

舗装の逆解析において層弾性係数の推定に影響を及ぼす因子とその影響度の検討

井上武美*・松井邦人**・三瓶辰之***

舗装の構造評価を行うため、測定した表面たわみ形状より舗装各層の弾性係数を推定している。この推定値に、種々の因子が影響を与える。本論文では、モンテカルロシミュレーションを用いて、層厚の誤差、ポアソン比の誤差については実構造を参考に、また測定値の誤差には測定精度を考慮し、これらの誤差が層弾性係数の推定値に与える影響を調べた。さらに、たわみ測定点の間隔と数が推定値に及ぼす影響も検討した。

Keywords : pavement structure, layer moduli, backcalculation, model error, measurement error

1. はじめに

既設舗装の構造的な健全性や路面性状に関して精度の良い情報を収集して舗装を評価することは、合理的な修繕計画を策定するうえで必要不可欠である。特に近年、舗装の非破壊試験とその評価に関する数多くの発表がなされており、海外においても1988年6月にBaltimore (Maryland, U.S.A)で舗装の非破壊試験と弾性係数の逆解析に関する第1回シンポジウム¹⁾が開かれている。1990年1月に開催されたTransportation research boardの第69回年次講演会²⁾、また同年7月にはTrondheim (Norway)で開かれた道路および空港の支持力に関する国際会議³⁾においても数多くの逆解析法と実舗装への適用例の発表が行われてきている。それらの研究報告では、構造的評価を行う方法として各種の方法が提案されており、いずれの方法でも舗装表面に載荷しその周辺で数か所のたわみを測定している。その中でもFWD (フォーリング・ウェイト・デフレクトメータ) 試験は最も注目されている。FWDによる評価の多くは、舗装構造を多層弾性構造で表せるとの仮定の下で表面たわみから各層の弾性係数を決定する一般に逆解析と呼ばれる手法であり、このような弾性係数を推定する方法としてはすでに多くの研究が発表されている。著者ら⁴⁾も Gauss-Newton 法とムーブリミットの考え方を用いて効率的な層弾性係数推定法を提案してきた。笠原ら⁵⁾は、アスファルト混合物層の弾性係数は混合物の弾性係数試験との相関と温度との関係で、路盤、路床の弾性係数はノモグラフを利用して求めている。さらに構造評価だけではなく舗装寿命の推定までも行っている。

しかし既往の研究をみると、弾性係数推定値に影響を与える種々の要因についての検討がなされていない。既設の舗装断面は設計断面と必ずしも同一ではなく、また同一区間でも舗装断面にばらつきがあってこれらを正確に知ることはできない。さらに、各層のポアソン比も概略値はわかっているが正しい値は不明である。このように逆解析を行うときモデルには誤差が含まれる(モデル誤差)。一方、測定された表面たわみも同様に誤差を含んだものであり(測定誤差)、当然逆解析結果はその誤差を反映したものとなってくる。本研究の目的は、まずこのようなモデル誤差と測定誤差が各層の弾性係数の推定値に与える影響を定量的に把握することである。

2. 評価関数の検討

M 個の層からなる多層弾性構造の層弾性係数を $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_m, \dots, x_M)^T$ で表す。また、その表面で測定された N 個のたわみ(測定たわみ)を $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n, \dots, u_N)^T$ 、多層弾性理論で解析した同位置でのたわみ(解析たわみ)を $\mathbf{z}(\mathbf{x}) = (z_1(\mathbf{x}), \dots, z_n(\mathbf{x}), \dots, z_N(\mathbf{x}))^T$ とする。 $\mathbf{z}(\mathbf{x})$ は解析たわみを与える層弾性係数の関数となることを意味している。本来、舗装表面の全域で測定たわみと解析たわみが一致するものであるとすると、測定たわみと解析たわみはともに r と θ の関数であり、その評価関数は式(1)で示される。

$$J(\mathbf{x}) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} w(r, \theta) \{u(r, \theta) - z(\mathbf{x}|r, \theta)\}^2 d\theta dr \dots\dots\dots (1)$$

いま、問題を軸対称であるとするとき式(2)となる。

$$J(\mathbf{x}) = \int_0^\infty w(r) \{u(r) - z(\mathbf{x}|r)\}^2 dr \dots\dots\dots (2)$$

非対称では式(1)を、軸対称では式(2)を最小とするように \mathbf{x} を決めれば良い。現実問題として、舗装表面のすべての点で表面たわみを測定することは不可能で

* 正会員 日本舗道(株)総合技術部技術管理課長 (〒104 中央区京橋1-19-11)
 ** 正会員 Ph. D. 東京電機大学教授 理工学部建設工学科
 *** 正会員 日本舗道(株)総合技術部生産技術第2グループ

