

◆特集：道路構造物の性能評価技術◆

# FWDによる舗装の疲労破壊輪数の評価法

坂本康文\* 寺田 剛\*\* 久保和幸\*\*\*

## 1. はじめに

平成13年に国土交通省より「舗装の構造に関する技術基準」(以下、技術基準)が通達され、車道および側帯の舗装が備えるべき6つの性能指標が示された。しかし、それらの指標の値の確認方法については、基本的な考え方のみ示されており、具体的な方法については明記されていない。

そこで、技術基準の円滑な運用を支援し、より一層性能規定化を推進することを目的として、土木研究所が中心となって技術基準に示された6つの性能指標の評価法について検討を行った。その成果は、平成18年1月に発刊された「舗装性能評価法—必須および主要な性能指標の評価法編—、(社)日本道路協会」<sup>1)</sup>に反映されている。

本報は、以上の検討成果のうち、舗装の構造を設計する上で重要な鍵となる、舗装がどの程度の交通荷重の繰返しに耐え得るかを表す「疲労破壊輪数」の評価法について、その背景も含めて検討の概要を取りまとめ報告するものである。

## 2. 検討の背景と目的

### 2.1 疲労破壊輪数の定義

技術基準では、疲労破壊輪数の定義を『舗装道において、舗装路面に49キロニュートンの輪荷重を繰返し加えた場合に、舗装にひび割れが生じるまでに要する回数で、舗装を構成する層の数並びに各層の厚さ及び材質(以下、舗装構成)が同一である区間ごとに定められたものをいう。』としている。すなわち、舗装構造全体の繰返し荷重に対する耐荷力を表す指標が疲労破壊輪数である。なお、この場合のひび割れは、舗装の下面から上方に発達する疲労破壊によるものとしており、表層材料の劣化等により路面から発生するひび割れとは概念上区別している。

### 2.2 疲労破壊輪数の評価法の現状

舗装における性能評価法の枠組みを整理すると表-1のようになる<sup>1)</sup>。「舗装の構造に関する技術基準・同解説」(以下、技術基準・同解説)によ

表-1 舗装における性能評価法の枠組み<sup>1)</sup>

指標 対象	性能指標 [直接計測]	性能指標以外の指標 [間接計測]
舗装 (現地) [直接評価]	(a) 現地において当該舗装の性能指標の値を測定して評価	(c) 現地において当該舗装の性能指標と関連付けられる指標の値を測定し、その結果に基づき当該舗装の性能指標の値を算出して評価
供試体 [間接評価]	(b) 当該舗装を代替可能である供試体において当該舗装の性能指標の値を測定して評価	(d) 当該舗装を代替可能である供試体において当該舗装の性能指標と関連付けられる指標の値を測定し、その結果に基づき当該舗装の性能指標の値を数値化して評価

れば、表中 (a) の直接現地で性能指標を確認することが測定方法の本質であるとしている。

疲労破壊輪数における (a) の方法としては、促進載荷装置による繰返し載荷試験があるが、試験装置が我が国に導入されていないこと、実際に試験を行うと破壊検査となってしまうことなどから、現実的な評価法とは言い難い。

(b) の方法には、促進載荷装置を用いた室内試験、土木研究所の舗装走行実験場における荷重車による促進載荷試験等があるが、試験装置の数量や試験機関等に制約があり、誰もが任意の時に使用できるわけではない。ただし、技術基準では、過去の実績からみて疲労破壊輪数が確認されている場合は、その値を疲労破壊輪数とすることができるとしており、それに適合するアスファルト舗装を別表-1、コンクリート舗装を別表-2としてその仕様を示している。

以上のように (a) と (b) の方法は、性能指標の値を直接的に計測して確認する方法であるが、汎用性の面で課題が残されている。

### 2.3 FWDによる評価法の現状

FWD (Falling Weight Deflectometer : 重錘落下式たわみ測定装置) は、舗装に動的な衝撃荷重を作用させたときの応答たわみを計測する装置

