

## I-10 舗装体の弾性係数の逆解析における解の唯一性に関する研究 Uniqueness of Backcalculated Layer Moduli of Pavement Structure

○ 亀山 修一<sup>\*)</sup>      姫野 賢治<sup>\*\*)</sup>      丸山 暉彦<sup>\*\*\*)</sup>      笠原 篤<sup>\*\*\*\*)</sup>  
Shuich Kameyama      Kenji Himeno      Teruhiko Maruyama      Atsushi Kasahara

**【抄録】** FWD (Falling Weight Deflectometer) によって舗装の支持力を評価する場合、測定された舗装表面のたわみから舗装構成層の弾性係数を推定することが必要であり、解析方法としては逆解析が用いられているため、一般的な逆問題と同様、逆解析によって得られる解の唯一性が問題となっている。本研究では、ある厚さ、ポアソン比、弾性係数を持つ3層構造をもった舗装を仮定し、多層弾性理論によって計算される表面たわみと、基準とした舗装の各層の弾性係数を適当に変動させたときに生じる表面たわみとの平均平方誤差 (RMS) を解析することにより、舗装体の弾性係数の逆解析における解の唯一性の検討を行った。極小値を与える弾性係数を初期値として逆解析を行った場合、RMS の停留点を得られた。この停留点は RMS の最小値ではない極小値を与えていることから、逆解析によって得られる解は唯一解ではないと考えられる。また、仮に真値以外の解が求まった場合、舗装の寿命予測にどのような影響が生じるかについても検討した。

**【Abstract】** Uniqueness of backcalculated layer moduli of a pavement is discussed. A standard model is assumed as a three-layer pavement with proper thickness, Poisson's ratio and moduli of each layer, and the surface deflection basin of the standard model is calculated using the multi layer elastic theory. Each layer modulus is changed widely, keeping the thickness and Poisson's ratio constant. Surface deflection basins are calculated by multi layer elastic theory. Root Mean Square Error (RMS) of deflection basins, which is employed as the evaluation function in the backcalculation, are calculated as the deviations between the standard model and the other models. It is found that there are other combinations of layer moduli which yield local minimum RMS value than the minimum one at the standard model. When backcalculation is started from an initial seed moduli which yields RMS local minimum value, an RMS stationary point is obtained. The combination of layer moduli at this point yields not the minimum value but the local minimum value. The allowable number of load repetitions for the local minimum combination are calculated in terms of fatigue life of the asphalt mixture layer and the subgrade.

**【キーワード】** FWD、逆解析、平均平方誤差、等 RMS 面、極小値、停留点、唯一性

**【Key Word】** FWD, Backcalculation, RMS (Root Mean Square Error), Constant RMS Value Surface, Local minimum Value, Stationary Point, Uniqueness

### 1. はじめに

現在、舗装の支持力を評価するための非破壊試験の一つとして FWD (Falling Weight Deflectometer)<sup>1), 2)</sup> が用いられており、解析方法としては逆解析<sup>3), 4)</sup> が採用されている。これは、多層弾性理論によって舗装構成層の弾性係数を変動させたときに生じる舗装表面のたわみを算出し、FWD によって測定されたたわみに一致するような弾性係数の組み合わせを求めるものである。

しかしながら、初期値の選び方によっては、工学的に意味を解釈できないような弾性係数が求まる場合があり、逆解析によって得られる解が一つだけか否か、いわゆる解の唯一性が問題となっている<sup>5)</sup>。

本研究では以下のような手順により、逆解析における解の唯一性の検討をおこなった。また、仮に真値以外の解が求まった場合、舗装の寿命予測にどのような影響を与えるのかも検討した。

<sup>\*)</sup> 長岡技術科学大学 建設系 (〒940-21 新潟県長岡市上富岡 1603-1, TEL:0258-46-6000)  
<sup>\*\*)</sup> 北海道大学 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北 1 4 条西 8 丁目, TEL:011-706-6205)  
<sup>\*\*\*)</sup> 長岡技術科学大学 建設系 (〒940-21 新潟県長岡市上富岡 1603-1, TEL:0258-46-6000)  
<sup>\*\*\*\*)</sup> 北海道工業大学 土木工学科 (〒006 札幌市手稲区前田 7 条 1 5 丁目, TEL:011-681-2161)