ある。本問題を軸対称に限定し、有限個の点で表面たわみを測定するものとする。評価関数は式(3)となる。

$$J(x) = \sum_{n=1}^N w_n (u_n - z_n(x))^2 \dots \dots \dots (3)$$

w_n 重み係数は、数学的見地から式(2)の数値積分の精度を向上するように選択することも可能であろう⁶⁾。

一方、工学的にはできるかぎり簡素化することも重要である。文献7)によると $w_n = \sigma_0^2 / \sigma_n^2$ である。 σ_n^2 は測点 n での測定たわみの分散、 σ_0^2 は無次元化の定数ですべての測点で一定である。このとき評価関数は式(4)となる。

$$J = \sum_{n=1}^N \frac{\sigma_0^2}{\sigma_n^2} (u_n - z_n(x))^2 \dots \dots \dots (4)$$

各測点で分散が等しいとき、 $\sigma_n^2 = \sigma_0^2$ ($n=1, \dots, N$) とおくことができる。このとき式(4)は式(5)となる。

$$J = \sum_{n=1}^N (u_n - z_n(x))^2 \dots \dots \dots (5)$$

また、すべての測点で変動係数が一定のとき $\delta = \sigma_n / u_n$ ($n=1, \dots, N$) となる。そこで $\sigma_0^2 = \delta^2$ を選択すると式(4)は式(6)となる。

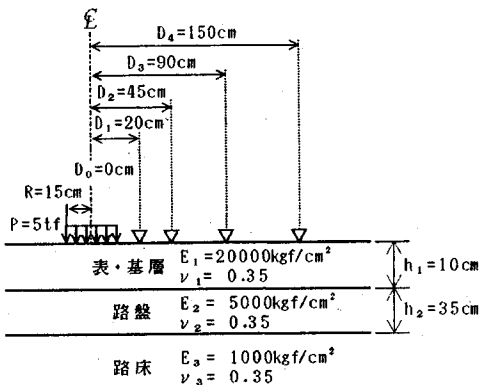
$$J = \sum_{n=1}^N \left\{ 1 - \frac{z_n(x)}{u_n} \right\}^2 \dots \dots \dots (6)$$

式(5)は各測点の測定たわみと解析たわみの差の2乗和であるのに対し、式(6)は1から各測点の解析たわみと測定たわみの比を引いたものの2乗和、すなわちたわみの不一致度の2乗和であるといえることができる。

また式(5)は、式(6)の各項に重み $w_n = u_n^2$ を掛けたものと一致する。式(6)は各測点で1と比較する形になっており、これはすべての測点でたわみを同様に重要視しているのに対して、式(5)はたわみの大きな測点を重視していると考えられる。たわみの一致度(あるいは不一致度)を等しくしようという考え方は、たわみの大きな位置ではたわみ誤差が大きくなることを許容することになりエンジニアの感覚として受け入れ難い。したがって式(6)よりは式(5)が望ましいと思われる。式(2)の代わりに式(5)あるいは式(6)を用いると、有限個の測点で測定たわみと解析たわみの差を最小にするように層弾性係数 x を決定することになる。

3. アスファルト舗装構造の設計

舗装構造はその表面に作用する交通荷重に耐えるよう各層がおおのこの機能を分担するようになっている。その設計は、気象条件、経済性をも考慮し各層が十分な厚さと品質をもつもので構成されなければならない。荷重は通常交通量で示されており、力学的には大型車交通量と路床の設計 CBR から舗装構造は決められる。通常の舗装構造は3層以上になるが、ここでは誤差の影響の検



測点	D0	D1	D2	D3	D4
たわみ (cm)	0.0481	0.0357	0.0244	0.0155	0.0096

図-1 3層構造モデル

討結果が把握しやすいことも考慮して図-1に示すような3層構造を検討例として考える。また同図に示した層厚、ポアソン比をこの断面の標準値とする。さらに、5tf荷重が半径15cmに円形等分布するとして多層弾性解析を行い、荷重載荷点中心から着目点までの距離とその点でのたわみを同図に併記した。

4. モデル誤差の検討

FWD 試験を念頭において考えると、実際の舗装構造と逆解析に用いる舗装構造の解析モデルとの間には種々の差異がある。これらを一般にモデル誤差といえることができるであろう。本逆解析では次のようなモデル化を行う。解析モデルは微小弾性理論で、等質・等方性、層間のすべりはなく、路床は半無限として扱う。また各層厚、ポアソン比を既知として与える。そして、衝撃載荷を行い、測定されたたわみのデータは静的なデータと同様に扱い逆解析を行う。逆解析の際における評価関数は式(6)を用い、収束条件は評価関数の値が 10^{-8} 以下となった場合、もしくは繰り返し計算回数が40回に達したとき計算を打ち切り、評価関数が最も小さくなったときの値を収束値としている。

ここでは特に逆解析を行うときの層厚とポアソン比の影響について検討するものとする。各層の弾性係数を正しく評価するためには、測定位置における正確な舗装構造断面を用いなければならない。しかし、これには一般に破壊試験を伴い、測定時間、経費等もかかり現実的ではない。したがって設計断面を用いて逆解析を行う必要がある。そこで実際の舗装断面が設計断面と比べてどの程度ばらついているかのデータがあれば、設計断面を用いて逆解析して得られた弾性係数から実際の弾性係数のおよその範囲を推定することも可能となろう。層厚のばらつきは既往のデータ⁸⁾(表-1)を用い、正規分布す

表一 層厚の標準偏差 (cm)

