

# 統計的評価に基づいた高速道路舗装の 効率的な維持管理手法に関する検討

楠橋 康広<sup>1</sup>・下谷 幸一<sup>2</sup>・濱岡 裕樹<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 西日本高速道路株式会社中国支社 事業調整部 (〒731-0103 広島市安佐南区緑井2-26-1)  
E-mail:y.kusuhashi.aa@w-nexco.co.jp

<sup>2</sup>非会員 西日本高速道路株式会社中国支社 事業調整部 (〒731-0103 広島市安佐南区緑井2-26-1)  
E-mail:k.shimotani.aa@w-nexco.co.jp

<sup>3</sup>非会員 西日本高速道路エンジニアリング 中国株式会社 土木事業本部 (〒733-0037 広島市西区西観音町2-1)  
E-mail:y-hamaoka@w-e-chugoku.co.jp

高速道路のアスファルト舗装を適切に維持管理するために、舗装補修工事では、定期点検や各種調査により舗装路面の損傷範囲と舗装内部の損傷深さを的確に把握し、補修範囲を設定することが重要である。路面の損傷は路面性状測定車により把握できるが、舗装内部の損傷は、コアサンプリングによるひび割れ深さの確認、もしくは路面からの非破壊検査 (FWD調査) に拠るため車線規制を伴うこと、調査に時間を要すること、により十分な量の調査を行っていく。そこで本検討では、重回帰分析を用いて、路面性状のうちひび割れ率と舗装諸元から舗装内部の損傷程度を推定する手法を検討した。その結果、簡便な手法であるが、舗装内部の損傷指標と、ひび割れ率・舗装諸元を用いた推定モデルによる推定結果に良好な相関があり、舗装のアセットマネジメントを効率的に行うためのツールの1つとしての可能性を確認できた。

**Key Words :** highway maintenance, asset management, multi variable analysis, pavement

## 1. はじめに

道路の舗装路面状態を定期的な調査・点検により的確に把握し、適切な時期に補修していくことは道路管理者の使命であり、限りある原資を効果的に活用して維持管理していく必要がある。西日本高速道路(株)中国支社(以下、「NEXCO中国支社」)は、中国5県の高速道路のうち、関西以東と九州を結ぶ東西交通を担う山陽道と中国道、及び、瀬戸内海側と日本海側の域内交通を担う岡山道、米子道など12道路、約1,040kmの管理運営を行っており、約30万トリップ/日の利用をいただいているところである。管内の山陽道では全線の日平均断面交通量が約3万台/日を超え、多い区間では約6万台/日に達する。また、大型車混入率も40%前後に達する。中国道や横断道では、交通量は少ないものの、冬季は雪の影響を受けるなど、舗装路面は過酷な環境下にある。

これらを道路資産として適切に維持管理していくために、西日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、東日本高速道路(株)(以下、「NEXCO」)では定期的な点検・調査を行い、管理目標値を超過した個所は速やかに補修すると

もに、管理目標値に達しない区間も劣化度合いに応じた優先順位を付け、中期的な補修計画に取り込んでいる。

点検・調査から補修に至る一連のサイクルを円滑に運用するためには、広範囲のエリアから収集されるデータを効率よく分析・評価し、補修工事に適切に反映していく必要がある。

本検討は、点検から補修に至る一連のサイクルを円滑に行うために、点検・調査から得られる舗装路面の情報を統計的に評価し、アセットマネジメントを効率的に行うための手法について検討したものである。

## 2. 舗装の点検・調査の現状と課題

NEXCO中国支社では、日常・定期的な点検に加えて、所掌する約3,200車線kmを3年サイクルで路面性状測定車(写真-1(a))により舗装路面の損傷(わだち、ひび割れ、平坦性(IRI))の測定を行っている。測定されたそれぞれの項目が管理目標値を超過した個所は、FWD(Falling Weight Deflectometer)を搭載した測定車(写真-1



