

# 逆解析弾性係数に対する測定たわみと 構造モデルの誤差の影響

松井邦人<sup>1</sup>・笠原篤<sup>2</sup>・岡田貢一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 Ph.D. 東京電機大学教授 理工学部建設工学科 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂)  
 (Currently Visiting Professor, Dept. Civil and Environment Engineering, The University of IOWA IOWA City IOWA)  
<sup>2</sup>正会員 工博 北海道工業大学教授 土木工学科 (〒006 札幌市手稻区前田7条15丁目)  
<sup>3</sup>学生会員 東京電機大学修士課程 建設工学専攻 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

本研究は、FWD試験を想定し、たわみの測定誤差と舗装モデルの誤差が逆解析弾性係数にどのような影響を与えるかについて検討している。検討方法には、モンテカルロシミュレーションと誤差に対する感度解析の2つの手法を用いている。両手法において測定誤差は測定回数、測点数が多くなると、逆解析弾性係数に及ぼす影響は減少するが、モデル誤差の影響は軽減できないことが明らかにされた。感度解析を用いれば逆解析弾性係数等の信頼領域を評価できることを示し、結果の妥当性をモンテカルロシミュレーションの結果と比較し検討している。本手法は、FWD試験から舗装構造の信頼性評価するのに有用であることを明らかにした。

**Key Words:** measurement error, model error, backcalculation, sensitivity analysis, variation of moduli

## 1. はじめに

近年舗装の構造評価、オーバーレイ設計のために非破壊試験が注目され、種々の非破壊試験装置が開発してきた。代表的な試験装置としてベンケルマンビーム、ダイナフレクト、ロードレイタ、FWD等がある<sup>1)</sup>。これらはいずれも舗装の表面たわみを測定し、その値から舗装を構成する各層の弾性係数を推定している。この非破壊試験に関する研究と普及を目指し、シンポジウムやセミナーが開かれてきた<sup>2) 3)</sup>。また、すでに舗装構造評価やオーバーレイ設計など実務への利用も始まっている<sup>4) 5)</sup>。現場における非破壊試験は、室内実験を伴う破壊試験と比べ効率的で経費も少なくて済むというメリットがある。しかし、まだ解決すべき点が残されているのも事実である<sup>6) - 8)</sup>。

表面たわみから間接的に層弾性係数を推定する作業を逆解析、推定された弾性係数を逆解析弾性係数と呼んでいる。逆解析の方法として、測定された表面たわみと線形多層弾性論で計算した表面たわみの差の自乗和を評価関数として選定し、この関数を最小にするいわゆる非線形最小自乗問題として定式化している。表面たわみは系統誤差が発生しないように十分注意深くキャリブレー-

ションを行ったセンサーで測定しているため、偶然誤差だけが含まれるものとされる。

逆解析弾性係数に影響する因子として、舗装構造モデルと実構造との差と表面たわみに含まれる測定誤差（偶然誤差）をここでは考慮している。設計断面が同じ区間ににおいても、でき上がった舗装は図面とは若干異なり、層厚、ポアソン比などにばらつきのあるものとなろう。その場合測定された表面たわみと設計断面を用いて逆解析すると、逆解析弾性係数は実構造と設計断面の違いを反映し実体と異なるものとなる。また、測定値は常に誤差を混入している。測定たわみが偶然誤差だけを含んでいる場合、測定回数が増すと測定値の信頼度は向上する。これらのモデル誤差、測定誤差が逆解析弾性係数に及ぼす影響は測点数により異なる。そこで、本研究ではモンテカルロシミュレーションを用いて逆解析弾性係数およびアスファルト層下面の半径方向のひずみ ( $\epsilon_r$ ) と路面上面の垂直ひずみ ( $\epsilon_z$ ) にこれらの因子が与える影響を検討している。次に、モンテカルロシミュレーションを用いると、一般的に計算時間も掛かり、実用性に限界がでてくると言われている。このようなばらつきの影響を解析的に評価する方法の一つとして信頼性工学では1次近似解析が用いられている。本論文でもその方

表-1 BISARを用いて解析した各測定点の表面たわみの基準値

(単位: cm)

測点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
測定位置	0.0	20.0	40.0	60.0	80.0	100.0	120.0	140.0	160.0	180.0
解析たわみ	0.0481	0.0394	0.0300	0.0241	0.0200	0.0169	0.0145	0.0126	0.0111	0.0099

表-2 測点数の種類

(単位: cm)

測点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
測定位置	0.0	20.0	40.0	60.0	80.0	100.0	120.0	140.0	160.0	180.0
CASE1	○	○	○	○	○	—	—	—	—	—
CASE2	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—
CASE3	○	○	○	○	○	○	○	—	—	—
CASE4	○	○	○	○	○	○	○	○	—	—
CASE5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
CASE6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

法を用いて誤差の影響を評価する方法を定式化している。そして、モンテカルロシミュレーションに対して、この方法をここでは解析的方法と呼んでいる。

## 2. 補装モデルとモンテカルロシミュレーション

本研究で用いている補装断面と材料定数は図-1に示す通りである。表面たわみの注目点として、載荷点を含み20cm間隔で10点とした。5トン荷重が作用した時、これらの点のたわみをBISARを用いて計算し、その結果を表-1に記した。ここでは、表-1の値が各測点におけるたわみの母平均と考える。

