

# アスファルト舗装の多層弾性理論を用いたパフォーマンスカーブのシミュレーション

水野直樹<sup>1</sup>・木村 鉄<sup>2</sup>・松島 学<sup>3</sup>・松井邦人<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 M.S. 日本舗道(株) 中国支店 試験所 (〒735 広島県安芸郡府中町柳ヶ丘1-45)

<sup>2</sup>日本舗道(株) 中国支店 試験所 所長

<sup>3</sup>正会員 工博 東電設計(株) 技術開発本部 耐震技術部 課長 (〒110 東京都台東区上野3-3-3)

<sup>4</sup>正会員 Ph.D. 東京電機大学 理工学部 建設工学科 教授 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

舗装管理システムにおいて、ライフサイクルコスト解析の観点からパフォーマンスカーブの予測は重要である。しかしながら、パフォーマンスカーブの予測は舗装断面、交通環境など多くの因子により支配されるものであるが、累積大型車交通量や供用年数などの代表的な因子のみで単純化し予測している例が少なくない。

本報告は、通行車両1回ごとの気象条件や荷重条件をシミュレートし多層弾性理論を用いてアスファルト舗装の時系列的な構造劣化を推定し、かつその構造劣化の程度からひびわれ率、わだち掘れ量の路面性状とMCIのパフォーマンスカーブの予測を行ったものである。

**Key Words:** performance curve, multi-layers elastic theory, Miner's rule, deterioration, simulation analysis, MCI, PMS

## 1. はじめに

我が国のアスファルト舗装の設計断面は、路床の支持力と設計期間の累積大型車交通量に対して、各層における材料の強度特性を加熱アスファルト混合物の厚さに換算する等値換算厚  $T_A$ 法により決定されている<sup>1)</sup>。近年、粗骨材の最大粒径を大きくした大粒径アスファルト混合物<sup>2)</sup>(最大粒径が30~50 mm)などの新規アスファルト混合物や、建設発生材やリサイクルと呼ばれるゴムやガラスなどを混入した混合物<sup>3)</sup>が路盤層のみならず表層の混合物として使用する傾向が大きい。しかしながら、これらの混合物は、 $T_A$ 法では加熱アスファルト混合物の厚さに換算する等値換算係数を設定する必要がある。通常、各層で規定された強度基準に準じて決定されるが、設定された等値換算係数の妥当性や整合性を評価するには、少なくとも3年程度の追跡調査などを行う必要がある。したがって、この $T_A$ 法は経験に大きく依存した設計手法の一つであると言える。

既設舗装に関しても、高度成長期に舗設された多くの舗装は、供用30年を経て維持補修の時代を迎えている。これらの問題に鑑み、平成4年度に改訂されたアスファルト舗装要綱では、中長期的なライフサイクルコストの観点から、維持補修の立案を行

うことが望ましいと明記されている<sup>4)</sup>。維持補修の管理基準は、供用性を客観的に評価する手法としてPSIやMCIが用いられている。しかしながら、これらの管理基準はひびわれ、わだち掘れ、および縦断凹凸量の表層における路面性状の機能から評価した基準値である。したがって、構造的な供用性能の評価(構造劣化)とは異なるものである。維持補修を合理的かつ効率的に行うためにPMSと呼ばれる舗装管理システムがある。PMSに基づき供用年数の増加による時系列的な供用性能の劣化(以下:パフォーマンスカーブと称する)を予測することはシステムの信頼性向上のため重要である<sup>5)~6)</sup>。このパフォーマンスカーブは、舗装断面、材料性状、および、交通環境など多くの因子により支配される。しかしながら、累積大型車交通量や供用年数などの代表的な因子のみで単純化し、パフォーマンスカーブの予測を行っている例が少なくない<sup>5)</sup>。したがって、パフォーマンスカーブをより正確に予測するには、路面性状の機能評価だけでなく構造劣化も考慮して予測を行うことが重要と考えられる。

一方、諸外国における設計手法は、多層弾性理論などを用いた理論的な設計手法により設計を行っている機関が少なくない<sup>7)</sup>。多層弾性理論を用いた設計法に関しては改訂版のアスファルト舗装要綱の付

録に付記されたことも相まって理論的設計手法の必要性が高まりつつある。たとえば、米国アスファルト協会 (AI) はアスファルト混合物層下面の引張りひずみからアスファルト混合物の疲労クラックに対する基準式と路床上面の圧縮ひずみから全層圧縮による変形（わだち掘れ）に対する基準式を示しており、理論的設計手法に基づいた舗装寿命を予測するシステムを開発している<sup>9)</sup>。さらに、1985年には American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) により発刊した *Design Guide of Pavement Structures* は、構造的な評価を考慮したオーバーレイの設計手法が示されている<sup>9)</sup>。

我が国においては、阿部ら<sup>10)</sup>が FWD の構造診断により推定される弾性係数と上記の AI が提案する破壊基準式による残存寿命の推定を 8 年間にわたる追跡調査から有効性を確認している。

しかしながら、一般にアスファルト混合物の弾性係数は、気象条件（温度）により異なった物理特性を示すため、多層弾性理論などで解析を行う場合は、温度条件ごとにアスファルト混合物の弾性係数を設定する必要がある。したがって、実際のアスファルト舗装が「どのようなパフォーマンスカーブを示すか」を予測を行うことは難しい。

本報告は上記の問題に鑑み、通行車両 1 回ごとの気象条件や荷重条件などをシミュレートし多層弾性理論と AI が示した基準式などからアスファルト舗装の時系列的な構造劣化を推定し、かつその構造劣化の程度からひびわれ率、わだち掘れ量の路面性状と MCI のパフォーマンスカーブを推定するものである。

## 2. シミュレーションのモデル化

理論的設計手法の多くは、舗装構造を多層弾性と仮定し Burmister の解法により設計などに利用している<sup>11)</sup>。理論的設計手法の手順は図-1 に示すとおりであり、路床の支持力、材料特性、環境条件、交通荷重、および設計期間などを設ける必要がある<sup>11)</sup>。図-1 で示した理論的設計手法の手順を基に本シミュレーションの手順は、図-2 に示すとおりである。

### (1) 交通条件

#### a) アスファルト舗装断面

設定したアスファルト舗装断面は図-3 に示すとおりである。等値換算厚  $T_A$  は 24.0 となり設計 CBR が 4 の時は、B 交通に属する交通区分となる。なお、累積 5t 換算輪数  $N$  と設計 CBR は、式 (1) に示