(a) 路面性状測定車 (b) FWD測定車

写真-1 路面性状測定車とFWD測定車

(b) による非破壊検査（FWD調査）や舗装体調査（コア採取）により舗装内部の損傷（以下、「内部損傷」）の深さを確認し、速やかに補修を行っている。

舗装路面の損傷は路面性状測定車を用いて、夜間に通常走行（70km/h～80km/h）しながら測定を行う。内部損傷の調査は、FWD測定車を用いて、調査箇所ごとに重錘落下による路面のたわみを測定することにより行う。この調査は、1箇所ごとに測定車を停止させてたわみを測定するため車線規制が必要となり、交通量の多い広島圏や岡山圏の山陽道では夜間での実施や、昼間でも交通量の減少するわずかな時間帯での実施を余儀なくされる。また、調査延長が3kmの場合で約2時間程度の時間を要する<sup>1)</sup>ことから、調査箇所数に制約を受けてしまう。

一方、高機能（排水性）舗装は路面の降水を表層内の空隙を通して排水するため、表層内に滞水する時間が長くなると、表層が健全に見えても基層以下の下層混合物の剥離といった内部損傷が進行するケースが報告されている<sup>2)・3)</sup>。NEXCO中国支社管内の高機能舗装率は約70%に達しており、予防保全的観点からは舗装路面の損傷発生箇所以外においても内部損傷を把握しておくことが望まれる。しかしFWD調査による手法は、前述の調査効率や交通規制の点において、NEXCO中国支社管内を一斉に調査することは現実的ではない。

その結果、損傷範囲の事前調査が点、または短い線状での判定となり、損傷の面的な分布を反映した判定が困難となることに起因して、舗装補修工事段階で補修深さや補修面積が増加するケースが頻発している。極端な場合はアスファルト合材調達に支障をきたしたり、車線規制時間内に工事が完了できないため、こま切れの施工を余儀なくされた結果、工事費が増加して予算管理に支障をきたしてしまったりする事態に至ることもある。

車線規制を要しない調査手法としては、3次元多配列レーダを搭載した車両による内部損傷評価技術<sup>4)</sup>が開発中であるが、現時点では本格稼働には至っていない。

このような背景から、路面性状や舗装構成等の比較的容易に入手可能な情報から舗装内部の損傷範囲を効率よく推定する手法の開発は喫緊の課題である。

舗装路面の損傷と内部損傷の関連について、城本ら<sup>5)</sup>は、路面のプロファイルが走行車両の動的荷重に及ぼす影響を確認し、動的荷重の指標として提案した修正動的荷重係数の経年変化が、舗装構造のダメージの経年変化

と相関があることを確認したが、構造的ダメージの推定手法には至っていない。渡邊ら<sup>6)</sup>は、舗装の構造的健全度の指標をアスファルト混合物弾性係数とし、関東地方近辺の幹線道路における構造的健全度と路面性状の関係について調査した結果、路面性状の中でもひび割れに着目することにより、舗装の構造的健全度を評価できる可能性があることを示している。しかし、文献5)と同様に、損傷範囲の推定手法には至っていない。

そこで本検討では、アスファルト舗装の内部損傷を簡便に精度良く推定可能な手法の開発を目的とし、路面性状のうちひび割れ率（以下、「Cr率」）に着目して、NEXCO中国支社が過去に行ったFWD調査、同時に実施した路面性状調査、舗装体調査（コア採取）の各調査結果を用いて、重回帰分析により推定する手法について検討した。

### 3. 舗装の内部損傷推定手法の検討

#### (1) 検討方針

本検討では、高速道路の舗装路面のうち、橋梁区間を除くアスファルト舗装区間を対象とした。そして、山陽道（広岩道含む）と中国道で実施したFWD調査、同時に実施した路面性状調査、及び調査時点の舗装構成や舗装種別などの舗装諸元から重回帰分析を用いて統計的に舗装内部の損傷程度を推定し、FWD調査から得られる内部損傷程度と対比して本手法の適合性を照査した。さらに、調査と同時に採取した舗装体コアと対比することにより、本手法の精度を検証することとした。

本検討で推定する内部損傷の指標は、NEXCOが行う高速道路の維持管理に用いられている指標で、FWD調査から得られるアスファルト層の損傷指標<sup>7)</sup>（以下、「Di」）とした。NEXCOでは、観測された路面のたわみからDiを算出し、Diと表層種別、アスファルト舗装設計厚（以下、「As舗装厚」）、下層路盤種別の3要因を用いて、推定される内部損傷の程度（表-1）を規定している。よって本検討でも、Cr率に加えて、表層種別、下層路盤種別、As舗装厚を説明変数として重回帰分析によりDiを推定した。なお文献7)によると、表-1に示す損傷区分は、前述の3要因が同じ組合せの下では、Diの増加に応じて損傷区分も悪化する。こうして重回帰分析