まず、モンテカルロシミュレーションによりたわみ測定誤差の影響を調べる。文献<sup>2), 3), 6)</sup>によるとたわみセンサーの測定精度は2μm程度であり、この値はたわみの大きさに依存しないと考えることができる。そこで、ここではその値をそれぞれの測点におけるたわみの母集団の標準偏差(σ)と考えることにする。測定たわみの平均値(標本平均)の期待値が母平均であり、標本平均の分散は、母集団の分散を $\sigma^2$ とすると $\sigma^2/R$ (Rは測定回数)で与えられる。従って平均たわみの標準偏差は、図-2のように測定回数が増加するに従い、減少する。取りうる測点数は、表-2のように5点から10点までの6ケースを考えた。

シミュレーションを行うに当たり、測定たわみは正規分布すると仮定する。測定回数はR=3, 5, 7, 10の4種類とし、case1～case6のそれぞれについて、たわみの平均値が表-1の値、その標準偏差は図-2の測定回数に対応する値となるように100組のたわみデータを作成した。この標準偏差は平均値の精度を反映し、このように作成したたわみデータは平均値のばらつきを表している。これらのデータを平均測定たわみとしてGauss-

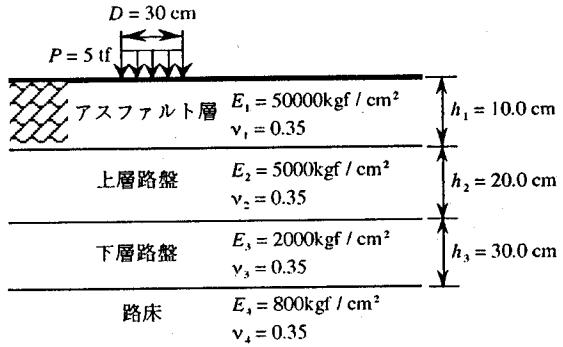


図-1 補装断面図 4層モデル

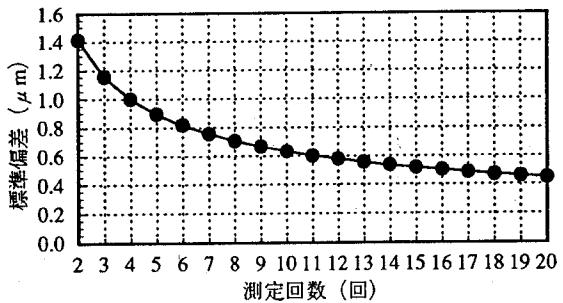


図-2 平均たわみの標準偏差と測定回数

Newton法を用いて逆解析を行っている。すなわち、 $u_i$ を測点*i*の測定たわみ、 $z_i$ を測点*i*の解析たわみとして、

$$f = \sum_{i=1}^N (u_i - z_i)^2 \quad (1)$$

を最小にするような弾性係数が逆解析弾性係数である。得られた100組の逆解析弾性係数、その逆解析弾性係数を用いて計算したアスファルト層下面の半径方向ひずみ( $\epsilon_r$ )と路床上面の垂直ひずみ( $\epsilon_z$ )は、平均たわみを用いて逆解析をした時のばらつきと見なすことができる。

