験から求める必要がある。ここでは福田らによる  $Z_0 = 0.024$  を用いている<sup>1,3)</sup>。

正味全天日射量  $q_{sol}$  はアルベドを0.1として、気象データの全天日射量から求めている。正味赤外放射量  $q_{rad}$  は大気から舗装表面への赤外放射量  $L \downarrow$  と舗装表面から大気への赤外放射量  $L \uparrow$  から、算出している。

$$q_{rad} = L \downarrow - L \uparrow \quad (6a)$$

ここに、

$$L \downarrow = \sigma T_{sky}^4 = \varepsilon_{sky} \sigma T_a^4 \quad (6b)$$

$$L \uparrow = \varepsilon \sigma T_s^4 + (1 - \varepsilon) L \downarrow \quad (6c)$$

ここに、 $\varepsilon_{sky}$  : 大気の射出率,  $T_a$  : 大気温度[K],  $\varepsilon$  :

舗装表面の射出率,  $\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数

( $= 5.67 \times 10^{-8}$  [W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)]),  $T_s$  : 表面温度[K]である。

なお、大気の射出率  $\varepsilon_{sky}$  は、近藤の提案式<sup>2)</sup>を用いている。

1年間の気象観測データを用いているので、当然雨天の日もある。その場合、顕熱輸送量  $q_{evp}$  を考慮しなければならない。そのためには舗装表面からの蒸発量が必要となる。しかし、蒸発量は不明である。顕熱輸送量は舗装温度を低減する効果があり、ここでは危険側を考え顕熱輸送量を無視している。

その他、温度解析に使用した境界条件は、熱特性値が異なる互いに隣接する  $i$  層と  $i+1$  層の境界で、

$$k_i \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_i + k_{i+1} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{i+1} = 0 \quad (7)$$

となる。最下面では熱の移動が起こらない断熱境界であると仮定すると、

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

となる。

### 3. 深さ方向の温度分布・弾性係数とその重心

アスファルト混合物層の温度は一樣ではなく深さ方向に温度が変化しているため、温度と相関がある弾性係数も変化する。本来ならば舗装内部温度の推定には、舗装を細分化し、細かな温度分布と弾性係数を求めることが理想的であるが、この方法は計算量が多くなるため、平均温度を使用することが一般的である。

舗装の平均温度を温度分布から求める方法は、温度分布面積および舗装表面で温度に関するモーメントをとることで、温度分布の重心を求め、さらに温度分布面積を層厚で割ることで求まる。このようにして求めた温度を平均温度、そして舗装表面から重心までの距離を平均深さとここでは呼ぶ。

時刻  $k$  における温度分布の面積

$$S_T^k = \int_0^H T^k(z) dz \quad (9)$$

$T^k(z)$  : 時刻  $k$  における温度分布 ( $k=1, \dots, N$ )

時刻  $k$  における温度分布の表面に関するモーメント

$$M_T^k = \int_0^H z T^k(z) dz \quad (10)$$

時刻  $k$  における温度分布の重心位置

$$z_T^k = \frac{M_T^k}{S_T^k} \quad (11)$$

時刻  $k$  における平均温度 ( $H$  は層厚)

$$T_{avg}^k = \frac{S_T^k}{H} \quad (12)$$

$T_{avg}^k$  : 時刻  $k$  における深さ方向の平均温度とする.

同様に, 時刻  $k$  における弾性係数分布の面積

$$S_E^k = \int_0^H E^k(z) dz \quad (13)$$

時刻  $k$  における弾性係数分布の表面に関するモーメント

$$M_E^k = \int_0^H z E^k(z) dz \quad (14)$$

$E^k(z)$  : 時刻  $k$  における弾性係数分布 ( $k=1, \dots, N$ )

時刻  $k$  における弾性係数分布の重心位置

$$z_E^k = \frac{M_E^k}{S_E^k} \quad (15)$$

時刻  $k$  における平均弾性係数  $E_{avg}^k$  は,

$$E_{avg}^k = \frac{S_E^k}{H} \quad (16)$$

式(1)~式(8)を用いて温度解析を行った. その方法と予測精度の良さについては過去の文献で詳述している<sup>3)</sup>. 温度解析, 構造解析に用いた舗装断面と熱特性値を表-1に示す.