工種		7.7.7.1舗装要綱で考慮した値	図-1で考慮した値
表・基層	アスファルト	0.45	0.71
	加熱混合物		
	基層	0.55	
上層	粒調碎石	1.5	(3.2 ² ~3.4)
	脛青安定処理	1.0	
路盤	下層路盤	3.0	

表二 正規乱数による層厚の平均値と標準偏差

層	平均値	標準偏差
表・基層	9.8	1.10
路盤	34.5	2.84

(単位: cm)

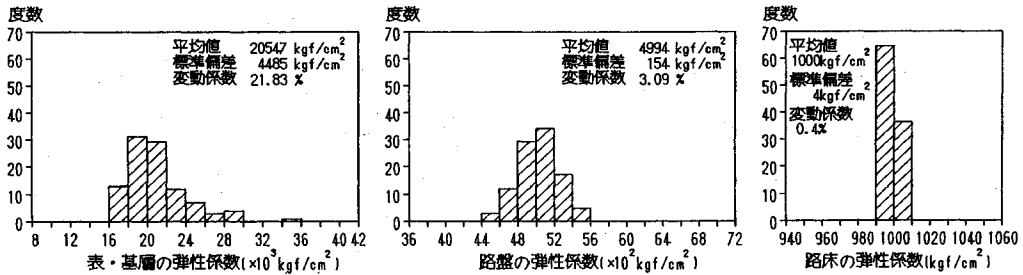


図-2 (a) 表・基層厚をばらつかせたとときの逆解析結果

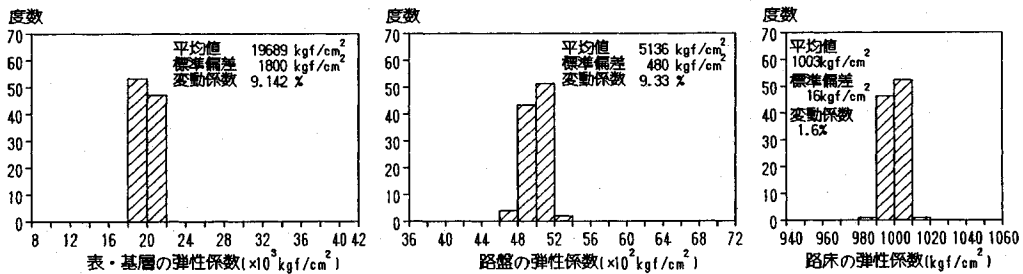


図-2 (b) 路盤厚をばらつかせたとときの逆解析結果

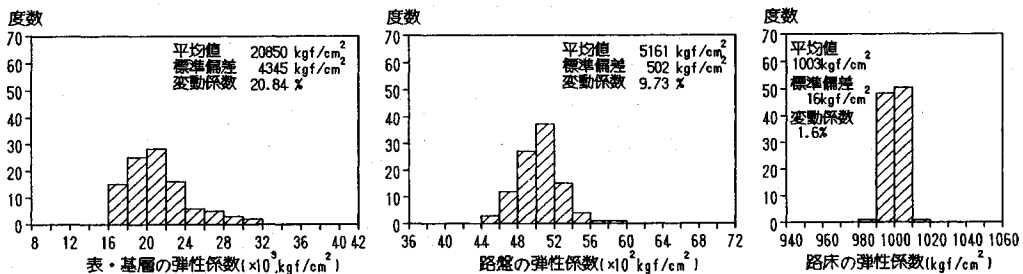


図-2 (c) すべての層厚をばらつかせたとときの逆解析結果

るものと仮定した。これは実際の舗装がこれをベースとした検査試験に合格している点も考慮したからである。表一に從ってモンテカルロシミュレーションにより正規分布の仮定の下で層厚をおのおの100個作成した。図一1の3層構造についてこのように作成した層厚の平均値と標準偏差を表二に示す。表二は、図一1にモデル化した舗装の施工順序と舗装の各層厚を考慮するとほぼ表一のばらつきを想定したものとなっている。ポアソン比を0.35に固定し、個々の層厚のばらつきが層弾

性係数の推定値に及ぼす影響を調べるため、1層だけ厚さを変動させ逆解析を行った。さらにすべての層厚の変動が層弾性係数に与える影響も同様に逆解析より求め図一2に示した。この結果より、逆解析においてある層の層厚に正しくない値を用いると、その層の弾性係数に大きく影響するだけでなく、他の層の弾性係数の推定値にも影響を与えることがわかる。特に表・基層の厚さに誤差が含まれるとき、その弾性係数の推定値に与える影響が大きいことを示している。

