

# たわみ評価指標に基づく舗装の構造評価

阿部長門\*・丸山暉彦\*\*・姫野賢治\*\*\*・  
林 正則\*\*\*\*

本研究では、FWD (Falling Weight Deflectometer) を用いて非破壊で舗装の構造評価を行っている。このFWDより得られるたわみ曲線より、舗装の構造評価を簡便に行うたわみ評価値の開発を検討した。たわみ評価値に基づき弾性係数の逆解析に代入する弾性係数の初期値を重回帰分析を用いて検討した。

この結果、たわみに基づく弾性係数の初期値を逆解析に用いると、逆解析で得られる解の収束が早くなる。

**Keywords** : NDT, FWD, critical deflection, elastic modulus, backcalculation, multiple regression

## 1. はじめに

現在の道路の構造設計は、昭和36年のAASHO道路試験の成果を基にした竹下ら<sup>1)</sup>の一連の研究成果によるCBR- $T_A$ 法という形で、その原形が昭和42年版のアスファルト舗装要綱に導入された。近年、再生材料、スラグ材、ゴム、樹脂などの新しい材料が使われ始めたが、現在の設計法では個々の材料の等値換算係数が必ずしも明確でなく、設計を行う際に問題となる場合がある。また、交通車両の大型化等に伴いほとんどの舗装において維持・修繕なくして設計寿命を満たす事ができなくなってきた。

この現況から、舗装の設計という概念が変革し、単に舗装断面を決定するだけでなく、設計、材料、建設、維持修繕まで含めた舗装マネジメントシステム(PMS)という概念が生まれてきた<sup>2)</sup>。舗装マネジメントシステムの実施にあたっては、舗装の現況を的確に判断するとともに、その状態が将来どの様に变化するかを予測することが重要である。

現在までの舗装の評価は、舗装を破壊し、アスファルト混合物のコアサンプルによる試験や路床、路盤材の一軸試験またはCBR試験による舗装各層の構造評価が広く行われてきた。しかしこの方法では、多大な労力、時間を消費するうえに調査ポイントが限定されるなどの問題があり、非破壊試験が注目されるようになってきた。

非破壊試験機には、材料の密度、含水量を測定するRI、舗装体の層厚や空洞を調査する地中探査レーダ、路面性状を把握する路面性状測定車、路面に荷重を加えた時のたわみ量やその曲率を測定するたわみ測定装置が開発及

び研究されてきた。

これらのたわみ測定装置には、低速移動荷重によるベンケルマンビーム、デフレクトグラフ等、振動荷重によるロードレータ、ダイナフレクト等、衝撃荷重によるフォーリング・ウエイト・デフレクトメータ(Falling Weight Deflectometer以下FWDとする)等が諸外国で開発されている<sup>3)</sup>。

本研究では舗装の構造評価を行う方法として、図-1に示す衝撃荷重を発生させたときのたわみを測定するFWDを使用している。FWDで測定されるたわみの大きさやたわみ曲線の形状は、舗装の構造強度や路床の支持力に依存しており、様々なたわみ曲線が得られる。

本研究で用いた構造解析は、図-2に示すような舗装構造で、各材料の弾性係数、層厚、ポアソン比を入力し、舗装体内に生じる応力、歪、変位を求めるものである。FWDでは荷重を載荷した時の表面たわみを得られ、舗装構造モデルに測定たわみを入力し、直接測定できない弾性係数を推定する方法が開発されている。

測定たわみから繰り返し計算により弾性係数を推定する逆解析法は、計算したたわみと測定たわみの差が定めた誤差範囲の中に収まっているか判断し、誤差が大きい場合は両者の差が縮まるように弾性係数を修正したたわみを計算する方法である。しかし、初期値の与え方によっては収束に時間がかかったり、得られる弾性係数が異なることがある。

そこで本論文では、FWDの測定たわみから舗装の構造評価を行うための評価値の開発について検討し、この評価値に基づき弾性係数の逆解析に代入する弾性係数の初期値に対する検討を行った。さらに、求めた評価値と現行の設計法に用いられている $T_A$ との比較を行った。

## 2. 原理及び既往の研究

本研究で用いたFWDは、図-1に示すように10個

\* 正会員 長岡技術科学大学博士課程 材料工学専攻  
(〒940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

\*\* 正会員 工博 長岡技術科学大学教授 建設系

\*\*\* 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科

\*\*\*\* 正会員 東亜道路工業(株)

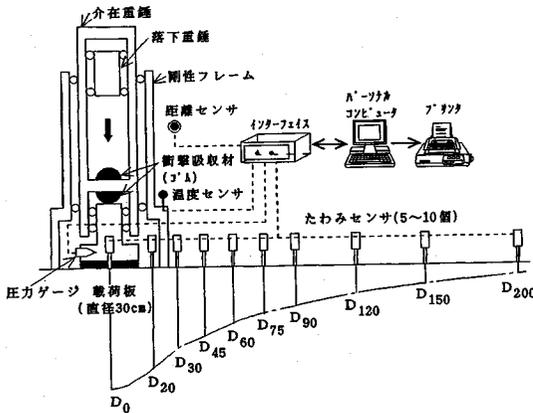


図-1 FWD測定装置

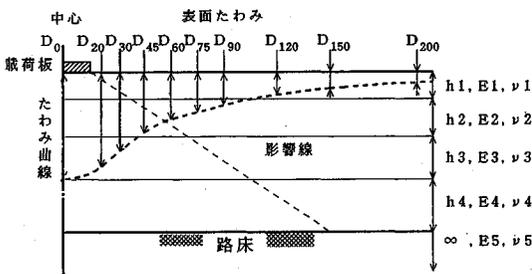
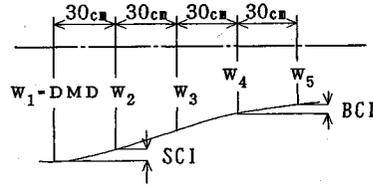