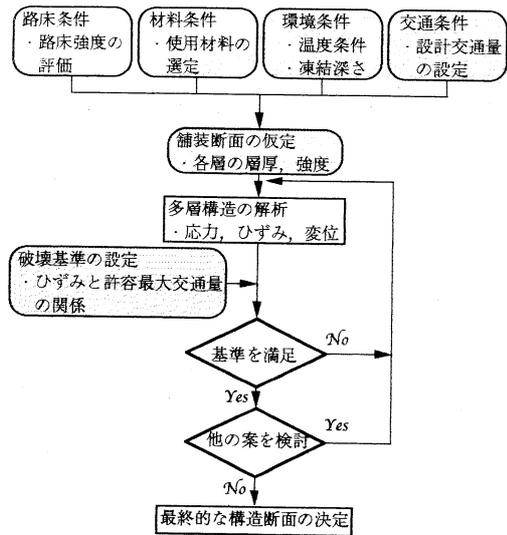


図-1 理論的設計法の手順

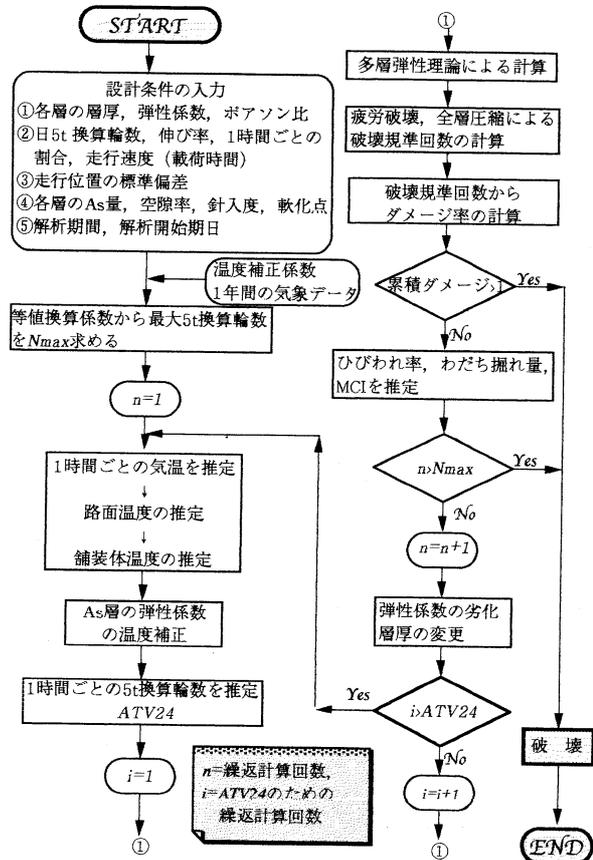


図-2 本シミュレーションの流れ

す関係式がある<sup>11)</sup>。

$$T_A = \frac{3.84N^{0.16}}{CBR^{0.3}} \quad (1)$$

式 (1) から累積 5t 換算輪数  $N$  を CBR と  $T_A$  から逆算すると式 (2) のようになる。

$$N = \left[ \frac{T_A \times CBR^{0.3}}{3.84} \right]^{1/0.16} \quad (2)$$

ここで、 $CBR=4$ 、 $T_A=24.0$  を代入すると累積 5t 換算輪数  $N$  は、約 127 万となる。この 127 万を許

|  |
|--|
| 表層：加熱As混合物(h <sub>1</sub> :5cm, a <sub>1</sub> :1.0)           |
| 基層：加熱As混合物(h <sub>2</sub> :5cm, a <sub>2</sub> :1.0)           |
| 上層路盤その1<br>加熱As安定処理(h <sub>3</sub> :10cm, a <sub>3</sub> :0.8) |
| 上層路盤その2<br>粒度調整碎石(h <sub>4</sub> :10cm, a <sub>4</sub> :0.35)  |
| 下層路盤<br>クラッシャーラン(h <sub>5</sub> :10cm, a <sub>5</sub> :0.25)   |
| 路床：設計CBR=4   |

図-3 設定したアスファルト舗装断面

表-1 各層の弾性係数とポアソン比

|      | 弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> ) | ポアソン比 |
|------|-----------------------------|-------|
| 表層   | 60000 *                     | 0.35  |
| 基層   | 50000 *                     | 0.35  |
| As処理 | 38000 *                     | 0.38  |
| 粒調   | 3000                        | 0.40  |
| C R  | 1300                        | 0.40  |
| 路床   | 400                         | 0.45  |

\* 混合物の温度が 21℃ (70F) の弾性係数

容累積 5t 換算輪数  $N_{m \cdot x}$  とする。

#### b) 荷重条件

荷重条件は半径 15cm で 5t の载荷とした。ただし、走行位置に関しては 20 ~ 25cm の幅をもつ正規分布かほぼ正規分布に近い対数正規分布であることが報告されている<sup>12)</sup> ため、走行位置は (平均が 0, 標準偏差として 22.5cm) の正規分布と仮定し、コンピュータ上で疑似乱数を発生させ 1 回ごとの 5t の走行位置を設定した。

#### c) 交通量

1 時間ごとの 5t 換算輪数  $ATV_{24}$  は 1 日の 5t 換算輪数  $ATV$  と 1 時間ごとの 5t 換算輪数の割合  $ATV_{hr}(t\%)$  から式 (3) を用いて設定した。

$$ATV_{24} = ATV \times ATV_{hr}(t)/100 \quad (3)$$

ここに、

$ATV_{hr}(t)$ : 時刻  $t$  時の 5t 換算輪数の割合 (%)

#### d) 各層の弾性係数とポアソン比の設定

図-3に示した舗装断面に対して設定した各層の弾性係数とポアソン比は表-1示すとおりである。

#### e) アスファルト混合物層、およびアスファルト安定処理層の温度に伴う補正

アスファルト混合物層、およびアスファルト安定処理層は温度により弾性係数が異なる。弾性係数の温度補正は、AASHTOの *Design of Pavement Structures* の Appendix L の図 L.2を基に決定した<sup>13)</sup>。

また外気温と舗装内温度の推定に関しても、AASHTOの 5 日間の平均気温と路面温度から推定する

上記文献の Appendix L の図 L.1を基に決定した<sup>13)</sup>。

なお、路面温度の推定においては、解析時の気温から推定する式 (4) に示す推定式を用いた<sup>14)</sup>。

$$TempSr = 1.1Temp24 + 1.5 + 0.17exp(0.126Temp24) \quad (4)$$

ここに、 $TempSr$ : 舗装表面温度 (°C) ,

$Temp24$ : 日最低・平均・最高から推定される 1 時間ごとの気温,

$$Temp24 = ((Temp(2) - Temp(1))/2) \sin(2\pi(24-t)/24) + Temp(3)$$

$Temp(1)$ : 日最低気温 (°C) ,

$Temp(2)$ : 日最高気温 (°C) ,

$Temp(3)$ : 日平均気温 (°C) ,

$t$ : 時刻 (0 ~ 23: 整数)