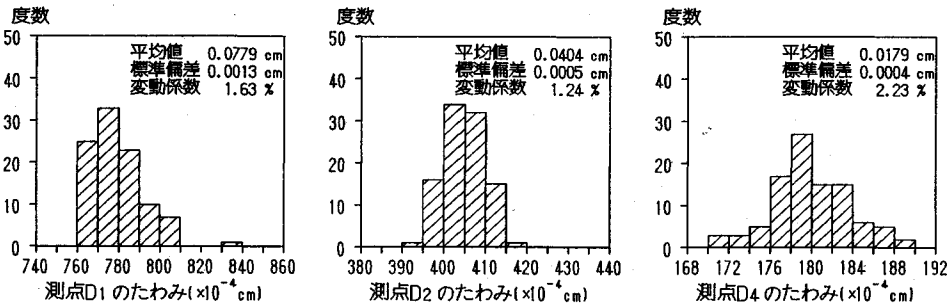


図-3 FWD測定たわみの分布

表-3 ポアソン比の値

材 料	値の範囲	一般的な値
アスファルト・コンクリート 7x安定処理	0.15~0.45	0.35
セメント 安定処理	0.15~0.30	0.20
粒状路盤 下層路盤	0.30~0.40	0.35
路 床	0.30~0.50	0.40

表-4 各層のポアソン比をばらつかせたときの逆解析結果

	平均値 (kgf/cm ²)	標準偏差 (kgf/cm ²)	変動係数 (%)	
表・基層のポアソン比をばらつかせたときの推定値	表・基層	20814	1344	6.457
	路盤	5090	144	2.83
	路床	1001	2	0.2
路盤のポアソン比をばらつかせたときの推定値	表・基層	19873	216	1.09
	路盤	4824	256	5.31
	路床	1003	5	0.5
路床のポアソン比をばらつかせたときの推定値	表・基層	21332	1051	4.927
	路盤	4755	191	4.02
	路床	981	21	2.1
全比をばらつかせたときの推定値	表・基層	22070	1864	8.446
	路盤	4661	359	7.70
	路床	986	22	2.2

次にポアソン比の値の不確実性の影響を検討することにする。実際の舗装構造の各層材料のポアソン比を正確に測定することは容易ではない。FWD試験結果の逆解析のたびにポアソン比を測定することは層厚を測定する以上に困難でありほとんど不可能である。文献9)にポアソン比のばらつきが表-3のように与えられているが、その分布については不明であるなどポアソン比に関してはあいまいな点が多い。ここでは割り切ってすべての層のポアソン比は0.1から0.45の間で一様分布すると仮定した。

各層のポアソン比は0.1から0.45の間で一様分布になるように、それぞれの層で100個のポアソン比のデータを作成した。まず各層のポアソン比の誤差が弾性係数の推定値に及ぼす影響を調べるため、1層だけのポアソン比を変え、他の層のポアソン比を0.35と固定した。その他の値は図-1に示された層厚と表面たわみを用いて逆解析を行った。その結果を表-4に示す。この結果より逆解析を行うとき1つの層のポアソン比に誤りがあると、その層だけでなく他の層の弾性係数の推定値にも影響することがわかる。ポアソン比が取り得る値を0.1から0.45の広い範囲でばらつくと考えたにもかかわらず、逆解析計算後の変動係数では9%以下となった。しかし、一般に考えられているポアソン比の範囲が本研究で考えた範囲よりも小さいことから、ポアソン比のばらつきが層弾性係数の推定値に及ぼす影響は、実際にはかなり小さいものであると考えられる。

5. たわみの測定誤差の検討

測定データから誤差の混入を排除することは不可能である。したがってFWD試験の測定データのばらつきを精度良く求め、それが逆解析して得られる層の弾性係数の推定値にどの程度影響するかを調べることが重要である。Uzanら¹⁰⁾はFWD試験のたわみのばらつきを調べ、各測点での標準偏差はほぼ平均たわみに比例する、すなわち変動係数がほぼ一定であると述べている。姫野ら¹¹⁾もFWD試験を行い同じ傾向を確認している。また著者らがFWD試験を同一地点で99回行って得た測定たわみの分布例を図-3に示した。この結果も同様の傾向を示している。本検討における各測点のたわみは図-3を参考とした正規分布とし、その変動係数を2%と仮定した。

図-1のモデルを解析して求めたたわみを平均値とし、その変動係数が約2%となるように正規乱数を求め100組のたわみデータを作成した。まず各測点におけるたわみ誤差の感度を調べるため図-1の3層モデルを用い1つの測点にだけ誤差を混入し、その他の測点にはたわみ誤差は全くないものとして逆解析を行った。推定弾性係数の分布の例を載荷点直下(測点D₀)のたわみと載荷点中心より90cm(測点D₃)の位置のたわみに誤