解析モデルとして, 三種類の3層舗装(断面1, 2, 3)をモデル化した. アスファルト混合物層の厚さは, それぞれ N3, N5, N7 交通量区分を想定した舗装断面に近いものとし, 断面1で5cm, 断面2で15cm, 断面3で25cmとした. 使用した気象データは2003年1月, 4月, 8月に東京で1時間毎に観測された外気温, 相対湿度, 全天日射量, 風速とした. データ数は各月744個(31日×24時間)であり, 総データ数は2232個である.

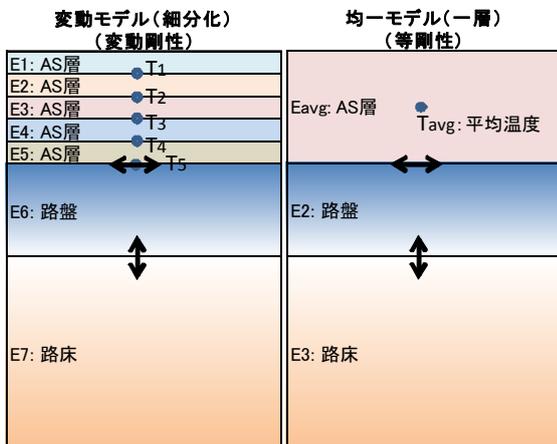


図-1 細分化モデルと均一モデル

表-1 舗装断面と熱特性値

|                         | 表層   | 路盤   | 路床   |          |
|-------------------------|------|------|------|----------|
| 層厚 (cm)                 | 断面1  | 5    | 25   | $\infty$ |
|                         | 断面2  | 15   | 45   | $\infty$ |
|                         | 断面3  | 25   | 50   | $\infty$ |
| 密度 (Kg/m <sup>3</sup> ) | 2300 | 1800 | 1600 |          |
| 比熱 (J/(kg · K))         | 900  | 1000 | 1000 |          |
| 熱伝導率 (W/(m · K))        | 2    | 1.5  | 1.6  |          |

1年間では天気は晴れ, 曇り, 雨と変化する. しかし, 雨天とその直後に舗装表面から蒸発する水分量は不明であり, ここでは潜熱輸送量を考慮していない. 気化熱の影響により舗装温度は低下するが, 舗装温度が低いことはアスファルト混合物層の剛性が高いことを意味して, 舗装にとっては安全側の評価となるため無視しても差し支えない.

### (1) 深さ方向の平均温度とその重心

各断面において, 舗装を1cm深さ毎に層を細分化(図-1左)して, 式(1)よりそれぞれの層について1時間毎の温度を計算し, 深さ方向の温度分布を求めた. 舗装内部のある時刻における温度は, 一般に非線形分布している. 8月7日14時におけるアスファルト混合物層厚25cmの温度分布を図-2に示す.

次に, 各断面の温度分布について, 式(11)を用いて1時間毎の平均温度と重心位置(平均温度深さ, 図-1右)を計算した. 各断面における1時間毎の重心位置の頻度分布を図-3(断面1, 3の1, 4, 8月)に示す. 全ての月(1, 4, 8月)において, 層厚5cmの断面1では, 2.5cmと2.55cmに分布, 層厚25cmの断面3では12.4cmから12.6cmの間に分布しており, どちらの場合も層厚のほぼ中央に温度分布の重心はある. アスファルト混合物層の厚さが5cmのとき, 1月の平均温度分布は0°C~25°Cに分布し, 最頻度は5°C, 4月では5°C~45°Cに分布し, 最頻

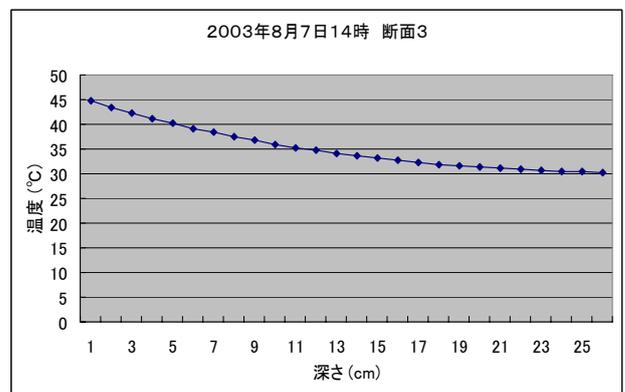


図-2 深さ方向の温度分布 (8月7日14時)

