

# 美々新試験道路におけるアスファルト舗装の パフォーマンスに関する研究

石谷雅彦<sup>1</sup>・中川伸一<sup>2</sup>・小笠原 章<sup>3</sup>・高橋守人<sup>4</sup>・笠原 篤<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 北海道工業大学大学院 工学研究科 博士後期課程 (〒006 札幌市手稲区前田7条15丁目)

<sup>2</sup>正会員 北海道開発局 局長官房 開発調整課 調査専門官 (〒060 札幌市北区北8条西2丁目)

<sup>3</sup>正会員 北海道開発局 室蘭開発建設部 苫小牧道路事務所 所長 (〒053 苫小牧市日吉町2丁目)

<sup>4</sup>正会員 北海道開発局 開発土木研究所 維持管理研究室 室長 (〒062 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

<sup>5</sup>フェロー会員 工博 北海道工業大学教授 土木工学科 (〒006 札幌市手稲区前田7条15丁目)

舗装マネジメントシステムにおいて、舗装構造のサービス性能およびそのパフォーマンスは、ライフサイクルコストを算定する上で重要である。舗装構造のサービス性能の評価は、舗装の支持力を評価することであり、支持力は舗装が疲労破壊するまでに許容する等価複輪荷重数と言えらる。

本研究では、FWDによるたわみと層構造理論に基づく弾性解析から舗装の疲労破壊回数を求め、走行軌跡分布を考慮した舗装の寿命を推定する一手法について述べるとともに、舗装構造のサービス性能の評価すなわち支持力評価方法として舗装の構造健全度指数(SPI:Structural Propriety Index)を提案し、試験道路における調査結果からMCIとの比較およびパフォーマンスの検討を行った。

*Key Words* : *fatigue, FWD, remaining life, performance, road test, serviceability, structural propriety index*

## 1. まえがき

我が国の道路整備によるストックは、経済成長の発展とともに飛躍的に増大し、今日では110万kmを越える全国的な道路網を形成するに至り、道路舗装について新設の時代から維持・修繕の時代へと移行しつつある。

舗装は路面を通して、利用者にサービスを提供するものであるが、舗装に要求されるサービスの内容とそのレベルは異なる。これらのサービスの善し悪しはサービスアビリティ(以下、本論文においてはサービス性能と表現する)と呼ばれており、それは乗り心地・支持力・路面損傷・滑り抵抗性などの要素から構成されるとしてよい。

舗装を設計する上で、サービス性能は設定された期間あるレベル以上に保持されていなければならない。すなわち舗装設計は、本来性能設計であり、要求される性能を満足するための必要な費用が最小化される必要がある。

この費用は、新設舗装に要する建設費、維持・修繕費などの管理者側費用、燃料費や車両の損耗などに伴う走行費および修繕工事に伴う渋滞によ

る時間損失費などの利用者側費用との総計で表される。この様な考え方に基づいて、舗装に関する計画・設計・建設・維持・修繕・評価・研究といった一連の活動を包括的にとらえ体系化したものとして「舗装マネジメントシステム」<sup>1)~4)</sup>(以下PMSと称する)がある。

PMSを有効に稼働させるためには、新設舗装および維持・修繕に関するライフサイクルコストの算定が重要となる。そこでは、新設舗装のパフォーマンスおよび維持・修繕を施した舗装のパフォーマンスの把握が不可欠である。一般にパフォーマンスは、50kN換算輪数(または年数)の増加に伴う舗装のサービス性能の低下として定義されている<sup>5), 6)</sup>。したがって、サービス性能を構成する要素は、客観的な数値によって評価される必要がある。

本研究においては、舗装サービス性能の構成要素の1つである支持力を構造的健全度として捉え、疲労ひび割れが発生するまでの50kN換算輪数を寿命と考えた評価値化の提案を行っている。さらに、「美々新試験道路」において、6年間にわたり路面損傷と支持力を定期的にモニターし、それぞ

れのパフォーマンスを求めている。それらの成果を、道路舗装の維持・修繕行為へ利用する場合の手法をも示している。

## 2. サービス性能

舗装のサービス性能は、PMSを稼働させる上で最も基礎的な入力条件となり、サービス性能を支配する舗装の破損は、適切な維持・修繕が行われなければ、供用輪(または供用年数)の増加とともに進行していくものである。新設舗装から維持・修繕までを包括的に捉えた経済解析を行うためには、舗装の破損の進行状態を予測しなければならない。舗装の破損の進行は、路面の損傷度合いの増加、支持力特性の低下、乗り心地の低下、すべり抵抗性の低下などの現象として捉えられる。

本来、舗装のサービス性能は概念的に次のような関数として表現されるべきであろう<sup>4)</sup>。

$$Sa = f(a, b, c, d, e, f \dots)$$

- a : 路面の損傷
- b : 支持力
- c : 乗り心地
- d : すべり抵抗
- e : 沿道住民に与える振動・騒音
- f : 路面の美観

各々の変数についての重みは、舗装にどのようなサービス性能を要求するかによって決定される。サービス性能を具体的に表現するものの例として、AASHOの道路試験の成果から導き出されたPSIは乗り心地を、我が国の建設省で用いられているMCIは路面損傷を重視した評価指標と言える。

舗装のサービス性能を総合的に表すために、世界各国、各自治体において、個々の要素を組み合わせた複合指数(Combine Index)を開発する努力がなされている。

カナダでは、複合指数の1つとして、式(1)に示すような舗装総合品質指数(PQI:Pavement Quality Index)が開発されている<sup>2)</sup>。しかし、乗り心地、路面損傷、支持力以外の要素については環境条件や車両の条件等を定量化することが難しいことから、長期間のパフォーマンスが明らかにされていないため組み込まれていない。

$$PQI = 1.607 + (0.596 \cdot RCI - SDI) + (0.5264 \cdot RCI - \text{Log}_{10} SAI) \quad (1)$$

RCI : Riding Comfort Index

SDI : Surface Distress Index

SAI : Structural Adequacy Index

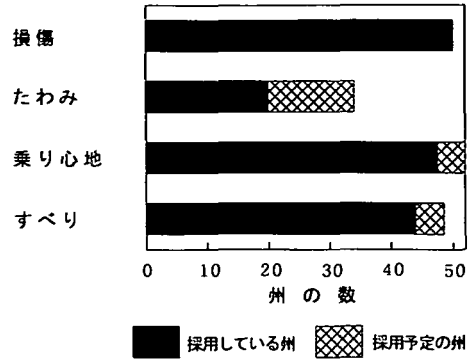


図-1 構成要素と米国の州の数 (出典: 文献<sup>7)</sup>)

また、米国の各州でも各々独自の複合指数を開発しており、非常に多くの指数が提案されている現状にある<sup>7)</sup>。図-1は、複合指数を構成している要素と各要素を組み込んでいる州ならびに将来組み込もうとしている州の数を示している<sup>8)</sup>。この図から、複合指数を構成する要素として、路面損傷、支持力、乗り心地、すべり抵抗が4大要素であることがわかる。