表-1 アスファルトの内部損傷区分

損傷区分	内部損傷の程度
A	全層(表層～上層路盤)の損傷
B	表層と基層の損傷
C	構造的損傷なし

により推定された $D_i$ を、以下、「推定 $D_i$ 」と称する。表-2に本検討で用いた変数一覧を示す。

## (2) 使用データ

NEXCO中国支社が平成21年から23年に実施した既往FWD調査では、調査区間内において10mピッチで1,338点の調査結果が蓄積されている。NEXCOでは路面性状調査で得られるCr率の評価基準長を100mとしているため、本検討での基準長（セグメント長）は100mとし、100m中で10点得られる $D_i$ の最大値を当該セグメントの代表値とした。換言すると、この代表値は当該セグメントにおける最大の損傷を意味しており、最大の損傷を確実に補修することを意図している。

次に、 $D_i$ とCr率についてサンプルのデータクリーニングを行った。 $D_i$ については、FWD調査時の重錘落下位置と得られた $D_i$ を調査報告により照合した。パッチング等による局所的な応急補修個所の $D_i$ は、特異なたわみ値から算出されている懸念がある。そのため、この位置の値は除去し、同一セグメント内の2番目の値を採用した。Cr率については、NEXCO西日本の管理目標値が20%であることから、この値を超えたサンプルも特異値として除去した。その結果、残る128個のサンプルを用いて検討を行った。使用したサンプルの諸元を図-1に示す。また、表-3に各変数間の相関係数を示す。

## (3) 推定モデルの構築

本検討では、セグメント $k$ におけるCr率、表層種別、下層路盤種別、アスファルト舗装厚を説明変数とし、重回帰分析による推定 $D_i$ を $y_k$ として(1)式で定式化する(以下、「内部損傷推定モデル」)。

$$y_k = \sum_{j=1}^4 \alpha_j x_{jk} + \beta \quad (1)$$

ここに、 $k$ はセグメント、 $x_{jk}$ は説明変数、 $\alpha_j$ は $x_{jk}$ のパラメータ、 $\beta$ は定数項を示す。これらの目的変数と説明変数は、表-2に示すとおりである。それぞれのパラメータの推定値と $t$ 値は、マイクロソフト・エクセル2007に装備されている“分析ツール”内に格納されている“重回帰分析”を用いて推定した。

## 4. 推定結果と考察

### (1) 内部損傷推定モデルによる推定結果

表-4に内部損傷推定モデルのパラメータ推定結果を示す。重相関係数は0.75、補正 $R^2$ は0.549の値が得られたこと、すべてのパラメータ推定値が統計的に有意となったことから、本検討で構築した簡易な推定モデルでも一定の説明力のあるモデルが構築できたと考えられる。

表-2 変数一覧

変数	単位	摘要
〔目的変数〕		
推定損傷指標	なし	セグメントの推定損傷指標
〔説明変数〕		
Cr率	%	各セグメントのひび割れ率
高機能ダミー	1 or 0	1: 高機能舗装, 0: 密粒度舗装
粒状ダミー	1 or 0	1: 粒状路盤, 0: セメント安定処理路盤
As舗装厚	cm	表層～上層路盤厚