2. 解析の流れ

1) Fig-1 に示すように、表層では弾性係数が  $50,000 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比が 0.35、層厚が 10cm、路盤では  $5,000 \text{ kgf/cm}^2$ 、0.35、30cm、路床では  $1,000 \text{ kgf/cm}^2$ 、0.40、半無限の深さをもつ3層構造を基準舗装構造と仮定した。そして、著者らが開発した、多層弾性構造プログラム (ELSA) <sup>6), 7)</sup> を用いて舗装表面のたわみ (基準たわみ) を算出した。

2) 舗装厚、ポアソン比を一定としたまま、各層の弾性係数を広範囲にわたって変動させ、舗装表面たわみを算出した。

3) すべての弾性係数の組み合わせにおいて、算出された表面たわみと基準舗装構造に生じるたわみとの平均平方誤差 (RMS) を求めた。

4) すべての弾性係数の組み合わせの中から RMS の極小値を与える弾性係数の組み合わせを抽出した。

5) 表層、路盤、路床の弾性係数 ( $E_1, E_2, E_3$ ) で構成される3次元空間上において、RMS が等しくなる面 (等RMS面) を描いた。

6) 著者らが開発した逆解析プログラム (LMBS) <sup>8), 9)</sup> において、得られた極小値の弾性係数を初期値として与え、逆解析を実行した。

7) 極小値を与える弾性係数を持つ舗装体に生じる応力、ひずみと舗装寿命を求めた。

3. 解析条件

(1) 基準舗装構造

解析対象とする舗装構造は3層構造とし、各舗装構成層が Fig-1 に示すような弾性係数、層厚、ポアソン比を持つ構造を基準舗装構造とした。この舗装体に、実際の FWD 測定と等しい荷重条件 (荷重 5 tf, 載荷半径 15 cm) を作用させたときに生じる舗装表面のたわみを多層弾性理論解析プログラム (ELSA: Elastic Layer System Analysis) を用いて算出し、これを基準たわみとした。舗装表面のたわみは、載荷板の中心 (0mm) と、中心から 300mm, 450mm, 600mm, 900mm, 1200mm, 1500mm の合計7点において算出した。基準舗装構造における舗装表面のたわみを Fig-2 に示す。

次に、舗装厚、ポアソン比を一定としたまま、各層の弾性係数 ( $E_1, E_2, E_3$ ) を広範囲にわたって変動させ、ELSA によって表面たわみを算出し、基準たわみとの平均平方誤差 (RMS) を求めた。RMS の算定式を (1) に示す。

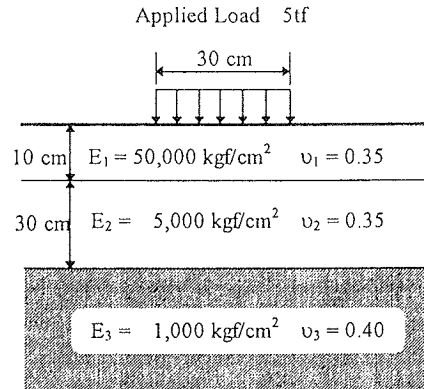


Fig-1. Standard model of pavement structure

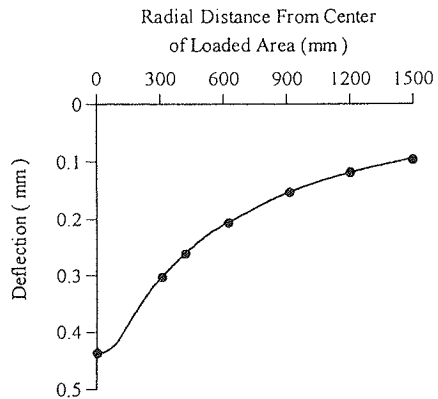


Fig-2. Deflection basin of standard model

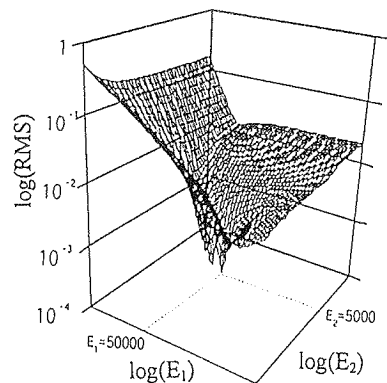


Fig-3. RMS value at the combinations of layer moduli ( $E_3 = 1,000 \text{ kgf/cm}^2$ )

