

◆ 報 文 ◆

舗装の理論的設計体系の構築に向けて

坂本康文* 久保和幸**

1. はじめに

設計に係わる国際技術標準への対応と、国内の各技術標準間の整合性を確保するため、平成14年に「土木・建築にかかる設計の基本¹⁾」(以下、設計の基本)が策定された。この設計の基本は、土木・建築に係わる技術標準を作成するためのガイドラインとなる包括設計コードを示したものであり、要求性能に基づいた設計を基本とし、その性能を満たすことの検証法は信頼性設計の考え方を基礎とすることが記されている。今後、国土交通省が所掌する設計に係わる技術標準(設計コード)については、この設計の基本の考え方に沿った整備・改訂が求められる。

一方、舗装に関しては、平成13年に「舗装の構造に関する技術基準²⁾」(以下、舗装技術基準)が国土交通省道路局長等から通達され、車道および側帯の舗装が備えるべき必須の性能指標とその値等が示された。これによって、舗装の性能規定化が正式に定められ、新技術の開発促進やコスト縮減に向けた動きが活発になっている。舗装の設計法についても、これまでの経験に基づいた設計法から、適材適所での自由でかつ合理的な理論的設計法へ移行すべく検討が進められている。

本稿では、舗装の設計法の現状³⁾等に加えて、(独)土木研究所ならびに(社)日本道路協会が中心となって行っている、舗装の理論的設計体系の構築に向けた調査研究の動向と成果について報告する。

2. 現行の舗装設計法

2.1 経験的設計法

舗装技術基準では、性能規定を基本としているものの、従来の経験に基づいた仕様設計(以下、経験的設計法)も認めている。経験的設計法においては、アスファルト混合物層に対する相対強度で表された材料定数(等値換算係数)を用い、所

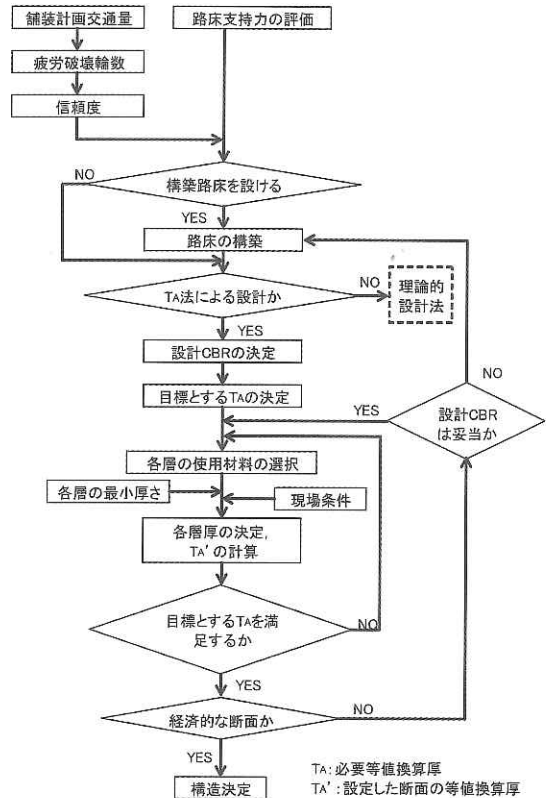


図-1 舗装構造の経験的設計法の概略の流れ (筆者加筆修正)⁴⁾

定のアスファルト混合物換算厚(TA)を満たすような舗装構造となるよう設計する。図-1⁴⁾に舗装構造の経験的設計法の概略の流れを示す。

経験的設計法は、我が国のほとんどの道路舗装に適用されており、施工実績はもとより供用データも豊富である。また、耐用年数の実態調査から、経験的設計法で設計された舗装の信頼度が算定され、信頼性を考慮した設計(部分安全係数を用いた設計法で、信頼性設計においていわゆるレベルIに相当するもの⁵⁾)も可能となっている。