図-2 道路の荷重分散とたわみ曲線の関係

のたわみセンサでたわみ量を測定している。以下の説明ではたわみの呼び方として、たわみ量を  $D$  で表し、載荷点からセンサまでの距離を添字としてつける。つまり、載荷点から 150 cm 離れた地点のたわみ量を  $D_{150}$  と呼ぶ。

FWD から得られる 10 個のたわみ ( $D_0 \sim D_{200}$ ) から、構造評価と補修工法の選択をするためのファクターを探り出し、かつ外的要因 (交通量・気象条件) と組み合わせた現場対応型の測定機としての適用方法に関する検討が必要となる。道路の荷重分散とたわみ曲線を表した模式図を図-2 に示す<sup>4)</sup>。すなわち、舗装に荷重が加わると、荷重の載荷点を中心に図-2 のように広がり、荷重の垂直応力は円錐状に分散する。図中のたわみ曲線の形状は、各層の弾性圧縮量によって定まるとする。載荷点から離れたたわみ、たとえば  $D_{150}$  の浅い部分は荷重影響線の外側にある。荷重影響線の外側では垂直歪がほとんど生じないため、 $D_{150}$  に関係するのは荷重影響線の内側にあるある深さ以上の層となる。逆に、載荷点直下の  $D_0$  の下方に注目すると、どこでも荷重影響線の内側にあるので、全ての層の弾性圧縮量の合計が  $D_0$  となって表れている。また、隣接するたわみ量の差をとると、中間にある層の弾性圧縮量を表しているとみなすことができる。アメリカ合衆国のユタ州<sup>5)</sup> ではこのような考え方にに基づき、ダイナフレクトのたわみ量を用いた簡単な舗装の評



DMD=Dynaflect Maximum Deflection  $DMD=W_1$  ( $\times 10^{-3} \text{mm}$ )  
 SCI=Surface Curvature Index  $SCI=W_1-W_2$  ( $\times 10^{-3} \text{mm}$ )  
 BCI=Base Curvature Index  $BCI=W_4-W_5$  ( $\times 10^{-3} \text{mm}$ )  
 A=Area of one-half deflection  $A=\frac{3}{20}(W_1+2W_2+2W_3+2W_4+W_5)$   
 S=Spreadability  $S=\frac{W_1+W_2+W_3+W_4+W_5}{5W_5} \times 100(\%)$

図-3 ダイナフレクトの評価指数

価指数を設定している。また、Vaswani<sup>6)</sup> は図-3 に示すように、路床の評価指数である  $A$  と荷重分散性を示す  $S$  を使用している。 $A$  は基準線とたわみ曲線に囲まれた面積で  $W_5$  に比例して大きくなるので、路床の強さと相関があると考えられた。 $S$  は荷重分散性を示し、 $W_5$  の影響を除いているので、路床以上の舗装の強度と最も相関があるとされた。達下<sup>7)</sup> は、ダイナフレクトのたわみ量より舗装の弾性係数と路床の弾性係数を求める式を提案している。

図-3 の DMD と呼ばれる評価指数は、FWD 測定データの  $D_0$  に対応し、路床を含めた舗装の支持力を表す指標である。SCI は、ベンケルマンビームや曲率計から求められる曲率半径に類似したもので、舗装上部層の構造強度を評価できる。BCI は、路床を含めた舗装下部の強度を表していると言われている。

FWD の簡便な評価方法としては、Andersson<sup>8)</sup> がたわみ差と剛性係数  $K$  (荷重/たわみ差) と多層弾性理論から得られた弾性係数を用いて多変量解析を行っている。この結果より、アスファルト混合物層の弾性係数を求める尺度としてたわみ差  $D_0-D_{20}$  を使い、路床の弾性係数を求める指数として  $D_0+D_{20}+D_{45}+D_{60}$  を設定している。しかしこの方法では、たわみデータが 4 個しかないので、3 層解析の場合には得られる弾性係数のばらつきが大きく、室内試験で得られる舗装材料の弾性係数と一致が見られない。

### 3. 舗装の評価指数

#### (1) 概要

1989 年から 2 年間にわたり、全国約 300 カ所の路線のたわみ測定を行い、データを蓄積した。このデータを使用し、FWD 測定たわみが舗装の構造評価を行う指標として適切であるか、ここで検討を行う。但し、スラッグ路盤やセメント安定処理系上層路盤を含む路線のデータは少ないのでここでは除いた。

筆者らは舗装を維持するためには、交通量に応じたた

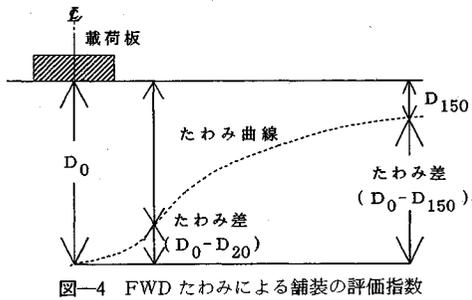


図-4 FWD たわみによる舗装の評価指数

わみの限界があると考え、荷重点直下のたわみ ( $D_0$ ) についての臨界値を示した<sup>9)</sup>。また、 $D_{150}$ と路床弾性係数の関係について調べ、舗装の厚さや各層の弾性係数が異なっても  $D_{150}$ は影響を受けず、路床の支持力のみ依存している事を明らかにした<sup>10)</sup>。