なお、路面温度の推定において、姫野<sup>15)</sup>らにより気温の他に日射量に依存すると指摘されているが、本シミュレーションでは対象外とした。

#### (2) 多層弾性理論による計算

本シミュレーションでの多層弾性理論で解析を行うために必要な入力データと解析により得られる出力データは下記に示すとおりである。

##### ① 入力データ

- ・層数
- ・各層の弾性係数 (温度補正有)
- ・各層の層厚・ポアソン比
- ・荷重条件 (荷重, 半径, 走行位置)

##### ② 出力データ

- ・表層表面のたわみ量, 垂直応力
- ・基層表面のたわみ量, 垂直応力
- ・As安定処理層表面のたわみ量, 垂直応力
- ・表層下面の引張ひずみ
- ・基層下面の引張ひずみ
- ・As安定処理層下面の引張ひずみ
- ・路床上面の圧縮ひずみ

#### (3) 構造劣化のモデル化

##### a) 破壊規準

アスファルト舗装の疲労破壊に関する研究は、数多くの研究者によりさまざまなものが発表されている。本シミュレーションに用いた破壊基準は、アスファルト舗装要綱に AI の提案するアスファルト混合物層、およびアスファルト安定処理層の疲労クラックに対する規準式と全層圧縮に変形 (わだち掘れ) に対する規準式が明記されていることから、AI が主に室内実験により提案した破壊基準式を用いた。AI の提案する破壊基準式は式 (5) ~ (7) に示すとおり

りである<sup>9)</sup>。

①疲労クラックに対する基準式

$$Nf_A = \frac{8.108 \times 10^{M-3}}{\epsilon_s^{3.218} \times E_A^{0.854}} \quad (5)$$

ここに

$Nf_A$ : アスファルト混合物層, およびアスファルト安定処理層の疲労クラックによる破壊回数 (ひびわれ率 20% 程度)

$\epsilon_s$ : アスファルト混合物層, およびアスファルト安定処理層下面の引張ひずみ ( $kgf/cm^2$ )

$E_A$ : アスファルト混合物層, およびアスファルト安定処理層の弾性係数 ( $kgf/cm^2$ )

$M$ : アスファルト混合物層, アスファルト安定処理層の空隙率 (Void%) と As 量 (As%) の関数

$$M = 4.84 \left[ \frac{As}{As + Void} \right] - 0.69 \quad (6)$$

②全層圧縮に対する基準式

$$Nfs = \frac{1.365 \times 10^{-9}}{\epsilon_s^{4.477}} \quad (7)$$

$Nfs$ : 路床の全層圧縮による破壊回数 (わだち掘れ量 13 mm 程度)

$\epsilon_s$ : 路床上面の圧縮ひずみ ( $kgf/cm^2$ )

b) 劣化の定量化

実際の応力やひずみの状態が疲労寿命にどのように寄与するかを評価する一つの手法として Miner 法がある。Palgren は「累積損傷が 1 に達したときに対象物は破壊する」という仮説をたて、Miner は、「累積損傷は線形に累積する」としている。ここで、通行車輛 1 回における劣化は a) の破壊基準で得られたアスファルト混合物層の破壊回数  $Nf_A$  と路床の破壊回数  $Nfs$  を基に下記に示す式により得られる<sup>16)</sup>。

$$Damage1 = 1/(Nf_{A1} + n-1) \quad (8)$$

$$Damage2 = 1/(Nf_{A2} + n-1) \quad (9)$$

$$Damage3 = 1/(Nf_{A3} + n-1) \quad (10)$$

$$Damage4 = 1/(Nfs + n-1) \quad (11)$$

ここに,

$Nf_{A1}$ : 表層の疲労クラックによる破壊回数,

$Nf_{A2}$ : 基層の疲労クラックによる破壊回数,

$Nf_{A3}$ : As 処理層の疲労クラックによる破壊回数,

$Damage1$ : 表層の疲労劣化,

$Damage2$ : 基層の疲労劣化,

$Damage3$ : As 処理層の疲労劣化,

$Damage4$ : 路床の全層圧縮による劣化,

$n$ : 繰り返し計算回数

c) ひびわれ率とわだち掘れ量の推定

ひびわれ率においては, アスファルト混合物層下

面の引張ひずみから得られる破壊回数の規準式が, ひびわれ率 20% 程度<sup>10)</sup> と想定していることから, ひびわれ率は最大累積ダメージに直接的に関係すると仮定し, 式 (12) に示す推定式を設定した。

$$Crack = 20 \times \{Max.(Damage5, Damage6, Damage7)\} \quad (12)$$

ここに,  $Crack$ : ひびわれ率 (%),

$Damage5$ :  $Damage1$  の累積ダメージ,

$Damage6$ :  $Damage2$  の累積ダメージ,

$Damage7$ :  $Damage3$  の累積ダメージ

全層圧縮による変形で生じるわだち掘れ量は, 路床上面の圧縮ひずみから得られる破壊回数の規準式がわだち掘れ 13 mm 程度<sup>10)</sup> と想定していることから, 変形わだち掘れ量は, 直接的に関係すると仮定し, 式 (13) に示す推定式を設定した。

$$Rutz = 13 \times Damage8 \quad (13)$$

ここに,

$Rutz$ : 全層圧縮により生じるわだち掘れ量 (mm)

$Damage8$ :  $Damage4$  の累積

一方, 流動によるわだち掘れ量は, アスファルト混合物の残留変形であると仮説をたて各層表面のたわみ量, 垂直方向の応力および, 弾性係数から式 (14) のように設定した<sup>11) 17)</sup>。

$$\Delta Rut = C \frac{\sigma_{zz} (\Delta d_i^2 / \Delta d_1)}{E_i} \quad (14)$$

ここに,

$\Delta Rut$ : 1 回の走行により生じる流動わだち掘れ (mm),

$C$ : 残留ひずみの係数 (1.0 ~ 2.0),

$\sigma_{zz}$ : 各層表面の垂直応力 ( $kgf/cm^2$ ),

$\Delta d_i$ :  $i$  層表面のたわみ量 (cm),

$\Delta d_1$ : 表層表面のたわみ量 (cm),

$E_i$ :  $i$  層目の弾性係数 ( $kgf/cm^2$ )