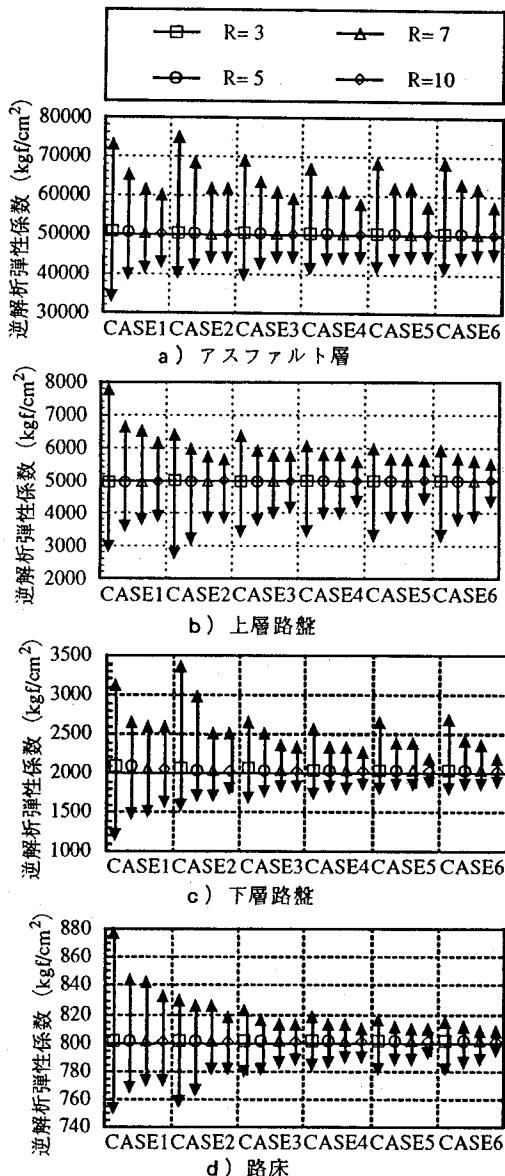


図-3 逆解析弾性係数の最大値・平均値・最小値

る。case1～case2の6種類の測点数について測定回数を変え計算結果を整理し図-3、図-4に示す。図-3は逆解析弾性係数の最大値、最小値、平均値を示している。それぞれの層について測点数が多いほど、また測定回数が多いほど逆解析弾性係数の最大値と最小値の差が小さくなる傾向を示している。図-4は、ひずみ ( $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_z$ ) の最大値、最小値、平均値を示している。この図から明らかなように、ひずみも逆解析弾性係数と同様の傾向を示している。

測定回数が増加すると逆解析弾性係数のばらつきも小さくなることは図-3、図-4からも明らかである。具体的にこの傾向を調べるために、アスファルト層および下層路盤に関する弾性係数の変動係数と測定回数の関係を

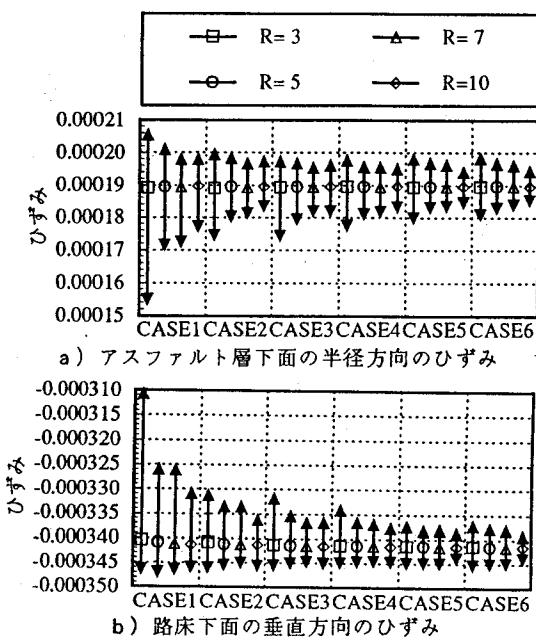


図-4 ひずみ ( $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_z$ ) の最大値・平均値・最小値

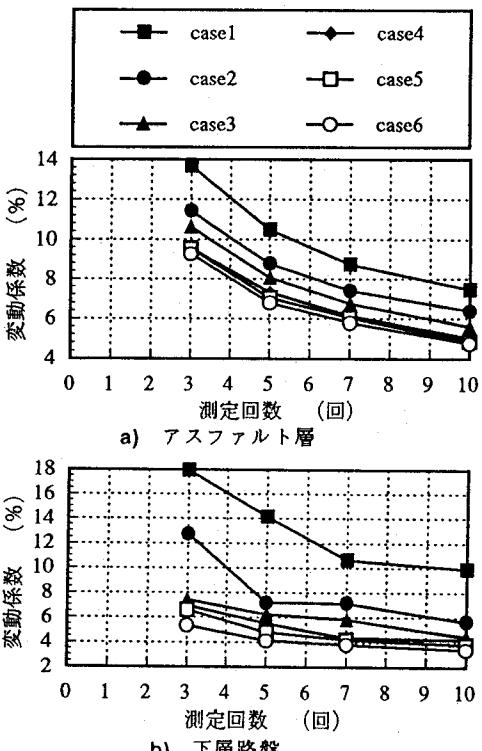


図-5 逆解析弾性係数と測定回数の関係

図-5に示した。測点数が8以上であると逆解析弾性係数の変動係数に顕著な差がなくなっている。また、測定回数が多くなるとこの変動係数は小さくなることを示しており、この図より5回程度の測定が望ましい。

### 3. たわみ誤差と逆解析弾性係数の精度 (標準偏差)

舗装構造の非破壊試験により測定した表面たわみから、各層の弾性係数を推定することが行われている。一回測定する度にそのデータを用いて逆解析を行っている場合もある。N回測定して得られた各層の逆解析弾性係数の平均値をその舗装断面の弾性係数と考えている。しかしこのようにして得られた弾性係数は、例え舗装断面の層厚とポアソン比が正しいとしても、測定誤差を反映したものである。たわみ測定誤差が偶然誤差だけを含むものと考えることができるなら、測定誤差が弾性係数の推定値に及ぼす影響を低減するためにはむしろ測定たわみの平均値とその精度（標本平均とその標準偏差）を用いて舗装構造を評価するのが良い。なぜなら測定回数が多くなると平均たわみはそれだけ母平均（真値）に近づくと考えることができるからである。平均たわみから計算した逆解析弾性係数の精度を求める場合には、逆解析弾性係数の誤差に対する感度を計算する必要がある。松井等<sup>9)</sup>は誤差はランダムでたわみ測定誤差の間には相関がないと仮定して、この感度を式(2)のように計算している。

$$\sum_{j=1}^M \left( \sum_{i=1}^N \frac{\partial z_i}{\partial E_j} \frac{\partial z_i}{\partial E_k} \right) \lambda_{ji} = \frac{\partial z_i}{\partial E_l}, \quad (l=1, \dots, N), \quad (k=1, \dots, M) \quad (2)$$