図-2の道路の荷重分散とたわみの関係及び図-3のダイナフレクトの評価指数より、たわみ差  $D_0-D_{20}$ はアスファルト混合物層の構造特性を表していると考えられる。また、 $D_{150}$ は路床の強度を表しているの、たわみ差  $D_0-D_{150}$ は路床面から上部の舗装全体の構造特性を表していると考えられる。

たわみによる舗装の評価指数として、荷重点直下のたわみ ( $D_0$ )、たわみ差  $D_0-D_{150}$ 、たわみ差  $D_0-D_{20}$ について検討を行った(図-4参照)。

(2) 荷重点のたわみ ( $D_0$ ) について

前節で述べた調査路線で継続的に調査している路線のたわみ測定結果に対しては、温度条件を統一して解析を行うことが必要である。ここでは新設舗装の路面温度  $20\sim 25^\circ\text{C}$ の時のアスファルト混合物層の平均弾性係数である  $6000\text{MPa}$ <sup>9)</sup>に置き換え、路盤層以下は逆推定で得られた弾性係数を使用し解析を行った。

荷重条件として接地半径  $17\text{cm}$ 、荷重  $5\text{t}$ の条件で、多層弾性理論によりアスファルト混合物層下面の引張り歪 ( $\epsilon_t$ )を求め、米国アスファルト協会 (AI)<sup>11)</sup>が提案しているアスファルト混合物の疲労破壊に対する式を用いて引張り歪による  $5\text{t}$ 許容載荷輪数を求めた(式(1)参照)。荷重点直下のたわみ  $D_0$ と  $5\text{t}$ 換算許容載荷輪数の関係を面対数グラフにプロットしたものが図-5である。このグラフには、路面性状が良好なものと線状クラックが発生しているものを示した。荷重点直下のたわみ  $D_0$ と  $5\text{t}$ 換算許容載荷輪数の相関係数は  $-0.89$ であり、両者には相関関係がある。この実線をシフトする事により、路面が良好か線状クラックが発生しているかの境界線とする事ができる(図中の点線)。荷重点直下のたわみ  $D_0$ に舗装に線状クラックが発生するかしないかの境界線を定めることができる。この境界線の式を式(2)に示す。

$$N = 18.4(c)(6.167 \times 10^{-5} \epsilon_t^{-3.291} E^{-0.854}) \dots \dots \dots (1)$$

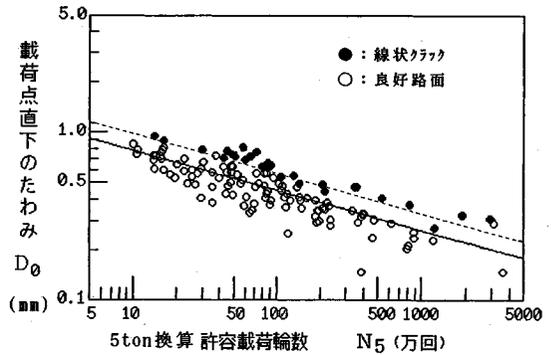


図-5 荷重点直下のたわみと許容載荷輪数の関係

$N$ : 許容載荷輪数 (回)

$\epsilon_t$ : アスファルト混合物下面の引張り歪 (mm/mm)

$E$ : アスファルト混合物の弾性係数 (MPa)

$c$ : アスファルト混合物の容積率と空隙率から得られる定数

$$\log(D_{0\max}) = -0.23 \log(N_5) + 1.14 \dots \dots \dots (2)$$

$D_{0\max}$ : 限界たわみ (mm)

$N_5$ : アスファルト混合物下面の引張り歪より求めた  $5\text{t}$ 換算許容載荷輪数 (回)

(3) たわみ差  $D_0-D_{20}$  について

アスファルト混合物層の構造特性の評価指標として、ダイナフレクトでは第1センサーと第2センサーのたわみ差 ( $W_1-W_2$ )を取り上げているが、FWDも同様に  $D_0-D_{20}$ がアスファルト混合物層の荷重分散特性を表していると考えられる。

FWDのたわみ差  $D_0-D_{20}$ と多層弾性計算により得られたアスファルト混合物層の弾性係数の関係を調べたが、アスファルト混合物層の弾性係数 ( $E_1$ )とたわみ差  $D_0-D_{20}$ の間には強い相関は見られない。そこで、層全体の強度を示す指数として、アスファルト混合物層の弾性係数 ( $E_1$ )と層厚 ( $h_1$ )の積(以下ではアスファルト混合物の層係数と呼ぶ)の関係について調べた。この関係を図-6に示す。図中のプロットは、アスファルト混合物層の層厚が  $5\sim 30\text{cm}$ の範囲の場合である。両者の間には高い相関がみられ、路面性状に関わらず、たわみ差  $D_0-D_{20}$ とアスファルト混合物層の層係数の間には一意的な関係がある。すなわち、アスファルト混合物層の層厚が既知ならば、たわみ差  $D_0-D_{20}$ より、アスファルト混合物層の弾性係数を推定することが可能である。この関係を、式(3)に示す。

$$\log(E_1 \times h_1) = -0.91 \log(D_0 - D_{20}) + 4.80 \dots \dots \dots (3)$$

$E_1$ : アスファルト混合物層の弾性係数 (MPa)