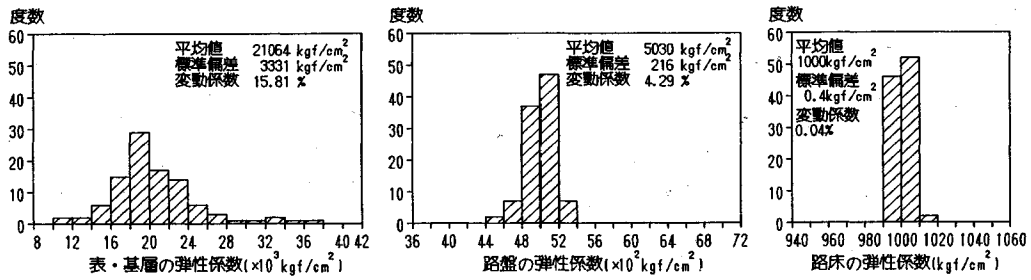


図-4 (a) 測点D₀のたわみをばらつかせたときの逆解析結果

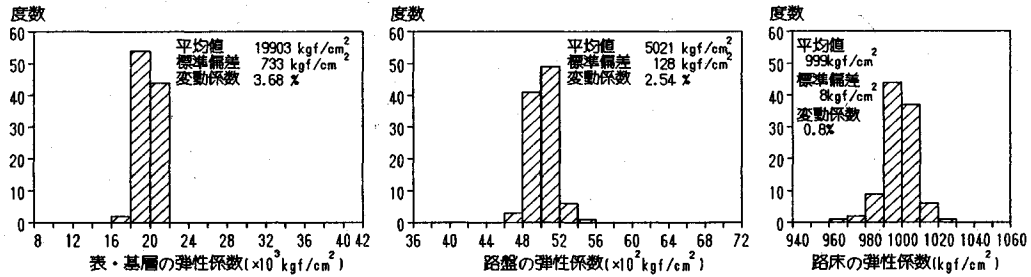


図-4 (b) 測点D₃のたわみをばらつかせたときの逆解析結果

差が混入したときの結果について図-4に示す。またその他の測点に誤差が混入したときの逆解析結果も含め表-5に記した。

FWD試験によるたわみの測定値は、変動係数が約2%と非常に小さいにもかかわらず層弾性係数の推定値に及ぼす影響は非常に大きい。載荷点中心におけるたわみに誤差が含まれるとき表・基層の変動係数が大きくなっていることから、表・基層の弾性係数の推定値に大きな影響を与えることがわかる。一般にたわみの測定誤差は、測点が載荷点に近いほど上層の弾性係数推定値に与える影響が大きく、載荷点から離れるにつれ誤差の影響は小さくなっている。また、たわみの測定誤差が路床の弾性係数推定値に及ぼす影響は非常にわずかであるといえる。

6. 各種誤差の総合的影響

実際の舗装構造を対象として逆解析を行うとき、上記のすべてが弾性係数推定値に誤差の影響として現れる。それらを念頭において得られた結果を判断し、場合によっては維持修繕計画を策定する必要がある。そこで、①測定たわみとして図-1に示した値を用い、すべての層厚、ポアソン比に誤差が混入したとき、②図-1に示した解析モデルを用いすべての測定たわみに前記の変動係数による誤差が混入したとき、③上記①と②の誤差がすべて同時に混入したときのおのおのについてモンテカルロシミュレーションで解析し、その結果を表-6に示す。まず①の場合、表・基層の弾性係数の平均値が約23000

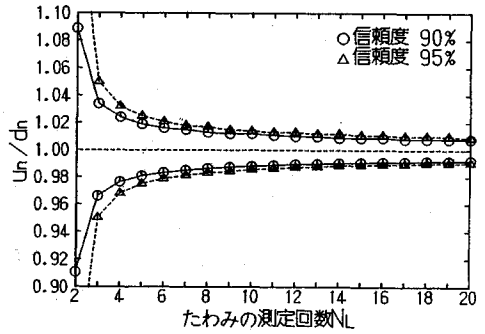
表-5 各測点のたわみをばらつかせたときの逆解析結果

		平均値 (kgf/cm ²)	標準偏差 (kgf/cm ²)	変動係数 (%)
測点D ₀ のたわみをばらつかせたときの推定値	表・基層	21064	3331	15.81
	路盤	5030	216	4.29
	路床	1000	0.4	0.04
測点D ₁ のたわみをばらつかせたときの推定値	表・基層	20275	5379	26.53
	路盤	5074	580	11.4
	路床	1001	1	0.1
測点D ₂ のたわみをばらつかせたときの推定値	表・基層	20006	106	0.530
	路盤	5004	65	1.3
	路床	999	13	1.3
測点D ₃ のたわみをばらつかせたときの推定値	表・基層	19903	733	3.68
	路盤	5021	128	2.55
	路床	999	8	0.8
測点D ₄ のたわみをばらつかせたときの推定値	表・基層	20011	294	1.469
	路盤	4999	54	1.1
	路床	1000	4	0.4

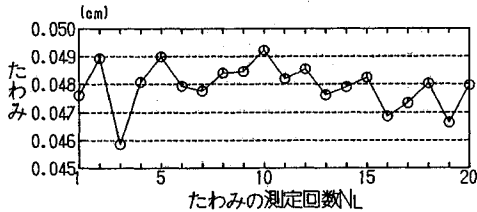
kgf/cm²と15%ほど大きくなっている。その理由はポアソン比の変動領域が0.1から0.45であり、その中央値が0.275となるのに対し、逆解析に用いたたわみはポアソン比が0.35のものであるためと思われる。次に②の場合、表面たわみの変動係数は約2%であるにもかかわらず、弾性係数の推定値は表・基層で変動係数が約33%、路盤で約13%と大きくなっている。しかし路床の弾性係数の変動係数は2%以下となり、たわみ誤差が路床の推定弾性係数に及ぼす影響は小さい。さらに③の場合、これらの誤差の総合的影響は表・基層で変動係数が約45%にも達している。