ここに、 $\lambda_{ji} = \partial E_j / \partial u_i$ であり、 $j$ 層の弾性係数の測点 $l$ のたわみ誤差に関する感度である。今、各測点のたわみの真値を $u_{0k}$ 、誤差を $\Delta u_k$ とすると、 $j$ 層の弾性係数は $E_j$ はすべての測点における誤差の影響を受けるので、

$$E_j(u_0 + \Delta u) = E_j(u_0) + \sum_{k=1}^N \frac{\partial E_j}{\partial u_k} \Delta u_k \quad (3)$$

$(j=1, \dots, M)$

と書くことができる。 $u_0 = (u_{01}, u_{02}, \dots, u_{0N})^T$ 、 $\Delta u_0 = (\Delta u_{01}, \Delta u_{02}, \dots, \Delta u_{0N})^T$ である。測点 $k$ のたわみの分散を $\sigma_k^2, (k=1, \dots, N)$ とすると、R回測定したときこの平均たわみの分散は $\sigma^2/R$ であるから、式(3)より、逆解析弾性係数の共分散マトリックスを式(4)のように書くことができる。

$$[\sigma_{EE}^u] = \left[ \frac{\partial E}{\partial u} \right]^T \begin{bmatrix} \ddots & & \\ & \sigma_1^2/R & \\ & & \ddots & \\ & & & 0 \end{bmatrix} \left[ \frac{\partial E}{\partial u} \right] \quad (4)$$

$$\left[ \frac{\partial E}{\partial u} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_1}{\partial u_1} & \frac{\partial E_2}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial E_M}{\partial u_1} \\ \frac{\partial E_1}{\partial u_2} & \frac{\partial E_2}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial E_M}{\partial u_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial E_1}{\partial u_N} & \frac{\partial E_2}{\partial u_N} & \dots & \frac{\partial E_M}{\partial u_N} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & \sigma_1^2/R & & 0 \\ & & \sigma_2^2/R & \\ & & & \ddots \\ & 0 & & \sigma_N^2/R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2/R & & & \\ & \sigma_2^2/R & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_N^2/R \end{bmatrix} \quad (6)$$

$E$ を $M$ 次元確率変数で、平均値 $E$ 、分散マトリックスを $[\sigma_{EE}^u]^{-1}$ に従う正規分布と仮定すると、確率密度関数は次式で表すことができる

$$p(E) = \frac{1}{(2\pi)^{M/2} |\sigma_{EE}^u|^{1/2}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} (E - \bar{E})^T [\sigma_{EE}^u]^{-1} (E - \bar{E}) \right\} \quad (7)$$

従って、信頼度 $1-e$ の $E$ の信頼領域は、

$$(E - \bar{E})^T [\sigma_{EE}^u]^{-1} (E - \bar{E}) < \chi^2_{e,M} \quad (8)$$

と書くことができる。ここに、 $\chi^2_{e,M}$ は自由度 $M$ 、信頼度 $1-e$ の限界値である。式(8)は、 $M$ 次元超楕円体の内部を意味している。

4次元以上では楕円体を記すことはできない。ここでは、平均たわみと図-2に記した標準偏差を用いて、式(4)～(6)より層弾性係数の分散を計算した。

その分散の平方根を取ることにより求められる標準偏差を図-6に実線で示す。計算方法の妥当性を検証するため、前節のシミュレーションから計算した標準偏差を破線で同図に示した。逆解析弾性係数が測定たわみの線形結合で表せるなら、たわみ誤差が正規分布すると逆解析弾性係数も正規分布し、図-6の実線と破線は一致しなければならない。しかし、たわみは弾性係数の非線形関数となり、たわみ誤差が正規分布でも逆解析弾性係数は正規分布とならず、少し偏った分布となる。そのため、図-6で実線と破線の不一致が起こっていると考えられる。解析結果とシミュレーションとの結果の不一致は測点数が多くなるほど、また測定回数が多くなるほど小さくなる傾向を示している。工学的には平均たわみの精度が十分に良ければ、シミュレーションを行わなくとも解析的に逆解析弾性係数の精度を推定することができる。逆解析弾性係数の精度が分かれれば、その信頼区間を評価することも可能となる。