しかし、経験則によって定数の値が定められている材料以外の使用は困難であり、新技術や新工法の導入を阻害してきたことも事実である。

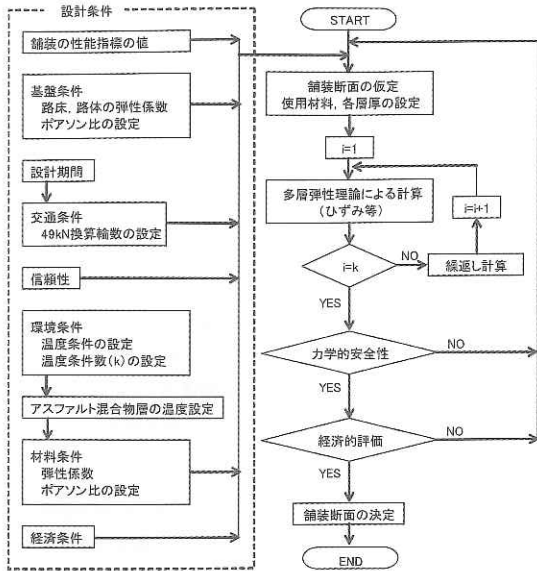


図-2 舗装構造の理論的設計法の概略の流れ⁴⁾

2.2 理論的設計法

理論的設計法は、材料特性を弾性係数等で表し、交通荷重に対する舗装の挙動の力学的解析から得られる応力やひずみを破壊規準に照らして、舗装構造を決定するものである。破壊規準に経験的な供用性と関係付けたものを適用することから、力学的経験的設計法とも呼ばれている⁶⁾。図-2⁴⁾に舗装構造の理論的設計法の概略の流れを示す。

力学的解析としては、多層弾性理論によるものが一般的であり、ほぼ確立された解析手法としてコンピュータプログラムも公開されている⁷⁾。一方、経験的な破壊規準については、我が国独自のものはなく、海外の研究成果（例えば、米国アスファルト協会の式⁸⁾（以下、AI式）を準用するしかないことから、理論的設計法への移行が停滞している。

そこで、理論的設計法へ移行するための第一ステップとして、経験的設計法で設計された舗装と等価な舗装が理論的設計法で行えるよう、従来の我が国の舗装に適合した破壊規準を検討した。また、理論設計の高度化のあり方やそれに向けた課題についても整理した。

3. 従来の舗装の破壊規準の検討

舗装の破壊規準は、アスファルト混合物層の疲労ひび割れによる構造的な破壊と、路床を含めた舗装各層の圧縮変形が累積して路面

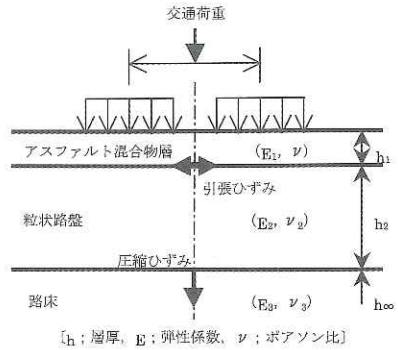


図-3 舗装構造の解析モデルの例

に現れる永久変形に分けられる。本検討では、この両者の破壊規準について検討した。参考までに、図-3に舗装構造の解析モデルの例（複輪荷重の例）を示す。

3.1 暫定破壊規準の設定

経験的設計法で設計された舗装断面をベースに、いくつかの仮定の下で理論的な解析を行い、AI式を修正するといった手法で、暫定破壊規準を検討した。具体的な検討の流れを以下に示す。

- ①経験的設計法で設計された舗装は、所要の疲労破壊抵抗性を有するものとみなす。
- ②舗装の破壊の状態を次のように仮定した。
 - ・アスファルト混合物層下面で発生し上方へ進行するひび割れの割合が20%を超えた場合をアスファルト混合物層の構造的な破壊とする。
 - ・路床を含む舗装各層の圧縮変形の累積により路面に現れた永久変形量が15mmを超えた場合を路床の永久変形による破壊とする。
- ③アスファルト混合物層の暫定破壊規準は、アスファルト混合物層下面の引張ひずみと経験的設計法により定まる許容通過輪数の関係から求める。

表-1 路床条件、材料条件および温度条件

年平均気温 (°C)	年平均舗装温度 (°C)	弾性係数 (MPa)				ポアソン比
		表層・基層	加熱アスファルト安定処理	粒度調整砕石	クラッシュラン	
7	10	9,000	6,000	300	200	10CBR
10	15	7,000	5,000			
15	20	5,000	3,500			
18	25	3,500	2,500			
23	30	2,500	2,000			

舗装各層: 0.35
路床: 0.4

- ④路床の暫定破壊規準は、路床上面の圧縮ひずみと経験的設計法により定まる許容通過輪数の関係から求める。
- ⑤理論的設計法に用いる特性値は、ばらつきを考慮した各々のモデルが確立されていないため、すべて平均値を用いることとし、上記③、④に用いる経験的設計法の信頼度は50%とする。
- ⑥路床条件、材料条件および温度条件は、これまでの調査・研究成果^{9)~12)}から、表-1のように設定した。