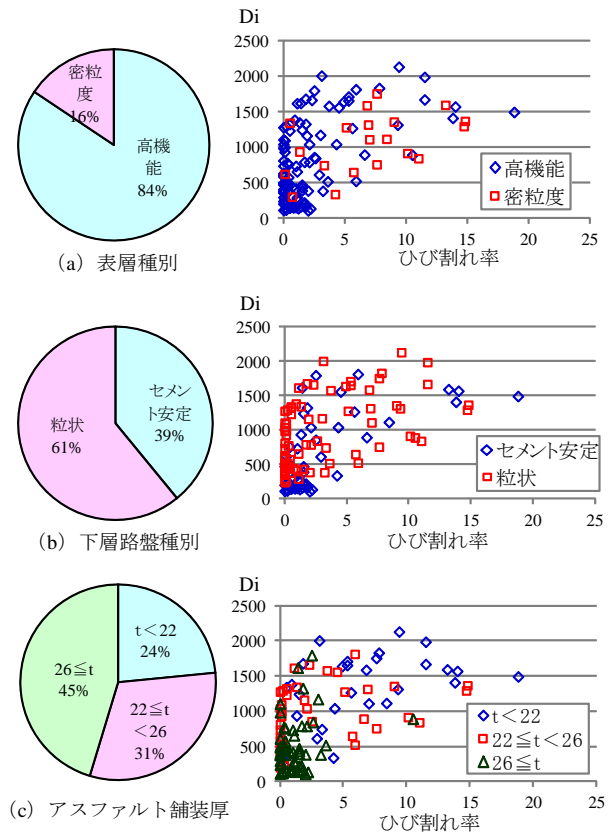


図-1 サンプル諸元

表-3 変数間の相関

	$D_i$	Cr率	高機能ダミー	粒状ダミー	As舗装厚
$D_i$	1				
Cr率	0.5486	1			
高機能ダミー	-0.1839	-0.4311	1		
粒状ダミー	0.2729	0.0234	-0.0799	1	
As舗装厚	-0.6149	-0.4366	0.3751	-0.0562	1

表-4 内部損傷推定モデルの推定結果

説明変数	パラメータ推定値	t値
定数項	2220.936	7.78
Cr率	56.170	5.90
高機能ダミー	296.876	2.94
粒状ダミー	277.830	4.20
As舗装厚	-80.411	-7.28
サンプル数	128	
重相関係数(R)	0.750	
補正 $R^2$	0.549	

\*\*:1%有意

各説明変数の、推定 $D_i$ への寄与の度合いを $t$ 値から判断すると、As 舗装厚、次いでCr 率の順で推定 $D_i$ に寄与していることが推測された。

パラメータ推定値の符号は、As 舗装厚が負で、他は正となった。このことは、As 舗装厚が厚いほど損傷を受けにくいことと合致する。

Cr 率の符号が正であることは、数値が大きくなるほど内部の損傷が進んでいることを示しており、実際の事象と合致している。

高機能ダミーの符号が正であることは、高機能舗装は内部の空隙を通じて降水を路外に排水することから密粒度舗装と比較して損傷を受けやすい傾向にあると考えられる。一方、表-1によると、 $D_i$ と高機能ダミー間の相関係数の符号は負であり、推定値の符号と逆符号となっている。この原因は、図-1(a)の散布図に示したように、高機能舗装は、密粒度舗装に比べて $D_i$ が小さい領域のサンプルが多かったこと、密粒度舗装のサンプル数が高機能舗装のサンプル数に比して著しく少ないことなどが考えられる。今後、密粒度舗装のサンプル数を蓄積していくとともに、継続して検証すべき課題と考えている。

粒状ダミーについては、変数間の相関係数、パラメータ推定値とも正の符号となった。このことは、図-1(b)に示したように、下層路盤がセメント安定の場合、 $D_i$ が小さい領域にサンプルが集中していることに起因していると考えられる。

## (2) $D_i$ 及び舗装体調査との対比

### a) $D_i$ との対比

図-2に、説明変数ごとに区分した $D_i$ と推定 $D_i$ の散布図を示す。また、表-5に、 $D_i$ から導いた内部損傷の程度と、推定 $D_i$ から導いた内部損傷の程度の適合性を示す。これより、高機能舗装、かつ粒状路盤、かつAs 舗装厚26cm以上のケースで $D_i$ と推定 $D_i$ の適合性が低く、 $D_i$ に対して推定 $D_i$ が過大に推定されたことが確認できた。このケースで推定 $D_i$ が過大となった16サンプルは、図-2(a)~(c)において、 $D_i < 500$ 、かつ $500 < \text{推定}D_i$ の領域にあった。このケースでは、表-1における損傷区分AとBのしきい値が500であることから、FWD調査から算出した $D_i$ により判定すると損傷区分B（表層と基層）であったが、推定 $D_i$ による判定では損傷区分A（全層）の損傷と判定されたものである。この結果から、特に、しきい値が500程度以下の小さい値となるケースでは、損傷区分の判定に注意を要するとともに、サンプルを蓄積してモデルの精度向上を図る必要があると考えられる。