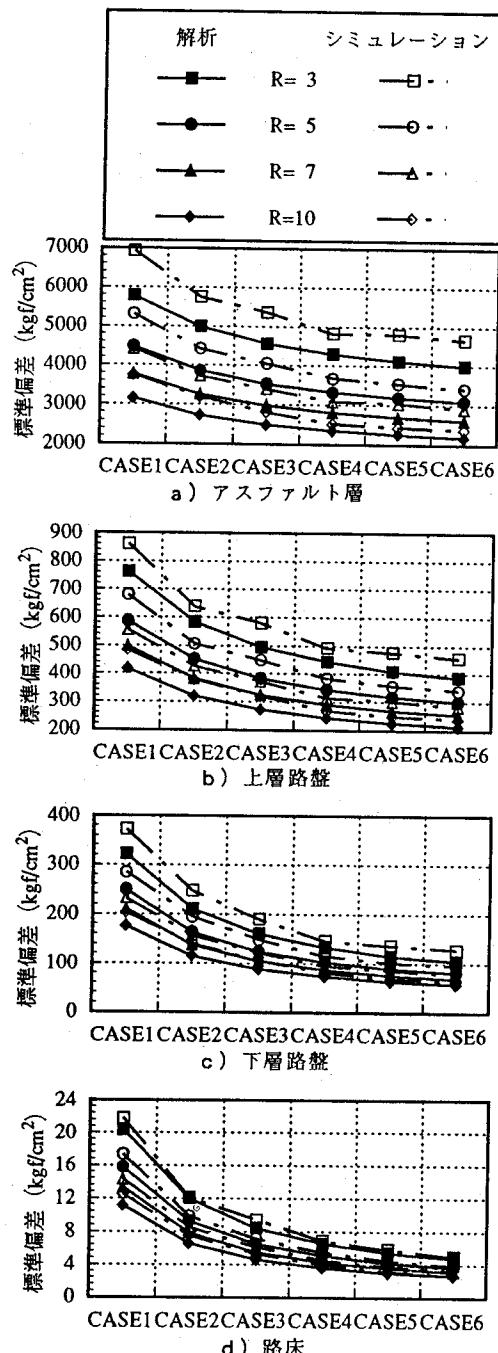


図-6 逆解析弾性係数の標準偏差

#### 4. たわみ誤差と $\epsilon_r$ と $\epsilon_z$ の精度

舗装構造の設計、維持管理において、しばしばアスファルト層下面の $\epsilon_r$ と路床上面の $\epsilon_z$ が重要となる。 $\epsilon_r$ と $\epsilon_z$ は、作用荷重、層厚、ポアソン比、層間のすべ

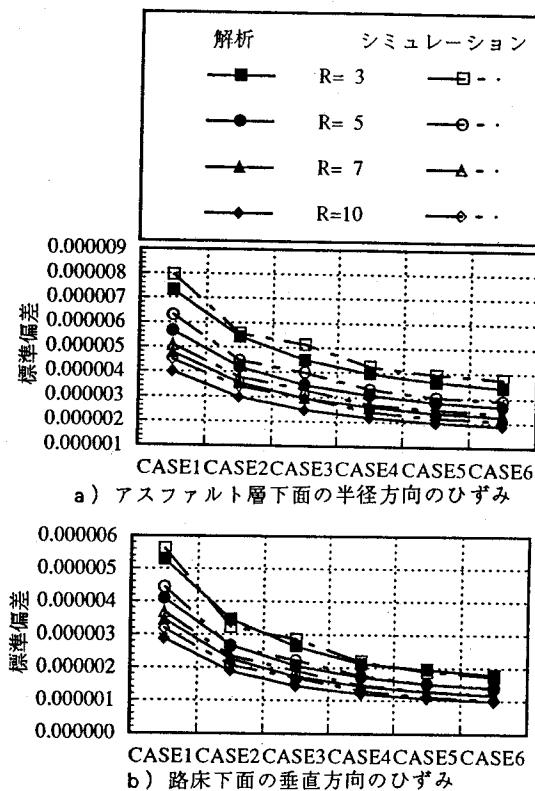


図-7 ひずみ ( $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_z$ ) の標準偏差

り、層弾性係数の関数となる。しかし、層弾性係数を表面たわみから推定するとき、これらのひずみもたわみ誤差の影響を受けることになる。すなわち、 $\epsilon_r$ と $\epsilon_z$ は

$$\epsilon_r(u_0 + \Delta u) = \epsilon_r(u_0) + \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N \frac{\partial \epsilon_r}{\partial E_j} \frac{\partial E_j}{\partial u_k} \Delta u_k \quad (9)$$

$$\epsilon_z(u_0 + \Delta u) = \epsilon_z(u_0) + \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N \frac{\partial \epsilon_z}{\partial E_j} \frac{\partial E_j}{\partial u_k} \Delta u_k \quad (10)$$

と書くことができる。したがって、 $\epsilon_r(u_0)$ と $\epsilon_z(u_0)$ の共分散マトリックスは、

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\epsilon\epsilon}^u \end{bmatrix} = \left[ \frac{\partial \epsilon}{\partial E} \right]^T \left[ \frac{\partial E}{\partial u} \right]^T \begin{bmatrix} \ddots & & \\ & \sigma_k^2 & \\ & & \ddots \end{bmatrix} \left[ \frac{\partial E}{\partial u} \right] \left[ \frac{\partial \epsilon}{\partial E} \right] \quad (11)$$

$$\left[ \frac{\partial \epsilon}{\partial E} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \epsilon_r}{\partial E_1} & \frac{\partial \epsilon_z}{\partial E_1} \\ \frac{\partial \epsilon_r}{\partial E_2} & \frac{\partial \epsilon_z}{\partial E_2} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \epsilon_r}{\partial E_M} & \frac{\partial \epsilon_z}{\partial E_M} \end{bmatrix} \quad (12)$$