$h_1$ : アスファルト混合物層の層厚 (cm)

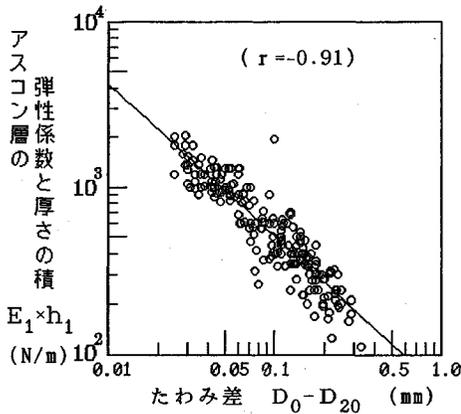


図-6 たわみ差  $D_0-D_{20}$  とアスファルト混合物層の層係数の関係

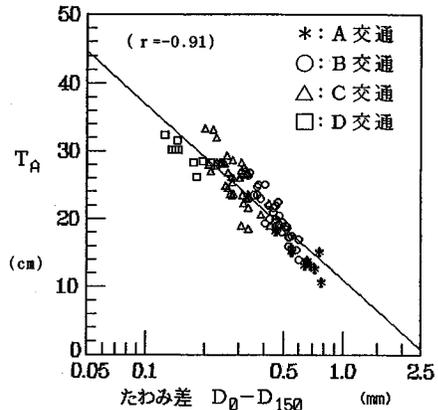


図-8 たわみ差  $D_0-D_{150}$  と  $T_A$  の関係

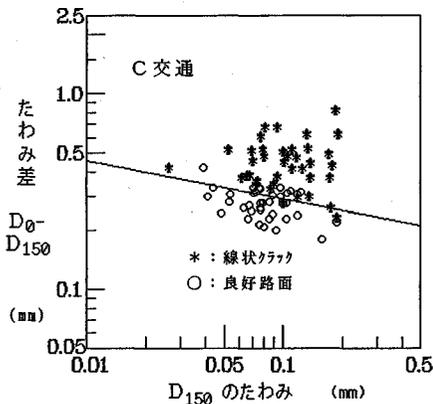


図-7 たわみ差  $D_0-D_{150}$  と  $D_{150}$  の関係 (C交通)

$D_0-D_{20}$ : たわみ差 (mm)

(4) たわみ差  $D_0-D_{150}$  について

前節で述べたように、 $D_0$  は表層以下の全層の強度を示し、 $D_{150}$  は路床の強度を表していると考えられるので、たわみ差  $D_0-D_{150}$  は路床面上の舗装の強度を示していると考えられる。アスファルト舗装要綱で示されている交通区分のC交通路線において測定したデータから、たわみ差  $D_0-D_{150}$  と  $D_{150}$  の関係をプロットすると図-7が得られた。舗装表面に線状クラックが発生している場合と良好な場合を区別すると、舗装が破壊するかしないかの境界線を求める事ができる。図中のプロットより、 $D_{150}$  のたわみが大きいところでは舗装が破壊している例が多い。

良好な路面のプロットを見ると、たわみ差  $D_0-D_{150}$  は、 $D_{150}$  が小さいところで大きくなっている。舗装構造が任意のものならば、たわみ差  $D_0-D_{150}$  と  $D_{150}$  とは相関がないはずであるが、 $D_{150}$  が大きいほどたわみ差  $D_0-D_{150}$  が小さくなっている。これは荷重条件が同一ならば、路床を含めた舗装の支持力が一定になるように舗装構造を設

計していることによる。

(5) 現行設計法との比較

たわみ差  $D_0-D_{150}$  は舗装体の変形量であり、舗装体の強度を表していると考えられるため、供用開始後3年未満の調査路線の設計時の等値換算厚 ( $T_A$ ) とたわみ差  $D_0-D_{150}$  の関係について調べた。この関係を図-8に示す。両者の関係は、片対数グラフ上でほぼ直線となる。両者の相関係数は-0.91であり、強い相関関係にある。たわみ差  $D_0-D_{150}$  と  $T_A$  の回帰式を式(4)に示す。式(4)を用いて現況の  $T_A$  を推測する事ができる。

図-8のプロットはほとんどが供用開始後1年未満のものであるが、数ポイント供用開始後5年未満で路面が良好な舗装のデータが含まれている。クラックの生じた舗装に式(4)を適用にする事については、今後の検討が必要である。

$$T_A = -25.8 \log(D_0 - D_{150}) + 11.1 \dots \dots \dots (4)$$

$T_A$ : 等値換算厚 (cm)

$D_0-D_{150}$ : たわみ差  $D_0-D_{150}$  (mm)

(6) たわみによる構造評価

前節までに述べたたわみによる評価指標をまとめると、図-9のフローチャートのようになる。goodとpoorの境界値は、現時点ではまだ明確ではないが、4つのたわみ評価指標による舗装の構造評価をまとめると表-1のようになる。

図-9、表-1のたわみの評価指標を用いて簡便な舗装体及び路床の構造評価を行うことができる。

4. 舗装各層の弾性係数の推定

舗装各層の弾性係数の推定は、多層弾性解析プログラム ELSA<sup>12)</sup> をサブプログラムとして取り込んだ非線形最小自乗法による逆解析プログラム LMBS<sup>13)</sup> により行っている。しかし、入力する弾性係数の初期値によっては解が収束するまでの計算回数が多かったり、場合によっては解が解散することもある。弾性係数を簡便に求

