

舗装の評価に関する調査法概論

阿部 頼 政
日本大学理工学部
土木工学科教授

目 次

1. まえがき	61
2. 舗装構造の評価法	61
3. 路面性状の評価法	66
4. あとがき	69
参考文献	69

1. まえがき

舗装に対する評価とは、広義に解釈すれば①車両走行の安全性、②車両の乗心地、③環境に対する影響、④車両の耐久性やエネルギー効率への影響なども含まれるであろうが、ここでは、舗装を維持管理する技術者からみた舗装の健全度評価に限って述べることにする。

アスファルト舗装要綱¹⁾では、舗装の破損を次の2つに分類している。

- ①構造的破損：舗装強度の低下に起因する破損であり、路床、路盤層にまで破損が及ぶ場合が多い。
- ②機能的破損：舗装強度の低下に起因しない破損であり、表層、基層のアスファルト混合物層のみに破損がとどまる場合が多い。

構造的破損の度合いを評価する方法としては、古くからたわみ試験が用いられ、機能的破損に対しては路面性状を測定する方法が用いられてきた。本稿は、この“たわみ”と“路面性状”につき、主な試験法を概括するとともに、測定値の取り扱いに関する研究の一端を紹介するものである。

2. 舗装構造の評価法

舗装の構造が健全か否かを判定する方法としては、1950年代にベンケルマンビームが開発されて以来、各種のたわみ試験が利用されてきた。表-1は載荷方式の相違によって測定装置を分類したものである²⁾。ベンケルマンビームが広く普及し研究が進むにつれ、欠点として指摘されるようになったのが、次の2点であった。

- ① 測定に時間と多くの人手がかかる。
- ② 剛性の高い舗装では、不動であるはずの前脚や後脚がたわみ曲線の中に入ってしまう。

前者の改良としてデフレクトグラフなどの自動たわみビームが登場し、後者の改良としてダイナフレクト、FWD (Falling Weight Deflectometer) などが開発されたと位置づけることができよう。本章では、これらのうちから代表的な装置を選び、それぞれの特徴を述べることにする。

表-1 たわみ測定装置の分類²⁾

載荷方式	たわみ測定装置
静的載荷および移動荷重	平板載荷試験 曲率計 ベンケルマンビーム 自動たわみビーム マルチデプスデフレクトメータ
定常波振動荷重	ダイナフレクト ロードレータ 16kipバイブレータ
衝撃荷重	フォーリング・ウェイト・デフレクトメータ (FWD)
マルチモード荷重	連邦道路局サンパー

(1) ベンケルマンビーム

ビームの構造を図-1に示す。測定原理は単純で、アームの先端をトラック後輪の複輪の間にさしこみ、輪荷重がある場合とない場合の差をダイヤルゲージで読み取るものである。このとき、前脚と後脚の荷重の影響範囲外にあって水平を保っていると想定されている。ベンケルマンビームが開発された1950年代のアメリカでは、C B R 設計曲線が採用されており、舗装構造は、表層にアスファルト混合物、上層路盤に碎石、下層路盤に砂利というのが標準的なものであった。したがって、前脚と後脚が荷重の影響範囲に入っていたとしても測定値をそれほど大きく左右するものではなかったと推定できる。

しかし、A A S H O 道路試験以来、安定処理の効果が明らかとなったこと、交通の量と質が増大したことなどから、舗装は構造的に剛性が高まる一方となった。

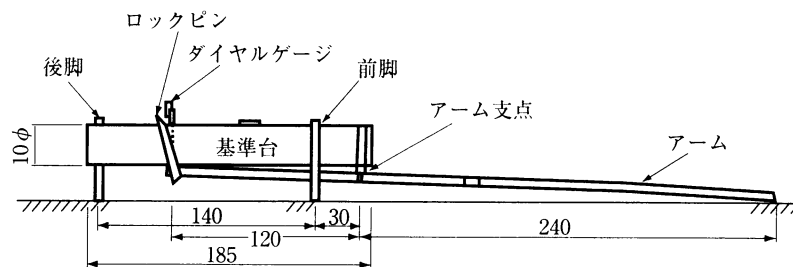


図-1 ベンケルマンビームの構造

舗装の剛性が高まれば、輪荷重は広く分散されるため、前脚も後脚もたわみ曲線の中に入ってしまい、結果的にベンケルマンビームで測定される値は真のたわみの一部ということになる。