度は15°C、8月では20°C~60°Cに分布し、最頻度は30°Cとなっている。厚さが25cmのとき、1月の平均温度分布は5°C~15°C、最頻度は10°C、4月では10°C~35°C、最頻度は20°C、8月では20°C~45°C、最頻度は35°Cである。この結果よりアスファルト混合物層の厚さが薄い方が平均温度の変動幅が広がっている。

それらはアスファルト混合物層の平均的な温度とその見かけの剛性から求められたものである。しかしアスファルト混合物層の温度分布を考慮した温度と弾性係数の関係は求められていない。ここでは、丸山等が提案した温度 $T$ (°C)と弾性係数 $E$ (Mpa)の関係図<sup>4)</sup>から下記のように書き換えて用いることにした。

## (2) 温度と弾性係数の関係

アスファルト混合物層の弾性係数はその温度の関数であり、様々な温度と弾性係数の関係式が提案されている。

$$E = 7500 \times 10^{0.368 \left( \frac{20-T}{20} \right)} \quad (17)$$

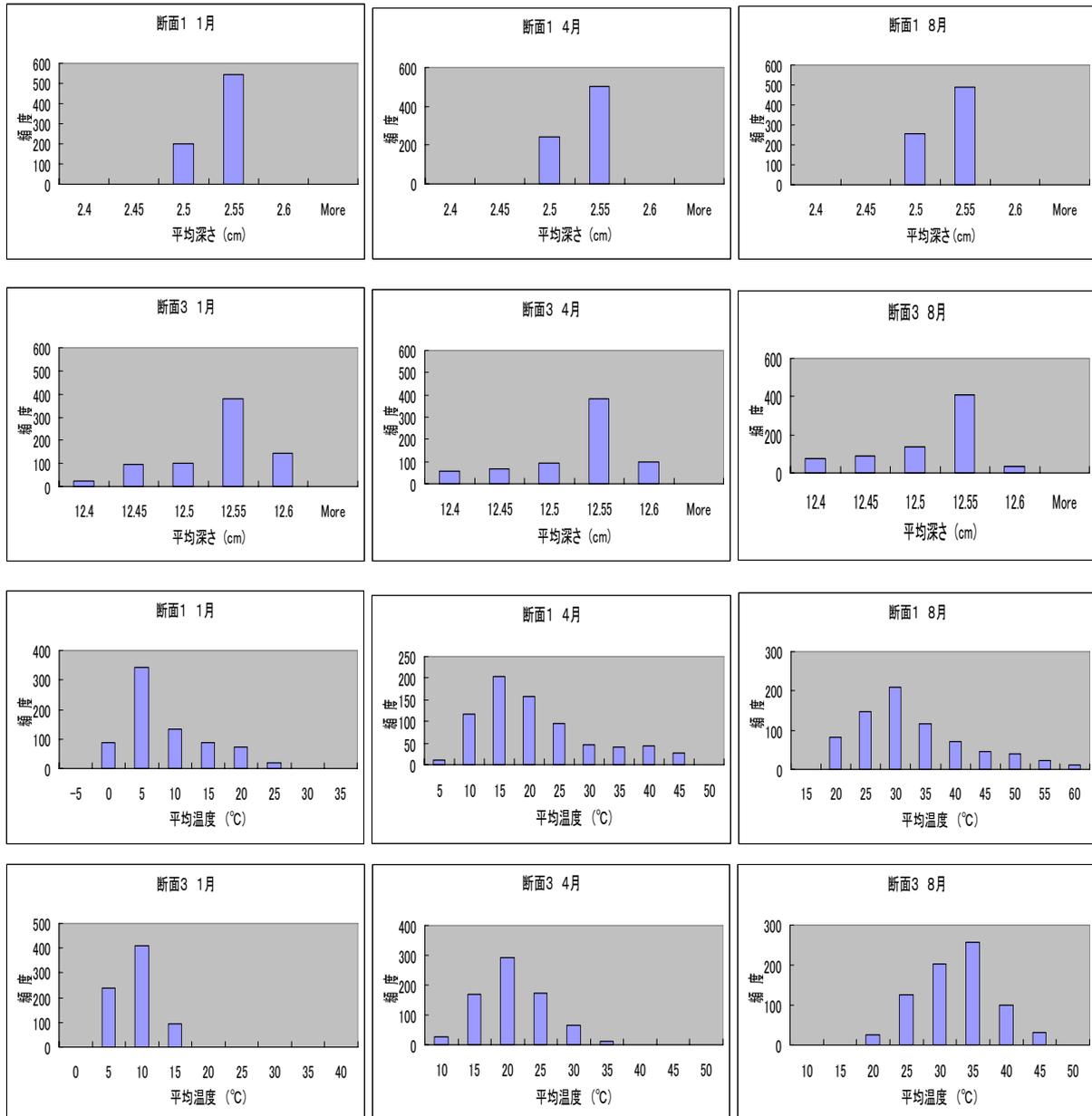


図-3 平均温度度とその重心位置

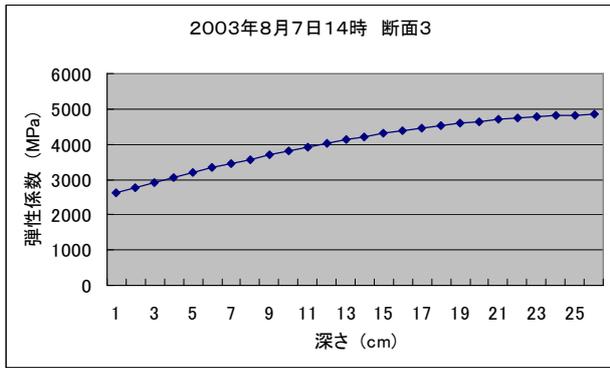


図-4 深さ方向の弾性係数分布 (8月7日14時)

### (3) 深さ方向の平均弾性係数とその重心

1年間の気象データを用いて計算した各時刻 $k$ のアスファルト混合物層の温度分布から、式(17)を用いて弾性係数に変換した。図-2の温度分布に対応する弾性係数の分布を図-4に記す。温度が舗装内部で非線形分布しているので、当然弾性係数も非線形分布する。舗装内部の温度分布は変動するが、通常アスファルト舗装の構造解析をするとき、アスファルト混合物層の弾性係数は一定で深さ方向に変動しないと仮定している。

