

FWDを用いた舗装の逆解析構造診断手法に関する提案

前川亮太・永塚竜也・藪 雅行

1. はじめに

高度経済成長期やそれ以降に整備した多くの道路が老朽化に直面していることを踏まえ、土木研究所舗装チームでは、安全を保ちつつ舗装マネジメントの効率化に役立つ様々な技術の開発や普及に取り組んでいる。その主要なものの一つとして、路面だけにとどまらない、舗装内部の健全性を適切に診断できる技術の普及を重要視している。本稿では主要な診断方法であり、道路管理者からの問い合わせも多い「FWDによる弾性係数の算出」を対象に活用の要点に関する考察を述べたい。

2. 舗装の診断技術

2.1 主要な診断技術

平成28年に舗装点検要領¹⁾（以下「点検要領」という。）が制定され、路盤以下の層の構造的健全性に着目した点検・診断が各地で行われている。この点検要領では、アスファルト舗装の「損傷の進行が速い道路等」において、表層を修繕することなく供用し続ける目標の年数を設定することが規定され、それよりも早く損傷に至った場合には、詳細調査を行い路盤の構造的健全性を調査することが規定されている。

この詳細調査には代表的なものとしてコア抜き調査、開削調査、FWD調査が挙げられる。なかでもFWD調査は舗装路面のたわみ量から舗装全体の支持力や路床のCBR等を非破壊で推定することができ、効率的に舗装の構造的健全性を評価できることから広く普及している。

2.2 FWDの原理と活用方法

FWDとはFalling Weight Deflectometerの頭文字をとった名称であり、「落とす」「錘(おもり)」「たわみ」を意味する3語からなる名称の、舗装の支持力を把握する装置である。FWDの原理のイメージを図-1に、FWDの外観を写真-1に示す。

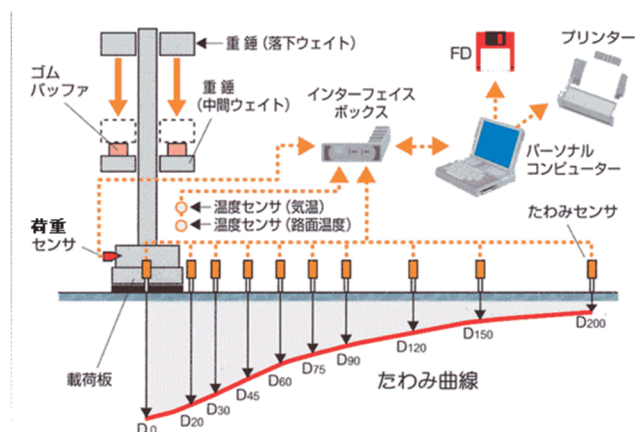


図-1 FWDの原理



写真-1 FWDの外観の例

FWDの利点のひとつに、舗装の層ごとの弾性係数を推定できることが挙げられる。路面ではない、舗装内部の健全性の評価指標として、点検要領等で標準とされている評価指標は特にない。しかし、前述したFWDを用いて算出した舗装内部の層ごとの弾性係数を評価指標として道路管理を行っている道路管理者が一定数あり、具体手法や算出結果の理解の仕方について土木研究所舗装チームが相談を受けることもしばしばあることから、FWDによる弾性係数の算出を本稿のテーマに挙げた。

弾性係数の推定手法は、測定されたたわみと荷重から弾性係数を算出する手法であり「逆解析」と呼ばれる。逆解析で得られた舗装の層ごとの弾

性係数により、路面に現れる損傷の原因が舗装のどの層にありうるのかを推定することが可能であり、全国の道路管理者で広く用いられている手法である。

逆解析に関する具体的な方法としてはまず、舗装各層の厚さとポアソン比、仮に設定した各層の弾性係数（以下「初期値」という。）から荷重が作用したときに路面に発生するたわみ量を計算する。この計算過程を一般に「順解析」と呼ぶ。その後、計算したたわみ量と実際にFWDで測定したたわみ量を比較し、両者に差が生じているようであれば各層の弾性係数を変えて再度たわみ量を計算する。この作業を繰り返し行うことで、計算結果と実測値が最小となるような各層の弾性係数を求める²⁾。これらの計算は一般に、逆解析専用のプログラム^{3),4)}を用いて行われる。

しかし、この逆解析による方法は、いくつかの書籍に構造評価の計算例^{2),5)}として紹介はされているものの、具体的な解析方法や解析パラメータの設定値については定められておらず、これらは実務を担う技術者の判断に委ねられているのが現状である。特に解析時に設定する弾性係数の初期値は、その値によって計算結果に影響を及ぼすことがわかっている²⁾。