この測定誤差を理論的に研究した一例を紹介しよう³⁾。

シュー、前脚、後脚が理論的なたわみ曲線（多層弾性論による）にのってそれぞれ W 、 F 、 R なる沈下を起した場合（図-2）、ベンケルマンビームによって測定されると推定される値（以下推測値と称する）は次式で示される。

$$D = (W_0 - W_F) - 2.92 (F_0 - F_f) + 1.93 (R_0 - R_f) \dots\dots\dots (1)$$

D ：推測値

W_0 、 F_0 、 R_0 ：载荷時におけるシュー、前脚、後脚の沈下量

W_F 、 F_f 、 R_f ：測定終了時におけるシュー、前脚、後脚の沈下量

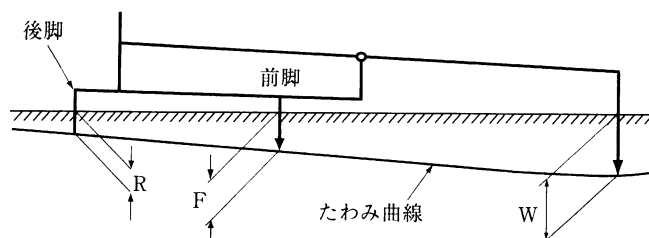


図-2 脚の沈下

脚に沈下がなく、最終測定的位置が十分に遠ければシューの沈下量（理論値 W_0 ）と推測値（ D ）は一致する。しかし、沈下があれば両者に差が生じる。この両者の関係をあらわすものとして次のように精度 A （Accuracy）を定義しよう。

$$A = (D / W_0) \times 100 (\%) \dots\dots\dots (2)$$

この精度をアスファルト舗装要綱の設計例⁴⁾で検討した結果、図-3の精度曲線が得られた。路床の弾性係数（ E_s ）が小さいほど、また理論にたわみ量が小さい（舗装の剛性が高い）ほど精度は低くなる。

図-4は、実際に測定した値から理論値を推定する場合に利用できるように、図-3の表現法を変えたもので、補正係数 K を読み取ることにより、次式から理論値を得ることができる。