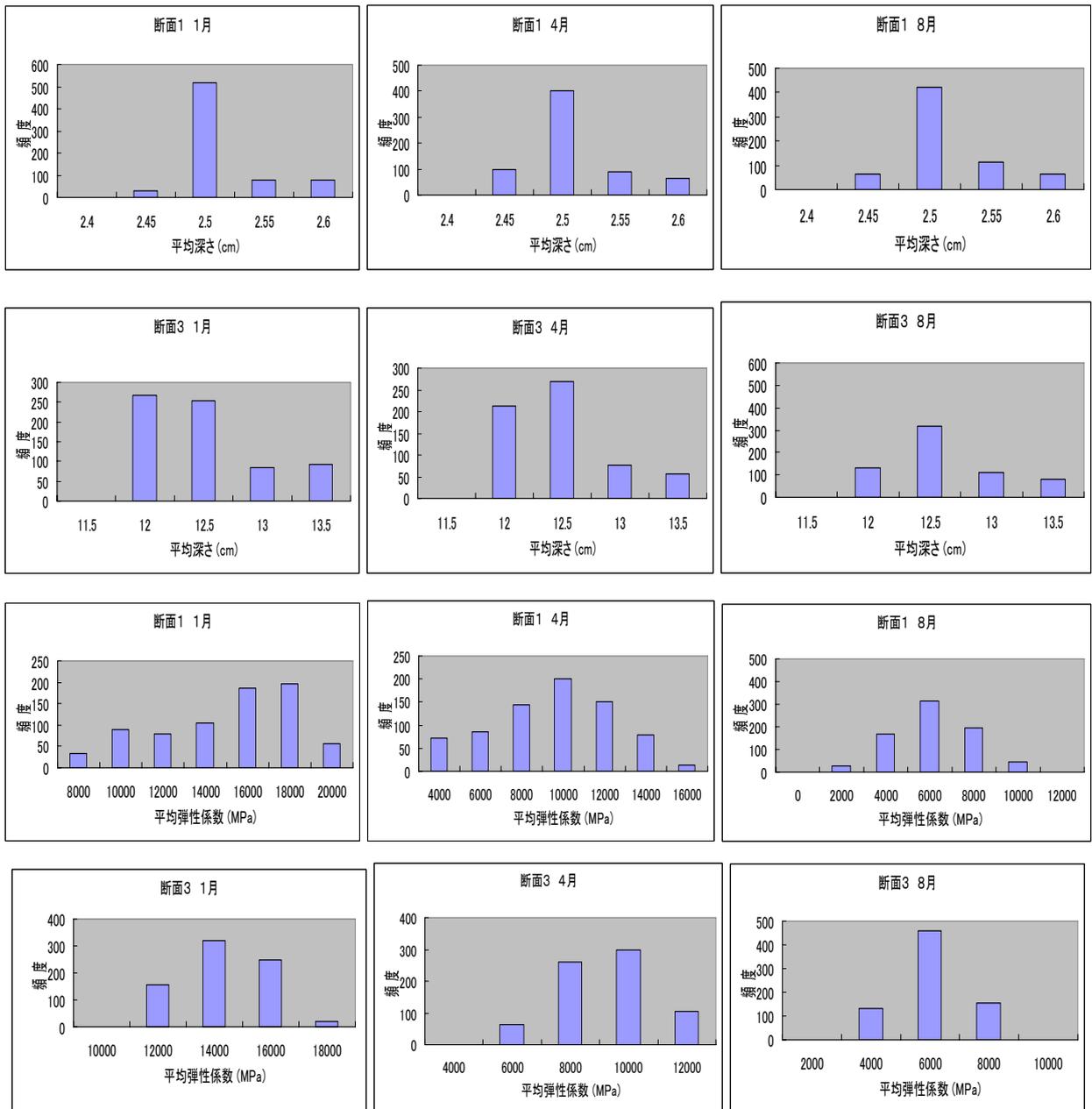


図-5 平均弾性係数とその重心位置

そこで、ここではアスファルト混合物層の平均的な弾性係数とその重心の位置の変動を求める。平均的な弾性係数を等剛性、深さ方向に変動する弾性係数を変動剛性と呼ぶことにする。式(15)および式(16)を用いて等剛性とその重心位置を計算した。図-5に1, 4, 8月の結果(断面1, 3)の頻度分布を示す。アスファルト混合物層の厚さが5cmのとき、1月、4月、8月とも剛性分布の重心は2.45cm~2.6cmの範囲で分布しており、重心は層厚のほぼ中央にあるとすることができる。層厚25cmのとき、1月、4月、8月とも12cm~13.5cmの範囲に分布している。

図より、平均温度深さと同様に、平均弾性係数の深さは舗装厚のほぼ中央にあることが分かる。断面2の結果も同様であった。

#### 4. ひずみへの影響

##### (1) 水平ひずみと鉛直ひずみ

舗装の理論的設計<sup>3)</sup>では、アスファルト混合物層下面の水平ひずみと路床上面の鉛直ひずみを用いて、暫定破壊基準式から49kN輪数を求める必要がある。そのため、これらのひずみは設計において重要な意味を持つ。ひずみを計算するためには弾性係数が必要であるため、適切な弾性係数を設定することが重要である。前章で求めた各時刻における等剛性と変動剛性でアスファルト混合物層下面と路床上面のひずみを計算した。等剛性のひずみから変動剛性のひずみを引いたひずみ差を計算し、その値を等剛性のひずみで割り、ひずみ差の変動率を計算した。変動剛性のひずみについては、各層の温度から弾性係数を式(17)より各層ごとのひずみを求めた。

解析にはGAMESを用いた。

図-6にアスファルト混合物層の厚さが5cm(断面1)と25cm(断面3)の場合について1月、4月、8月のひずみ差の変動率の分布を記す。横軸の値が負のひずみは変動剛性のひずみの方が大きいことを意味している。