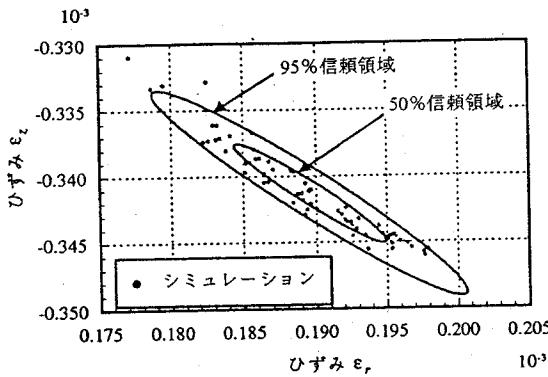


図-8 ひずみ  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_z$  の信頼性領域（信頼度50%, 95%）

$$\begin{pmatrix} \epsilon_r - \bar{\epsilon}_r \\ \epsilon_z - \bar{\epsilon}_z \end{pmatrix}^T [\sigma_{ee}^h] \begin{pmatrix} \epsilon_r - \bar{\epsilon}_r \\ \epsilon_z - \bar{\epsilon}_z \end{pmatrix} < \chi^2_{e,2} \quad (13)$$

と表すことができる。図-2の平均たわみの標準偏差を用いて式(9), (10)より  $\epsilon_r$  と  $\epsilon_z$  の標準偏差を計算し、その結果を図-7に示した。また図-7には、2節でシミュレーションにより求めた逆解析弾性係数を用いて  $\epsilon_r$  と  $\epsilon_z$  計算し、その標準偏差も同様に図示した。 $\epsilon_r$  と  $\epsilon_z$  の標準偏差も平均たわみの精度が良いほど、また測点数が多いほど小さくなることを示している。

式(13)はひずみの信頼性領域を示す式であり、楕円の方程式になっている。そして信頼度  $100(1-e)\%$  の領域はその内部である。信頼度50%と95%の領域を図-8に示した。比較のため、モンテカルロシミュレーションの結果も同時にプロットした。プロットした点は、全部で100個であり、信頼度50%の領域の中には54。この点が、信頼度95%の領域には、95個の点があり、ほぼ理論式の妥当性を裏付けている。

## 5. 層厚、ポアソン比の誤差の影響

表面たわみから舗装各層の弾性係数を推定するとき、測定たわみの誤差だけでなく逆解析に用いる構造モデルの誤差も、逆解析弾性係数に影響する。舗装を線形多層弾性体と仮定できるとしても、各層の厚さ、ポアソン比を正確に知ることは難しい。そこで、これらに誤差が含まれているとき、逆解析結果に及ぼす影響を調べることにする。層厚とポアソン比の個々の影響を調べるために、層厚には変動係数10%、ポアソン比には標準偏差0.05となる誤差を設定して、層厚あるいはポアソン比のみをばらつかせ表面たわみを計算した。計算された表面たわみを測定たわみとみなし、舗装断面は図-1を用いて逆解析を行い、各層の弾性係数、 $\epsilon_r$  と  $\epsilon_z$  を計算した。その結果から層弾性係数、 $\epsilon_r$  と  $\epsilon_z$  の平均値と標準

偏差をそれぞれ求めた。

また逆解析弾性係数の層厚誤差に対する感度は、文献<sup>9</sup>により次式から計算できる。

$$\sum_{j=1}^{M-1} \left( \sum_{i=1}^N \frac{\partial z_i}{\partial E_j} \frac{\partial z_i}{\partial E_k} \right) \frac{\partial E_j}{\partial h_p} = - \sum_{i=1}^N \frac{\partial z_i}{\partial h_p} \frac{\partial z_i}{\partial E_k} \quad (14)$$

$$(k=1, \dots, M) \quad (p=1, \dots, M-1)$$

この感度を用いて、舗装の層厚のばらつきによる逆解析弾性係数の共分散マトリックスを式(15)のように表現できる。

$$[\sigma_{EE}^h] = \left[ \frac{\partial E}{\partial h} \right]^T \begin{bmatrix} \ddots & & \\ & \sigma_h^2 & \\ & & \ddots \end{bmatrix} \left[ \frac{\partial E}{\partial h} \right] \quad (15)$$

また同様に、 $\epsilon_r$  と  $\epsilon_z$  の共分散マトリックスも、

$$[\sigma_{ee}^h] = \left[ \frac{\partial \epsilon}{\partial E} \right]^T \left[ \frac{\partial E}{\partial h} \right]^T \begin{bmatrix} \ddots & & \\ & \sigma_h^2 & \\ & & \ddots \end{bmatrix} \left[ \frac{\partial E}{\partial h} \right] \left[ \frac{\partial \epsilon}{\partial E} \right] \quad (16)$$