Evaluation Method for Numbers of Wheel Passes Causing Fatigue of Pavements Using FWD

であり、その構成は図-1のようになっている。複数点のたわみ量を同時に測定できることから、たわみ量と併せてたわみの形状も分かるため、多層弾性解析等と組み合わせることで、舗装の健全度だけでなく舗装を構成する各層の状態を推定することもできる。その概念は図-2に示すとおりである。

これまでに運用されているFWDによる舗装の構造評価では、たわみ指標と評価特性に表-2に示すような関係があるとされている。たわみ指標の中でも、舗装の健全度評価には $D_0$ （載荷板中心のたわみ量）が用いられており、供用中の舗装の許容限界たわみ量 $D_0$ を設定し、それを越えた舗装は構造的にみて維持修繕が必要と判断される。しかし、新設時の舗装を対象とした評価法ではない。

そこで、前述の現地で性能指標以外の指標を間接計測して確認する方法（表-1における（c）の方法）としてFWDに着目し、施工直後の舗装路面のたわみ量から当該舗装の疲労破壊輪数を推定する方法について検討を行った。

### 3. 検討の概要

#### 3.1 検討方法

本検討の流れを図-3に示す。

まず、舗装の疲労破壊の定義を整理し、次に、アスファルト混合物層（以下、アスコン層）の特性を同一の温度条件下で評価するために、アスコン層の平均温度の算出方法を検討した。疲労破壊が定義され、アスコン層平均温度の算出方法も定まった後に、実道の供用性調査データを用いた検討を行い、評価法と適用範囲を取りまとめるとともに、残された課題の整理を行った。供用データは、これまでに国土交通省が主体となって調査している路面のたわみ量、損傷度合い（ひび割れの程度）および交通量に関する経年データを用いた。

#### 3.2 検討結果

##### 3.2.1 舗装の疲労破壊の定義

前述のように、技術基準では舗装の疲労破壊輪数を「舗装にひび割れが生じるまでに要する回数」と定義しているが、疲労破壊の定量的な定義は定められていない。そこで、本検討では技術基準・同解説に示されている考え方にに基づき、以下の事項を基本として舗装の疲労破壊を定義することとした。

①舗装は、交通荷重が繰返し載荷されることによって、舗装の下面から上方に向かってひび割れが発生する。

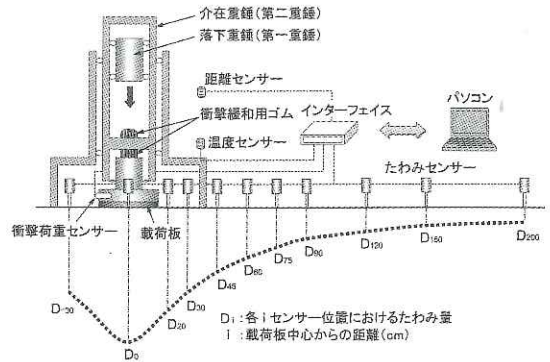


図-1 FWDの構成例（土研所有のFWD）

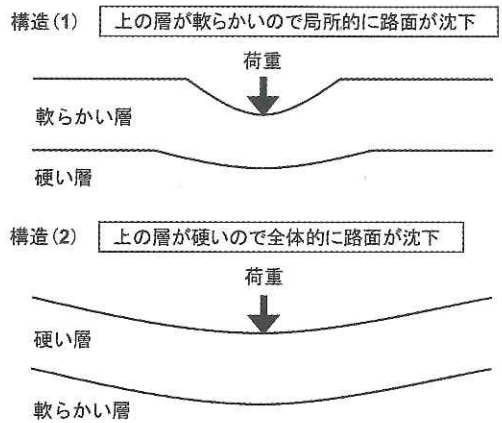


図-2 たわみ量と形状による舗装構造評価の概念

表-2 FWDのたわみ指標とその特性

たわみ指標*	評価特性
$D_0$	路床を含む舗装全体の支持力を評価
$D_{150}$	路床の支持力を評価
$D_0 - D_{150}$	路床面より上の舗装の特性を評価
$D_0 - D_{20}$	アスファルト混合物層の特性を評価