PMSの研究と実施において先駆的な米国の例にも示されるように、4大要素を始めとする多くの要素を組み込んだ複合指数を構築することが重要と言える。また、複合指数化が困難であるとしても要素毎に限界値(Terminal Value)を設定し、舗装のサービス性能を評価する必要がある。

### (1) 路面損傷

#### a) 維持管理指数

アスファルト舗装の路面の損傷を評価する方法として我が国では維持管理指数(MCI: Maintenance Control Index)が用いられている。MCIは先に述べたように「舗装の管理者から見た路面の損傷」を重視した維持管理水準を表すものであり、建設省土木研究所が全国約1,800組のデータを解析し、道路管理者による路面の評価値と路面性状値の重回帰分析によって指数化したものである<sup>9), 10)</sup>。

MCIは、ひび割れ率、平坦性、わだち掘れ量の3特性により指数化するほか、2特性、1特性においても指数化でき、これらの指数の最小値をMCIの代表値としている。総合的な路面評価を行う上では、3特性による評価が望ましいが近年の車両の大型化、重量化に伴いわだち掘れ量の寄与率の高さが、問題となる例も多い。

#### b) 現在サービス性能指数

現在サービス性能指数(PSI: Present Serviceability Index)は、AASHOの道路試験において開発され

た舗装のサービス性能評価方法である<sup>9)</sup>。

PSIは、道路の管理者、建設者、利用者からなる評価者によって採点された舗装路面評価値(PSR)と、わだち掘れ量、縦断凹凸量、ひび割れ度、パッチング度との重回帰分析から評価式を作成している。

我が国では、AASHO道路試験で開発されたPSI式を参考に、直轄国道の路面視察評価とひび割れ、わだち掘れ、平坦性による路面性状値との重回帰分析から評価式を作成している<sup>9)</sup>。

### c) 舗装補修指数

我が国の空港のアスファルト舗装では、運輸省が路面特性値を基にして開発した舗装補修指数(PRI:Pavement Rehabilitation Index)により、舗装路面のサービス性能を評価している<sup>11)</sup>。

PRIは、大型化、高速化する航空機を対象とした空港基本施設の維持補修計画に必要な評価指数としてクラック率、わだち掘れ量、平坦性から指数化している。

この他、カナダのオンタリオ州では舗装表面損傷指数(SDI:Surface Distress Index)、東京都ではMNIなどにより路面の損傷状態を評価している<sup>9)</sup>。

### (2) 支持力

舗装には、累積交通量の増加とともにダメージが蓄積され、ひび割れや平坦性の悪化現象が舗装路面に現れる。従って、舗装の補修時期、補修区間、補修工法等の検討を行う場合には、ダメージの蓄積状態を評価し将来どのように変化していくのか、そして残存寿命がどの程度あるのかを予測することが重要である。

ある時点における舗装の支持力は、それまでのダメージの蓄積状態を表し、これにより舗装の構造健全度を評価することが出来る。すなわち舗装の支持力評価は、舗装の構造健全度評価と換言できる。また、残存寿命の予測には舗装体に生ずるひずみと舗装疲労破壊曲線が利用できる<sup>12)</sup>。

カナダでは、ひずみと荷重載荷回数の疲労現象を、許容最大たわみと最大荷重載荷回数との関係に近似させ、荷重レベルに応じた推定残存寿命から構造適正指数(SAI:Structural Adequacy Index)を求めている<sup>2)</sup>。

SAIは大型車混入量、将来交通量予測、季節変動を考慮した許容最大たわみなどの多くの入力条件から回帰されているが、それぞれの係数については米国のUtah州、カナダのAlberta州などいくつかの州のデータに基づいた補正值を用いて10段階評価している。しかし、評価期間が短く研究段

階にあるため詳細は明確化されていない。

### (3) 乗り心地

諸外国においては、乗り心地の評価値として国際ラフネス指数(IRI:International Roughness index)<sup>13)</sup>を取り入れている例が多い。

IRIは、縦断方向の形状特性により与えられる多くのラフネス指数の互換性を高めたものとして、世界銀行が1986年に提案したものであり、アメリカ、カナダ、中国他の各国で採用されている。このIRIは、レスポンスタイプのラフネス指数であり、路面の縦断方向の実測プロファイルデータ上にクォーターカーシミュレーションモデルを走行させた時の、車両が受ける上下方向の運動変位の累積量と走行距離から与えられるため、どのような縦断方向の形状特性にも対応できる。

IRIは、車両のシステム、速度、縦断形状の波長と振幅に対応した周波数と加速度など走行する車両の動的特性から乗り心地を評価しようとするもので、今後は世界的にその主流となるものと期待されている。

### (4) 滑り抵抗

走行安全性から舗装のすべり抵抗性は重要な因子であり、サービス性能の上でも欠かせないものといえる。滑り抵抗性は、直接摩擦係数により評価する方法と、摩擦係数を評価値化したものがある。他方、テクスチャからのアプローチもある。

PIARCから1995年に報告された国際フリクション指数(IFI:International Friction Index)<sup>14)</sup>は、多くの研究例がある中で舗装のサービス性能の一つである滑り抵抗性を評価する最も合理的な方法として評価されている。IFIは、60km/h走行時の安全性を舗装表面のテクスチャとすべり摩擦係数から指数化している。

我が国においては、摩擦係数と事故発生率、摩擦係数のパフォーマンスなどの研究例が少なく限界値として示される例はあるものの、評価値化されていない。

### (5) パフォーマンスモデル

舗装のパフォーマンスモデルは、図-2に示すように縦軸にサービス性能、横軸に50kN換算輪数(または、等価単軸荷重数(ESAL:Equivalent Single Axle Load)などの標準となる荷重の累積数(または年数)が用いられる。

縦軸のサービス性能は、PMSを稼働させる上で総合的な評価指標であることが望ましい。しかし

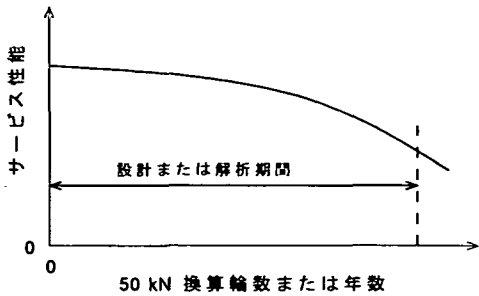


図-2 パフォーマンスモデル

前述したように世界的にも開発過程にあり、総合評価指標化するためのそれぞれの構成要素の重み付けを行うためには、長期的な検証が必要となる。そのため、現段階ではサービス性能の構成要素単独、またはいくつかの組み合わせによる指標が用いられている<sup>15)・16)</sup>。

横軸となる50kN換算輪数は、動的交通荷重測定装置などを用いて実測される必要がある。長期にわたって実測されたサービス性能と50kN換算輪数との関係を回帰し、パフォーマンス曲線を得なければ、将来予測を行うことができない。このことから、パフォーマンスモデルの構築が最も重要な命題となる。