表一六 すべての層厚とポアソン比およびたわみをばらつかせたときの逆解析結果

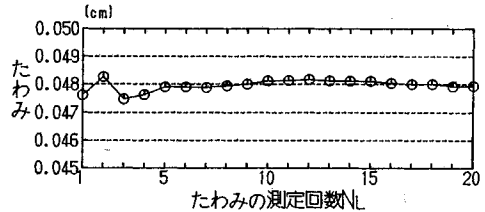
		平均值 (kgf/cm ²)	標準偏差 (kgf/cm ²)	変動係数 (%)
層厚とポアソン比をばらつかせたときの推定値	表・基層	23077	5490	23.79
	路盤	4808	625	12.3
	路床	989	29	2.9
たわみをばらつかせたときの推定値	表・基層	20720	6923	33.41
	路盤	5095	645	12.7
	路床	999	15	1.5
層厚及びたわみをばらつかせたときの推定値	表・基層	24052	10854	45.127
	路盤	4795	809	16.9
	路床	989	29	2.9



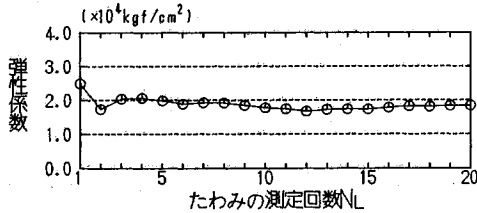
図一五 測定回数 N_L と u_n/d_n の関係



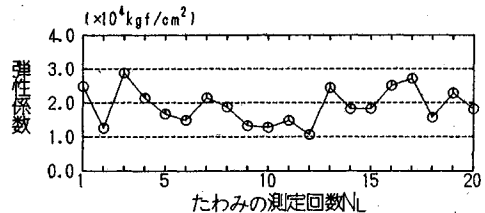
図一六 (a) 正規乱数によるたわみ (測点 D_0)



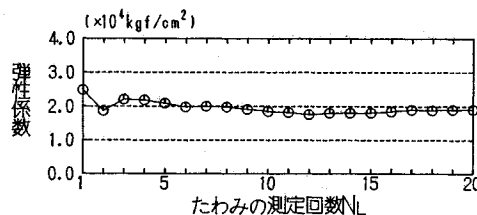
図一六 (b) 図一六 (a) のたわみの N_L 回までの平均値



図一六 (c) N_L 回までのたわみの平均値を用いた弾性係数推定値 (表・基層)



図一六 (d) 図一六 (a) に示したたわみデータを用いた弾性係数推定値 (表・基層)



図一六 (e) 弾性係数推定値の N_L 回までの平均値 (表・基層)

7. たわみの測定回数の検討

各測点のたわみに含まれる誤差はランダムで、それぞれ正規分布しているものとする。測点 n におけるたわみの母集団平均を u_n 、 N_L 個の標本の平均値を d_n 、標準偏差を S_n とすると $(u_n - d_n)/(S_n/\sqrt{N_L})$ は自由度 $N_L - 1$ のスチューデントの t 分布となる。したがって、

$$1 - t_{\alpha/2, N-1} \frac{1}{\sqrt{N_L}} \frac{S_n}{d_n} < \frac{u_n}{d_n} < 1 + t_{\alpha/2, N-1} \frac{1}{\sqrt{N_L}} \frac{S_n}{d_n}$$

が信頼度 $(1 - \alpha)$ の母集団平均値の範囲である。各測点において測定たわみの変動係数が 2% ($S_n/d_n = 0.02$) であるとき、信頼度 90% および 95% における測定回数 N_L と u_n/d_n の関係を図一五に示す。 u_n/d_n を $\pm 2\%$ 以内におさえるためには、信頼度 90% で 5 回、信頼度 95% で 7 回ほどの測定が必要となることを意味している。この結果を確認する意味で 5. で用いた各測点における 100 組のたわみデータを用いて次のような逆解析を行った。まず、測定位置 D_0 における測定回数ごとのたわみの変化を図一六 (a) に示す。図一六 (b) は測定位置 D_0 の N_L 回までのたわみの平均値を示している。予測されるように図一六 (a) と比べ図一六 (b) に示したたわみの平均値は、測定回数 $N_L = 5$ 回以上ではほぼ一定となっている。各測点で N_L 回までのたわみの平均値を用いて逆解析を行ったときの表・基層の弾性係数推定値を図一六 (c) に示した。図一六 (d) は、図一六 (a) に示した各測点のたわみを用いて逆解析したときの表・基層の弾性係数推定値を示しているが、図一六 (a) の