さらに, 流動によるわだち掘れ量は, 走行時間 (一輪通過時間) に依存することが指摘されている。井上ら<sup>18)</sup> が行った 2 層モデルのホイールトラッキング試験による室内試験によれば, わだち掘れ量とアスファルト混合物層下面の累積塑性ひずみとの関係は使用バインダの軟化点の正負で区分することにより, ほぼ直線的な関係が得られているとしている。本シミュレーションにおいては, アスファルト舗装内温度が使用バインダの軟化点より大きい場合は載荷時間に対する補正式として式 (15) を設定した。

$$\Delta Rut = \Delta Rut \times (1 + \log(Time/0.02)) \quad (15)$$

ここに,  $Time$ : 一輪通過時間 (秒)

なお, 式 (15) 中の 0.02 は Shell が一輪通過時間として一般に設定している値である<sup>11)</sup>。式 (14), および式 (15) は表層アスファルト混合物層のわだち

掘れ量であり、基層、およびアスファルト安定処理層も同様に計算を行う。表層上面のわだち掘れ量  $RutSm$  は、式 (16) に示すように圧縮変形によるわだち掘れ量と流動によるわだち掘れ量の総和とする。

$$RutSm = Rutz + RutSrSm + RutBiSm + RutABSm \quad (16)$$

ここに、

$RutSrSm$  表層アスファルト混合物層の流動による

わだち掘れ量の累積 (mm),

$RutBiSm$  基層アスファルト混合物層の流動による

わだち掘れ量の累積 (mm),

$RutABSm$  アスファルト安定処理層の流動による

わだち掘れ量の累積 (mm),

なお、摩耗によるわだち掘れも考えられるが、本シミュレーションでは対象外とした。

#### d) 各層における層厚の変更

わだち掘れにより圧縮されたり、流動化したことによる各層厚の変更を行う。圧縮によるわだち掘れ量に関しては、式 (17) に示すように各層の層厚の割合に応じて各層における層厚の変更を行う。

$$ThRut_i = Rutz \times Th_i / Hall \quad (17)$$

ここに、  $ThRut_i$  :  $i$  層番目の層の圧縮厚 (cm),

$Th_i$  :  $i$  層目の層厚 (路床含まず) (cm),

$Hall$  舗装の全厚 (cm)

流動によるわだち掘れ量に関しては、アスファルト混合物層、およびアスファルト安定処理層において、式 (18) ~ (20) に示すように流動したわだち掘れ量を引いた値を各層における層厚とする。

$$Th_1 = ThInt_1 - RutSrSm/10 \quad (18)$$

$$Th_2 = ThInt_2 - RutBiSm/10 \quad (19)$$

$$Th_3 = ThInt_3 - RutABSm/10 \quad (20)$$

ここに、  $ThInt_i$  :  $i$  層番目の層の初期値 (cm)

したがって、圧縮と流動によるわだち掘れ量は、式 (18) ~ (20) に式 (17) を代入して得られる。

#### ① 表層アスファルト混合物層

$$Th_1 = ThInt_1 - RutSrSm/10 - ThRut_1 \quad (21)$$

#### ② 基層アスファルト混合物層

$$Th_2 = ThInt_2 - RutBiSm/10 - ThRut_2 \quad (22)$$

#### ③ アスファルト安定処理層

$$Th_3 = ThInt_3 - RutABSm/10 - ThRut_3 \quad (23)$$

#### ④ 路盤層

$$Th_i = ThInt_i - ThRut_i / 10 \quad (24)$$

#### e) 弾性係数の劣化による補正

Miner 法により求めた劣化の累積を用いて、各層の弾性係数の劣化による補正を行う。アスファルト混合物層、およびアスファルト安定処理層の疲労破壊の累積ダメージを基に、式 (25) ~ (27) に示す疲

労破壊にに対する補正式を設定した。

$$Ef_1 = (1.0 - 10.0^{-ln(Damage^5)}) E_1 Int \quad (25)$$

$$Ef_2 = (1.0 - 10.0^{-ln(Damage^6)}) E_2 Int \quad (26)$$

$$Ef_3 = (1.0 - 10.0^{-ln(Damage^7)}) E_3 Int \quad (27)$$

ここに、

$Ef_1$  : 表層アスファルト混合物の疲労破壊により決定される弾性係数,

$Ef_2$  : 基層アスファルト混合物の疲労破壊により決定される弾性係数,

$Ef_3$  : アスファルト安定処理層の疲労破壊により決定される弾性係数,

$E_1 Int$  表層アスファルト混合物層の初期弾性係数,

$E_2 Int$  基層アスファルト混合物層の初期弾性係数,

$E_3 Int$  アスファルト安定処理層の初期弾性係数,

$Damage5$ 、 $Damage1$  の累積,

$Damage6$ 、 $Damage2$  の累積,

$Damage7$ 、 $Damage3$  の累積

また、全層圧縮による変形においても同様に式 (28)、(29) に示す補正式を設定した。

#### ① アスファルト混合物層、アスファルト安定処理層

$$E_{rut_i} = (1.0 - 10.0^{-ln(Damage^4 \cdot Th_i / Hall)}) E_i \quad (28)$$

for  $i=1,2,3$

ここに、

$E_{rut_i}$  : 全層圧縮により決定される弾性係数

#### ② 路盤層

$$E_i = (1.0 - 10.0^{-ln(Damage^8 \cdot Th_i / Hall)}) E_i Int \quad (29)$$

路盤層においては、式 (29) により劣化にともなう弾性係数の設定を行うものとした。一方、アスファルト混合物層、およびアスファルト安定処理層においては、疲労破壊に伴う劣化と全層圧縮にともなう劣化を考慮しているため、本シミュレーションでは、安全側に考えて劣化の大きい方を新たな弾性係数と設定した。

一般にアスファルト混合物は、供用を経るにつれ針入度が小さくなり、かつ軟化点が大きくなることにより弾性係数が大きくなると考えられる。しかながら、バインダの性状試験の一つである伸度試験から考えると伸度は供用を経るにつれ小さくなる。これは、バインダの老化によりバインダの凝集力や耐ひびわれ性を低減する。したがって、老化の激しい再生材を混入したアスファルト混合物は、通常のアスファルト混合物に比べてひびわれが生じやすいことから、安全側に考え上記のように弾性係数を軽減させた。