### 3. 舗装構造の健全度

アスファルト舗装体は一般的に路床、路盤、アスファルト混合物層から成り立っており、交通量の増加および気象条件の変化とともに舗装構成層にはダメージが蓄積される。路床、路盤などの土質材料に関するダメージは、含水比、凍結融解などの主に気象条件の変化によるものと交通荷重の繰り返しによる塑性変形の進行などで表される。アスファルト混合物層に対するダメージは、主に交通量の増加によるアスファルト混合物の疲労の蓄積として表現される。ここでは、アスファルト舗装体に与えられるダメージを、アスファルト混合物層の疲労問題に限定して捉え、ダメージの蓄積を構造健全度として論じている。

アスファルト舗装の亀甲状ひび割れの発生の過程は疲労問題と捉えることができ、輪荷重が作用したときにアスファルト混合物層下面には曲げ引張りひずみが生じる。このひずみに対応する疲労破壊回数を  $N_f$ 、供用開始から現時点までの载荷回数を  $N_s$  とすれば、残存寿命は  $N_x = N_f - N_s$  となる。ここで提案する構造健全度指数 (SPI: Structural Propriety Index) は、残存寿命と疲労破壊回数との比

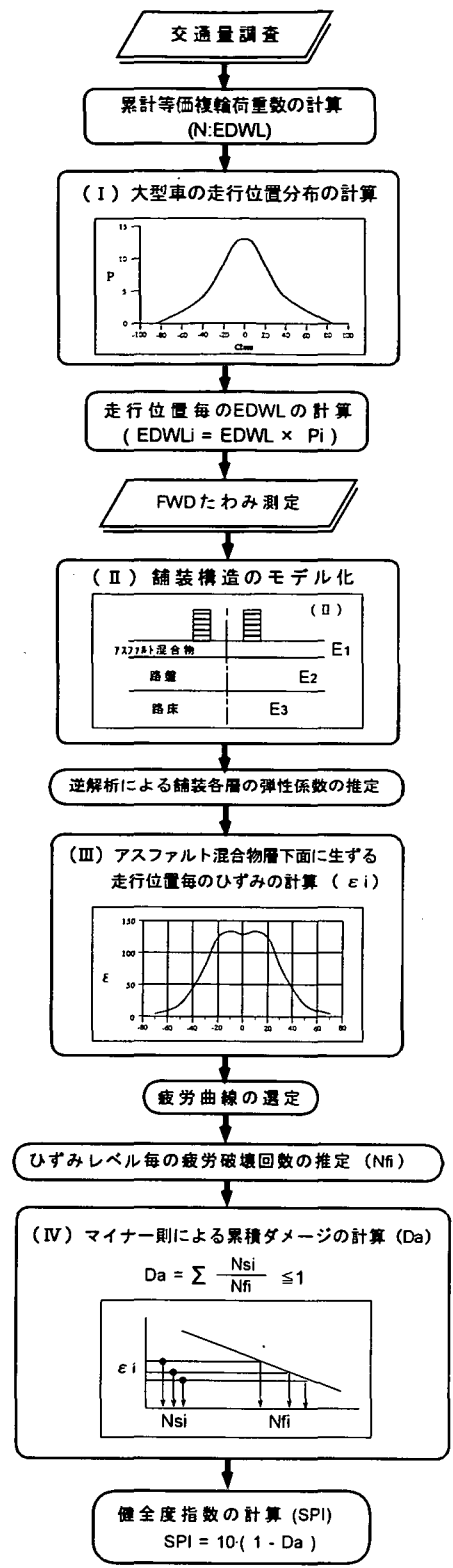


図-3 構造健全度指数 (SPI) 計算フロー

物層に蓄積されるダメージの影響度を表現するも  
( $N_x / N_f$ )を意味し、舗装のアスファルト混合  
のである。図-3に構造健全度指数(以下SPIと称  
する)の算出フローが示されている。

### (1) 交通量調査

我が国においては、大きさが異なる輪荷重によ  
る輪数を輪荷重 50kN (単輪)の輪数に換算して  
いる。

我が国の大型車の後軸の輪配置を見るとほとん  
どが複輪であることから、本研究においては50kN  
換算輪荷重を各 25kNの複輪荷重として取り扱っ  
ている。標準的複輪荷重(載荷輪半径 132.5 mm, 載  
荷輪中心間距離 340 mm, 荷重 25kN)を等価複輪荷  
重(EDWL:Equivalent Dual Wheel Load)と名付けた<sup>17)</sup>。

### (2) アスファルト混合物層に生ずるひずみ。

アスファルト混合物層に発生するひずみとその  
繰り返し数から舗装の寿命を予測する研究は多層  
弾性プログラムの汎用化に伴い近年積極的に行われ  
ている。これらの研究報告の多くは、輪荷重によ  
って発生する最大ひずみとその繰り返し数により  
寿命を予測している。しかし、車両は常に舗装  
の同一地点上を走行するわけではなくあるバラツ  
キを持って走行する<sup>18), 19)</sup>。したがって、アス  
ファルト舗装の疲労寿命の予測では、図-3の(1)  
に示すような走行位置毎の交通量を決定するた  
めの大型車走行軌跡の分布を把握することが必要  
である。

アスファルト混合物層下面に生ずるひずみ( $\epsilon_i$ )  
は、FWDによる測定たわみと逆解析<sup>20)</sup>および順  
解析から求められる。(II)に舗装構造のモデル  
が示されている。(III)には複輪荷重の走行頻度  
が最も高い地点に着目し、左右に 10 cm 移動した  
場合のアスファルト混合物層下面に生ずるひずみ  
( $\epsilon_i$ )の影響線が示されている。

### (3) 疲労ダメージ

(IV)は、ひずみレベル毎の供用開始から測定  
時までの等価複輪荷重による載荷回数( $N_{si}$ )と、  
疲労曲線から推定した、ひずみレベル毎( $\epsilon_i$ )  
の疲労破壊回数( $N_{fi}$ )の関係が示されている。

異なったひずみレベルの疲労問題では、「累積  
損傷は線形に累積する」とするマイナー則が適用  
される。したがって、走行位置毎の載荷回数( $N_{si}$ )  
と疲労破壊回数( $N_{fi}$ )を等価複輪数(EDWL)で表  
し  $N_s/N_f$  の累計をアスファルト舗装に蓄積された  
ダメージ( $D_a$ )とすると式(2)で表される。

$$D_a = \sum_{i=-k}^k \frac{EDWLi}{N_{fi}} \quad (2)$$

ここに、

EDWLi: 走行位置毎の累積等価複輪数

$N_{fi}$ : 走行位置毎のひずみに対応する疲労破壊回  
数

$i$ : 輪走行位置 (-k, ..., -20, -10, 0, 10, 20, ..., k cm)

### (4) 構造健全度指数

構造健全度指数(SPI)は、式(3)より与えられる。

$$SPI = 10 \times (1 - D_a) \quad (3)$$

ここに

SPI: 構造健全度指数(Structural Propriety Index)

$D_a$ : 測定時までの累計等価複輪数による累積  
ダメージ

ダメージの無い健全な状態を 10、供用後  
ダメージが蓄積され徐々にその指数は低下し  
疲労破壊する状態を 0 とする。式(3)にお  
ける係数 10 は、利便性を考慮し PSI、MCI  
などの他の評価指数と合わせるために設  
けたものである。