$$W_0 = K \cdot D \dots\dots\dots (3)$$

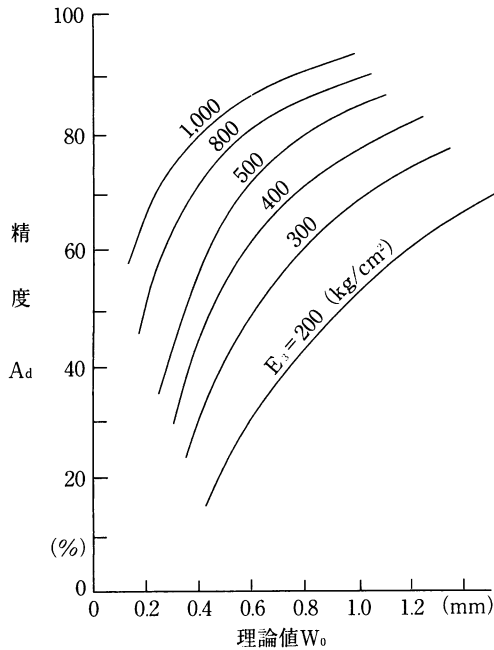


図-3 精度曲線

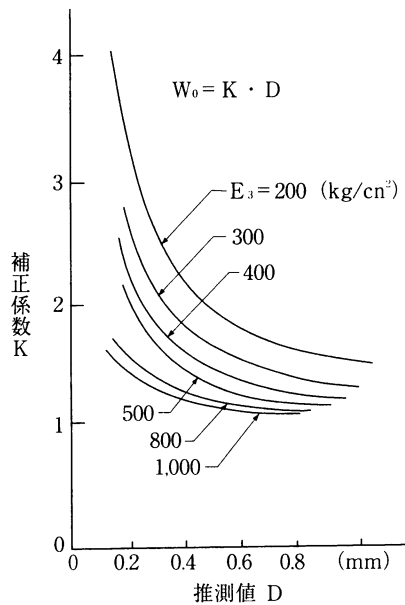


図-4 補正曲線

ベンケルマンビームがいまだに広く使われているのは、何と言っても測定装置の取扱いが簡便なことによるものであろう。そして、もう一つ忘れてならないのは、広く使われれば実績が多くなり、経験工学的な技術が向上するということである。その意味では、CBR試験、マーシャル安定度試験などに似たところがあり、理論的に説明しようとする大変であるが、舗装にとってはきわめて便利な試験法となっている。

(2) デフレクトグラフ

この機種は最初フランスのラクロワ社で開発されたが、1970年代、イギリスのTRRLが積極的に取り組み、イギリスの規格に合致するように改良した上、実用化に成功している。イギリスはも

ともたわみ測定に力を入れており、舗装構造の設計曲線もたわみを中心にしていることで知られている。

デフレクトグラフの測定装置は、図-5に示すように、牽引トラック後輪の双方と両者の間にそれぞれ3本のビーム先端がくるようになっているものであり、時速3km/h程度の連続走行中、断続的に左右両方のたわみ量を測定することができるものである。ここで、中間のビーム(B)は水平線に相当し、両側のビームA、Cはたわみ量に応じて下がるため、BとA、Cの差(角度を測定)としてたわみ量が求まるわけである。

交通を遮断し、数人がかりで測定するベンケルマンビームに比べ、時速3km/hとはいえ、トラックを止めることなく動かせること、測定が自動的に行われるようになったことは画期的な改良であった。しかし、中間のビームBが、後輪の影響を受けやすいことはベンケルマンビーム以上のものがあり、たわみの絶対値を測定することは無理で、結局BとA、Cの相対的変位を測定していることになってしまう。そのため、多層弾性論との整合性、ひいては舗装構造の解析にあたっては、この機種独自の研究が必要とされる。