これらの結果より、温度分布を考慮して求めたひずみ(変動剛性)と、平均温度に対応する弾性係数から求まるひずみ(等剛性)の差は、層厚25cmの方が層厚5cmより大きく変動している。

##### (2) 暫定破壊基準式に基づいた輪数

図-7に、等剛性および変動剛性のひずみを用いて、アスファルト混合物層の暫定破壊基準式から求めた49kN輪数を図示した。変動剛性の場合では、暫定基準式には細分割したアスファルト混合物層の最下層の弾性係数を用いて、49kN輪数を計算した。変動剛性で求めた輪数を基準として、等剛性の輪数と等しいときは実線で、±20%の輪数を1点鎖線で同図に記した。同図よりアスファルト混合物層の厚さが5cmのとき、等剛性と変動剛性で算出した輪数の間の差は小さいことが分かる。層厚が25cmのとき、等剛性と変動剛性から求めた輪数には差が見られるが、ばらつきがほぼ±20%の範囲内におさまることが確認された。

図-8は、アスファルト混合物層の厚さが5cmと25cmの場合について、路床の暫定破壊基準式から求めた49kN輪数を図示した。等剛性と変動剛性から求めた輪数の差は非常に小さい。同図にも変動剛性と等剛性の輪数が等しいときを実線で、変動剛性の輪数を基準として±20%の範囲を1点鎖線で記した。図-7と同様に、±20%におさまる結果となった。