以下、逆解析を行う際に設定する弾性係数の初期値が、各層の弾性係数の計算結果にどのような影響を及ぼすのかを試算したので紹介する。

3. 逆解析による診断手法

3.1 弾性係数の初期値が計算結果に及ぼす影響の確認

3.1.1 検討の目的と方法

本検討の目的は、逆解析で設定する弾性係数の初期値の違いによって「①解析結果は各層の材料が有する弾性係数の真値（以下「正解値」という。）に対してどの程度過大、あるいは過小に評価するのか」、また「②初期値の増減によって、①がどのように変動するのか」の2点とした。

ここで特筆したいことは、本検討の逆解析に用いるたわみ量は現場での実測値ではなく、多層弾性理論に基づく理論上のたわみ量を用いた点である。FWDの実測値ではなく理論値を採用した理由は、既往の研究成果（例えば6））で示されていない、次に述べる知見を得るためである。

既往の成果では、FWDの実測データを用いても弾性係数の正解値が不明であり、前述①に関する知見を得ることができない。前述②単体であれば既往の成果が参考になる。一方、本稿の試みの特徴は、理論上のたわみ量を用いることにより①と②の両方を扱っている点にある。なお②については各層における材料の弾性係数の一般的な値の範囲のなかで初期値を変えたいくつかのケースを設定し、その解析結果の傾向を確認した。

解析モデルは、N5交通、設計CBR4、設計期間10年、信頼度90%のTA法で設計された一般的な舗装構成⁷⁾とした。舗装構成と解析に用いたパラメータを図-2に示す。

検討の方法はまず、図-1に示す舗装構成と設定した弾性係数の正解値とポアソン比から、FWDの載荷荷重（荷重49kN、載荷板半径15cm）が作用したときの理論上のたわみ量を、多層弾性解析ソフトGAMES8を用いて計算した。この結果を図-3に示す。

	舗装構成			解析パラメータ		
	厚さ [cm]	× 等値換 算係数	= T _A	弾性係数[MPa]		ポアソン 比 ^{※2}
				正解値 ^{※1}	初期値 ^{※2}	
アスコン	10	× 1.00	= 10.00	5,000	600 ~12,000	0.35
上層路盤(粒状 砕石)	15	× 0.35	= 5.25	300	100 ~600	0.35
下層路盤(クラ ッシュラン)	35	× 0.25	= 8.75	200	100 ~600	0.35
路床	CBR4	Σ	24.0	40	40	0.40