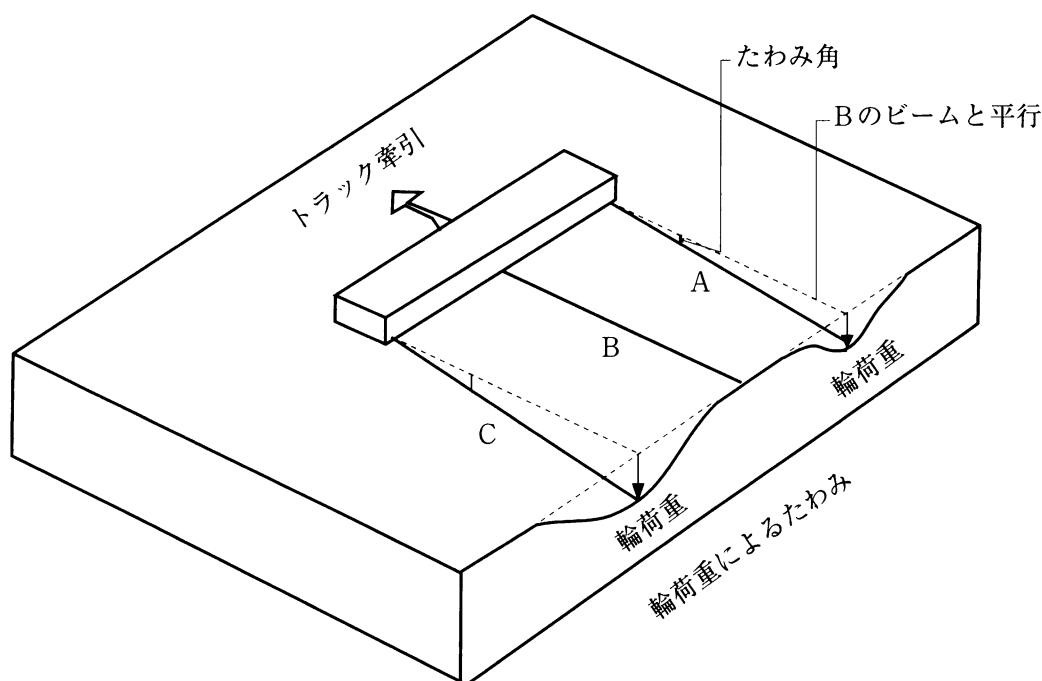


図-5 デフレクトグラフの測定原理

(3) FWD

FWDは、1970年代始めにシェル石油が開発したもので、アメリカの新道路研究計画(Strategic Highway Research Program)に、たわみ測定に使用する機種として採用されたこともあり、わが国でも注目され、現在10台以上が導入されている。

FWDは、円形載荷板に重錘を落下させて衝撃荷重を与えるもので（図-6）、いくつかのセンサーが各地点のたわみを検出できるようになっている。メーカーによって多少の差はあるが、共通して言える特徴は次のように要約できよう。

- ① ベンケルマンビームやデフレクトグラフで問題となったような不動点は必要なく、直接たわみを測定することができる。
- ② 載荷板の直下のたわみ量だけでなく、載荷板から離れた地点のたわみ量も複数個測定できる。
- ③ 載荷板を円形にするなど、多層弾性論による解析がしやすいように配慮してある。
- ④ 測定時間の短縮、人手の削減も考慮してある。

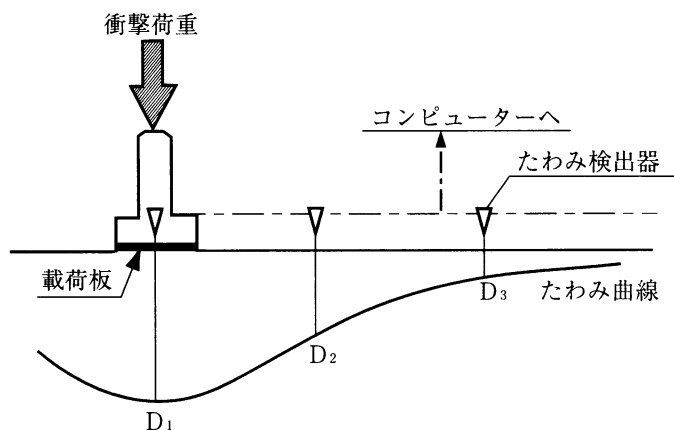


図-6 FWDの測定原理

以上のようにFWDは、たわみ測定機としてきわめてすぐれた特徴を備えている。同一機による測定値の再現性がよく、異機間の測定誤差が小さいということも知られており²⁾、FWDに対する期待は大きい。

しかし、FWDが舗装の構造解析に万能であるかのようにとらえるのは全くの誤りである。舗装は一筋縄ではいかないことを知るべきであろう。

FWDによる測定値は多層弾性論とドッキングさせて解析されることが多い。現在、世界中の多くの研究者が取り組んでいる課題がいわゆる逆解析（Back Calculation）の問題である。簡単に言えば、たわみ測定値から各層の弾性係数を逆算する問題である。

いま、弾性係数的なものを x 、たわみ量的なものを y として、逆解析の意味を考えると

$$y = a x^3 + b x^2 + c x \quad (a, b, c \text{ は定数}) \dots\dots\dots (4)$$

であらわされると仮定すれば、 x がわかっているときに y を求めるのは簡単でこれは順解析に相当する。

逆に y が既知で x を求めるには3次方程式を解くことになり、解が1個しかなかったり3個あったりする。といっても三次方程式程度ならまだよく、次のような式になったらどうであろうか。

$$y = a x^3 + b x^2 + c x + d \log x \dots\dots\dots (5)$$

順解析は簡単でも逆解析は大変である。たわみ量から各層の弾性係数を求めるということは、(5)式の数十倍、数百倍複雑な数式を取り扱うということで、世界中の研究者が苦勞してもなかなか良い方法が見つからないというのが現状である。