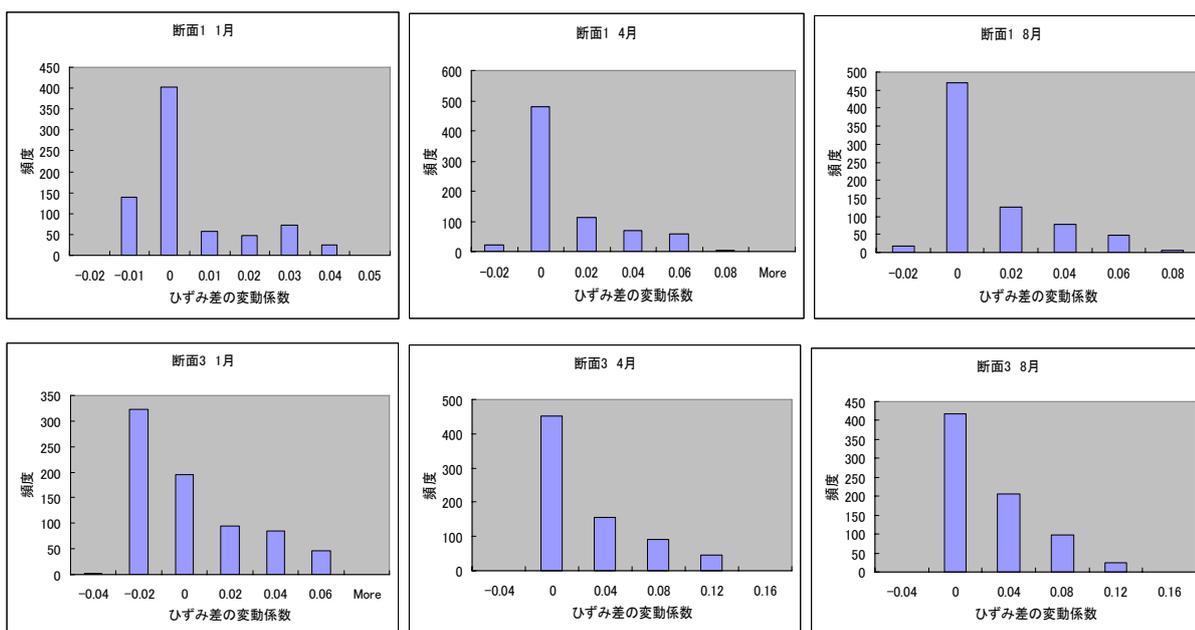


図-6 アスファルト混合物層下面の水平ひずみ差の変動率

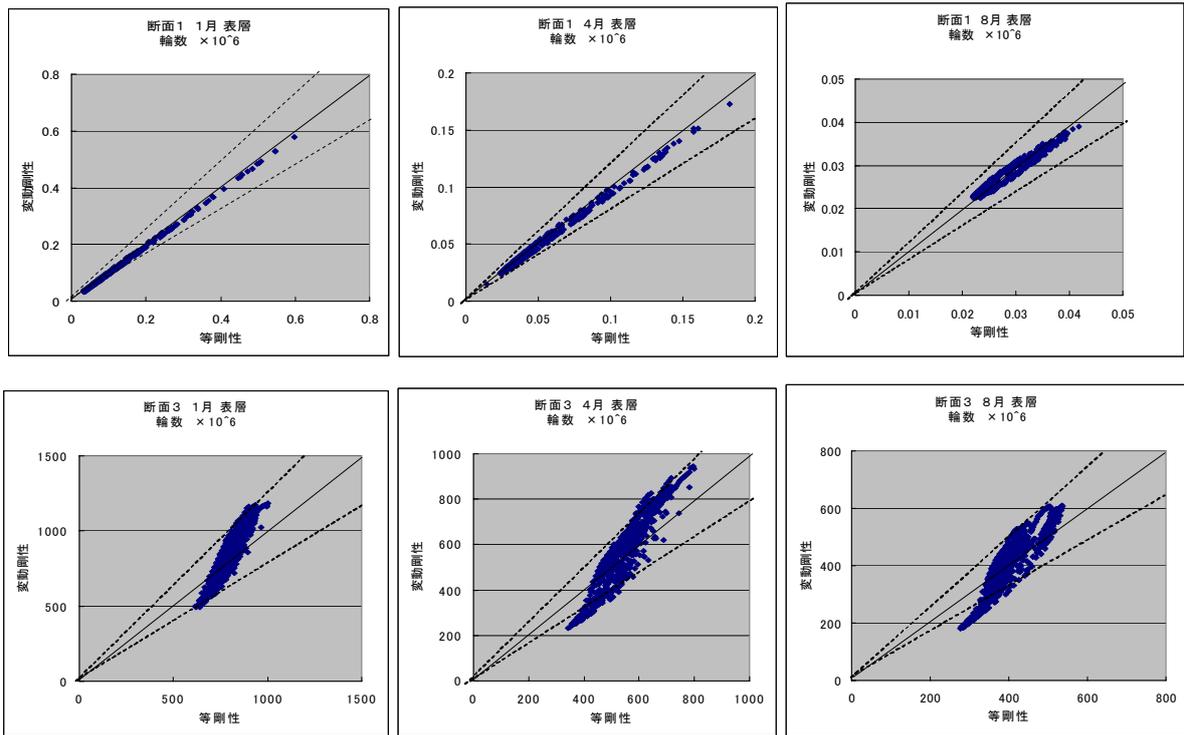


図-7 等剛性と変動剛性の49kN輪数(アスファルト混合物層)