### b) 舗装体調査との対比

表-6に、 $D_i$ 及び推定 $D_i$ から算出した内部損傷区分を、FWD調査と同時に採取したコアから判定した損傷区分と対比した結果を示す。本検討で使用したサンプル数は

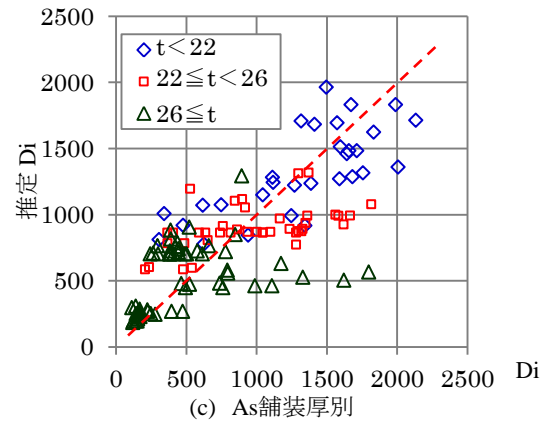
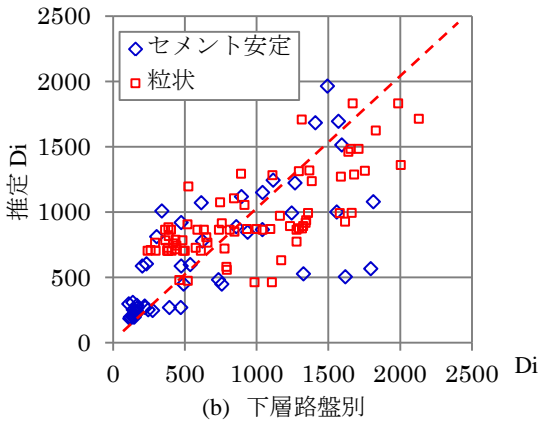
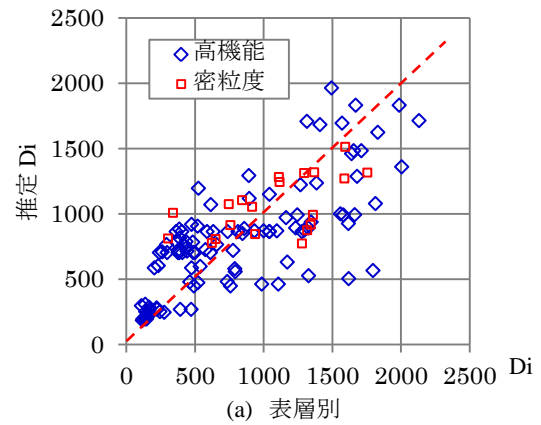


図-2  $D_i$ と推定 $D_i$ の対比

表-5  $D_i$ と推定 $D_i$ の適合性

表層	下層路盤	As舗装厚	一致	過大	過小
高機能	セメント安定	$26 \leq t$	18	8	1
		$22 \leq t < 26$	7	2	0
		$t < 22$	5	2	1
	粒状	$26 \leq t$	12	16	3
		$22 \leq t < 26$	14	8	0
		$t < 22$	5	1	5
密粒度	セメント安定	$26 \leq t$	0	0	0
		$22 \leq t < 26$	0	0	0
	粒状	$t < 22$	4	2	0
		$26 \leq t$	0	0	0
合計			77	40	11

一致率:  $77/128=0.602$

28であるが、Di による的中率は67.9%、推定Di による的中率は60.7%だった。この結果から、現在の標準的な非破壊調査手法であるFWD調査による的中率に対して、約90%の精度があることが確認できた。

次に、舗装構造別にコアとの適合性を照査した結果を表-7に示す。高機能舗装、かつセメント安定処理路盤のケースでの中率が低いが、サンプル数が少ないため、サンプル収集を継続して本検討で開発したモデルを改良していく必要があると考えている。

表-6 採取コアとの適合性

	推定 Di による損傷区分		Di による損傷区分	
	サンプル数	比率	サンプル数	比率
的中	17	60.7%	19	67.9%
過大	7	25.0%	5	17.9%
過小	4	14.3%	4	14.3%
全体	28	100.0%	28	100.0%