しかしながら、流動によるわだち掘れ量の推定では、バインダの老化 (軟化点) を式 (30) に示す推

表-2 1時間ごとの5t換算輪数の割合と一輪通過時間

| 時刻 | 割合 | 一輪通過時間 | 時刻 | 割合 | 一輪通過時間 |
|----|----|--------|----|----|--------|
| 0  | 3  | 0.020  | 12 | 8  | 0.025  |
| 1  | 2  | 0.020  | 13 | 9  | 0.026  |
| 2  | 1  | 0.020  | 14 | 8  | 0.027  |
| 3  | 1  | 0.020  | 15 | 7  | 0.026  |
| 4  | 1  | 0.020  | 16 | 6  | 0.025  |
| 5  | 2  | 0.020  | 17 | 6  | 0.024  |
| 6  | 2  | 0.020  | 18 | 5  | 0.023  |
| 7  | 2  | 0.021  | 19 | 4  | 0.022  |
| 8  | 3  | 0.022  | 20 | 4  | 0.021  |
| 9  | 4  | 0.023  | 21 | 4  | 0.020  |
| 10 | 5  | 0.023  | 22 | 3  | 0.020  |
| 11 | 7  | 0.024  | 23 | 3  | 0.020  |

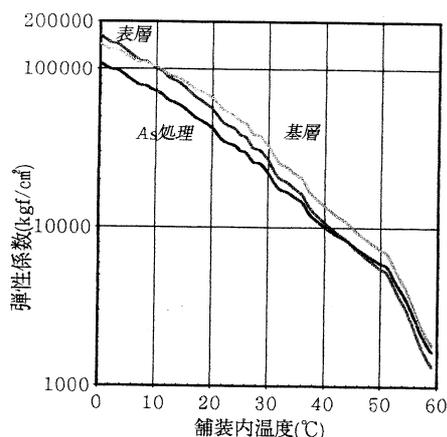


図-4 アスファルト混合物層, アスファルト安定処理層の弾性係数の温度変化

表-3 アスファルト混合物層, およびアスファルト安定処理層のアスファルト量, 空隙率, 針入度, 軟化点

| 層種          | As量(%) | 空隙率(%) | 針入度(1/10mm) | 軟化点(°C) |
|-------------|--------|--------|-------------|---------|
| 表層(密粒13)    | 5.7    | 4.0    | 68          | 48.5    |
| 基層(粗粒20)    | 5.0    | 4.5    |             |         |
| アスファルト安定処理層 | 4.3    | 6.5    |             |         |

定式<sup>17)</sup>を引用し, 式(15)の一輪通過時間におけるわだち掘れ量の増加の推定に用いた。

$$Soft(NM) = 64.4448 + (1.5775 \sqrt{NM}) - (0.2531Penn) - (0.5518Void) \quad (30)$$

ここに,  $Soft(NM)$ :  $NM$ ヶ月経過した軟化点(°C),  
 $NM$  累積月数,  
 $Penn$  初期針入度(1/10mm)

### (3) 供用性評価

供用性の評価は, ひびわれとわだち掘れ量から得られる式(31)に示す  $MCI$ 式を利用した。

$$\left. \begin{aligned} MCI &= \text{Min}(MCI_0, MCI_1, MCI_2) \\ MCI_0 &= 10 - 1.51Crack^{0.3} - 0.3RutSum^{0.7} \\ MCI_1 &= 10 - 2.23Crack^{0.3} \\ MCI_2 &= 10 - 0.54RutSum^{0.7} \end{aligned} \right\} (31)$$

式(31)で示された3つの式の中で最も低い値を与えるものをその時点での  $MCI$ とする。縦断凹凸量も路面性状の一つの特性であるが, 本シミュレーションでは, 対象外とした。なお,  $MCI$ に対する各路面性状値の寄与率の程度で比較した場合, 縦断凹凸量は最も寄与率が低い特性値である<sup>19)</sup>。

### 3. 入力データ

本シミュレーションによる解析に用いた入力データは, 下記に示すとおりである。

①解析期間: 10年間

①解析開始期日: 4月15日18時

②日5t換算輪数: 300(台)

③1時間ごとの5t換算輪数の割合(%) : 表-2参照

④1時間ごとの一輪通過時間(秒) : 表-2参照

⑤1年ごとの交通量の伸び率: 2(%)

⑥各アスファルト混合物層, アスファルト安定処理層の弾性係数, アスファルト量, 空隙率, および使用バインダの軟化点: 図-4, 表-3参照

⑦気象データ: 図-5参照(1994年, 福井県福井市)

解析期間は, アスファルト舗装要綱の設計期間に準じて10年間とした。また, 各アスファルト混合物層, およびアスファルト安定処理層に用いたバインダは一般地域で使用されているストレートアスファルト60/80とし, 既往のデータを基に表-3に示す値を設定した。また, 表-1に示したアスファルト混合物層, およびアスファルト安定処理層の温度変化に伴う弾性係数は, 井原ら<sup>20)</sup>や村上ら<sup>21)</sup>が室内試験により行った既往の間接繰り返し引張試験<sup>22)</sup>とAASHTOの温度補正の関係式を基に図-4に示すように設定した。