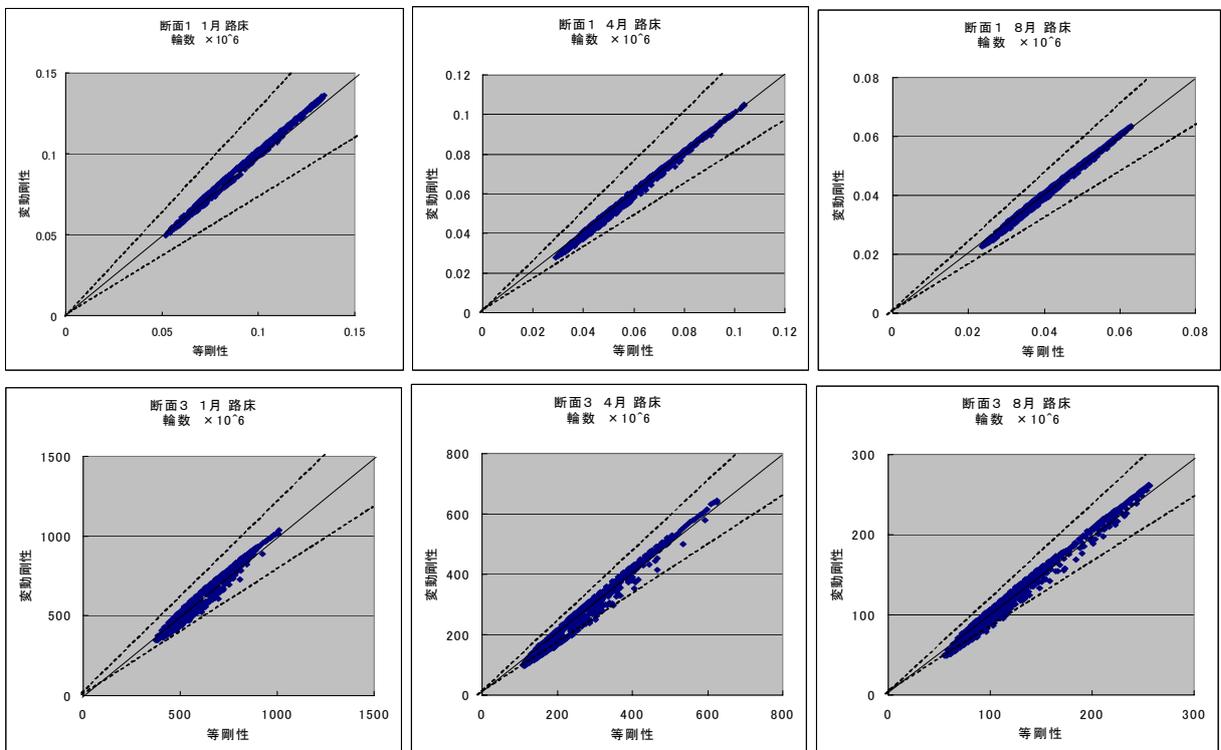


図-8 等剛性と変動剛性の49kN輪数(路床)

## 5. まとめ

本研究では東京気象台で観測した1年間の気温データを用いて、数値シミュレーションより舗装内部の非線形温度分布を求めた。この温度分布の平均的な舗装温度に対応するアスファルト混合物の剛性を有する舗装モデルと、アスファルト混合物層を細分割し、その温度分布に対応する剛性からなる舗装モデルを構築した。両者モデルでひずみと疲労破壊輪数を求めた結果を要約すると、以下ようになる。

- 1) 舗装の非線形温度分布の重心は、アスファルト混合物層の厚さに関わらず、そのほぼ中央である。
- 2) 舗装の非線形弾性係数分布もアスファルト混合物層の厚さに関わらず、そのほぼ中央である。
- 3) アスファルト混合物層下面の変動剛性と等剛性のひずみ差の変動率は、その層厚が厚い方が薄い方より大きい。
- 4) 49kN 輪数に関しては、アスファルト混合物層の厚

さが薄いとき、変動剛性と等剛性の差は小さいが、厚いとき差は大きくなるが、±20%の範囲にあることが確認できた。

## 参考文献

- 1) 近藤純正：地表面に近い大気の科学—理解と応用—，東京大学出版会，2000.9.
- 2) 福田裕子，江川和寿，松井邦人：舗装温度予測システム開発のための顕熱モデルの開発，土木学会舗装工学論文集，第14巻，2009.12.
- 3) 福田裕子，吉中保，松井邦人：数値シミュレーションに基づく密粒度及び遮熱性(灰)舗装の表面温度予測システムの構築，舗装，Vol.43 No.4，pp3～8，2008.
- 4) 丸山暉彦，阿部長門，雑賀義夫，姫野賢治：FWDによる舗装の構造評価および補修設計システムの開発，土木学会論文集，No.484/V-22，pp.61-68，1994.2.
- 5) (社)日本道路協会：舗装設計便覧，丸善株式会社，2006.2.

## DESIGN STRAIN CONSIDERING TEMPERATURE DISTRIBUTION ON ASPHALT MIXTURE LAYER

Taizo NISHIYAMA, Shinobu OMOTO, Soki KI, Kunihito MATSUI

It is known weather change affects the loading capacity of asphalt pavement especially the stiffness of pavement which is significantly sensitive to temperature. This study conducted numerical simulation to estimate the nonlinear temperature distribution of inner pavement layer using the one year measured weather data. Layer stiffness corresponding to the mean temperature of temperature distribution and the finely subdivided temperature of temperature distribution were calculated. Furthermore, strains and number of wheel passing causing failure were calculated and compared.