\* $D_i$  ( $i = 0, 20, 150$ ) は載荷板中心から $i$  cm離れた位置のたわみ量を指す

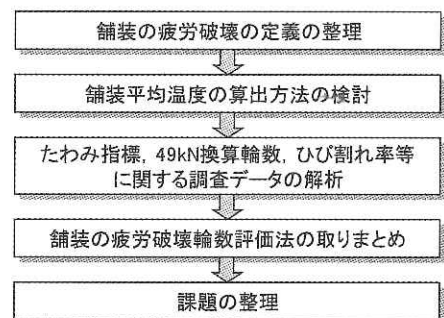


図-3 本検討の流れ

②アスファルト舗装の疲労破壊によるひび割れは、最初に車両走行部（わだち部）の縦方向に線状に発生する。

③表層材料の劣化等により路面から発生するひび割れとは区別される。

すなわち、疲労破壊輪数で想定している舗装のひび割れは、疲労によるひび割れが車両走行部に1本発生した時であり、全線にわたり均等につながっている状態と捉えることが妥当と考えられる。全延長にわたり車両走行部に1本のひび割れが生じた状態のひび割れ率を算出すると約20%となる。ひび割れ率20%のイメージを図-4に示す。

以上のことから、本検討におけるアスファルト舗装の疲労破壊は、ひび割れ率が20%に達した時点であるとした。

### 3.2.2 アスコン層平均温度の算出方法の検討

アスファルト舗装のたわみ量は、アスファルト混合物のスティフネス（剛性）が温度依存性を有するために、アスコン層の温度に大きく影響される。しかし、アスコン層内部の温度は、図-5のように時々刻々と変化するため、アスコン層の温度を規定しないとその物性も決まらない。したがって、アスファルト舗装のたわみ量を適切に評価するためには、アスコン層の平均温度を的確に算定することが求められる。

アスコン層の平均温度を気温や路面温度等から推定する方法は幾つか提案されているが、それらの方法を並列で比較したことはなく、実際にどの方法を使うかは道路管理者に任されている。

そこで、平均温度算出方法の標準化を目的として、現在活用されている方法について、直轄国道における実測値を使った比較を行った。

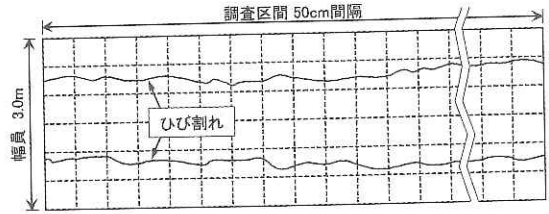
#### (1) 比較に用いる代表温度の検討

一般に、アスコン層内の温度分布を積分平均したものを平均温度としているが、これ以外に、各深さにおける測定値を平均する方法、深さ方向の中間部の温度を平均温度とする方法がある。ここでは、これらの方法がどのような関係にあるかを把握するために、土木研究所内の舗装走行実験場で測定したデータを用いて比較・検討を行った。結果を図-6に示す。

いずれの方法でも良好な相関関係が得られており、ここで示したいずれかの方法で求めたアスコン層の平均温度を代表温度とし、これを基準として推定温度と比較することとした。

#### (2) アスコン層平均温度の推定方法の検討

表-3に示す4通りの方法について、直轄国道を対象としたモニター調査での実測データと比較し



$$\text{ひび割れ率(\%)} = \frac{\text{ひび割れ(升目)面積の和} + \text{パッチング面積}}{\text{調査対象区間面積}} \times 100$$