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (s_i - c_i)^2} \dots\dots(1)$$

ここで、

- $n$  : たわみを計算する地点数 ( $n=7$ )
- $s_i$  : 基準舗装構造の表面たわみ (基準たわみ)
- $c_i$  : 弾性係数を変動させたときの表面たわみ

各層の弾性係数は対数目盛上で 0.1 毎に、 $10^2 \text{ kgf/cm}^2$  から  $10^7 \text{ kgf/cm}^2$  にわたって変動させ ( $10^{2.1}, 10^{2.2}, \dots, 10^{7.0}$ )、合計  $51^3 (= 132,651)$ 通りの弾性係数の組み合わせについて RMS を求めた。

路床の弾性係数( $E_3$ )が基準舗装構造と同じ  $1,000 \text{ kgf/cm}^2$  であるときの、表層の弾性係数 ( $E_1$ )、路盤の弾性係数 ( $E_2$ ) と RMS の関係を Fig-3 に示す。この図から、弾性係数が基準舗装構造の弾性係数 (真値) に近づくと RMS が急激に減少していきることがわかる。また、真値の他にも RMS の極小値を与えるような弾性係数が存在していると考えられる。

#### 4. 極小値の抽出

いま、ある弾性係数の組み合わせ ( $E_1 = E_i, E_2 = E_j, E_3 = E_k$ ) において算出される RMS を  $RMS_{i,j,k}$  とすると、Fig-4 に示すように、 $RMS_{i,j,k}$  が近傍の弾性係数の組み合わせにおいて算出される RMS ( $RMS_{i+1,j,k}, RMS_{i-1,j,k}, RMS_{i,j+1,k}, RMS_{i,j-1,k}, RMS_{i,j,k+1}, RMS_{i,j,k-1}$ ) と比べて小さくなる時、 $RMS_{i,j,k}$  は弾性係数 ( $E_i, E_j, E_k$ ) において極小値を生じると考えられる。

$51^3 (= 132,651)$ 通りの弾性係数から得られる RMS について上記の方法で極小値を抽出した。その結果、RMS の最小値 (基準舗装構造の弾性係数) を含めて 67 個の極小値が得られた。RMS の極小値を与える弾性係数の組み合わせを Fig-5 に示す。

この結果より、RMS の極小値は最小値を与える弾性係数 (基準舗装構造) を中心に帯状に分布していることがわかった。また、極小値を与える弾性係数は  $E_1$  で  $1.6 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2 \sim 7.9 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $E_2$  で  $1.3 \times 10^2 \text{ kgf/cm}^2 \sim 2.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$  と広い範囲にわたっているが、路床の弾性係数  $E_3$  は  $2.0 \times 10^2 \text{ kgf/cm}^2 \sim 6.3 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$  と比較的狭く、極小値は表層、路盤の方向に広く存在していると言える。