3.1.1 アスファルト混合物層の暫定破壊規準

上記のような条件で検討した結果、アスファルト混合物層下面の引張ひずみと経験的設計法により定まる許容通過輪数の関係は、(1)式のようになった。これをAI式をベースとした形に修正すると(2)式のようになる。

$$N_{fa} = 3.225 \times (C) \times (\epsilon_z^{-4.326} \cdot E^{-2.577}) \quad (1)$$

$$N_{fa} = \beta_{a1} \times (C) \times (6.167 \times 10^{-5} \cdot \epsilon_z^{-3.291\beta_{a2}} \cdot E^{-0.854\beta_{a3}}) \quad (2)$$

ここに、 N_{fa} ：許容49kN輪数

C ：アスファルト混合物層の最下層に使用する混合物の容積特性に関するパラメータ

$$C = 10^M$$

$$M = 4.89 \times \left(\frac{VFA}{100} - 0.69 \right)$$

VFA：飽和度 (%)

ϵ_z ：アスファルト混合物層下面の引張ひずみ (μ)

E ：アスファルト混合物層の最下層に使用する混合物の弾性係数 (MPa)

$\beta_{a1}, \beta_{a2}, \beta_{a3}$ ：我が国の経験に基づくAI式に対する補正係数 (図-4)

$$\beta_{a1} = K_a \times \beta_{a1}'$$

K_a ：ひび割れ伝播速度による補正係数

$$\beta_{a1}' = 5.229 \times 10^4$$

$$\beta_{a2} = 1.314$$

$$\beta_{a3} = 3.018$$

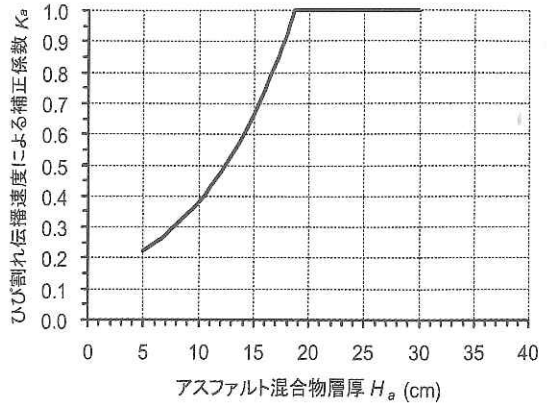


図-4 ひび割れ伝播速度の補正係数

(2)式を用いて既存の供用データのひび割れ率と疲労度の関係を求めたところ、一般に破壊の基準とされる疲労度1におけるひび割れ率は約20%であることが確認された。

3.1.2 路床の暫定破壊規準

アスファルト混合物層と同様、前述のような条件で検討した結果、路床の圧縮ひずみと経験的設計法により定まる許容通過輪数の関係は、(3)式のようになった。

$$N_{fs} = \beta_{s1} \times (1.365 \times 10^{-9} \cdot \epsilon_z^{-4.477\beta_{s2}}) \quad (3)$$

ここに、 N_{fs} ：許容49kN輪数

ϵ_z ：路床上面の圧縮ひずみ (μ)

β_{s1}, β_{s2} ：我が国の経験に基づくAI式に対する補正係数

$$\beta_{s1} = 2.134 \times 10^3$$

$$\beta_{s2} = 0.819$$

今回得られた(3)式は、補正係数を乗じてはいるものの、算出される結果はAI式とよく近似している。

3.2 実大舗装による理論解析結果の検証

理論解析の結果を検証するために、土木研究所舗装走行実験場内に試験舗装を構築し、舗装内部のひずみや応力等を計測した¹³⁾。試験舗装の概要を図-5に示す。

3.2.1 計測および解析方法

ひずみ計等の計測は、FWD (Falling Weight Deflectometer) による49kN載荷時の動的データとし、FWDのたわみ量についても、逆解析時の初期入力値の影響を考慮し、動的な時系列データ