と書くことができる。

$$\left[ \frac{\partial E}{\partial h} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_1}{\partial h_1} & \frac{\partial E_2}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial E_M}{\partial h_1} \\ \frac{\partial E_1}{\partial h_2} & \frac{\partial E_2}{\partial h_2} & \dots & \frac{\partial E_M}{\partial h_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial E_1}{\partial h_{M-1}} & \frac{\partial E_2}{\partial h_{M-1}} & \dots & \frac{\partial E_M}{\partial h_{M-1}} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \ddots & & \\ & \sigma_h^2 & \\ & & \ddots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{h_1}^2 & & & 0 \\ & \sigma_{h_2}^2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \sigma_{h_{M-1}}^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{pmatrix} \epsilon_r - \bar{\epsilon}_r \\ \epsilon_z - \bar{\epsilon}_z \end{pmatrix}^T [\sigma_{ee}^h] \begin{pmatrix} \epsilon_r - \bar{\epsilon}_r \\ \epsilon_z - \bar{\epsilon}_z \end{pmatrix} < \chi^2_{e,M-1} \quad (19)$$

モンテカルロシミュレーションから求めた逆解析弾性係数の標準偏差と解析的に求めた標準偏差を図-9に示す。全ての層の厚さに変動係数で10%の誤差が含まれるとき、測点数が多いほどアスファルト層と下層路盤の弾性係数の標準偏差はやや大きくなる。しかし、上層路盤、路床の弾性係数の標準偏差は小さくなっている。すべての層のポアソン比のばらつきの影響は、測点数が増えててもアスファルト層の弾性係数のばらつきに与える影響はほとんどないが、上層路盤、下層路盤の弾性係数のばらつきは増加し、また路床の弾性係数のばらつきは小さくなる傾向がある。すなわち、たわみの測定誤差と異

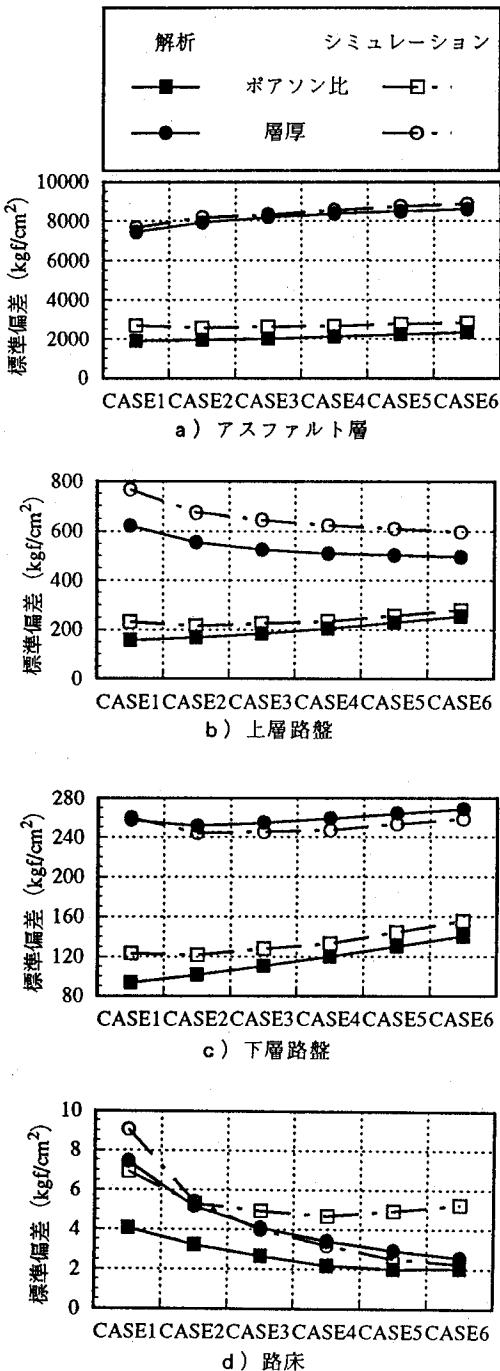


図-9 逆解析弾性係数の標準偏差

なり、測点数を増加しても逆解析弾性係数の精度は良くならない。層厚は正しく、ポアソン比のみに誤差があるとき、それが弾性係数に及ぼす影響も層厚誤差の影響と同様に計算できる。すなわち、式(14)～(19)において、 $h_p$ を $v_p$ と置き換えればよい。ポアソン比の場合、層数と同じであるから、( $p=1, \dots, M$ )となる。層厚は