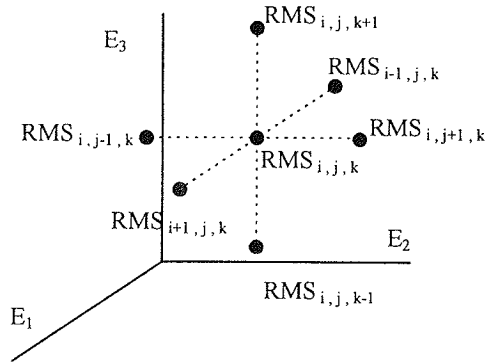


Fig-4. Combination of layer moduli where the RMS value yields the local minimum

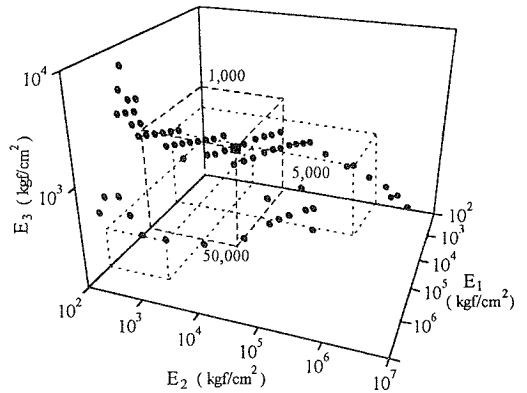


Fig-5. Combination of layer moduli which yields the local minimum

#### 5. 等 RMS 面の描画

抽出した極小値の妥当性を検討するために、表層、路盤、路床の弾性係数からなる 3 次元空間において、RMS が等しくなる平面 (等 RMS 面) を描き、極小値を与える弾性係数 ( $E_1, E_2, E_3$ ) の近傍の RMS 値の変動を解析した。

RMS 値を  $1.0 \times 10^4$  と小さく設定すると、基準舗装構造の弾性係数 (真値) 近傍において等 RMS 面が表れ、この平面が閉じた空間を構成する。したがって、RMS 値が十分小さいときには真値近傍においてのみ極小値が表れると考えられる (Fig-6)。

Fig-7 に示すように、RMS 値が  $4.9 \times 10^{-4}$  となると、真値とは異なる弾性係数 ( $E_1 = 7.9 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $E_2 = 4.0 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $E_3 = 1.0 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ ) 近傍に独立した空間が表れ、この範囲にも極小値が存在していることがわかる。次第に RMS 値を大きくしていくと、極小値が含まれる独立した空間の数は増加し、お互いに連結し、細長い空間を形成するようになる。この空間は路床の弾性係数 ( $E_3$ ) の方向には広がらず、表層の弾性係数 ( $E_1$ ) と路盤の弾性係数 ( $E_2$ ) の方向に大きく、細長く広がっていく。

しかしながら、Fig-8 に示すように、RMS 値が  $1.9 \times 10^{-3}$  となると、 $E_3 = 1.0 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$  以外の弾性係数をもつ組み合わせ ( $E_1 = 2.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $E_2 = 1.0 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $E_3 = 1.0 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ ) 近傍において閉じた空間が現れ、極小値は路床の弾性係数の方向にも広がり始める。

RMS 値を  $5.63 \times 10^{-3}$  とさらに大きくすると (Fig-9)、等 RMS 面は真値を中心として帯状に広がり、大きな空間を形成するようになる一方、真値とはかなり離れた位置 ( $E_1: 1.6 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2 \sim 2.5 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $E_2: 1.3 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2 \sim 2.5 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $E_3 = 2.5 \times 10^2 \text{ kgf/cm}^2$ ) にも閉じた空間が存在する。

この範囲においては  $E_2$  の変動幅 (対数目盛上で 0.1) が  $E_1$ ,  $E_3$  と比べて大きくなるため、各層の弾性係数の変動幅をより小さく設定し ( $E_1$  で  $10^2 \text{ kgf/cm}^2$  毎、 $E_2$  で  $10^5 \text{ kgf/cm}^2$  毎、 $E_3$  で  $10 \text{ kgf/cm}^2$  毎)、等 RMS 面を描いた (Fig-10)。この場合も、閉じた空間が現れ、その位置は極小値を与える弾性係数として抽出された弾性係数の近傍 ( $E_1 = 1.7 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $E_2 = 2.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $E_3 = 2.5 \times 10^2 \text{ kgf/cm}^2$ ) であることから、極小値近傍では、等 RMS 面が閉じた空間を形成していると考えられる。得られた他の極小値についても、その近傍で等 RMS 面を描いたところ、同様に閉じた空間が表れた。

このことから、RMS の極小値は基準舗装構造の弾性係数 (RMS の最小値) において存在するだけでなく、Fig-5 に示したように、広い範囲にわたって多数存在しているということが確かめられた。また、極小値の存在する範囲は、路床の弾性係数 ( $E_3$ ) に比べ、表層 ( $E_1$ )、路盤 ( $E_2$ ) の弾性係数の方向に大きく広がっていることが分かる。