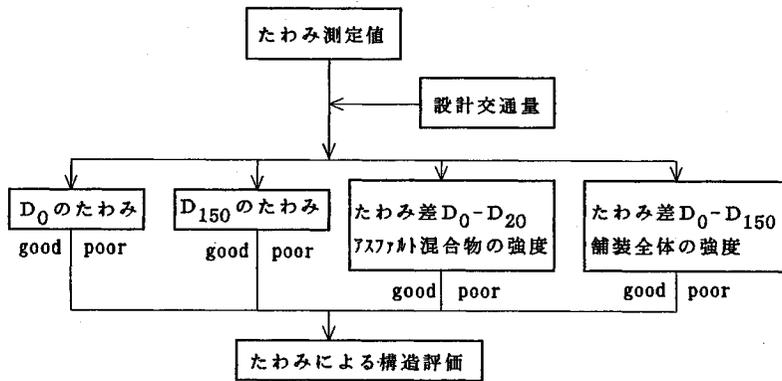


図-9 たわみによる構造評価のフローチャート

表-1 たわみ評価指数による舗装の構造評価

D0の たわみ	D150の たわみ	たわみ差 D0-D20	たわみ差 D0-D150	舗装体の状況
good	good	good	good	舗装の強度が大きく路床の支持力が大きい
good	good	poor	good	アスコンの強度は小さいが路床の支持力は大きい
good	poor	good	good	舗装の強度は大きいが路床の支持力が小さい
poor	poor	good	good	舗装の強度は大きいが路床の支持力が小さい
poor	good	good	poor	路盤の強度が小さく路床の支持力は大きい
good	poor	good	poor	路盤の強度が小さく路床の支持力も小さい
poor	poor	good	poor	路盤の強度が小さく路床の支持力も小さい
poor	good	poor	poor	舗装の強度は小さいが路床の支持力は大きい
poor	poor	poor	poor	舗装の強度が小さく路床の支持力も小さい

める方法として、Marchionnaら<sup>14)</sup>は弾性係数  $E$ 、層厚  $h$  を独立変数とし、たわみとの関係を重回帰分析により求め、得られた重回帰式の弾性係数を変動させて、計算たわみと測定たわみが一致するようにして弾性係数を求めている。多層弾性計算を使用しないで弾性係数を求める例はあるが、多層弾性計算に用いる弾性係数の初期値を求める方法は現在までの研究では存在しない。

そこで、図-10の舗装構造モデルを用いて逆解析プログラムの初期値として入力する弾性係数の推定方法について検討を行った。逆解析プログラムの初期値として入力する弾性係数の値は、全く未知な値をランダムに選んで与えるのではなく、これまでの経験から妥当と考えられる範囲の値を選定しなければならない。

本研究では、前節までに述べた結果を利用して、弾性係数の初期値をさらに絞り込むことを検討した。ここでは、舗装材料によって推定する弾性係数は大きく異なるので、上層路盤に粒状路盤を用いている場合とアスファルト安定処理を行っている場合のそれぞれについて検討を行った。前述のたわみ差  $D_0-D_{20}$  より、アスファルト混合物の層厚  $h_1$  が既知ならば、アスファルト混合物層の弾性係数  $E_1$  を推定することができ、 $D_{150}$  より路床弾

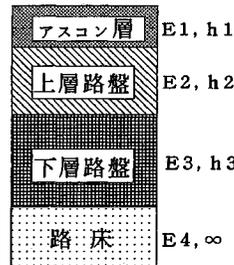


図-10 舗装構造モデル

性係数  $E_4$  を推定することは文献<sup>10)</sup>で明らかになっている。これに基づき  $E_1$  と  $E_4$  を推定することが可能となるので、ここでは路盤層の弾性係数  $E_2$ 、 $E_3$  の推定について検討を行う。

約300個のFWD測定値に対して、路盤層の弾性係数  $E_2$ 、 $E_3$  をそれぞれ目的変数とし、路盤層以外の弾性係数  $E$ ・層厚  $h$ ・各センサのたわみ  $D$ ・各センサ間のたわみ差を従属変数として重回帰分析<sup>15)</sup>を行った。アスファルト混合物層の厚さにより、路盤層に発生する歪レベルが異なるため、路盤層の弾性係数  $E_2$ 、 $E_3$  の推定は、アスファルト混合物層の層厚  $h_1$  の異なるごとに解析を

表-2 上層路盤に安定処理を用いた時の  $E_2$ ,  $E_3$  の重回帰係数

係数	$E_2$ の推定	アスファルト層の層厚 $h_1$ (cm)			係数	$E_3$ の推定	アスファルト層の層厚 $h_1$ (cm)		
		5	10	15			5	10	15
a		27.855	23.701	-15.712	a		93.249	89.347	119.645
b	E1	-0.318	-0.781	-0.904	b	E1	-0.770	-0.993	-0.989
c	E4	-7.489	-5.054	6.008	c	E2	-0.534	-0.921	-0.796
d	h2	-0.339	-0.442	-0.706	d	E4	-44.553	-25.404	-36.203
e	h3	0.343	0.270	0.134	e	h2	-2.670	-2.003	-1.883
f	D0	0.000	1.905	-4.110	f	h3	-0.237	0.000	-0.072
g	D20	-0.440	0.000	8.392	g	D0	1.422	-2.976	0.000
h	D30	0.000	-0.423	0.000	h	D30	-29.416	-15.454	-28.043
i	D60	2.261	0.000	0.000	i	D90	-41.357	0.000	0.000
j	D90	0.000	6.126	3.676	j	D150	4.610	-10.048	-14.329
k	D150	-9.139	-11.137	0.000	k	D20-D30	0.000	-1.901	0.000
l	D0-D20	-1.608	-1.291	0.000	l	D20-D45	2.781	5.027	0.000
m	D20-D30	-0.797	-0.078	-0.693	m	D30-D60	0.000	0.000	5.012
n	D20-D60	3.032	0.000	0.797	n	D45-D60	0.854	1.295	-1.388
o	D30-D45	-1.803	-1.032	-1.495	o	D45-D90	0.000	0.000	3.547
p	D45-D60	-0.665	-0.188	-0.549	p	D60-D90	-6.824	0.000	0.000
q	D45-D90	0.000	-0.921	-2.143	q	D60-D150	24.490	0.000	1.643
$R^2$ (重回帰)		0.983	0.974	0.947	$R^2$ (重回帰)		0.749	0.841	0.834