さらには、仮に各層の弾性係数が特定できたとしても、それで舗装構造の何が言えるかという問題が残る。ある層の弾性係数が経年的に小さくなっていけば、その層が年々弱くなっていると推定することはできるが、限界値はいくつなのか、逆解析による推定やアスファルト混合物層の温度変化、測定機のキャリブレーションに伴う誤差の影響はどの程度なのかなど、構造的に何か結論を出すとなると考慮すべき要因はきわめて多くなる。

要するに測定値の多層弾性論による解析法は確立されたものではなく、目下研究中の段階にあるということである。いたずらに盲信することなく、現場技術者と研究者が協同して着実に研究を進める必要がある。

3. 路面性状の評価法

(1) M C I と P S I

路面性状を総合的に評価し、維持修繕の判断を決定しようとする場合、M C I（維持管理指数）やP S I（共用性指数）が使用される¹⁾。

$$M C I = 10 - 1.48 C^{0.3} - 0.29 D^{0.7} - 0.47 \sigma^{0.2} \dots\dots\dots (6)$$

$$P S I = 4.53 - 0.518 \log \sigma - 0.371 C^{0.5} - 0.174 D^2 \dots\dots\dots (7)$$

ここに

C：ひびわれ率（%）

D：わだち掘れ深さの平均（M C I：mm，P S I：cm）

σ ：平坦性（mm）

両式はいずれも“ひびわれ”，“わだち掘れ”，“平坦性”の3者を指標としてとっているが、これはA A S H O道路試験の流れをくむものであることはいうまでもない。一般に舗装構造が比較的弱い場合には、種々の破損が同時に進行する傾向があるので、このような総合的評価が重要となる。しかし、最近の重交通道路のように舗装構造が強くなると、わだち掘れだけが卓越する場合が多い。また、これを防ごうとして硬いアスファルトや粒度の粗い骨材配合を使用するとクラックが生じやすくなる。すなわち、舗装構造が強い場合の破損は表基層を中心として発生するもので、路盤以下の層はあまりダメージを受けていないという特徴がある。機能的破損と言われる所以である。

(2) 路面性状自動測定装置

路面性状を調査する方法としては、従来、技術者による目視が中心であり、必要に応じて手作業

による調査（わだち掘れ、平坦性など）が行なわれてきた。しかし、年々増大する交通量はこれらの手作業を困難にしてきた。ここに登場したのが“路面性状自動測定装置”である。概要は表-2⁵⁾のとおりであるが、これは、通常車両と同程度のスピードで路面を走行しながら、ひびわれ、わだち掘れ、平坦性を同時に測定するもので、舗装技術の向上にとっては画期的な開発であった。建設省技術評価制度の認可を受け、現在4社が実用化して広く調査を実施している。しかし、残念なことに、調査結果は予算請求等に用いられるのみで、技術的に活用されている例は少ないようである。この理由として、①1区間100mの平均値で出力されること、②それでもデータ数が膨大になり解析が大変なこと、③現場の実態と合わない場合がかなりあること、④数値が実際よりも低めに出ることなどが挙げられているが、活用法を研究すれば技術的にも十分使用に耐えうるものであると筆者は考えている。研究の一部を次章に紹介しよう。