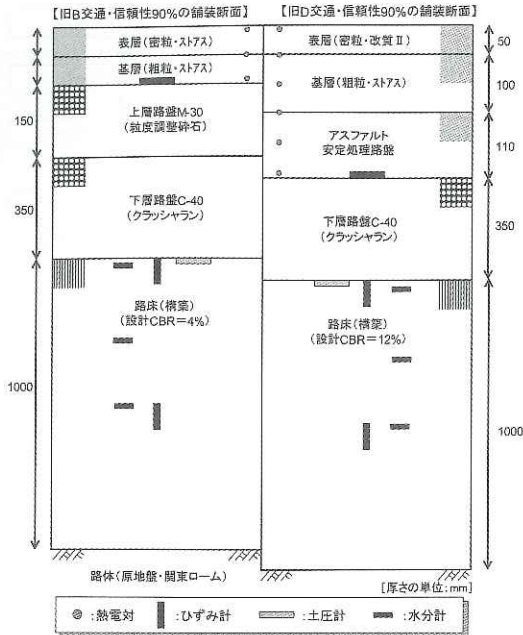
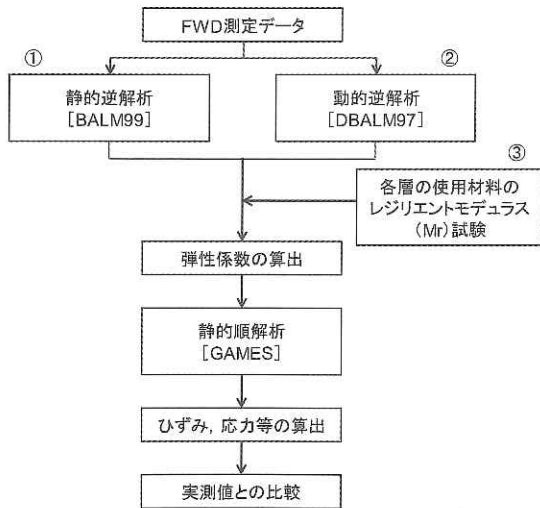


図-5 試験舗装の概要



※ 静的：荷重、たわみデータのピーク値を使用した解析
動的：時系列データを使用した解析

図-6 試験舗装データの解析の流れ

を収集した。荷重は、荷重車走行の開始前とし、オフセット荷重での挙動も把握するために、計器埋設位置の直上から延長方向に2m離れた地点まで50cm間隔で行った。

解析は、図-6に示すような方法で行った。ひずみの算出には順解析の多層弾性解析プログラム“GAMES (静的)¹⁴⁾”に加えて、逆解析用の多層弾性解析プログラム“BALM99 (静的)¹⁵⁾”お