図-4 ひび割れ率20%のイメージ

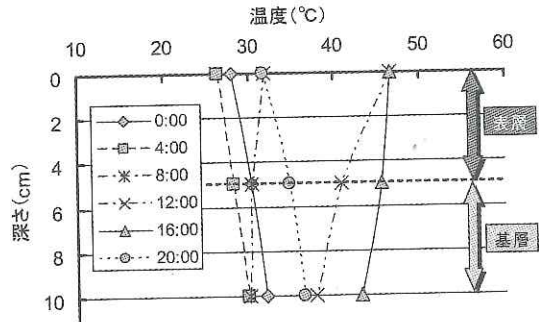


図-5 アスコン層の内部温度(例)

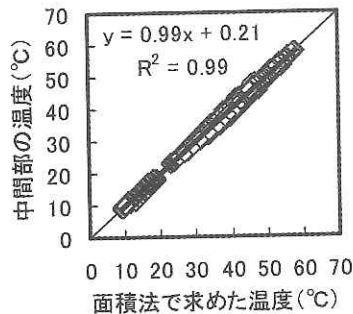


図-6 算出方法と平均温度の関係の一例

表-3 アスコン層平均温度の推定方法

方法名	平均温度の推定に必要な情報	備考
BELLS法 <sup>5)</sup>	測定時刻、測定前日の平均気温、測定時の路面温度、求める深さ	アメリカ
A法 <sup>2)</sup>	測定時期、測定時刻、測定時の1時間前の気温、測定時の気温、測定時の路面温度、アスコン層の厚さ	日本
B法 <sup>3)</sup>	測定時刻、測定時の路面温度、求める深さ	日本
C法 <sup>4)</sup>	測定時期、測定時刻、測定時の気温、測定時の路面温度、アスコン層の厚さ	日本

た。使用したデータは、青森、茨城、埼玉、広島の4箇所である。4つの方法のうちのA法<sup>2)</sup>、B法<sup>3)</sup>、

C法<sup>4)</sup>の3つは我が国で開発・提案されているものであり、BELLS法<sup>5)</sup>はアメリカのSHRP (Strategic Highway Research Program: 戦略的道路研究計画)の成果として提案されているものである。比較結果を図-7に示す。

代表温度との一致度が高く、相関式の勾配が1に近い推定方法はA法である。よって、FWDを用いた疲労破壊輪数の評価法におけるアスコン層の平均温度の推定には当該方法を適用することとした。推定式のモデルは次のとおりである。

$$y_{Tave} = ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 + e \quad (1)$$

ここに、 $y_{Tave}$ : アスコン層の平均温度 (°C)

$x_1$ : 測定時の路面温度 (°C)

$x_2$ : 測定時の気温 (°C)

$x_3$ : FWD測定時の気温-1時間前の気温 (°C)

$x_4$ : アスファルト混合物層の厚さ (cm)

$a, b, c, d, e$ : 係数

なお、たわみ量の温度補正には、「FWD運用マニュアル (案)」の方法を用いる。

### 3.2.3 たわみ量やひび割れ率等に関する調査データの解析

本解析には、昭和63年から全国の直轄国道28箇所を対象として行っている「新基準調査」等のデータを使用した。新基準調査は、初期調査、路面調査、環境調査、交通調査、維持調査、修繕調査で構成されており、表-4にその概要を示す。

#### (1) FWDたわみ量 (D<sub>0</sub>) の経時変化

調査路線における累積49kN換算輪数とD<sub>0</sub>たわみ、ひび割れ率の関係の代表的な例を図-8に示す。D<sub>0</sub>たわみの回帰式によれば、供用とともにたわみ量は小さくなるが、ひび割れ率が20%程度に達したあたりからたわみ量が大きくなっている。既往の研究<sup>6)</sup>でも、供用中の路面のたわみ量は疲労破壊に至る直前から大きくなる傾向が認められている。したがって、供用中のD<sub>0</sub>で疲労破壊輪数を評価すると誤った判断を下す可能性があることから、施工後の早い段階でのD<sub>0</sub>を評価指標として、以降の検討を行うこととした。