### 4. 解析結果

解析結果は, 図-6~11に示すとおりである。図-6はアスファルト混合物層, およびアスファルト安定

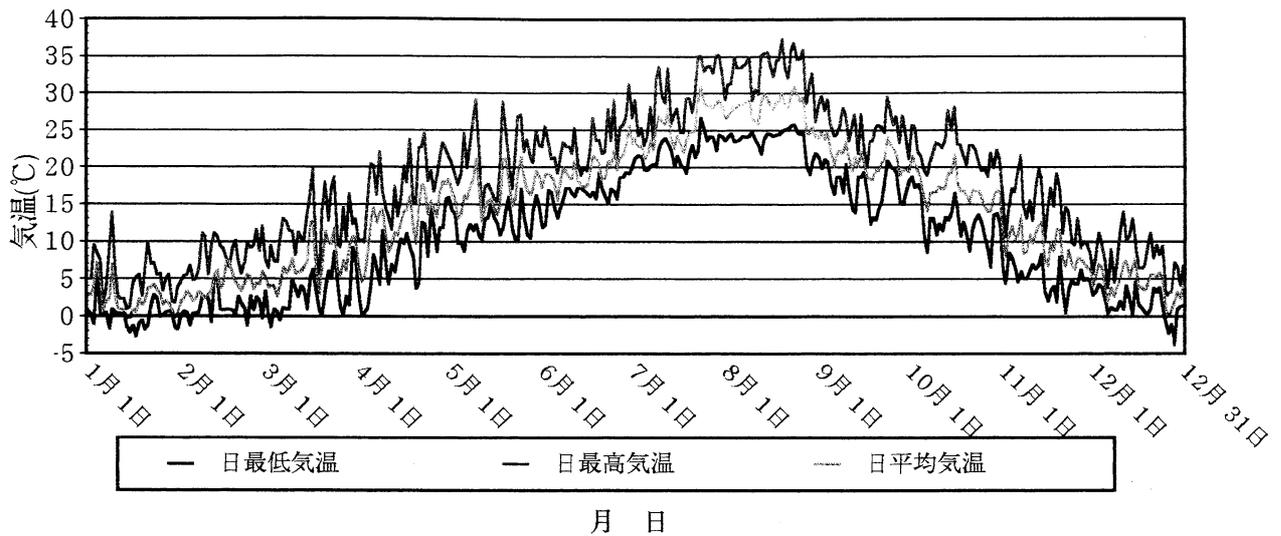


図-5 1年間の日最低・最高・平均気温

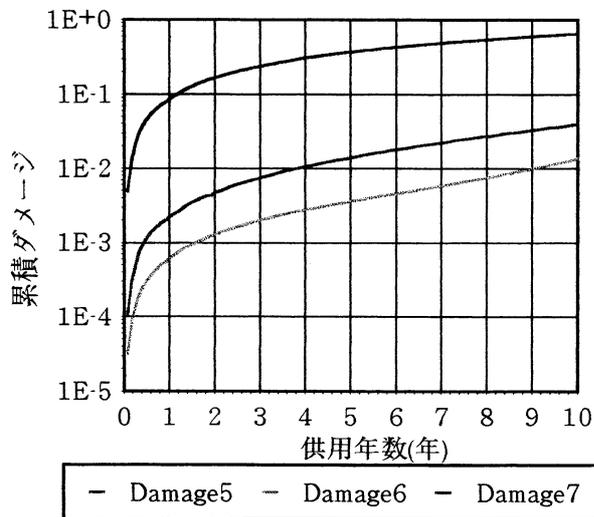


図-6 各層の疲労クラックの累積ダメージ

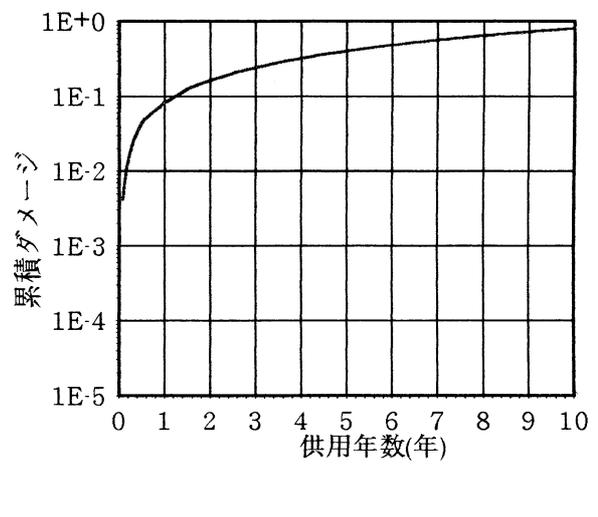


図-7 全層圧縮による累積ダメージ

処理層下面に生じる引張ひずみから疲労クラックの破壊基準式より求めた各層の累積ダメージを示している。アスファルト安定処理層の累積ダメージが表・基層と比べて大きい値となっている。一般にひびわれ多くはアスファルト混合物の弾性疲労や変形が原因して、その混合物層下面から発生すると考えられている<sup>23)</sup>。本シミュレーションによれば、アスファルト混合物層の下面に相当するアスファルト安定処理層下面の引張ひずみが最も大きな値を与えており、それらの現象を顕著に再現している。

図-7は、路床上面の圧縮ひずみから全層圧縮による破壊基準より求めた累積ダメージを示している。路床の設計 CBR は 4 程度であり支持力が小さいため、アスファルト安定処理層と同様に累積ダメージも大きい。一般に路床の支持力が小さいと新設から第一

回目の補修までの寿命が、路床の支持力が大きい舗装断面に比べて短いと言われている。これは、軟弱路床などでは大きな残留沈下の発生し、支持力不足により寿命が短くなると考えられている<sup>24)</sup>。坂田ら<sup>25)</sup>が行ったアスファルト舗装を主体として路床、および路盤を対象としたライフサイクルコスト解析によれば、長寿命化舗装の観点から路床構築の重要性を指摘している。したがって、本シミュレーションにおいても、路床の支持力が小さいため路床上面の圧縮ひずみが大きくなり、累積ダメージを大きくしたと推察される。