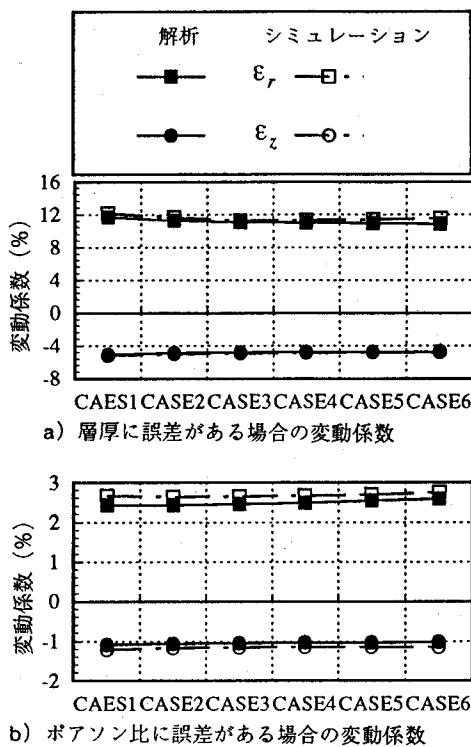


図-10 層厚、ポアソン比に誤差があると考えた場合の標準偏差、変動係数

正しくてポアソン比のみに誤差があるとき、逆解析弾性係数の標準偏差、 $\epsilon_r$ と $\epsilon_z$ の変動係数を図-9、図-10に示した。ここでは、 $\epsilon_z$ の値が負であるため、その変動係数に負の符号を付け表示した。この図からも、ポアソン比に誤差がある場合、測点数を増やしてもひずみの精度は向上しないことが分かる。しかしポアソン比の誤差の影響は層厚誤差に比べ、かなり小さいと言える。

層厚、ポアソン比にばらつきがあるとき、その100(1- $e$ )%の信頼領域は式(19)で表される楕円の内部である。

## 6. 結論

モンテカルロシミュレーションと解析的方法を用いてたわみ誤差、層厚誤差、ポアソン比誤差が逆解析弾性係数に及ぼす影響について検討した。一般に測定回数を増すと平均たわみの精度は向上する。このことを踏まえ、モンテカルロシミュレーションにより、測定回数、測点数の関係を調べた。対象とした4層構造のモデルでは、測点数は7点、測定回数は少なくとも5回必要である。

逆解析弾性係数の共分散マトリックスとたわみの精度との関係を誘導した。この関係式を用いて各層の弾性係

数の標準偏差を推定し、モンテカルロシミュレーションの結果と比較した。両者の間には概ね良い一致が見られる。同様に、アスファルト層底面のひずみ  $\epsilon_r$  と路床上面のひずみ  $\epsilon_z$  の標準偏差の推定値を解析的に求めた。これらの値はモンテカルロシミュレーションの結果と良く一致している。解析結果も、測定誤差の影響は測点数が多いほど、また測定回数が多いほど、各層の弾性係数の標準偏差は小さくなり、推定精度が向上することを示している。

層厚誤差、ポアソン比誤差が逆解析弾性係数に及ぼす影響についても、解析的な方法とモンテカルロシミュレーション結果は、逆解析弾性係数およびひずみ  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_z$  ともかなり良く一致しているといえる。

解析的方法を誘導することにより、測定誤差やモデル誤差に対して、逆解析弾性係数およびひずみの信頼領域を解析的に示すことが可能となった。

#### 参考文献

- 1) 笠原 篤：非破壊試験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, No. 160, pp. 57-67, 1989.
- 2) 土木学会：舗装機能の評価法、1992年5月.
- 3) FWD研究会：FWDに関する研究、1993年8月.
- 4) 井原 務、井上武美、陶山武彦：アスファルト舗装の評価診断・修繕設計支援システムの開発、道路建設、No.520, pp. 44-53, 1991年5月.
- 5) 阿部長門、丸山暉彦、姫野賢治、林 正則：たわみ評価指標に基づく舗装の構造評価、土木学会論文集、No.460/V-18, pp.41-48, 1993年2月.
- 6) Irwin,L.H., Yang,W.S. and Stubstad,R.N. : Deflection Reading Accuracy and Layer Thickness Accuracy in Backcalculation of Pavement Layer Moduli, / Bush,A.J.3. and Baladi,G.Y. eds. : *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli*, pp.229-244, ASTM 1989.
- 7) Siddharthan,R., Sebaaly,P.E. and Javaregowda,M. : Influence of Statistical Variation in Falling Weight Deflectometers on Pavement Analysis, *Transportation Research Record*, No.1377, pp.57-66, 1992.
- 8) Uzan,J. and Lytton,R.L. : Experimental Design Approach to Nondestructive Testing of Pavements, *J. of Transportation Engineering*, Vol.115, No.5, pp.505-520, September 1989.
- 9) Inoue, T. and Matsui, K. : Structural Analysis of Asphalt Pavement by FWD and Backcalculation of Elastic Layered Model, *Proceedings from The Third International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, pp.425 - 434. 1990.

(1994. 12. 2 受付)

## EFFECT OF ERRORS IN DEFLECTION READINGS AND PAVEMENT MODEL ON BACKCALCULATED LAYER MODULI

Kunihito MATSUI, Atsushi KASAHARA and Koichi OKADA

The paper investigates how significantly the errors in deflections and analysis model affect backcalculated layer moduli. The Monte Carlo simulation and sensitivity analysis are utilized for this purpose. It is found that as number of repeated measurement increases and as number of measuring points increases, the effect of error in deflection reading decreases, but that of analysis model error remains same. Furthermore by using the sensitivity analysis, confidence regions of backcalculation moduli, radial and vertical strains are derived. This will serve as a useful tool for reliability analysis of pavement structure from FWD test.