## 4. 美々新試験道路

舗装の機能を評価するためには、舗装の設計  
データ及び維持・修繕、交通量等の詳細な履  
歴が必要となる。ここでは、北海道開発局  
開発土木研究所維持管理研究室が中心とな  
って行った「美々新試験道路」の調査デー  
タから、舗装の路面損傷および構造健全  
度を、各々 MCI および SPI で評価し、  
そのパフォーマンスを求めた。「美々新  
試験道路」の建設は、アスファルト舗装  
の理論設計法を検討し、同時に舗装の長  
期供用性から舗装機能の評価手法を研  
究する目的で行われた<sup>21), 22)</sup>。

「美々新試験道路」は、新千歳空港の南  
東約 7 km の苫小牧市三沢を通過する  
一般国道 36 号線上に位置し、設計交通  
量区分は C 交通である。調査区間は、  
札幌方面に向かう片側 3 車線のうち中央  
帯側の車線で、延長約 500 m である。

舗装構造設計は、CBR- $T_A$ 法と多層弾性理  
論による設計の 2 種類で行われている。多  
層弾性理論による設計では、車輪が同一  
地点を走行するものとして車輪の走行軌  
跡分布は考慮されていない。舗装構造  
は、CBR- $T_A$ 法で設計した設計交通量区  
分 A, B, C, D に対応する 4 種類の舗装  
構造(A,B,C,D 構造)と、多層弾性理論  
による設計累積等価複輪数(EDWL)が  
640,000 輪/年・方向(設計寿命 1 年)  
の舗装構造( $T_{1-1}, T_{1-2}$  構造)と

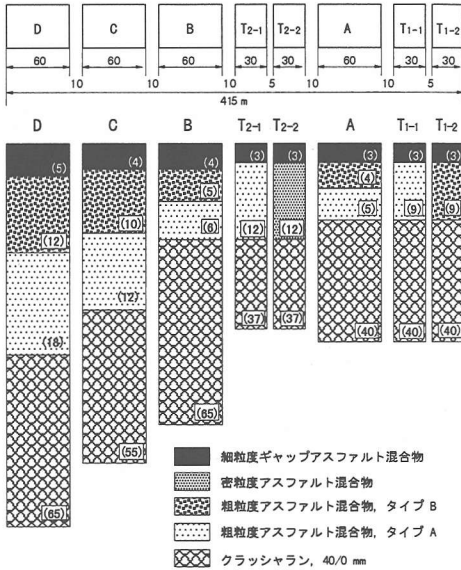


図-4 美々新試験道路の舗装構造と使用材料

1,280,000 輪/年・方向（設計寿命2年）の舗装構造（T2-1,T2-2）の合計8種類の構造から構成されている。構造断面と使用材料を図-4に示す。

「美々新試験道路」においては、交通量調査、路面性状調査、FWDによるたわみ量の測定が供用開始時の1990年から継続的に行われている。

### 5. パフォーマンス

「美々新試験道路」の路面評価及び構造評価のための調査データは、供用開始時の1990年8月から1995年7月まで定期的に調査されたのものを使用している。調査データ項目は・交通量・縦断凹凸量・ひび割れ率・平均わだち深さ・FWDによるたわみ量である。

#### (1) 交通量調査

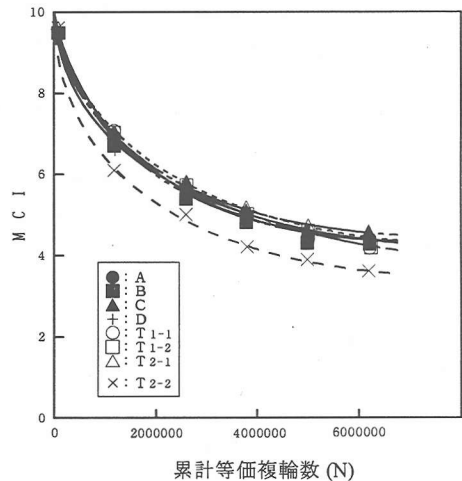
美々新試験道路においては、試験車線を走行する交通量と輪荷重について調査が実施された。交通量調査は、磁気車両識別システム（VIM：Vehicle Magnetic Imaging）を試験車線に設置し、時間交通量について1993年10月の1週間にわたって実施された。その結果から、交通量の日変動および曜日変動を求めることができた。曜日変動係数は平日を1.00とすると、土曜日が1.05、日祭日が0.98であった。

表-1 日平均等価複輪数 (EDWL)

測定日	日平均等価複輪数
1990年10月12日(金)	4,213
1991年9月3日(火)	2,410
1992年11月12日(木)	3,572
1993年10月14日(木)	5,626
1994年9月13日(火)	1,125
平均	3,400

表-2 車輪走行位置と走行頻度

中心からの距離 (cm)	走行頻度 P (%)
0	13
± 10	12
± 20	9
± 30	6
± 40	4
± 50	3
± 60	2
± 70	1



A: MCI=-0.6958・log(N)+9.7422 r=-0.925
B: MCI=-0.6977・log(N)+9.6356 r=-0.932
C: MCI=-0.6496・log(N)+9.6394 r=-0.986
D: MCI=-0.7069・log(N)+9.7191 r=-0.947
T1-1: MCI=-0.6922・log(N)+9.7550 r=-0.914
T1-2: MCI=-0.6926・log(N)+9.7574 r=-0.912
T2-1: MCI=-0.6615・log(N)+9.7391 r=-0.923
T2-2: MCI=-0.7886・log(N)+9.7309 r=-0.950

図-5 MCIのパフォーマンス

輪荷重測定はASTM E1318に規定されている走行動荷重測定システム(WIM：Weigh In Motion)の1種であるマット式軸重計を用いて毎年1回平日に実施された。表-1には交通量調査と輪荷重調査から算出された日平均等価複輪数(50kN換算輪数と同一)が示されている。日平均等価複輪数は測定日によって異なっているが、本研究では5回の