表-2 路面性状自動測定装置の概要⁵⁾

測定項目	装置の概要
ひびわれ	①走行しながら照明用ハロゲンランプとスリットカメラを用いて路面を撮影することにより路面のひびわれを連続撮影する方法 ②走行しながらレーザー光線を照射し、特殊ビデオを用いて路面を撮影することにより路面のひびわれを連続撮影する方法 ③走行しながらスチールカメラを用いて路面を撮影することにより路面のひびわれを連続測定する方法 ④走行しながら照明用ストロボフラッシュカメラを用いて路面を撮影することにより路面のひびわれを連続測定する方法
わだち掘れ	①走行しながら路面横断方向にレーザー光線を照射し、これを固体素子テレビカメラで撮影することにより路面の横断形状を測定する方法 ②走行しながら路面横断方向に直線の暗映像を投影し、これをカメラで撮影することにより路面の横断形状を測定する方法 ③走行しながら路面横断方向に多数の光帯を投光し、これを固体素子テレビカメラまたは通常のテレビカメラで撮影することにより路面の横断形状を測定する方法
平坦性	①走行しながら車両に取付けたレーザー変位計を用いて路面との距離を計測することにより路面の縦断凹凸を測定する方法 ②走行しながら車両に取付けた加速時計とわだち掘れ自動測定装置の一部を用いて路面との距離を計測することにより路面の縦断凹凸を計測する方法 ③走行しながら第5輪りに取付けた加速時計を用いて路面との距離を計測することにより路面の縦断凹凸を測定する方法

(3) わだち掘れ深さ測定データの解析

ここでは東京都の環状7号線を毎年1回、数年間にわたり調査したデータを使用する⁶⁾。

わだち掘れ深さの経年変化を知り、将来予測もしたいという場合、一般に取られる方法は、同一地点を毎年測定することであろう。本データに限らず、筆者が手がけた自動測定データでは、い

ずれもこの方法で経年変化を知ることは不可能であった。表-3に見られるように測定年度によるデータの偏りが大きいためである。

これを解決する方法として、筆者らは補修履歴と測定データを対比することを考えた。図-7は、補修後1年目のデータを集め、わだち掘れ深さの大きさによる度数分布をとったものである。対数確率紙にプロットした図-8から明らかなように、図-7の分布は対数正規分布であり、金属疲労の分野で常識となっている破壊のパターン（全く同一と思われる供試体を数多く破壊試験すると結果はこの分布となる）と一致する。

表-3 測定値の平均値と標準偏差⁶⁾

	年	データの数	平均値	標準偏差
外廻り走行車線	1986	1,571	9.33 mm	5.14 mm
	1987	1,470	10.99 mm	5.41 mm
	1988	1,529	5.84 mm	3.65 mm
外廻り追越車線	1986	1,570	11.42 mm	6.32 mm
	1987	1,418	14.12 mm	6.88 mm
	1988	1,561	10.65 mm	6.65 mm
内廻り走行車線	1986	1,571	10.74 mm	5.27 mm
	1987	1,392	13.67 mm	6.26 mm
	1988	1,530	10.05 mm	5.75 mm
内廻り追越車線	1986	1,571	8.99 mm	4.76 mm
	1987	1,465	10.66 mm	5.06 mm
	1988	1,530	6.67 mm	3.51 mm