(1) ひびわれ率、およびわだち掘れ量の予測

図-8は、ひびわれ率のパフォーマンスカーブを示している。定性的に言われている供用開始後はひび

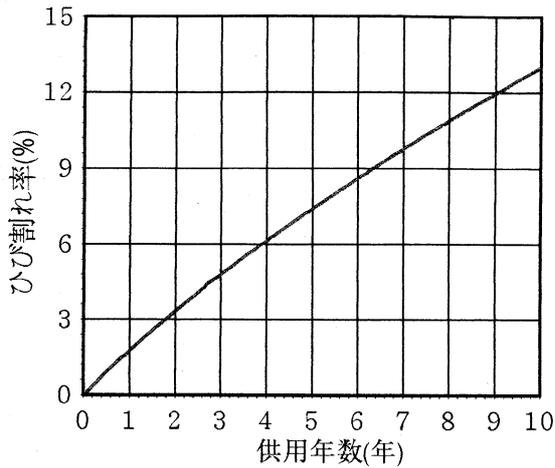


図-8 ひびわれ率のパフォーマンスカーブ

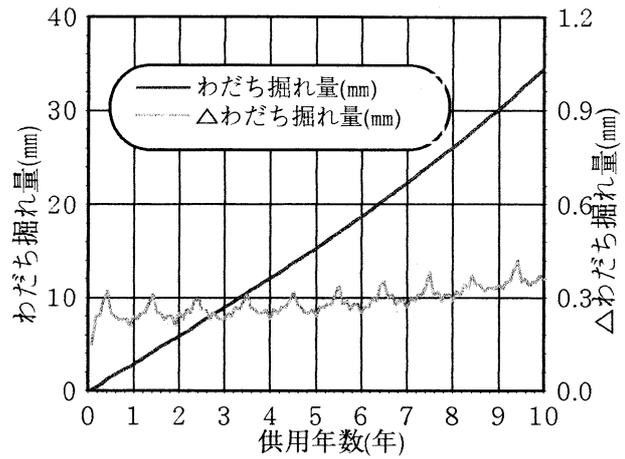


図-9 わだち掘れ量のパフォーマンスカーブ

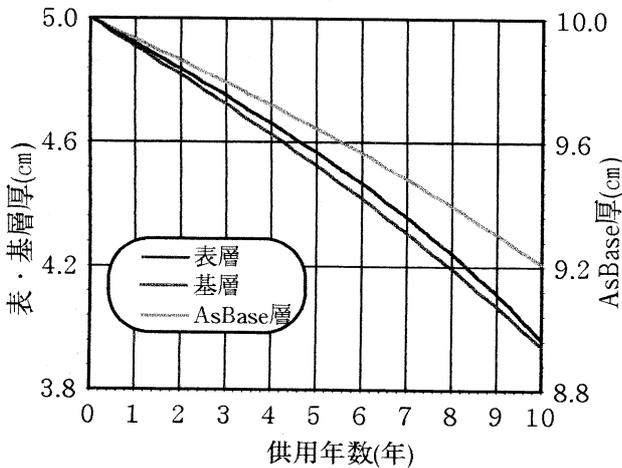


図-10 各層の層厚の変化

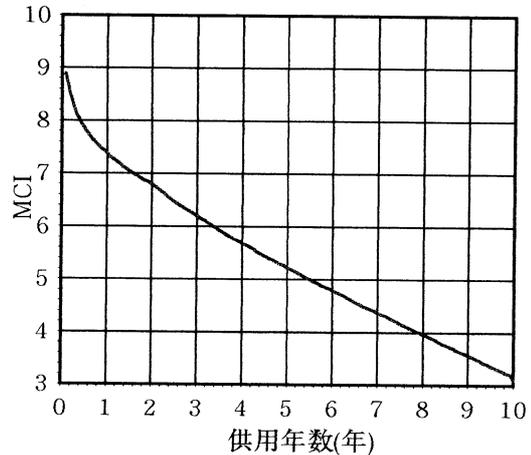


図-11 MCIのパフォーマンスカーブ

われ率の発生も少ないが、供用を経るにつれひびわれ率も増加するパフォーマンスカーブを顕著に示している。図-6より、アスファルト安定処理層の累積ダメージが表・基層と比べて大きいことから、本シミュレーションで設定した舗装断面および交通環境では、ひびわれはアスファルト安定処理層の弾性疲労や変形が原因してアスファルト安定処理層の下面から発生すると推察される。

図-9は、わだち掘れのパフォーマンスカーブを示している。青木ら<sup>26)</sup>の追跡調査によれば、わだち掘れ量は路面温度の累積時間に大きく依存するとしているが、本シミュレーション結果でのわだち掘れの進行が、夏季に大きく進行していることを顕著に再現している。

図-10は、各層の総厚の変化を示している。舗装内

温度が最も高くなる表層の層厚の低減が最も大きい。したがって、本シミュレーションで設定した構造断面、および交通環境では流動によるわだち掘れ量が圧縮変形にともなうわだち掘れ量に比べて大きいことが推察される。

## (2) MCIの予測

図-11は、予測されたひびわれ率とわだち掘れ量から求めた MCIを示している。MCIは路面機能のみの特性値により決定されるが、本シミュレーションによれば、構造劣化の程度に準じて劣化する MCI のパフォーマンスカーブを再現している。

## 5. おわりに

通行車輛1回ごとの気象条件や荷重条件をシミュレ

ートし多層弾性理論を用いてアスファルト舗装の時系列的な構造劣化を推定し、かつその構造劣化の程度からひびわれ率、わだち掘れ量の路面性状と MCI のパフォーマンスカーブの予測を行った結果、以下のように要約できる。

- ①多層弾性理論を用いて構造的劣化を推定し、その構造劣化の程度からひびわれ率、わだち掘れ量の路面性状と MCI のパフォーマンスカーブのシミュレーションを行うことは可能と示唆できる。
- ②アスファルト舗装要綱に準じれば、アスファルト舗装の設計期間は 10 年間である。本シミュレーションによれば、構造劣化も考慮したパフォーマンスカーブの推定を行うことにより中長期的なライフサイクルコストの観点から長寿命化舗装の設計や、反対にイベント広場などの短期供用を目的とした舗装構造の設計に有益である。
- ③一般にライフサイクルコスト解析において、残存価値は投資金額と残存寿命の関係により求めている<sup>27)</sup>。本シミュレーションによれば、補修工法の立案において、構造劣化の程度が推定できるため、舗装の構造的な残存価値が得られる。
- ④流動によるわだち掘れが著しい箇所は、基層も流動している場合が少なくない。本シミュレーションによれば、流動および変形に伴う各層厚の変化が推定できることから、補修工法の立案において切削厚さの検討に有益である。
- ⑤維持補修の立案で補修後のパフォーマンスカーブの予測は重要である。一般に累積大型車交通量や供用年数などの代表値を用いて路面性状の各特性値を予測しているのが現状のようである。本シミュレーションによれば、FWD に代表される構造診断から推定される各層の弾性係数を利用することが可能となり、補修後のパフォーマンスカーブの予測は構造劣化に準じて予測することができるため、信頼度の高いものになると期待される。

以上のように、本シミュレーションによれば、各因子がパフォーマンスカーブにどのような影響を与えるかを確認することができる。したがって、新材料、舗装断面、および補修工法の意志決定において構造的な劣化や、どの層から破壊していくか、およびどの層まで補修を行う方が望ましいかを予測するシミュレーション環境が可能となる。

しかしながら、現段階では各定数の設定は筆者らの経験的な判断により設定した値であり、必ずしも正解値とは言い難い。したがって、時間とコスト削減、および試験舗装での危険性の退避といったシミ

ュレーションの長所と相反することではあるが、各定数の整合性と再現性は、室内試験や追跡調査などにより、さらなる検討を行うことが今後の課題である。

近年、維持補修は「壊れたら直す」と言った時代から合理的、かつ効率的なシステム工学に準じた維持管理の時代に移行している。さらには、新設時の設計においても長寿命化を考慮した設計断面の検討が必要とされている。これらの社会的なニーズに鑑み、今後は理論的設計手法への確立や補修工法の立案を支援することを目的としたシミュレーションシステムの開発に期待される。