表-3 路面性状調査結果

舗装構造	測定時期	わだち (mm)	平坦性 (mm)	MCI	EDWLs	舗装構造	測定時期	わだち (mm)	平坦性 (mm)	MCI	EDWLs
A	1990, 8	0.0	0.64	9.6	0	T1-1	1990, 8	0.0	0.81	9.6	0
	1991, 8	12.4	1.23	6.9	1.30E+06		1991, 8	11.7	1.30	7.0	1.30E+06
	1992, 10	20.4	1.32	5.5	2.76E+06		1992, 10	20.1	1.33	5.6	2.76E+06
	1993, 10	24.8	1.42	4.9	4.00E+06		1993, 10	24.1	1.59	5.0	4.00E+06
	1994, 10	28.4	1.79	4.4	5.36E+06		1994, 10	27.3	1.45	4.5	5.36E+06
	1995, 10	28.4	—	4.4	6.51E+06		1995, 10	29.5	—	4.2	6.51E+06
B	1990, 8	0.0	1.43	9.5	0	T1-2	1990, 8	0.0	1.34	9.5	0
	1991, 8	13.2	1.41	6.7	1.30E+06		1991, 8	11.6	1.16	7.0	1.30E+06
	1992, 10	21.2	1.36	5.4	2.76E+06		1992, 10	19.5	1.03	5.7	2.76E+06
	1993, 10	25.6	1.70	4.8	4.00E+06		1993, 10	24.5	1.43	4.9	4.00E+06
	1994, 10	28.9	1.52	4.3	5.36E+06		1994, 10	27.9	1.15	4.5	5.36E+06
	1995, 10	28.8	—	4.3	6.51E+06		1995, 10	29.7	—	4.2	6.51E+06
C	1990, 8	0.0	0.65	9.6	0	T2-1	1990, 8	0.0	0.57	9.6	0
	1991, 8	11.4	1.52	7.0	1.30E+06		1991, 8	11.4	1.17	7.0	1.30E+06
	1992, 10	18.9	1.47	5.8	2.76E+06		1992, 10	19.0	1.38	5.8	2.76E+06
	1993, 10	23.3	1.45	5.1	4.00E+06		1993, 10	22.9	1.39	5.2	4.00E+06
	1994, 10	26.6	2.36	4.6	5.36E+06		1994, 10	25.9	1.24	4.7	5.36E+06
	1995, 10	26.7	—	4.6	6.51E+06		1995, 10	27.2	—	4.5	6.51E+06
D	1990, 8	0.0	0.57	9.6	0	T2-2	1990, 8	0.0	0.69	9.6	0
	1991, 8	14.0	0.87	6.6	1.30E+06		1991, 8	16.6	0.95	6.1	1.30E+06
	1992, 10	21.8	1.76	5.3	2.76E+06		1992, 10	24.0	0.84	5.0	2.76E+06
	1993, 10	24.9	1.22	4.9	4.00E+06		1993, 10	28.3	1.11	4.4	4.00E+06
	1994, 10	28.0	2.06	4.4	5.36E+06		1994, 10	32.2	0.86	3.9	5.36E+06
	1995, 10	28.1	—	4.4	6.51E+06		1995, 10	33.9	—	3.6	6.51E+06

平均値である 3,400 輪/日と交通量の曜日変動係数を累積等価複輪数の算出に用いている。

舗装の破損に関しては、交通量のみならず車輪走行の集中度が大きな影響を及ぼすことは良く知られている。表-2には、片側2車線で車線幅が3.6mである典型的な車線における大型車の走行位置分布が示されている。これは美々試験道路のものではないが、本研究においては、美々試験道路と車線構成がほぼ同一であることから、この走行位置分布を準用した。

(2) 路面損傷のパフォーマンス

路面性状調査は、供用を開始した 1990 年から継続的に実施されているが、ここでは 1995 年までの 5 年間（累積等価複輪数：651 万輪）の調査結果を解析している。その結果を表-3に示す。

EDWLの算出は、調査期間全体の日平均等価複輪数を経過日数倍するのではなく、曜日変動を考慮した。

維持管理指数 MCI は、式 (4-1) から (4-4) で算出され、その最小値が採用される。「美々新試験道路」では 5 年経過時においても、ひび割れの発生が認められず平坦性の悪化も少ないため、最も MCI が小さくなる式 (4-4) が採用された。

$$MCI = 10 - 1.48C^{0.3} - 0.29D^{0.7} - 0.47\sigma^{0.2} \quad (4-1)$$

$$MCI_{10} = 10 - 1.51C^{0.9} - 0.30D^{0.7} \quad (4-2)$$

表-4 舗装構造と路盤 (E2), 路床 (E3) の推定弾性係数

舗装構造	アスファルト混合物厚さ cm	路盤厚さ cm	E2 N/mm <sup>2</sup>	E3 N/mm <sup>2</sup>
A	12	40	330	77
B	15	65	330	80
C	26	55	180	81
D	35	65	240	99
T1-1	12	40	300	73
T1-2	12	40	280	86
T2-1	15	37	260	75
T2-2	15	37	290	80

$$MCI_1 = 10 - 2.23C^{0.9} \quad (4-3)$$

$$MCI_2 = 10 - 0.54D^{0.7} \quad (4-4)$$

ここに、

MCI：維持管理指数

C：ひび割れ率 (%)

D：わだち掘れ量 (mm)

σ：平坦性 (mm)

MCI と累積等価複輪数 (N) との関係を表 (5) に示す関数により回帰した結果、どの舗装構造においても 0.9 以上の高い相関係数を示した。路面損傷のパフォーマンスを図-5に示すが、MCI の低下傾向は舗装構造の影響を受けていないことが解る。

$$MCI = A \log(N) + B \quad (5)$$

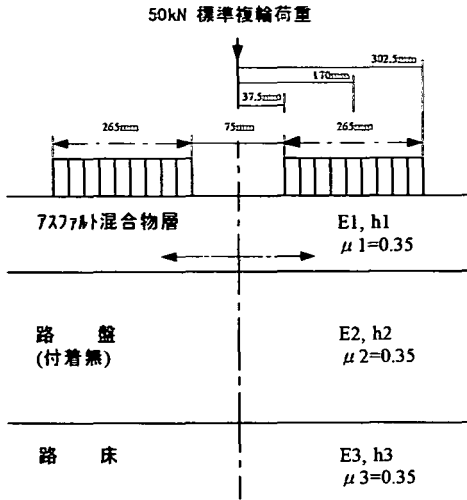


図-6 順解析のための層構造モデル

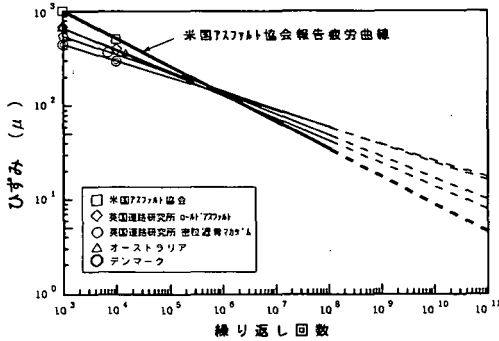


図-7 アスファルト混合物の疲労曲線

### (3) 構造健全度指数のパフォーマンス

舗装構造の健全度を表す SPI は、図-3に示したフローから求められ、累積等価複輪数との関係として与えられる構造健全度のパフォーマンスカーブを回帰した。

#### a) 舗装構成層の弾性係数

舗装構成各層の弾性係数は、逆解析プログラム LMBS (Layer Moduli Backcalculation System)<sup>23)</sup> を使用して推定した。

層構造モデルは、アスファルト混合物層、路盤、路床の3層構造モデルに単純化し温度依存性の影響の少ない路盤 (E2)、路床 (E3) の推定弾性係数は、各々の舗装構造を代表するものとして、5年間の測定値を平均化した。舗装構成層の厚さと推定弾性係数の結果を表-4に示す。