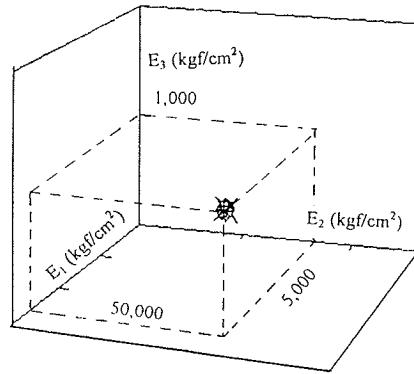


Fig-6. Constant RMS value surface when RMS value is  $1.0 \times 10^{-4}$  cm

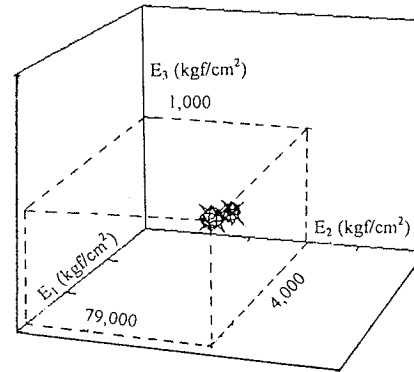


Fig-7 Constant RMS value surface when RMS value is  $4.9 \times 10^{-4}$  cm

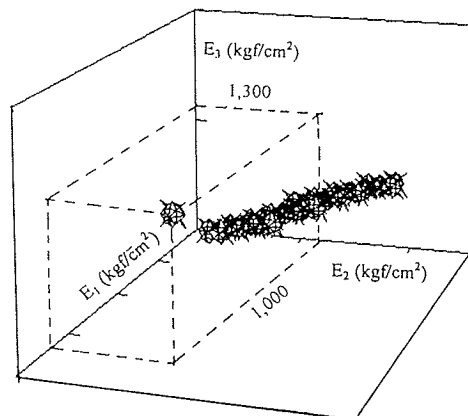


Fig-8. Constant RMS value surface when RMS value is  $1.9 \times 10^{-3}$  cm

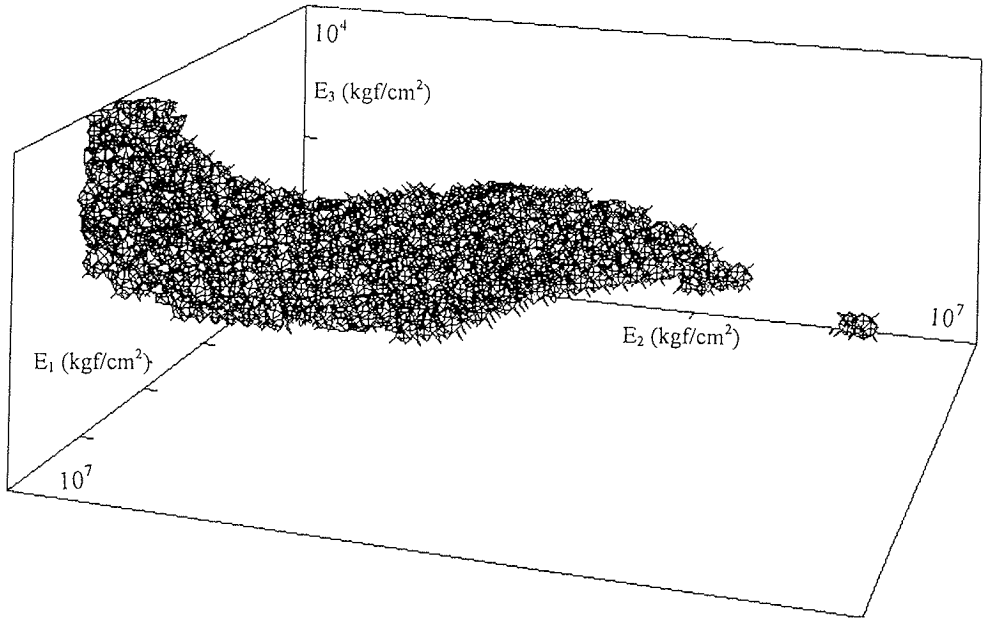


Fig-9. Constant RMS value surface when RMS value is  $5.63 \times 10^{-3}$  cm

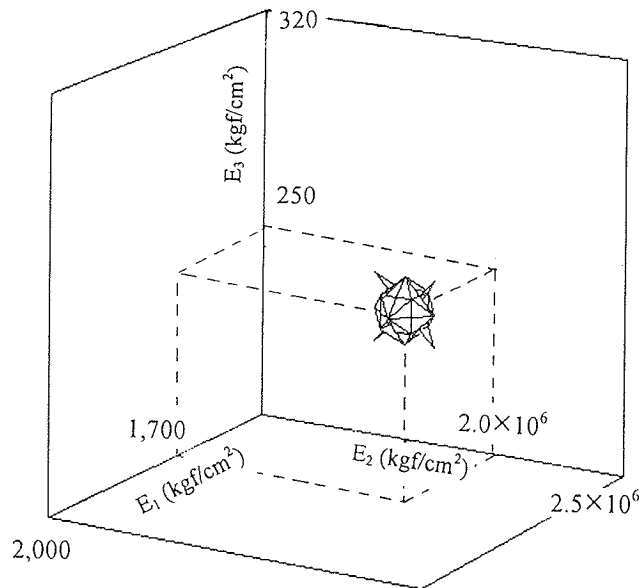


Fig-10. Constant RMS value surface when RMS value is  $5.473 \times 10^{-3}$  cm

Table-1. Change in RMS value at an RMS stationary point in iteration

No. of Iteration	RMS	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
0	5.514502×10 <sup>-3</sup>	1600.0	2000000.0	250.0
1	5.507362×10 <sup>-3</sup>	1598.2	2046120.8	247.5
2	5.500464×10 <sup>-3</sup>	1603.7	2058804.1	246.7
3	5.494912×10 <sup>-3</sup>	1610.6	2062413.9	246.3
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
47	5.471134×10 <sup>-3</sup>	1684.6	2057198.4	245.4
48	5.471134×10 <sup>-3</sup>	1684.6	2057191.1	245.4
49	5.471134×10 <sup>-3</sup>	1684.7	2057184.5	245.4