※1 各層の弾性係数の正解値: 舗装設計便覧P.117 表-5.3.1の代表値を参照

※2 各層の弾性係数の初期値、ポアソン比: 舗装設計便覧P.117 表-5.3.1を参照

図-2 舗装構成と計算パラメータ

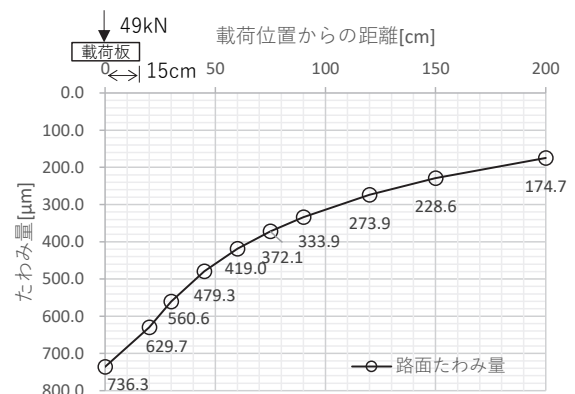


図-3 弾性係数の代表値から計算したたわみ量

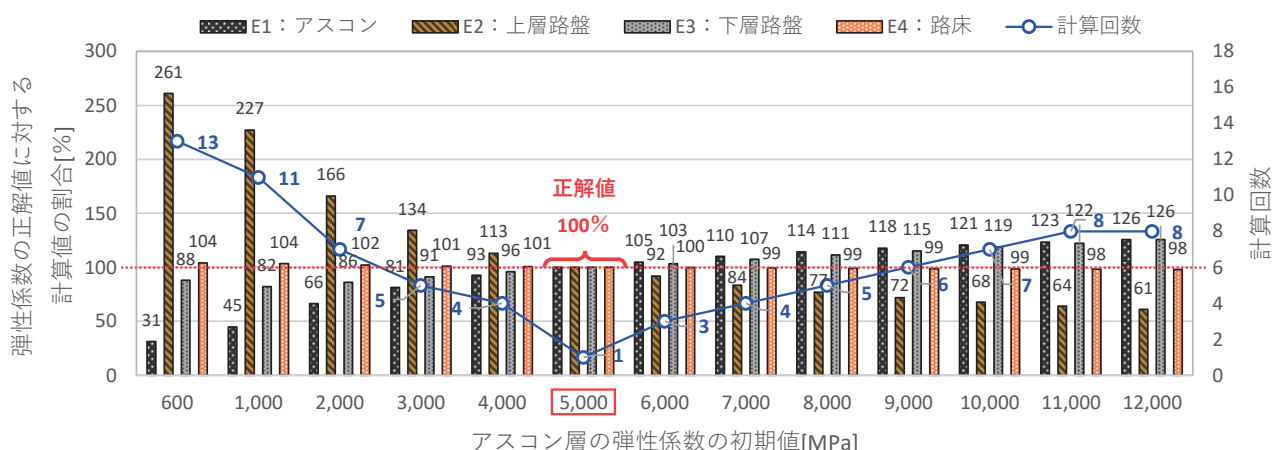


図-4 アスコン層の弾性係数の初期値と各層の弾性係数の計算結果

本検討では図-3のたわみ量が、実際に現場で測定されたたわみ量と仮定して逆解析プログラム「BALM」⁴⁾に入力し、アスファルト混合物層（以下「アスコン層」という。）と路盤層（上層、下層）の弾性係数の初期値を変えて各層の弾性係数を計算した。その後、計算された各層の弾性係数と正解値を比較し、初期値によってどの程度弾性係数の算出結果にばらつきがみられるかを確認した。

3.1.2 アスコン層の弾性係数の初期値が各層の弾性係数の計算に及ぼす影響

アスコン層の弾性係数の初期値は、一般的な値の範囲（600～12,000MPa）のなかで計13ケース設定した。路盤と路床の弾性係数は、アスコン層の弾性係数の初期値の影響を確認するため、いずれのケースにおいても図-2に示す正解値で固定している。試算結果を図-4に示す。図-4の横軸はアスコン層の弾性係数の初期値で、棒グラフは各層における弾性係数の正解値に対する計算値の割合を示している。正解値はそれぞれアスコン層5,000MP、上層路盤300MPa、下層路盤200MPa、路床40MPaである。また折れ線グラフは、BALM⁴⁾のなかで弾性係数が決定するまでに繰り返した順解析の回数（以下「計算回数」という。）を示している。この結果からアスコン層の弾性係数は、初期値を正解値よりも大きく設定するほど、アスコン層と下層路盤の弾性係数は大きくなり、逆に上層路盤と路床の弾性係数は小さくなった。特に初期値を12,000MPaに設定したときの路盤の弾性係数は61%と、小さく評価する傾向

がある。

一方、アスコン層の弾性係数の初期値を正解値よりも小さく設定した場合には、初期値を正解値よりも小さく設定するほどアスコン層と下層路盤の弾性係数は小さくなり、逆に上層路盤と路床の弾性係数は大きくなった。これらは特に初期値を600MPaに設定したときのアスコン層で31%と小さく評価、上層路盤で261%と大きく評価することとなり、その傾向が顕著に表れていることがわかった。計算回数については、初期値が正解値から離れるほど繰り返し計算の数が増える傾向にあることがわかった。

3.1.3 上層路盤の弾性係数の初期値が各層の弾性係数の計算に及ぼす影響

上層路盤の弾性係数の初期値は、一般的な値の範囲（100～600MPa）のなかで計11ケース設定した。前項と同様に、上層路盤以外の層の弾性係数は図-2に示す正解値で固定している。試算結果を図-5に示す。この結果から上層路盤の弾性係数は、初期値を正解値よりも大きく設定するほど、上層路盤と路床の弾性係数は大きくなり、逆にアスコン層と下層路盤の弾性係数は小さくなった。特に初期値を600MPaに設定したときの路盤の弾性係数は正解値に対して149%と大きく評価する傾向がみられた。

一方、上層路盤の弾性係数の初期値を正解値よりも小さく設定した場合には、初期値を正解値よりも小さく設定するほど上層路盤と路床の弾性係数は小さくなり、逆にアスコン層と下層路盤の弾