#### (2) 疲労によるひび割れの判断

疲労破壊の定義では、ひび割れはアスコン層下面から上方に向かって入るものとしている。そこで、本検討では調査対象箇所のひび割れ部からコアを採取してひび割れの状態の確認を行い、下面からひび割れが入った箇所のデータだけを評価法の検討に用いることとした。ひび割れ部から採取したコアの代表的なものを写真-1に示す。

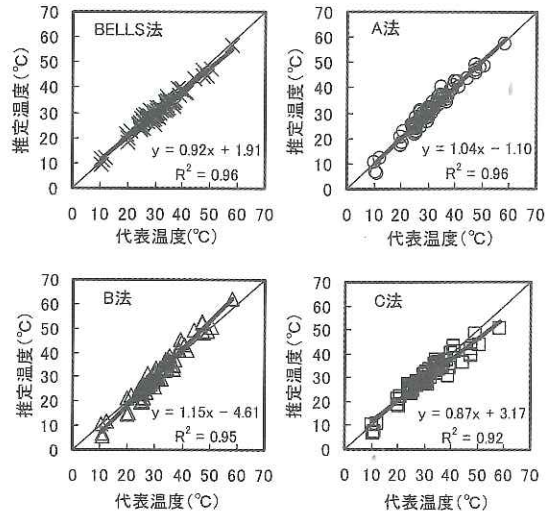


図-7 推定温度算出方法の比較結果の一例

表-4 新基準調査の概要

調査項目	調査内容
初期調査	地先名、路線名や距離標等の一般的なデータ、試験舗装地点の車線数、幅員等の道路構造データ、舗装を構成する各層の材料や厚さを示す舗装構造データ、各材料の特性値を示す材料特性データ
路面調査	ひび割れ、平坦性、わだち掘れ、すべり抵抗等の路面性状やたわみ量等について、交通に供用されることによる変化を定期的 (毎年9~11月を目標) に観測する。
環境調査	気温や降水量等の現場の気象条件を示すデータを収集する。
交通調査	交通量や車両重量を調査する。
維持調査	維持作業の方法、規模、使用材料、施工費等のデータを収集する。
修繕調査	修繕作業の方法、規模、使用材料、施工費等のデータを収集する。

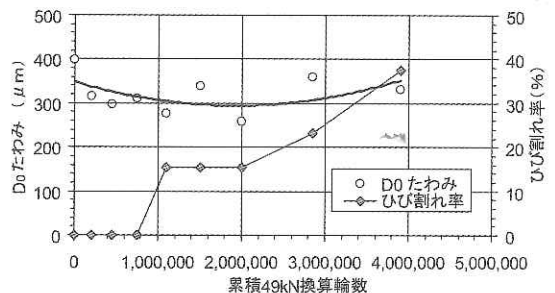


図-8 累積49kN換算輪数とD<sub>0</sub>、ひび割れ率の関係 (例)

#### (3) 疲労破壊輪数の推定式の検討

評価法を取りまとめるにあたり、以下の考え方

に基づいて調査データを整理した。

- ①直轄国道のデータだけでは交通量に偏りが生じるため、新基準調査のデータに東京都の市道における調査データを加えたものを用いる。
- ②累積49kN換算輪数は、各調査年の軸重調査データから49kN換算した年ごとの累積輪数を供用年まで逐次累積したものを用いる。
- ③たわみ量は、ひび割れ率20%以上となった路線を抽出し、その路線の施工直後の実測たわみ(D<sub>0</sub>)を用いる。
- ④ひび割れ率20%の時の累積49kN換算輪数は、ひび割れ率が20%を超える前後の累積49kN換算輪数から補間して求める。