### 6. 逆解析の実行

逆解析により最適な弾性係数を求めるということは、弾性係数が変動しても、RMS 値がほとんど変化しない点、すなわち RMS の停留点を求めることに他ならない。したがって、極小値を与える弾性係数を初期値として与え逆解析をおこなった。この際、真値以外の極小値を与える弾性係数の存在する範囲が狭いと考えられるため、繰り返し計算過程において算出され、次候補の弾性係数を設定する際に用いられる、弾性係数の増分を通常よりも小さくして、より細かく、狭い範囲で逆解析を実行するようにした。極小値を与える弾性係数の一つである E<sub>1</sub> = 1.6 × 10<sup>3</sup> kgf/cm<sup>2</sup>, E<sub>2</sub> = 2.0 × 10<sup>6</sup> kgf/cm<sup>2</sup>, E<sub>3</sub> = 2.5 × 10<sup>2</sup> kgf/cm<sup>2</sup> を初期値として与え、逆解析を実行した結果を Table-1 に示す。

計算回数が 49 回目には RMS がほとんど変化しなくなり、停留点となった。このときの弾性係数は Fig-11 において、極小値が存在していると考えられる空間に含まれていることから、逆解析によって得られた弾性係数は、RMS の最小値（真値）以外の、極小値を与えている。言い換えると、解析的には正しいが、工学的には間違っている解が存在し、逆解析において、この解に陥る可能性があることを示している。

### 7. 応力、ひずみの算出と寿命の予測

仮に、逆解析によって真値ではない解が求めた場合、舗装の寿命予測<sup>10)</sup>にどのような影響を与えるかについて検討した。得られた RMS の極小値を与える弾性係数で構成される舗装体において、舗装表面に 5 tf の荷重が作用したときに表層（アスファルト層）下面に生じる応力 (σ<sub>1</sub>)、ひずみ (ε<sub>1</sub>) と路床上面に生じる応力 (σ<sub>2</sub>)、ひずみ (ε<sub>2</sub>) を ELSA によって算出し、さらに、表層、路床が破壊に至るまでの 5 tf 通過輪数 (N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>) を求めた。RMS が大きい極小値を与える弾性係数の組み合わせにおいては、算出されるアスファルト層下面の応力、ひずみが圧縮となる場合があることから、アスファルト層の疲労寿命の予測には散逸エネルギー理論<sup>11)</sup>を採用した。Fig-11 に散逸エネルギー理論によるアスファルト混合物の疲労破壊規準を示す。