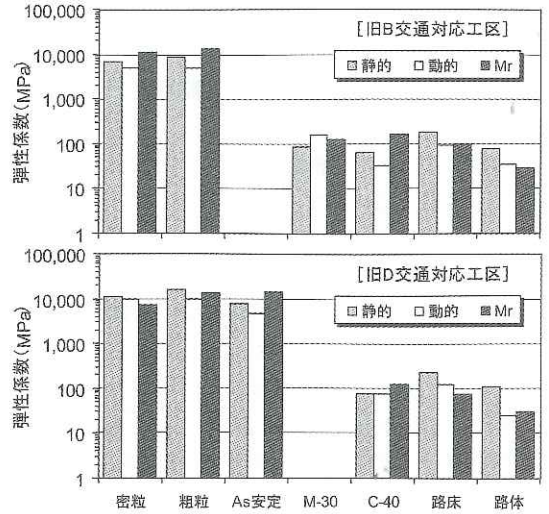


図-7 算出方法の違いによる弾性係数の比較

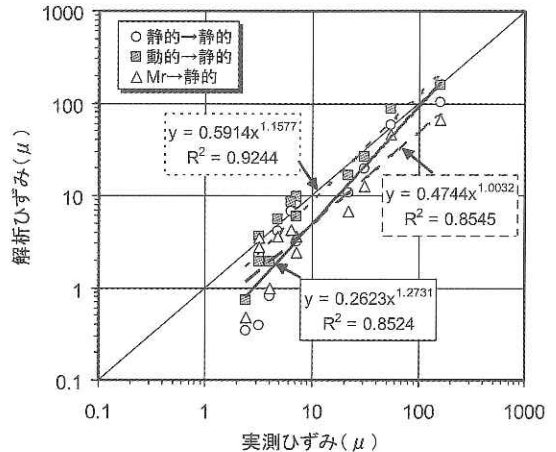


図-8 アスファルト混合物層下面における引張ひずみの実測値と解析値の比較

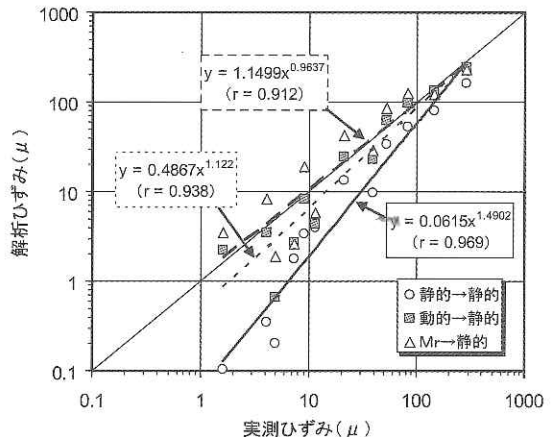


図-9 路床上面における圧縮ひずみの実測値と解析値の比較

よび“DBALM97 (動的)¹⁶⁾”を用いた。レジリエントモデュラス (Mr) 試験は、室内試験から得られる各材料の弾性係数を比較対象とするために行った。

3.2.2 計測および解析結果

(1) 弾性係数について

図-6中の①～③に示す3通りの方法により得られた弾性係数を図-7に示す。材料によって若干の違いはあるが、いずれの材料もほぼ同等と考えられるレベルの結果が得られている。

(2) アスファルト混合物層下面の引張ひずみ

アスファルト混合物層の下面に生じる水平方向の引張ひずみの実測値と解析値の関係を図-8に示す。解析値は、(1)で示した3通りの方法で求めた弾性係数を用いて、それぞれの方法ごとに静的順解析を行い、計器埋設位置のひずみ等を算出した。また、ひずみの最大値は、計器直上で載荷した場合の値であり、それ以外はオフセット載荷時の値で、小さくなるほど計器埋設位置から離れた箇所で載荷した場合の値となっている。

解析方法により若干の違いはあるが、実測値と解析値はほぼ一致している。

(3) 路床上面の圧縮ひずみ

路床上面に生じる鉛直方向の圧縮ひずみの実測値と解析値の関係を図-9に示す。解析値の算出方法は上記(2)と同様である。

ひずみの小さいところではばらつきは見られるが、舗装構造解析に使用するレベルのひずみはほぼ一致している。

3.2.3 実大実験のまとめ

本実大実験により、実際の舗装でも理論解析で得られた数値と同等のひずみや応力が生じていることが確認できたことから、理論解析によって求めたひずみ等の妥当性が検証できたものとする。

なお、今回の検討では、現段階で確立されたと認められている解析手法(静的順解析、静的逆解析、動的逆解析)を用いたが、動的順解析手法については別途研究が進められており、動的順解析においても、実測値と解析値に良好な一致が確認されている¹⁷⁾。

4. 理論的設計の高度化へ向けた課題

「土木・建築にかかる設計の基本」において信頼性設計が推奨され、舗装の構造設計の分野にお

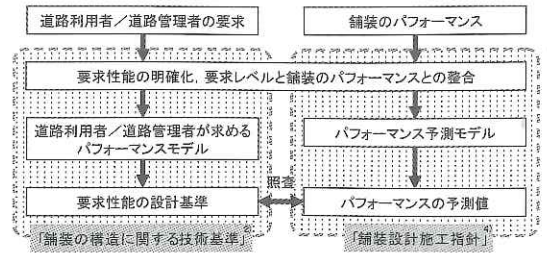


図-10 舗装設計の枠組みと基準類の位置づけ (筆者加筆修正)¹⁹⁾

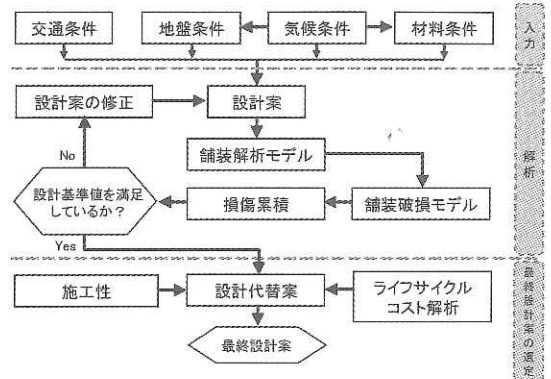


図-11 AASHTO舗装設計指針の設計の流れ⁶⁾

いても、信頼性設計法に関する検討が進められている¹⁸⁾。舗装の設計に係わる基準類においても、図-10のように整備されており¹⁹⁾、舗装が満たすべき性能の基準値が明示されているが、図中の右側に当たる舗装のパフォーマンス予測に関しては研究が遅れている。