表一七 たわみの測定位置（載荷点中心からの距離（cm））

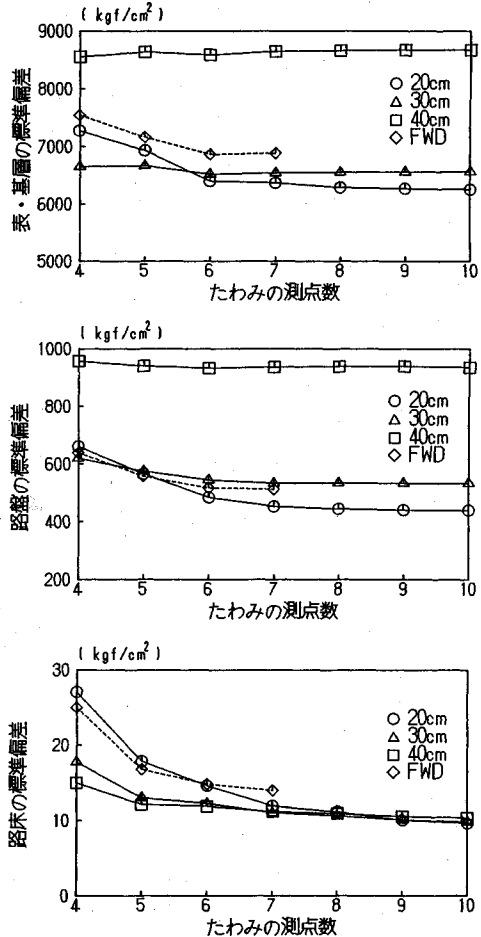
測点番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ケース1	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
ケース2	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270
ケース3	0	40	80	120	160	200	240	280	320	360
ケース4	0	20	45	60	90	150	250			

たわみの変動と同様、激しく変化している。しかし N_L 回までの結果を平均すると図一六（e）のように弾性係数推定値はほぼ安定する。この図は図一六（c）と比べると若干変動が大きい。たわみの平均値を用いると1回の逆解析で弾性係数の推定値が得られる。これに対し各セットのたわみ測定値を用いると、 N_L 回逆解析して得られる弾性係数推定値を平均して各層の弾性係数を求めることになる。両者は必ずしも一致しないが比較的近い値になる。前者は1回の逆解析で済むが、弾性係数のばらつきの程度はわからない。後者は N_L 回逆解析することになるが、弾性係数の推定値だけでなくそのばらつきの程度も判断できる得失がある。

8. たわみの測定位置と測点数に関する検討

逆解析によって得られる弾性係数の推定値に対するたわみの測定位置と測点数の影響を検討するため、図一一のモデルを用いて表一七に示す4ケースの測定位置を選定した。ケース1、ケース2およびケース3ではそれぞれ測定間隔を20cm、30cm、40cmと定め、最高10点までを考慮している。ケース4は実際のFWDに取り付けられたたわみ測定センサーの位置であり、このFWDでは最高7点までのたわみの測定が可能である。まずケース1からケース3について多層弾性解析を行い、得られたたわみデータを各測点のたわみの平均値であると考えた。次に、たわみの測定値は変動係数2%の正規分布であるものとし、各測点でそれぞれ30個の乱数を出してたわみデータに変換した。得られたたわみを測定データとみなし、測点数を載荷点中心より水平方向に4点から10点まで順次増やしてそれぞれの測点数に対して30組のたわみデータを用いて逆解析を行った。そしてケース1、ケース2、ケース3について逆解析して得られた各層の弾性係数推定値の標準偏差を求め、図一七に示した。

路床の弾性係数推定値については、測点数が比較的小さいときは測定間隔が大きい方がばらつきが小さいといえる。しかし、測点数が多くなると弾性係数推定値に与える測定間隔の影響は小さくなる。上層の弾性係数推定値は測定間隔が密である方が標準偏差が小さい。また、測定位置が載荷点より離れすぎると測点数を増やしても弾性係数推定値のばらつきは減少しない。これは言い換えると、表・基層、路盤の弾性係数を精度良く推定する



図一七 測点数と弾性係数推定値の標準偏差との関係

ためには荷重載荷点付近のたわみ測定値が重要であるということである。

5. では、特に表・基層の弾性係数の推定値は載荷点近くのたわみ誤差の影響を大きく受けることを示している。そして本節の結果は、測点数、測定精度は同じでも測定位置が載荷点より遠方になると、弾性係数の推定値は標準偏差が大きくなり信頼度が悪くなることを示している。

さらにFWDにおける実際の測定位置の例がケース4の場合である。図一一のモデルを解析して得られたたわみを各測点のたわみ平均値とし、上述のように変動係数を2%とした30個の正規乱数を求め、たわみデータ

に変換した。測点数を載荷点に近い位置から4点、5点、6点、7点と選びそれぞれについて逆解析を行った。得られた30個の弾性係数推定値の標準偏差を計算し、図一7上に記号“◇”でプロットした。ケース4の標準偏差は、ケース1、ケース2の標準偏差と比べ若干大きい。が、ほぼ同じであるとみなせるであろう。また、測点数が6点でこの例題の場合一定となることを示している。

9. あとがき

舗装構造の逆解析を行うとき、モデル誤差、たわみの測定誤差が各層の弾性係数推定値に及ぼす影響について定量的に検討した。また、たわみの測定位置と測点数についての検討もあわせて行った。