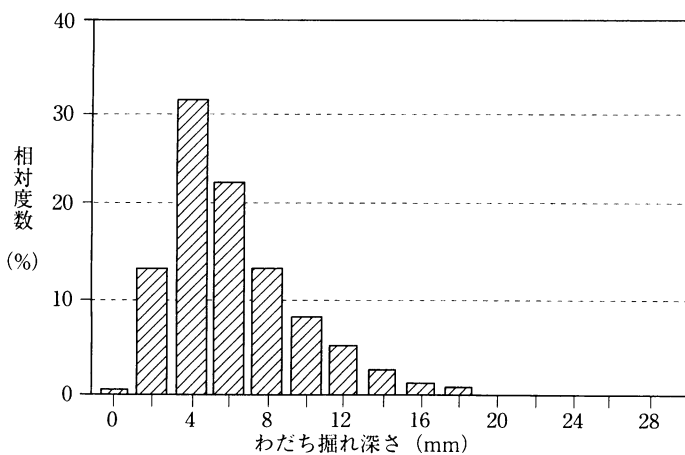


図-7 補修後1年目のわだち掘れ深さ⁶⁾

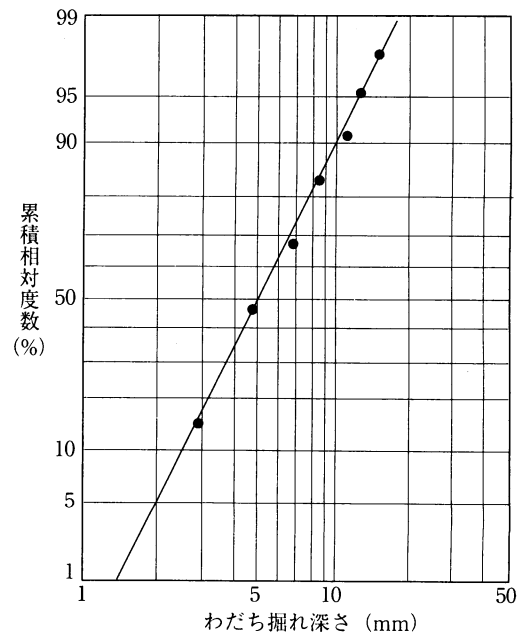


図-8 対数確率紙による分布形の確認⁶⁾

補修後2年目以降のデータについてもこれと同様の結果が得られ、簡単な統計処理（詳細は省略）をすることによって図-9のような経年変化を得ることができた。

なお、蛇足になるが、本研究の成果は延べ100人に近い卒業研究生が数年間、日夜苦勞してつくりあげたものである。俗にいう「コロンブスの卵」で、誰も思いつきそうな手法ではあるが……。

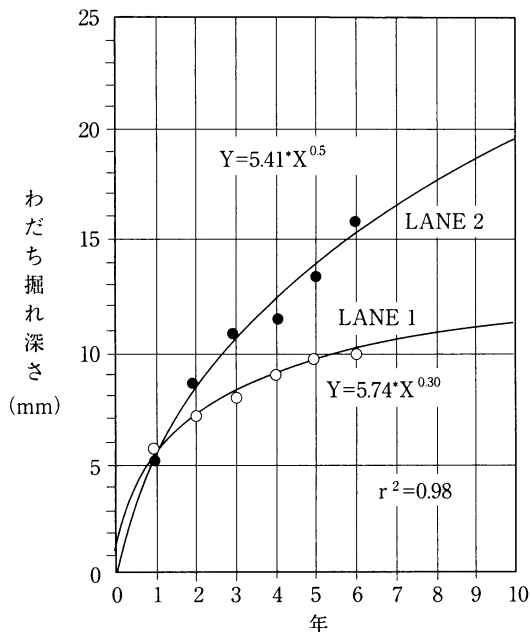


図-9 わだち掘れ深さの経年変化⁶⁾

4. あとがき

舗装の評価に関する試験法の主だったものを一覧してきた。紙面の都合でごくわずかしか述べることができなかつたが最後に一言。たわみにしろ路面性状にしろ、近未来に新しい機械の出現を期待するのは無理であろう。現存する機器は完全なものではないが、これを技術的に役に立つようにするには、ソフトの開発がきわめて重要であると筆者は考えている。官民学の一致協力による研究を期待する次第である。

参考文献

- 1) 「アスファルト舗装要綱」, (社)日本道路協会, 平成4年
- 2) 「舗装機能の評価法」, 土木学会, 平成4年
- 3) 阿部頼政, 「ベンケルマンビームによるたわみ測定値の補正に関する理論的研究」, 土木学会論文集, No.287, 昭和54年
- 4) 「アスファルト舗装要綱」, (社)日本道路協会, 昭和53年
- 5) 「路面性状調査に関する検討業務報告書」, (財)道路保全技術センター, 平成4年
- 6) Y. Abe他, “The Development of Pavement Data Acquisition System and Rehabilitation Strategy for Heavy Roads in Tokyo”, Proceedings of BCRA, 1990.