謝辞：本シミュレーションのモデル化にあたり東電設計(株)耐震技術部の栗田哲史氏に貴重なる助言を頂いた。また、本論文作成にあたり東京電機大学理工学部建設工学科松井研究室の卒研究生である宮崎孝平君に多くの協力を得たことを記し未筆ながら謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，pp.29～39，平成4年。
- 2) 内田清一，安藤政浩，溝淵優：表層用大粒径アスファルト混合物に関する2,3の検討，舗装，Vol.24, No.10, pp.3～9,1989年10月。
- 3) 泉秀俊，黒田智，荒木田靖：産業副産物の道路分野への利用化提案，第21回日本道路会議論文集，pp.636～637，平成7年。
- 4) 1)に同じ，pp.225～226。
- 5) 亀山修一，丸山輝彦，笠原篤：舗装パフォーマンスへの影響因子に関する検討，第21回日本道路会議論文集，pp.698～699，平成7年。
- 6) 土構造物および基礎委員会 舗装機能の評価に関する研究委員会：舗装機能の評価技術の現状と将来，土木学会論文集，No.472/V-20, pp.13～28,1993年8月。
- 7) 峰岸順一，鈴木秀輔，田中耕作，湯川ひとみ：各国のアスファルト舗装設計法の現状と研究の動向，アスファルト，Vol.34, No.171, pp.35～42,1992年。
- 8) 阿部忠行，田中輝栄：アスファルト舗装の寿命予測～コンピュータ・プログラム DAMA～，アスファルト，Vol.29, No.149, pp.76～81，1986年。
- 9) American Association of State Highway Transportation Officials: Design Guide of Pavement Structures, pp. III-28～III-55, 1985。
- 10) 阿部長門，名塚忠一，丸山輝彦：フォーリングウェイトデフレクトメータに基づく舗装の寿命予測の方法，舗装，Vol.30, No.4, pp.8～12,1995年4月。

- 11) 土木学会土構造物および基礎委員会「舗装工学」編集委員会：舗装工学，土木学会，pp.120～131，平成7年。
- 12) 11)と同じ，pp.53～54。
- 13) 9)と同じ：Appendix L Temperature-Deflection Corrections for Asphalt Pavement，pp.L-1～L-6。
- 14) FWD研究会：FWDに関する研究，pp.108～105，1993年8月。
- 15) 姫野賢治，渡部隆，勝地太：アスファルト舗装内部の温度推定に関する研究，土木学会論文集，No.366，pp.123～132，1986年2月。
- 16) 11)と同じ，pp.69～72。
- 17) 笠原彰彦：「第6回アスファルト舗装の構造設計に関する国際会議(1/2)」セッションI：構造設計および材料，アスファルト，Vol.32，No.161，pp.44～56，1989年。
- 18) 井上武美，内田清一，井原務：2層モデルのホイールトラッキング試験による流動特性の検討，舗装，Vol.23，No.3，pp.18～22，1988年3月。
- 19) 11)と同じ，pp.305～308。
- 20) 井原務，井上武美，須山武彦：アスファルト舗装の評価診断・修繕設計支援システムの開発，道路建設，No.520，pp.44～53，1991年5月。
- 21) 村上浩，溝淵優：アスファルト混合物の耐久性評価方法の一提案，道路建設，No.540，pp.55～63，1993年1月。
- 22) ASTM Standards D4123-82: Standard Method of Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures。
- 23) 松野三郎，西澤辰男：アスファルト舗装の破損の分類，第20回道路会議論文集，pp.516～517，平成5年。
- 24) 日本道路公団：設計要領第一集第2編舗装，pp.6～10，平成3年。
- 25) 坂田耕一，高橋哲躬，田中徹夫：路床・路盤の強化とライフサイクルコスト，第21回道路会議特定課題論文集，pp.45～46，平成7年。
- 26) 青木秀郎，西尾宗雄：アスファルト舗装の流動わだち掘れ-路面性状調査と開削調査からみたわだち掘れの発生原因-，舗装，Vol.30，No.3，pp.18～24，1995年3月。
- 27) Peterson, B. E. : Life - Cycle Cost Analysis of Pavements, *National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice, No. 122, 1985.*
- 28) 峰岸順一：アスファルト舗装の設計期間，舗装，Vol.28，No.11，pp.11～15，平成5年11月。
- 29) 西澤辰男，松野三郎：アスファルト舗装の車軸走行位置に生じる縦表面のひびわれについて，土木学会論文集，No.478/V-21，pp.71～80，1993年11月。
- 30) McNeil, S., Markow, M., Nuemann, L., Ordway, J., and Uzaski, D. : Emerging Issues in Transportation Facilities Management, *ASCE, Journal of Transportation Engineering, Vol.118, No.4, pp.477～495, 1990 July/August.*
- 31) 岩の力学委員会：岩の工学的性質と設計・施工への応用，土質工学会，pp.324～332，平成3年7月。
- 32) Dautz, M. and Rmpel, A. : Mechanisms of Surface Cracking in Wearing Course, *The 6th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, pp.232～247, 1988.*
- 33) 森康男，金田一夫，新留正道：舗装の層構成と流動わだち掘れ，舗装，Vol.25，No.2，pp.23～32，平成2年2月，平成2年2月。
- 34) 横山稔：パソコンを利用した舗装解析プログラムの使用例，舗装，Vol.26，No.6，pp.28～35，平成4年6月。
- 35) Hugo, F. : Catering for Long Term Changes in the Characteristics of Asphalt during the Design Life of a Pavement, *The 6th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, pp.290～304, 1988.*
- 36) Gerlach, A., Loizos, A. and Ludce, H. : The Influence of Stiffness Progress of the Different Pavement Layers on the Size and Shape of Rut Depth in the Pavement Surface, *The 6th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, pp.72～81, 1988.*
- 37) Gerritsen, A.H. and Koole, R.C. : Seven Years Experience with Structural Aspects of the Shell Pavement Design Manual, *The 6th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, pp.94～106, 1988.*

## PERFORMANCE CURVE SIMULATION FOR FLEXIBLE PAVEMENT BY USING MULTI-LAYERS ELASTIC THEORY

Naoki MIZUNO, Tetsu KIMURA, Manabu MATSUSHIMA and Kunihiro MATSUI

It is of great importance to predict performance curve from a viewpoint of life cycle cost analysis in a pavement management system. Although the pavement performance depends on many factors such as a pavement profile, traffic and environmental conditions, it is often represented by a simple model with a few key factors of cumulative traffic volume and a number of years in service.

This paper demonstrates gradual deterioration of pavement structures using elastic multi-layer analysis along with environmental and loading conditions at each passage of vehicle. From the deterioration, cracking ratio, rutting depth and a performance curve of MCI are predicted.