一方、路床の破壊回数の予測には米国の Asphalt Institute (AI) の破壊規準<sup>12)</sup>を用いた。得られた最小値（真値）を含む 67 個の極小値のうち、その代表として、10 個の極小値についての結果を Table-2 に示す。

Table-2. Stress, strains, and allowable numbers of load repetitions for the standard model and the local minimum

No.	RMS	E <sub>1</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	E <sub>2</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	E <sub>3</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	σ <sub>r</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	ε <sub>r</sub> (μ)	N <sub>r</sub>	σ <sub>r</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	ε <sub>r</sub> (μ)	N <sub>z</sub>
Standard	0	50,000	5,000	1,000	12.45	184.99	1.9×10 <sup>6</sup>	-0.46	-281.05	1.1×10 <sup>7</sup>
1	4.86×10 <sup>-4</sup>	79,000	4,000	1,000	19.79	173.89	1.9×10 <sup>6</sup>	-0.45	-272.44	1.2×10 <sup>7</sup>
2	5.02×10 <sup>-4</sup>	32,000	6,300	1,000	6.31	173.57	7.2×10 <sup>6</sup>	-0.46	-278.14	1.1×10 <sup>7</sup>
3	1.92×10 <sup>-3</sup>	200,000	1,000	1,300	42.31	138.94	1.4×10 <sup>7</sup>	-0.42	-174.30	9.2×10 <sup>7</sup>
4	1.97×10 <sup>-3</sup>	160,000	1,300	1,300	37.92	156.35	1.5×10 <sup>7</sup>	-0.47	-199.42	5.0×10 <sup>7</sup>
5	2.74×10 <sup>-3</sup>	4,000	40,000	790	-3.72	-32.21	>10 <sup>8</sup>	-0.23	-150.81	>10 <sup>8</sup>
6	2.76×10 <sup>-3</sup>	63,000	7,900	790	10.44	127.36	1.1×10 <sup>7</sup>	-0.32	-243.04	2.1×10 <sup>7</sup>
7	5.52×10 <sup>-3</sup>	1,600	2,000,000	250	-3.63	-3.49	>10 <sup>8</sup>	-0.01	-18.46	>10 <sup>8</sup>
8	5.65×10 <sup>-3</sup>	2,000	1,600,000	250	-3.63	-4.20	>10 <sup>8</sup>	-0.01	-22.03	>10 <sup>8</sup>
9	5.68×10 <sup>-3</sup>	2,000	1,300,000	320	-3.63	-4.71	>10 <sup>8</sup>	-0.02	-24.18	>10 <sup>8</sup>
10	8.65×10 <sup>-3</sup>	250,000	200,000	320	-2.83	0.31	>10 <sup>8</sup>	-0.04	-50.41	>10 <sup>8</sup>

No.1, 2のように RMS 値が小さい値をとる極小値と基準舗装構造（真値）の結果と比べると、弾性係数においては、若干の違いが見られるが、応力、ひずみ、破壊回数では、その差は小さくなっていることから、仮に逆解析によって、RMS 値が小さい真値近傍の極小値（解）が得られたとしても、舗装体に生じる応力、ひずみ、舗装寿命にさほど大きな影響をもたらすことはないと考えられる。

一方、No.3, 4, 6, 7, 8, 9, 10のように、RMS 値が比較的大きな値をとる極小値では、応力、ひずみ、破壊回数においても、基準舗装構造との差が大きくなる。

しかしながら、これらの極小値を与える弾性係数の組み合わせは、基準舗装構造の弾性係数とは大きく異なっており、各舗装構成層に妥当と考えられる弾性係数の範囲を逸脱していることから、仮に逆解析によって、これらの解が得られたとしても、工学的な判断を加えることにより、不適当な解を棄却することが可能であると考えられる。