図-11は、新しいAASHTO舗装設計指針における設計の流れを示したもの⁶⁾である。このAASHTOの指針では、舗装のパフォーマンスを予測するために各種条件について詳細なデータが蓄積され、解析のためのソフトウェアも整備されている。しかし、図-10の左側に当たる道路利用者や道路管理者が求める性能の基準については、すべて道路管理者の判断に委ねられている。

我が国の基準類をより一層有効に運用するためには、パフォーマンス予測(性能の経時変化の予測)手法を確立し、求められる性能の基準値に対する舗装の経時変化を予測できるようにすることが不可欠であり、今後、以下に示す課題等を整理することで、舗装の構造設計の高度化を図る必要がある。

- ①各種入力条件の変動、信頼性に関する検討

- ②要求性能に応じた舗装破損モデル、舗装解析モデルの構築 (維持修繕含む)
- ③要求性能の水準と設計基準との整合

5. おわりに

以上、舗装の設計法の現状、ならびに土木研究所、日本道路協会が中心となって行っている、舗装の理論的設計体系の構築に向けた調査研究の動向と成果について述べた。また、理論的設計法の高度化のために解決しなければならない課題等についても整理した。これら成果については、平成18年2月に改訂・発刊された「舗装設計施工指針(平成18年版)」⁴⁾ならびに「舗装設計便覧」²⁰⁾に反映されている。

今後、理論的設計法を照査する上では、これまでのような実道における舗装路面の経時変化だけでなく、ひずみや応力といった舗装内部の挙動を把握することが重要となってくる。そのためには、舗装の計画～設計～施工～調査～解析(設計へのフィードバック)について、産学官が連携して取り組むことが大切である。

参考文献

- 1) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本、平成14年10月
- 2) 国土交通省：舗装の構造に関する技術基準、平成13年6月
- 3) 伊藤正秀：舗装技術基準の現状と高度化に向けた取り組み、土木技術資料, Vol.47-7, pp.34-37、平成17年7月
- 4) (社)日本道路協会：舗装設計施工指針(平成18年版)、平成18年2月
- 5) 星谷 勝、石井 清：構造物の信頼性設計法、鹿島出版会、1986
- 6) 土木学会舗装工学委員会舗装設計小委員会：力学的一経験的舗装設計指針—生まれ変わったAASHTO舗装設計指針—、アスファルト, Vol.48 No.218, pp.2-47、平成17年10月
- 7) (社)土木学会：舗装工学ライブラリー3 多層弾性理論による舗装構造解析入門—GAMESを利用して—、平成17年5月
- 8) The Asphalt Institute: Research and Development of The Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MA-1), Ninth Edition, Research Repot, No.82-2
- 9) 中川伸一、島多昭典、小笠原章：美々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
- 10) 八谷好高、高橋 修、坪川将丈：FWDによる空港アスファルト舗装の非破壊構造評価、土木学会論文

- 集 No.662/V-49号, pp.169-183、平成12年10月
- 11) The Asphalt Institute: Computer Program DAMA, User's Manual, 1983
 - 12) 建設省土木研究所：新基準調査結果(平成元年～平成13年)
 - 13) 坂本康文、伊藤正秀：試験舗装における路床に生じるひずみに関する実験的検討、土木学会第60回年次学術講演会講演概要集, 2005.9
 - 14) 松井邦人, James MAINA、董 勤喜、小澤良明：鉛直および水平に円形等分布の荷重作用を受ける舗装構造の弾性解析、土木学会舗装工学論文集 第6巻, pp.100-109, 2001.12
 - 15) 松井邦人、黒林 功、西山大三：FWD試験による弾性係数推定の精度向上に関する検討、土木学会舗装工学論文集 第3巻, pp.39-47, 1998.12
 - 16) 東 滋夫、金井利浩、岡部俊幸、林 信也、松井邦人：FWDによる時系列データの舗装構造評価への適用、土木学会舗装工学論文集 第3巻, pp.31-38, 1998.12
 - 17) 董 勤喜、金井利浩、坂本康文、姫野賢治：舗装の動的応答に関する実測値と解析値との比較検討、土木学会舗装工学論文集 第10巻, pp.61-67, 2005.12
 - 18) 西澤辰男：TA法によるアスファルト舗装の信頼性評価、土木学会論文集No.781/V-66, 2005.2
 - 19) (社)土木学会：舗装工学委員会セミナー資料, 2005.6
 - 20) (社)日本道路協会：舗装設計便覧、平成18年2月

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

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, 工修
Kazuyuki KUBO