#### b) アスファルト混合物層下面に生ずるひずみ ( $\epsilon_i$ )

車輪走行位置の変動に応じたアスファルト混合

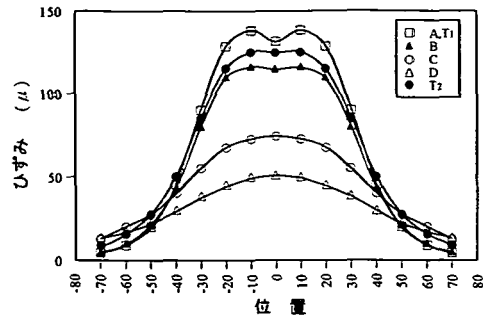


図-8 舗装構造種類別、車輪走行位置の変動に伴うアスファルト混合物層下面に生ずるひずみ

表-5 車輪走行位置毎の疲労破壊回数とアスファルト混合物層下面に生ずるひずみ ( $N_{fi} / \epsilon_i$ )

位置	日 EDWL	走行位置毎の疲労破壊回数とひずみ (上段: $N_{fi}$ , 下段: $\epsilon_i$ )				
		A, T1	B	C	D	T2
0	442	7.0E+06 133.0	1.5E+07 115.0	6.0E+07 74.5	2.0E+08 51.3	1.4E+07 123.0
± 10	816	6.0E+06 137.0	1.6E+07 117.0	6.2E+07 73.3	2.2E+08 50.1	1.3E+07 124.0
± 20	612	1.2E+07 127.0	1.4E+07 108.0	8.0E+07 67.0	3.0E+08 46.0	1.5E+07 115.0
± 30	408	3.0E+07 90.7	5.0E+07 78.6	1.8E+08 54.0	5.8E+08 38.9	3.5E+07 85.2
± 40	272	3.0E+08 45.3	6.8E+08 43.5	5.8E+08 39.0	1.3E+09 30.7	2.4E+08 49.6
± 50	204	5.0E+09 20.2	4.0E+09 21.8	2.0E+09 26.9	3.0E+09 23.3	1.8E+09 27.4
± 60	136	9.0E+10 8.6	5.0E+10 10.6	8.0E+09 18.8	8.2E+09 17.6	1.5E+10 15.6
± 70	68	3.0E+12 3.1	9.0E+11 4.7	1.9E+10 13.4	1.9E+10 13.5	7.0E+10 9.1

物層下面に発生するひずみを、順解析により求めた。順解析を行う上での層構造モデルは、図-6に示すように、3層構造モデルに等価複輪荷重を載荷させたものとした。このように解析断面を単純化したため、アスファルト混合物層では材料性状の差異を考慮せず、A, T1-1, T1-2 は A, T1 舗装構造として、T2-1, T2-2 は T2 舗装構造と見なして順解析および寿命予測を行っている。

許容載荷回数を求めるためのアスファルト混合物の疲労曲線は、これまで多くの研究者から提案されている。図-7に、Per Ullidtz<sup>24)</sup> による種々の研究成果の比較が示されている。本研究では、

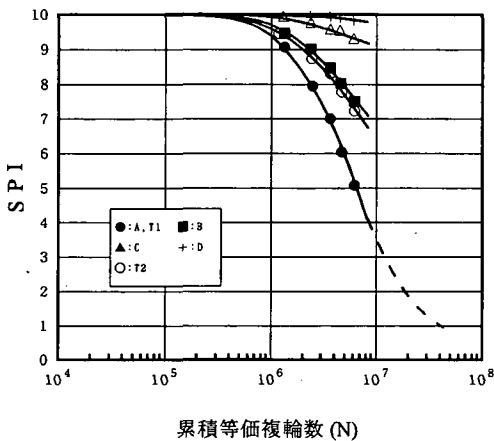


表-6 A 舗装構造の累積ダメージ (Da)

舗装構造	位置 (cm)	EDWL <sub>di</sub>	ε <sub>i</sub> (μ)	疲労破壊回数 (N <sub>f</sub> )	日ダメージ (D <sub>ai</sub> )
A T1	0	442	133.0	7.0E+06	6.31E-05
	± 10	816	137.0	6.0E+06	1.36E-04
	± 20	612	127.0	1.2E+07	5.10E-05
	± 30	408	90.7	3.0E+07	1.36E-05
	± 40	272	45.3	3.0E+08	9.07E-07
	± 50	204	20.2	5.0E+09	4.08E-08
	± 60	136	8.6	9.0E+10	1.51E-09
	± 70	68	3.1	3.0E+12	2.27E-11
1日当たり累積ダメージ (D <sub>ad</sub> =EDWL <sub>d</sub> )					2.65E-04

表-7 美々新試験道路の SPI

舗装構造	調査年月	Ns EDWLs	累積ダメージ	SPI
A T1	1990-08	0	0	10.0
	1991-08	1.30E+06	0.101	9.0
	1992-10	2.76E+06	0.214	7.9
	1993-10	4.00E+06	0.311	6.9
	1994-10	5.36E+06	0.416	5.8
	1995-10	6.51E+06	0.505	4.9
B	1990-08	0	0	10.0
	1991-08	1.30E+06	0.050	9.5
	1992-10	2.76E+06	0.107	8.9
	1993-10	4.00E+06	0.155	8.4
	1994-10	5.36E+06	0.208	7.9
	1995-10	6.51E+06	0.253	7.5
C	1990-08	0	0	10.0
	1991-08	1.30E+06	0.019	9.8
	1992-10	2.76E+06	0.041	9.6
	1993-10	4.00E+06	0.060	9.4
	1994-10	5.36E+06	0.080	9.2
	1995-10	6.51E+06	0.097	9.0
D	1990-08	0	0	10.0
	1991-08	1.30E+06	0.003	10.0
	1992-10	2.76E+06	0.007	9.9
	1993-10	4.00E+06	0.010	9.9
	1994-10	5.36E+06	0.014	9.9
	1995-10	6.51E+06	0.017	9.8
T2	1990-08	0	0	10.0
	1991-08	1.30E+06	0.056	9.4
	1992-10	2.76E+06	0.119	8.8
	1993-10	4.00E+06	0.173	8.3
	1994-10	5.36E+06	0.232	7.7
	1995-10	6.51E+06	0.281	7.2



A,T1	:SPI=EXP(2.3360-1.0892 × 10 <sup>-7</sup> × N) r = -0.994
B	:SPI=EXP(2.3064-4.4573 × 10 <sup>-8</sup> × N) r = -0.999
C	:SPI=EXP(2.3039-1.6021 × 10 <sup>-8</sup> × N) r = -0.999
D	:SPI=EXP(2.3037-2.8485 × 10 <sup>-9</sup> × N) r = -0.922
T2	:SPI=EXP(2.3076-4.9961 × 10 <sup>-8</sup> × N) r = -0.999

図-9 SPIのパフォーマンス

ひずみの小さい領域において安全側となる Asphalt.Institute の疲労曲線を外挿して用いている。

順解析の計算に用いた各々の層の弾性係数は、図-7の疲労曲線に用いられているアスファルト混合物の弾性係数 (E<sub>1</sub>=3000N/mm<sup>2</sup>) と表-4に示す推定された路盤 (E<sub>2</sub>)、路床 (E<sub>3</sub>)の弾性係数とし、荷重の載荷位置が左右に10cmずつ移動した場合の載荷位置中心のアスファルト混合物層下面に生ずるひずみを求めた。舗装構造種類別のひずみ分布を図-8に示す。

c) 累積ダメージ (Da)