$$\begin{aligned} \log(E_2) = & a + b \log(E_1) + c \log(E_4) + d h_2 + e h_3 \log(E_3) = a + b \log(E_1) + c \log(E_2) + d \log(E_4) \\ & + f \log(D_0) + g \log(D_20) + h \log(D_30) + e h_2 + f h_3 + g \log(D_0) + h \log(D_30) \\ & + i \log(D_60) + j \log(D_90) + k \log(D_150) + i \log(D_90) + j \log(D_150) + k \log(D_20-D_30) \\ & + l \log(D_0-D_20) + m \log(D_20-D_30) + l \log(D_20-D_45) + m \log(D_30-D_60) \\ & + n \log(D_20-D_60) + o \log(D_30-D_45) + n \log(D_45-D_60) + o \log(D_45-D_90) \\ & + p \log(D_45-D_60) + q \log(D_45-D_90) + p \log(D_60-D_90) + q \log(D_60-D_150) \end{aligned}$$

数値は、標準化した偏回帰係数

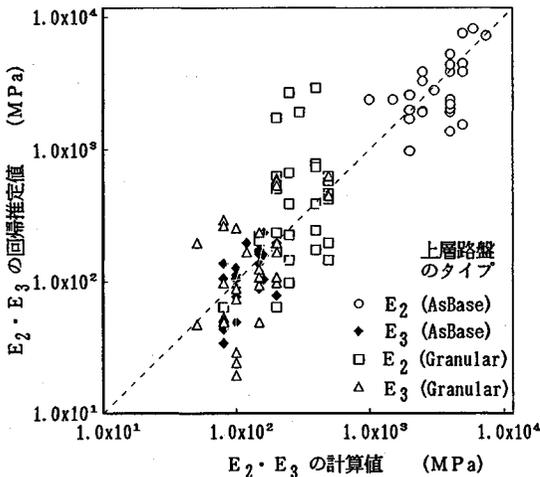


図-11  $E_2$ ,  $E_3$  の計算値と回帰推定値の比較

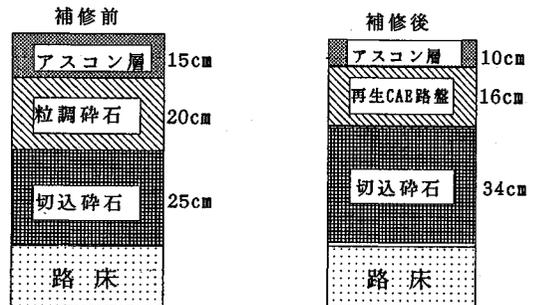


図-12 適用区間の舗装構成

路床の支持力の与える影響が大きいがわかる。

重回帰式より求めた弾性係数  $E_2$ ,  $E_3$  とこれまでに計算して得られた弾性係数  $E_2$ ,  $E_3$  の比較を図-11に示す。この図より、上層路盤に粒状路盤を用いている場合には、 $E_2$  の計算値に比べ回帰推定値の範囲が大きくなる傾向がある。上層路盤に安定処理を用いた場合には、 $E_2$ ,  $E_3$  共に弾性係数の違いが少ない。

### 5. たわみによる評価指数の適用

FWD によるたわみ測定結果に基づき、 $T_A$  及び各層

行った。

上層路盤にアスファルト安定処理を用いた時の重回帰係数を表-2に示す。表中の数値は、各従属変数の値を平均値で除して標準化した偏回帰係数を示す。表より  $E_2$ ,  $E_3$  の推定において、 $E_4$ ,  $D_{150}$  の偏回帰係数が大きく、

表-3 補修前後のたわみの比較

	荷重 (kN)	たわみ (mm)										T <sub>A</sub> (cm)
		D <sub>0</sub>	D <sub>20</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>45</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>75</sub>	D <sub>90</sub>	D <sub>120</sub>	D <sub>150</sub>	D <sub>200</sub>	
補修前	48.7	0.578	0.441	0.347	0.251	0.184	0.142	0.114	0.079	0.054	0.038	18.3
補修後	49.5	0.335	0.264	0.227	0.190	0.156	0.131	0.110	0.080	0.056	0.037	25.4