モデル誤差に関しては、層厚、ポアソン比についての検討を行った。その結果、特に表・基層の厚さに誤差があるとき、その層の弾性係数推定値の変動係数が約22%となり影響が大きいことがわかった。また、ポアソン比の変動領域は0.1から0.45と広い範囲を考慮したにもかかわらず、層厚に含まれる誤差の影響と比べて全体的に小さく、一番影響の大きいときでも約6.5%と層厚の誤差の影響の約1/3となっている。さらに、すべての層の層厚およびポアソン比に誤差が含まれるとき表・基層の弾性係数に与える影響は変動係数で約24%となっている。

次にたわみの測定誤差については、荷重載荷点およびそれに近い測点でのたわみデータに誤差が含まれると表・基層の弾性係数推定値に与える影響が大きい。また、すべての測点(図一1の5点)で変動係数2%で正規分布の誤差があると考え、表・基層の弾性係数に与える影響は変動係数で約33%と非常に大きくなっている。さらにこれらのモデル誤差、測定誤差の影響を同時に考慮すると、表・基層の弾性係数の変動係数は約45%にも大きくなる。このとき路盤、路床の弾性係数推定値の変動係数はそれぞれ約17%と約3%であり、特に路床が半無限と仮定して差し支えないかぎり路床の弾性係数に与える影響は非常に小さい。また、モデル誤差と異なり測定誤差は測定回数を繰り返すことにより精度を向上できる。たわみの真値は不明であるが測定たわみの変動係数が2%であるとする、測定値の平均値が真値に対して信頼度が90%から95%の範囲で±2%以内となるためには、5回から7回程度同一地点で測定する必要がある。

さらにたわみの測定位置、測点数も弾性係数の推定値に影響を与える。8.で示したように、表・基層の推定弾性係数は特に載荷点およびその近くのたわみ測定値に含まれる誤差の影響を大きく受けることがわかっている。しかし測点を40cm刻みとしたケース3の場合、表・基層の弾性係数推定値の標準偏差が他の例と比べて

大きくなっていることから荷重載荷点から遠いところの測点を増やしても、弾性係数推定値の精度は向上しない。むしろ、載荷点の比較的近くで多くのたわみを測定する方が表・基層の弾性係数の推定精度は良くなるのがわかる。

また載荷点付近は、一般に弾性理論と実際の挙動との一致度が悪くなる場所であり、FWD衝撃荷重の接触圧分布も含め計測精度に注意を払うことが重要である。そのためにはたわみ測定センサーの特性を理解し常にキャリブレーションを行う必要がある。

最後に、本論文では可能な範囲で各種誤差の影響を調べたが、実測データはこれらの誤差だけでは説明しきれない結果も観測されている。それは本解析で用いた仮定に起因するものであるのか、全く別のことが影響しているのかを今後究明する必要がある。

謝 辞：本研究の数値計算にあたっては、当時東京電機大学4年生 佐藤淳次氏(現在、日本道路(株))の協力を得たことを記し、ここに感謝の意を表する次第です。

参 考 文 献

- 1) Bush III, A.J. and Baladi, G.Y., eds.: Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM, 1989.
- 2) Proc. of 69th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., Jan., 1990.
- 3) Proc. of 3rd Int. Conf. on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Jul., 1990.
- 4) 松井邦人・井上武美・三瓶辰之：舗装各層の弾性係数を表面たわみから推定する一手法，土木学会論文集，第420号/V-13，pp.107~114，1990年8月。
- 5) 笠原 篤・五十嵐光徳：舗装構造解析へのフォーリング・ウェイト・デフレクトメーターの—利用，土木学会論文集，第420号/V-13，pp.43~49，1990年8月。
- 6) 赤坂 隆：数値計算，応用数学講座第7巻，コロナ社，1974年。
- 7) 中川 徹・小柳義夫・最小二乗法による実験データ解析—プログラムSALS，UP応用数学選書7，東京大学出版会，1982年。
- 8) 松野三朗：講座「アスファルト舗装」，舗装，Vol.4，No.11，pp.23~26，建設図書，1969年。
- 9) AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1986，AASHTO，1986。
- 10) Uzan, J. and Lytton, R.L.: Experiment Design Approach to Nondestructive Testing of Pavements, Proc. of ASCE, Vol.115, No.5, pp.505~520, Sept., 1989.
- 11) 姫野賢治・丸山暉彦・林 正則・菅原義昭：FWDによる舗装のたわみ測定システムの開発に関する研究，東京工業大学土木工学科研究報告，No.38，pp.51~67，1987年12月。

(1990.12.14 受付)

INFLUENCING FACTORS AND THEIR MAGNITUDE IN ESTIMATES OF PAVEMENT LAYER MODULUS BY MEANS OF BACKCALCULATION

Takemi INOUE, Kunihito MATSUI and Tatsuyuki SAMPEI

Importance of estimating pavement layer moduli has been widely acknowledged among highway officials as well as pavement engineers to formulate a management and rehabilitation design. It is, thus, essential for developing reliable and practical backcalculation procedures, which enable one to estimate the layer moduli from FWD deflection data. However, such a backcalculation system can never be free from model and measurement errors. It is, hence, significantly important to investigate the effects of these errors on the estimates of layer moduli. This paper presents an influence of each error and finally overall effects of errors on the estimates.