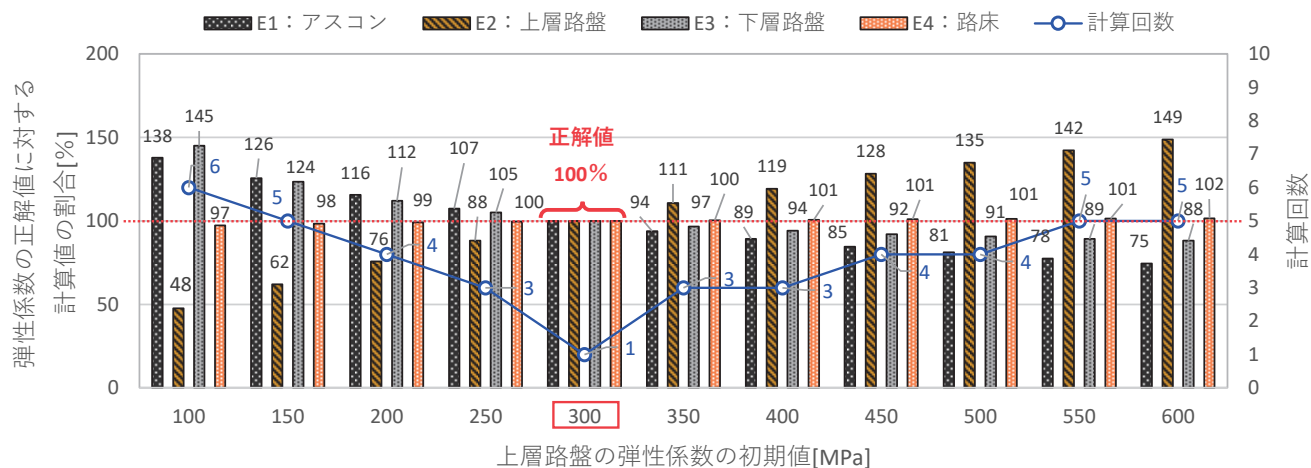


図-5 上層路盤の弾性係数の初期値と各層の弾性係数の計算結果

性係数は大きくなった。これらは特に初期値を100MPaに設定したときの上層路盤で48%小さく評価し、アスコン層で138%、下層路盤で145%の大きい評価となり、その傾向が顕著に表れている。また、計算回数については初期値が正解値から離れるほど繰り返し計算の数が多くなる傾向にあることがわかった。

4. まとめ

FWDで算出した弾性係数について舗装の健全性を判別する際に、値のわずかな大小をもってやや過敏に健全性の優劣を区別しようとする現場にいくつか接してきた。今回示した結果は、ひとつの舗装構成と理論的なたわみ曲線を対象に試算した結果にすぎないが、FWD逆解析で算出する弾性係数のばらつきの程度を示した。設定する各層の弾性係数の初期値は正解値に近いほうがより適切といえるが、実際の現場では測定や計算の前に正解値は知りえない。道路管理の実務においては、算出結果がこの程度ばらつくという認識を持つことと、初期値をいくつかのパターンで計算し、その

なかでも計算回数が少ないケースを採用することが、逆解析結果の確からしさを高めるうえで効果的であると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：舗装点検要領2016.10
- 2) (公社) 土木学会 舗装工学委員会：舗装工学ライブラリー14非破壊試験による舗装のたわみ測定と構造評価、p.59～78、2015.11
- 3) 姫野、井上：FWDによる舗装の診断、アスファルト、第35巻、第175号、p.9～20、1993
- 4) James MAINA, Hiroshi YOKOTA, Kunihito MATSUI : EFFECT OF ERROR IN LAYER THICKNESS ON BACKCALCULATED LAYER MODULI、土木学会舗装工学論文集第3巻、1998.12、p.49～56
- 5) (公社) 日本道路協会：舗装の維持修繕ガイドブック2013、p.81、2013.11
- 6) FWD研究会：2005年度報告書 FWDに関する研究、2005.12
- 7) (公社) 日本道路協会：舗装設計便覧、p.85、2006.2
- 8) (公社) 土木学会 舗装工学委員会：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 (General Analysis of Multi-layered Elastic Systems) を利用して—、2005.

前川亮太



研究当時 土木研究所 道路技術
研究グループ舗装チーム 主任研
究員、現 ニチレキ(株) 博士(工
学)
Dr. MAEKAWA Ryota

永塚竜也



研究当時 土木研究所 道路技術
研究グループ舗装チーム 専門研
究員、現 ニチレキ(株)
NAGATSUKA Tatsuya

藪 雅行



土木研究所 道路技術研究グ
ループ舗装チーム 上席研究員
YABU Masayuki