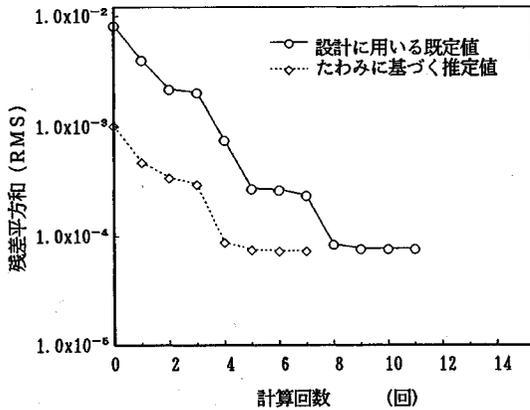


図-13 初期値の違いによる計算回数の違い

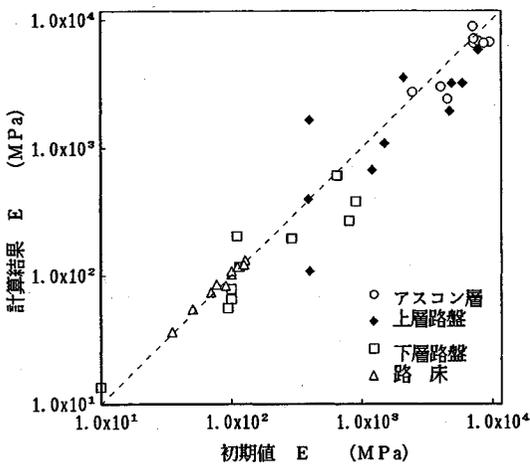


図-14 弾性係数の初期値と計算結果の比較

の弾性係数を推定した例を以下に示す。検討を行った道路はC交通の設計CBRが12%の舗装で、再生セメントアスファルト乳剤(再生CAE)路盤で補修を行った舗装である。補修前後の舗装構成を図-12に示す。補修前後のFWDの各センサのたわみを表-3に示す。また、前述の方法を用いて求めた舗装各層の弾性係数を初期値とし、逆解析を行った結果を表-4にまとめた。

表-3の補修前のたわみを見ると、載荷点直下のたわみD<sub>0</sub>は0.5mmを超えており、式(4)より計算されたT<sub>A</sub>も18.3と小さい。補修前は舗装全体の強度が小さいことがわかる。

補修後のたわみを見ると、D<sub>150</sub>はほとんど変化していないが、D<sub>0</sub>のたわみが0.33mmと小さくなり、式(4)

表-4 補修前後の弾性係数の逆解析

補修前	材料名	アスコン	粒調砕石	切込砕石	路床
	♯7/7比	0.35	0.40	0.40	0.45
	層厚 (cm)	15	20	25	∞
Eの回帰推定値 (MPa)		2500	100	30	150
計算回数	RMS	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>
初期値	1.786 10 <sup>-3</sup>	2500.0	100.0	30.0	150.0
1	6.941 10 <sup>-4</sup>	1477.7	201.5	37.3	150.9
2	3.213 10 <sup>-4</sup>	1763.3	164.0	56.4	144.8
3	1.304 10 <sup>-4</sup>	1819.6	153.1	69.3	145.6
4	1.186 10 <sup>-4</sup>	1832.7	149.4	73.9	145.3
5	1.185 10 <sup>-4</sup>	1835.6	148.6	74.8	145.2
6	1.185 10 <sup>-4</sup>	1835.9	148.4	74.9	145.2
センサの位置 (cm)		測定値	計算値	差	
0		0.05780	0.05798	-0.00018	
20		0.04410	0.04345	0.00065	
30		0.03470	0.03504	-0.00034	
45		0.02510	0.02534	-0.00024	
60		0.01840	0.01860	-0.00020	
75		0.01420	0.01406	0.00014	
90		0.01140	0.01099	0.00041	
120		0.00790	0.00752	0.00038	
150		0.00540	0.00579	-0.00039	
200		0.00380	0.00430	-0.00050	

補修後	材料名	アスコン	再生CAE路盤	切込砕石	路床
	♯7/7比	0.35	0.30	0.40	0.45
	層厚 (cm)	10	16	34	∞
Eの回帰推定値 (MPa)		4700	3500	75	150
計算回数	RMS	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>
初期値	4.739 10 <sup>-4</sup>	4700.0	3500.0	75.0	150.0
1	3.475 10 <sup>-4</sup>	3487.8	2954.6	102.3	157.0
2	1.813 10 <sup>-4</sup>	5220.6	1744.5	88.8	162.8
3	1.781 10 <sup>-4</sup>	2036.9	2538.2	105.3	159.2
4	8.694 10 <sup>-5</sup>	1735.5	2768.7	126.7	155.9
5	7.535 10 <sup>-5</sup>	1768.6	2746.5	130.9	155.9
6	7.534 10 <sup>-5</sup>	1773.2	2737.6	131.2	155.9
7	7.534 10 <sup>-5</sup>	1774.0	2736.2	131.3	155.9
センサの位置 (cm)		測定値	計算値	差	
0		0.03350	0.03345	0.00005	
20		0.02640	0.02621	0.00019	
30		0.02270	0.02302	-0.00032	
45		0.01900	0.01905	-0.00005	
60		0.01560	0.01569	-0.00009	
75		0.01310	0.01295	0.00015	
90		0.01100	0.01075	0.00025	
120		0.00800	0.00769	0.00031	
150		0.00560	0.00582	-0.00028	
200		0.00370	0.00413	-0.00043	

から求めたT<sub>A</sub>も25.4cmに増加している。

表-4の逆解析では、補修前及び補修後共に5、6回で解が収束しており、各センサの測定値と計算値の差の程度を表す残差平方和(RMS)も小さい。路床弾性係数E<sub>4</sub>は、初期値と計算結果がほぼ一致している。切込砕石の弾性係数E<sub>3</sub>は、初期値と計算結果に差がある。実際の切込砕石の弾性係数の範囲はかなり大きく、現状では回帰式の精度を向上させる事は困難である。