以上の考えに基づいて整理した累積49kN換算輪数とたわみ量の関係は図-9のとおりであり、(2)式のような相関式が得られた。なお、参考までにアスコン層上面からひび割れが入っている箇所のデータも図中に併記した。

$$D_0 = 5900 \times N^{-0.193} \quad (2)$$

ここに、

D<sub>0</sub>: FWDによる載荷板中心のたわみ量(μm)

N: 累積49kN換算輪数(疲労破壊輪数)

(2)式を疲労破壊輪数を求める式に変換すると、

$$N = \left[ \frac{5900}{D_0} \right]^{5.18} \quad (3)$$

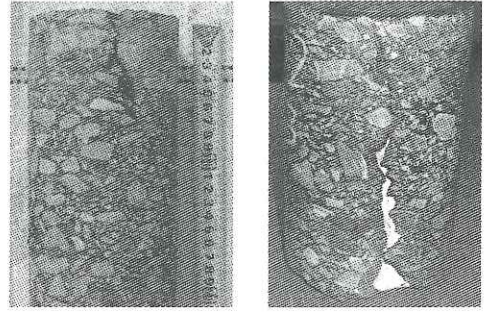
となり、(3)式を用いることで、施工直後のたわみ量D<sub>0</sub>から舗装体の疲労破壊輪数を推定できることになる。

(4) 推定式の感度分析

(3)式の感度分析のために、これまでに都道府県・市町村道で施工直後に測定したFWDのたわみデータを収集した。結果を図-10に示す。総データ数は1,014個であり、交通量別に推定式を下回るデータの割合(交通量に応じた所定の疲労破壊輪数を有すると判断される舗装の割合)等を求めたものを表-5に示す。

これらの舗装の供用に伴う経年履歴については不明であるが、所定の疲労破壊輪数を有すると判断される舗装は、旧L、A交通の舗装では少ないものの、旧B、C、D交通の舗装では6~8割が該当している。また、図-10の中に1,014個のデータの回帰曲線を破線で併記したが、推定式よりも若干下側にはあるがほぼ同等の結果が得られている。

したがって、今回の推定式は、交通量の少ない道路舗装への適用には注意を要するが、それ以外



(a) 表面からのひび割れ (b) 下面からのひび割れ

写真-1 ひび割れ部から採取したコアの例

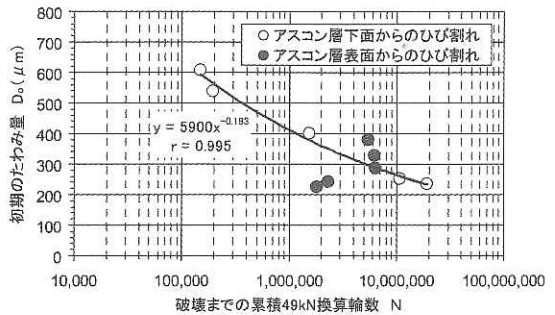


図-9 たわみ量D<sub>0</sub>と累積49kN換算輪数の関係

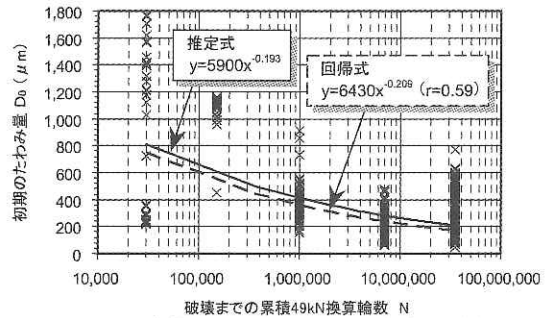


図-10 収集した測定データと推定式の関係

表-5 推定式の感度分析結果

旧交通量区分	推定式を下回った個数(割合)	全体数	たわみ(μm)	
			平均値	標準偏差
L交通	13 (40.6%)	32	991	608
A交通	2 (6.3%)	32	1,056	165
B交通	56 (62.9%)	89	385	124
C交通	369 (86.6%)	426	212	71
D交通	255 (58.6%)	435	221	125
計	695 (68.5%)	1,014	-	-