累積ダメージは、車輪走行位置毎のひずみの繰り返し回数とそれらのひずみの疲労破壊回数の比の累積値として式 (2) より与えられる。車輪走行

位置毎のひずみの繰り返し回数は、交通量調査で求めた等価複輪数と表-2の車輪走行位置毎の走行頻度より求めた。

車輪走行位置毎の EDWL<sub>i</sub> および図-7より求めた疲労破壊回数 (N<sub>f</sub>) を表-5に示す。しかし、累積ダメージは日 EDWL<sub>i</sub> が小さいか、疲労破壊回数 (N<sub>f</sub>) が大きい場合、累積値に与える影響は小さくなる。したがって、累積ダメージの有効数字を2桁とすると、走行位置毎の最大日ダメージの有効数字2桁未満のダメージは、実用上無視しうる。表-6に、A 舗装構造について走行位置毎の日ダメージの計算結果が示されている。

表より走行位置毎の最大日ダメージ (D<sub>a</sub>) は、1.36E-04 であり、その2桁未満のダメージは無視できる。したがって、走行位置分布において ± 40 cm 以上のデータは、不用といえる。

表-7に、表-5の値と式 (2) より 1990年8月の供用開始から 1995年10月の測定時までの舗装構造毎の累積ダメージ (D<sub>a</sub>) を示す。

#### d) 構造健全度指数 (SPI)

構造健全度指数 (SPI) は、これまでに述べてきたようにアスファルト舗装に蓄積されるダメージの影響度を表す。すなわち、疲労破壊するまでのダメージの容量を示している。

表-7に舗装構造種類および調査実施年毎の SPI の計算結果を、図-9に累積等価複輪数 (N) との関係を示す。どの舗装構造においても相関係数は 0.9 以上を示し、式 (6) は SPI の評価モデル式として妥当であると言える。

$$SPI = EXP (A - B \times N) \quad (6)$$

MCI のパフォーマンスカーブから、修繕が必要となる MCI=4 の時の累積等価複輪数は、およそ 600 万～700 万輪と推定される。SPI のパフォーマンスカーブからは、ダメージの蓄積が大きいものでも舗装寿命の 51% 経過を示す SPI=4.9 と評価される舗装構造は、A、T1 の 2 構造である。したがって、舗装構造の改善を必要とする修繕ではなく路面の損傷状態の回復を目的とした修繕が妥当と評価できる。しかしこの修繕を繰り返す過程において、次回の修繕を要するまでの等価複輪数が残存寿命を越える場合は、今回の修繕において構造改善を考慮する必要がある。戦略的な修繕計画においては、MCI と SPI は対をなすものと言える。

#### 6. 補修、修繕行為への応用

総合的なサービス性能指数を考える上で、構成要素の客観的検証による重み付けが必要となる。しかし、サービス性能を構成する個々の要素の評価値化が研究過程であること、総合指標によるパフォーマンスを得るためには長期間の調査が必要なこと等から重み付けに関する研究例が少ない。

現時点ではアスファルト舗装に要求される機能に応じた、個別要素の限界値を考慮する必要がある。図-10は4項目の限界値について概念的に示したものである。

図-10に示すように、等価複輪数の増加に伴い、路面の損傷は増加し、同時に乗り心地や支持力、滑り抵抗も低下していく。しかし、4項目の特性から初期の段階では、構造改善をとまわらない路面の損傷や乗り心地の改善による維持・修繕が行われる。これらの維持修繕が繰り返され、やがてダメージが蓄積された舗装構造は支持力が低下し、疲労ひび割れを発生するようになる。従って、疲労ひび割れの発生とともに舗装構造の改善強化に

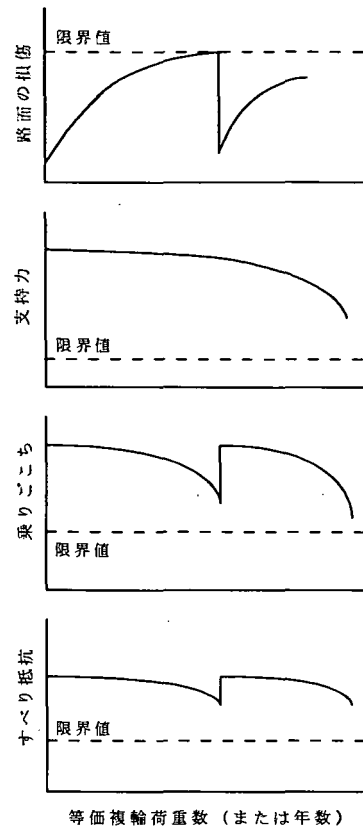


図-10 構成要素の限界値

よる修繕が行われる必要がある。この修繕が行われる時期は、路面の損傷や乗り心地、滑り抵抗など同時に限界値に達するとは限らないため、PMSでは最適化の作業により経済評価を行う。

舗装構造はその他の機能を支える基礎であり改善強化による修繕は、道路構築において最も多くの費用を要する。従って、長期の維持・修繕計画において、舗装構造の健全度は重要な要素である。

サービス性能の中の乗り心地や滑り抵抗においても、IRI,IFIのような国際的な共通指標の国内におけるパフォーマンスカーブが得られたならば、それぞれのパフォーマンスと限界値から総合的な修繕計画が可能となろう。

#### 7. 結論

美々新試験道路について、5年間の追跡調査の結果 (累積等価複輪数が約 6 5 1 万輪までの範囲) から得られた成果をまとめると、およそ次のようになる。

(1) 構造の異なる舗装について、各々相関係数が0.9以上の高い相関のあるMCIのパフォーマンスカーブを得ることができた。

(2) 舗装の支持力を表す指数として、アスファルト混合物層の疲労破壊回数と現時点までの累積等価複輪荷重から、構造健全度指数(SPI)を提案した。

(3) 舗装構造毎に構造健全度指数(SPI)のパフォーマンスカーブを得ることができ、それらを指数回帰した場合の相関係数は、いずれも0.9以上の値を得た。

(4) 構造健全度を考慮することにより、舗装の維持、修繕計画を合理的に立案することができる。

## 8. あとがき

PMSを稼働させるためには、アスファルト舗装の評価を的確に行えなければならない。この評価は、路面の損傷に代表される路面性状だけではなく、乗り心地や滑り抵抗のような舗装の機能も評価されなければならない。さらに、路面の状態からは推測し得ないアスファルト舗装の支持力の評価すなわち構造の面からの健全度も重要である。

この健全度を評価する方法として、舗装の寿命を本研究では取り上げたが、これまでの寿命予測の研究例では、アスファルト混合物層下面に生ずる最大ひずみから許容載荷回数を推定している例が多い。しかし実際にはそれよりも小さなひずみが、数多く繰り返されている。したがって、最大ひずみから疲労破壊寿命を予測し構造設計を行うと、過大設計となる可能性がある。

本研究におけるアスファルト舗装の寿命の予測は、走行位置の変動によるひずみの分布に着目しひずみレベル毎の疲労破壊回数を求め、さらにマイナー則を適用し累積ダメージから求めることを試みた。