※的中率の比 推定FWD=0.607/0.679=0.89

表-7 舗装構造別のコアとの適合性の対比

(a) 推定Di による損傷区分とコア

表層	下層路盤	As 舗装厚	的中	過大	過小
高機能	セメント安定	26 ≤ t	0	1	2
		22 ≤ t < 26	0	0	1
		t < 22	1	2	0
	粒状	26 ≤ t	3	0	0
		22 ≤ t < 26	2	1	0
		t < 22	1	1	1
密粒度	セメント安定	26 ≤ t	0	0	0
		22 ≤ t < 26	0	0	0
		t < 22	1	2	0
	粒状	26 ≤ t	0	0	0
		22 ≤ t < 26	7	0	0
		t < 22	2	0	0

(b) FWD調査による損傷区分とコア

表層	下層路盤	As 舗装厚	的中	過大	過小
高機能	セメント安定	26 ≤ t	1	1	1
		22 ≤ t < 26	0	0	1
		t < 22	1	2	0
	粒状	26 ≤ t	2	0	1
		22 ≤ t < 26	2	1	0
		t < 22	3	0	0
密粒度	セメント安定	26 ≤ t	0	0	0
		22 ≤ t < 26	0	0	0
		t < 22	1	1	1
	粒状	26 ≤ t	0	0	0
		22 ≤ t < 26	7	0	0
		t < 22	2	0	0

## 6. おわりに

本検討では、舗装の内部損傷を把握する代表的な調査手法であるが、効率性の点で課題のあるFWD調査を補完する手法として、Cr 率と舗装諸元から重回帰分析による内部損傷推定モデルを構築し、内部損傷を簡便に推定する手法を検討した。その結果、本検討に関して以下の結論を得ることができた。

第一に、構築したモデルは簡便なモデルであるが、重回帰係数は0.75、自由度修正済決定係数は0.549を示し、Di とやや強い相関があることが確認できた。

第二に、Di から得られた損傷区分と推定Di から得られた損傷区分を対比した結果、Di に対する本手法の的中率は60%程度であったが、採取したコアの損傷に対する推定精度は、FWD調査からDi を算出して推定する標準的な手法の約90%に相当することが確認できた。

以上より、本検討で用いた重回帰分析モデルは簡易な線形モデルであるが、本モデルを用いて路面性状と舗装諸元から内部損傷を推定することの有効性が示唆された。今後の課題として、以下の3点が挙げられる。

- ① 輪荷重の繰返し載荷からひび割れ発生、内部損傷に至る舗装の物理的挙動を反映したモデルの精度向上。
  - ② 説明変数の照査によるモデルの適合度の向上。
  - ③ FWD調査を継続実施し、舗装諸元に偏りのないサンプルの蓄積と、サンプル及びモデルの信頼性向上。
- これらの課題については、引き続き検討を加え、本手法の精度を高めていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 神谷恵三：高速道路舗装の非破壊構造診断に関する研究、建設の施工企画 11月号, pp.9-13, 2009.
- 2) 神谷恵三, 山本忠守：高速道路における高機能舗装の構造評価、土木学会舗装工学論文集, 第 9 巻, pp.171-176, 2004.12.
- 3) 神谷恵三, 内藤政男：高機能舗装の下層損傷に関する一考察、土木学会舗装工学論文集, 第 10 巻, pp.17-22, 2005.12.
- 4) 佐藤雅規, 大井明, 佐藤正和：舗装体の内部損傷評価に関する検討、第 29 回日本道路会議論文集, 2011(CD-R).
- 5) 城本政一, 川村彰, 富山和也, 高橋清：路面のプロファイルと舗装に生ずる構造的ダメージの相関性について、土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol167, No.3 (舗装工学論文集第 16 巻), I\_73-I\_79, 2011.
- 6) 渡邊一弘, 井谷雅司, 久保和幸：アスファルト舗装のひび割れに関する新たな評価指標の提案、第 12 回北陸道路舗装会議技術論文集, A-4, 2012.
- 7) 西日本高速道路株式会社：設計要領 第一集 舗装編, 2012.