の道路舗装には十分適用できるものと考えられる。

3.2.4 推定式の適用範囲と課題の整理

(1) 推定式の適用範囲

設計方法を問わずあらゆる舗装に今回の推定式を適用できることが理想ではあるが、経験に基づくTA法(アスコン層に対する相対強度[等値換算係数]で表された材料定数を用いて、所定のアスファルト混合物換算厚さ[TA]を満たすような舗装構造とする設計法)で設計された舗装については、すでに多くの施工実績を有し、その耐久性が経験的に認められていることから、技術基準において所要の疲労破壊輪数を有するとされている。したがって、当該推定式は、TA法以外の方法で設計された舗装に適用することが妥当と考える。もう少し踏み込んだ表現に言い換えると、本評価法適用時の良否判定における混乱を避けるために、材料定数が不明でTA法では評価できない舗装に適用することが望ましい。

評価対象については、今回の検討に用いたデータがすべてアスファルト舗装であることから、評価対象はアスファルト舗装に限定して適用することになる。

また、今回のデータが供用10数年程度までのものであることから、適用できる累積49kN換算輪数の上限値を3,500万輪に設定することが適切であると考えられる。

ひび割れ率も20%を対象としたものであり、それ以外への適用については別途検討が必要である。

#### (2) 残された課題

以上のように、今回の推定式を適用できる範囲には限界がある。今後、適用範囲拡充に向けて次のような調査・検討を行い、評価法においても信頼性の考え方を導入する必要があるものと考えられる。

- ①直轄国道以外の舗装(特に軽交通道路の舗装)のデータ収集
  - ②舗装路面調査(たわみ量、ひび割れ、交通量等の調査)の継続
  - ③TA法以外で設計された舗装のデータ収集
  - ④コンクリート舗装の疲労破壊に関する調査・検討
- また、今回の推定式は新設時の舗装を評価する

ものであるが、道路構造物の更新時代であることを鑑みると、舗装補修のための評価法の高度化に向けた調査・検討も推進しなければならない。

#### 4. おわりに

今回の検討により、適用範囲に限りはあるものの、新設時のアスファルト舗装の疲労破壊輪数を簡易に評価できる方法が提案できた。これによって、長期間の調査を行わなくても、材料定数が不明な材料を用いた舗装の構造評価が可能となる。ただし、そのような場合であっても、これまでの経験を踏まえた技術的判断は不可欠である。

本評価法を適切に運用することで、新材料・新工法等の開発・活用がこれまで以上に積極的かつ効果的に行われることを期待したい。

#### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：舗装性能評価法, 2006.1
- 2) 林 信也、東 滋夫、金井利浩、岡部俊幸：FWD試験における測定たわみの温度補正システムの開発、土木学会舗装工学論文集 第2巻, pp.95-104, 1997.12
- 3) 近藤佳宏、三浦裕二：アスファルト舗装体内温度の推定に関する研究、土木学会論文報告集 第250号, pp.123-132, 1976.6
- 4) 雑賀義夫、阿部長門、姫野賢治、丸山暉彦：FWDから得られる特性値の温度補正に関する検討、舗装, pp.10-15, 1995.8
- 5) Federal Highway Administration (US): "Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement", Publication No. FHWA-RD-98-085, 2000
- 6) Lister, N.W., Kennedy, C.K. and Ferne, B.W.: The TRRL Method for Planning and Design of Structural Maintenance, Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp.709-725, 1982.

坂本康文\*



独立行政法人土木研究所つくば  
中央研究所道路技術研究グループ  
舗装チーム主任研究員  
Yasufumi SAKAMOTO

寺田 剛\*\*



独立行政法人土木研究所つくば  
中央研究所道路技術研究グループ  
舗装チーム主任研究員  
Masaru TERADA

久保和幸\*\*\*



独立行政法人土木研究所つくば  
中央研究所道路技術研究グループ  
舗装チーム上席研究員  
Kazuyuki KUBO