アスファルト舗装のサービス性能のパフォーマンスは、総合的指標化が難しいばかりでなく、長期間の継続的な調査が必要なことから、我が国における研究例は少ない。このようなことから「美々新試験道路」の建設と調査結果は貴重である。

本研究では、一応の成果を得たものと判断しているが、未だ多くの検討事項を残している。

美々試験道路では、いずれの舗装構造においてもひび割れが発生していない。特に多層弾性理論設計によるT<sub>1</sub>,T<sub>2</sub>舗装構造においては、設計累計等価複輪数を越えても、疲労破壊が生じていない。これは、設計に用いた諸条件と本研究において行

った疲労解析での諸条件の相違によるものと言える。設計では、走行軌跡分布を考慮していないため、全ての走行車両が同一地点を走行するものとして設計累計等価複輪数を推定している。また、設計時に用いた弾性係数は、 $E_2=200\text{N/mm}^2$ 、 $E_3=80\text{N/mm}^2$ でありこれは試験舗装区間の築造前に同区間の既設舗装のFWD測定より求めている。

これに対し、表-4に示す本研究において推定した供用期間中の弾性係数は、 $E_2=260\sim 300\text{N/mm}^2$ と設計時のものより大きい。アスファルト混合物の弾性係数は設計において仮定した $3000\text{N/mm}^2$ に対し実測データから推定した弾性係数は $5100\text{N/mm}^2$ であった。これらの相違から、アスファルト混合物層下面に生ずる引っ張りひずみは、設計時においてT<sub>1</sub>舗装構造が $204\mu$ 、T<sub>2</sub>舗装構造が $240\mu$ 、供用時の推定弾性係数から求めるとT<sub>1</sub>舗装構造が $161\mu$ 、T<sub>2</sub>舗装構造が $137\mu$ と設計時の仮定値よりも小さい。これらのため、美々試験道路においては、疲労ひび割れが生じていないと考えられる。したがって、疲労解析を行う場合には、舗装構成層の弾性係数の推定や疲労曲線の選定が予測寿命に大きく影響することに注意しなければならない。

一般に疲労現象には固有のパラツキが存在し、疲労寿命は確率事象と言われている。アスファルト混合物の疲労曲線においても、疲労寿命の予測においても破壊確率を考慮しなければならない。

また、総合的評価指数を考慮する場合のSPIとMCI、IRI、IFIとの重み付け、それぞれの限界値の妥当性など、今後解決していかなければならない。

## 参考文献

- 1) Haas, R. and Hudson, W. R. : *Pavement Management Systems*, 1978.
- 2) Haas, R., Hudson, W. R. and Zaniewski, J. : *Modern Pavement Management*, 1994.
- 3) 菊川 滋 : 日本の道路網への舗装管理システム(PMS)の適用について, 道路, 昭和60年12月号, pp.64-69, 1985.
- 4) 笠原 篤 : 舗装マネジメントシステム, 土木学会論文集, No478/ V -21, pp.1-12, 1993.
- 5) (社)セメント協会 : AASHO 道路試験, 1966.
- 6) Cary, W.n. and Irich, P.E. : The Pavement Serviceability-Performance Concept, *HRB Bulletin*, No.250,1960.
- 7) Baladi, G.Y., Novak Jr, E.C and Kuo Wen-Huo, Pavement Condition Index-Remaining Service Life, *ASTM STP1121*, pp.63-90, 1992.
- 8) Papet, L.M. : Federal Highway Administration-Current PMS Requirements, *ASTM STP 1121*, pp.3-10, 1992.
- 9) 土構造物および基礎委員会 舗装機能の評価に関する

- る研究小委員会：舗装機能の評価技術の現状と将来，土木学会論文集，No472/ V -20, pp.13-28, 1993.
- 10) 飯島 尚，今井 博，猪俣和義：MCIによる舗装の供用性の評価，土木技術資料，23-11, pp.15-20, 1981.
- 11) 福手 勤：路面性状による空港舗装の供用性評価，港湾技術研究所資料，pp.20, No.414, 1982.
- 12) 笠原 篤，五十嵐光徳：舗装構造解析へのフォーリング・ウェイト・デフレクトメーターの利用，土木学会論文集，No.420/ V -13, pp.43-49, 1990.
- 13) Sayers, M.W., Gillespie, T.D. and Queiroz, C.A.V. : The International Road Poughness Experiment, *World Bank Technical Paper Number 45*, 1986.
- 14) International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements : *PIARC Technical Committee on Surface Characteristics C.1*. 1995.
- 15) Chen, X., Hudson, S. and Cumberledge, G.: Pavement Performance Modeling Program for Pennsylvania, *Transportation Research Record*, No.1508, pp.1-8, 1995.
- 16) Ishitani, M., Kameyama, S., Himeno, K. and Kasahara, A.: Maintenance and Rehabilitation Strategy at Network Level of Pavement Management Systems Using Genetic Algorithms, *Second International Conference on Road & Airfield Pavement Technology Vol2*, pp674-682, 1995.
- 17) 菊川滋，笠原篤：舗装マネジメントシステムにおけるデータベースの役割と支持力データの利用，道路，No.559, pp.53-58, 1987-09.
- 18) 笠原 篤：舗装における車両の車両通過位置分布に関する研究，第38回土木学会年次学術講演会概要集，V -239, pp.475-476, 1983.
- 19) Kasahara, A. : The Wheel Pass Distribution of Vehicles on Highway, *Proceedings of the International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Vol. 1, pp.413-420, 1982.
- 20) FWD 研究会：FWDに関する研究，1993.
- 21) Kasahara, A., Himeno, K., Kawamura, K and Nakagawa, S.: Performance of Asphalt Pavements at BIBI New Test Road in Japan Related to Their Bearing Capacity, *Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements*, Vol. 1, pp.106-123, 1992.
- 22) 中川伸一，島多昭典，小笠原章：美々新試験道路における構成厚の異なる舗装の長期パフォーマンス調査（中間報告），開発土木研究所月報，No.513, pp.25-39, 1996-02.
- 23) Himeno, K., Maruyama, T., Avc, N and Hayashi, M. : The Use of FWD Deflection Data in Mechanistic Analysis of Flexible Pavements, *Proceedings of the Third International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, pp.401, 1990
- 24) Per Ullidtz : *Pavement Analysis*, Elsevier Science Publishers B.V., 1987.

(1996. 6. 6 受付)

## PERFORMANCE OF ASPHALT PAVEMENTS AT BIBI NEW TEST ROAD

Masahiko ISHITANI, Shinichi NAKAGAWA, Morihito TAKAHASHI,

Akira OGASAWARA and Atsushi KASAHARA

This study describes a method to estimate the life of pavement. the method obtains the number at which fatigue failure of pavement occurs, from elasticity analyses based on deflection due to FWD and the theory of multi-layered systems and considers traveling track distributions. this study also proposes using the Structural Propriety Index (SPI) of pavement as a method to evaluate serviceability of pavement structures, i.e. the bearing capacity of pavement structures, and compares the results of research on the test road with MCI, then uses these results to examine the performance of pavement structures.