設計で用いる各層の弾性係数を初期値にした場合と本論文で提案したたわみに基づく推定値を初期値にした場合の計算回数の違いを図-13に示す。この図より、たわみに基づく推定値を初期値に用いた方が初期値の残差平方和(RMS)が小さく、収束にいたる計算回数が少ない。

ここで示した補修前後の計算例のほかに、各層の弾性係数の初期値と計算結果の比較を図-14に示す。図-

14より、路床弾性係数 $E_4$ とアスファルト混合物の弾性係数 $E_1$ は、初期値と計算結果が比較的一致している。しかし、下層路盤の弾性係数 $E_3$ と上層路盤の弾性係数 $E_2$ は、初期値と計算結果に差が生じている。現段階では重回帰式の結果だけで $E_2$ 、 $E_3$ を求めることは、妥当でないことを示している。

## 6. ま と め

本研究の結論をまとめると以下のようなになる。

- 1) 1日当たりの5t換算許容載荷輪数に対する載荷点直下の限界たわみ( $D_{0max}$ )を設定した。
- 2) たわみ差 $D_0-D_{20}$ とアスコン層の弾性係数と層厚の積 $E_1h_1$ の間には、一意的な関係がある。たわみ差 $D_0-D_{20}$ より、アスコン層の強度が大きい小さいかを判断する事ができる。
- 3) たわみ差 $D_0-D_{150}$ と $T_A$ は一意的な関係がある。たわみ差 $D_0-D_{150}$ より、舗装構造強度が十分であるかどうかの判断を行う事ができる。
- 4) 各センサで得られるたわみ $D$ とたわみ差 $D_i-D_j$ より、路盤層の弾性係数 $E_2$ 、 $E_3$ を推定する重回帰式を提案した。
- 5) たわみに基づき各層の弾性係数( $E_i$ )を推定することは可能であるが、現段階においては路盤の弾性係数( $E_2$ 、 $E_3$ )はアスファルト混合物及び路床の弾性係数( $E_1$ 、 $E_4$ )に比べ信頼性が低い。
- 6) たわみに基づく弾性係数の推定値を弾性係数の逆解析の初期値に適用すると、設計に用いる弾性係数の既定値を初期値に用いた場合より収束が早くなる。

### 参 考 文 献

- 1) 竹下春見：アスファルト舗装の構造設計に関する考え方、舗装、Vol.1-2, 1966.
- 2) Hass, R. and Hudson, W.R. : Pavement Management Systems, McGRAWHILL, 1978.
- 3) 笠原篤：非破壊試験機としてのたわみ測定装置とたわみデータの利用、アスファルト、Vol.32-160, pp.57~68, 1989.
- 4) Lytton, R.L. and Smith, R.E. : Use of Nondestructive

Testing in the Design of Overlays for Flexible Pavements, Transportation Research Record 1007, TRB, pp.11~20, 1985.

- 5) Smith, R.E. and Lytton, R.L. : Operating Characteristics and User Satisfaction of Commercially Available NDT Equipment, Transportation Research Record 1007, TRB, pp.1~10, 1985.
- 6) Vaswani, N.K. and Virginia Highway Research Council : Method for Separately Evaluating Structural Performance of Subgrades and Overlying Flexible Pavements, Highway Research Record 362, HRB, pp.48~62, 1971.
- 7) 達下文一ほか：ダイナフレクトによる舗装の構造評価と補修工法の選択について(その2), 東京都土木技術研究所年報, pp.19~28, 1984.
- 8) Andersson, O. : A Simple Correlation Approach to Interpretation of Deflection Basin Data, 3th International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, pp.435~445, 1990, 7.
- 9) 雑賀義夫ほか：舗装のたわみ測定から得られる性状値に関する考察, 土木学会第44回学術講演会, pp.88~89, 1989.
- 10) 丸山暉彦ほか：FWDによる舗装診断システム, 舗装 Vol.23-11, pp.16~20, 1988.
- 11) Asphalt Institute : Research and Development of Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1), pp.8~15, 1982.
- 12) 姫野賢治ほか：パソコン用多層弾性構造解析システム(ELSA)の開発, 第18回日本道路会議論文集, pp.338~339, 1989.
- 13) Himeno, K., Maruyama, T., Abe, N. and Hayashi, M. : The Use of FWD Deflection Data in Mechanistic Analysis of Flexible Pavements, 3th International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, pp.401~410, 1990, 7.
- 14) Marchionna, A., Cesarini, M., Fornaci, M. G. and Malgarini, M. : Pavement Elastic Characteristics Measured by Means of Test Conducted with The Falling Weight Deflectometer, Transportation Research Record 1007, TRB, pp.46~52, 1985.
- 15) 奥野忠一・芳賀敏郎・久米均・吉澤正：多変量解析法, <改訂版>, 日科技連出版社, 1982.

(1992.2.14 受付)

## STRUCTURAL EVALUATION OF PAVEMENTS BASED ON FWD DEFLECTION INDICES

Nagato ABE, Teruhiko MARUYAMA, Kenji HIMENO and Masanori HAYASHI

This report describes a non destructive pavement structural evaluation method using the Falling Weight Deflectometer (FWD). Deflection indices which include deflection and shape factors are determined from deflection basin measured by the FWD. The multiple regression method is proposed to get seeds which are used for backcalculating layer's elastic moduli.

As a result, it takes less time to backcalculate elastic moduli.