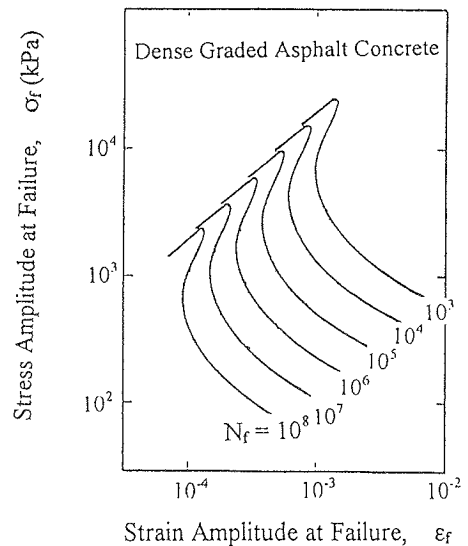


Fig-11. Fatigue failure criterion by energy approach, source[11]

## 8. 結論

本研究は基準舗装構造(3層構造)に生じる表面たわみと、各層の弾性係数を適当に変動させたときに算出される表面たわみとの平均平方誤差(RMS)を解析することで、舗装構造の弾性係数の逆解析における解の唯一性についての検討を行った。得られた結論を以下に示す。

- $51^3$ 通りの弾性係数の組み合わせの内、RMSの極小値を与える弾性係数の組み合わせは基準舗装構造(真値)を含めて67個存在した。
- 表層、路盤、路床の弾性係数( $E_1, E_2, E_3$ )からなる3次元空間において、等しいRMS値を持つ平面(等RMS面)を描いた。その結果、得られた極小値近傍においては、等RMS面が閉じた空間を形成していることから、その内部に極小値が存在すると考えられる。
- 極小値を与える弾性係数を初期値として与え、逆解析を実行すると、RMSの停留点が得られた。また、この点はRMSの最小値(真値)ではなく、極小値を与えていることから、逆解析において、真値以外の解が得られる可能性がある。
- 基準舗装構造と、極小値を与える弾性係数の組み合わせで構成される舗装体において、内部に生じる応力、ひずみを算出し、舗装が疲労破壊に至るまでの寿命予測をおこなった。その結果、真値近傍にあり、RMS値が小さい極小値においては、これら間には大きな差は見られず、舗装寿命の予測には大きな影響を与えないと考えられる。一方、RMS値が大きい極小値では応力、ひずみ、疲労寿命に差が見られた。したがって、逆解析によりこのような解が求まった場合には、工学的な判断を導入し、棄却することが必要である。

## 参考文献

1. 笠原、岳本、伊藤、古川：フォーリング・ウエイト・デフレクトメータについて、舗装、Vol.20, pp.15-19, 1985.
2. 笠原、伊藤：舗装構造の非破壊測定機の現況(フォーリング・ウエイトデフレクトメータ)、建設の機械化、No.478, pp.43-46, 1989.
3. 松井、井上、三瓶：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、No.432/V-13, pp.107-114, 1990.
4. Inoue, T. Matui, K. : Structural Analysis of Asphalt Pavement by FWD and Backcalculation of Elastic Layered Model. " *Proceedings of 3rd International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Vol.1, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, July 1990, pp.425-434.
5. Stolle, D. and Hein, D. : " Parameter Estimates of Pavement Structure Layers and Uniqueness of the Solution," *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli*, ASTM STP 1026, A. J. Bush III and G. Y. Baladi, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989, pp. 313-322.
6. 姫野、丸山、菅原：パソコン用多層弾性構造解析システム(ELSA)の開発、日本道路会議論文集、pp.338-339, 1989.
7. Himeno, K. Maruyama, T. and Kasahara, A. : "Development of Pavement Evaluation System Using The Falling Weight Deflectometer," *Proceeding of 2nd International Symposium on Pavement Evaluation and Overlay Design*. "Brazilian Paving Association. Rio de janeiro, Brazil, 1989, pp.4.6.1-4.6.20.
8. 丸山、姫野、林：FWDによる舗装診断システム、舗装、Vol.23, pp.16-20, 1988.
9. Himeno, K. Maruyama, T. and Hayashi, M. : "The use of FWD Deflection Data in Mechanistic Analysis of Flexible Pavements," *Proceedings of 3rd International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields*" Vol.1, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, July 1990, pp.401-410.
10. 笠原、五十嵐：舗装構造解析へのフォーリング・ウエイト・デフレクトメータの一利用、土木学会論文集、No.420/V-13, pp.43-49, 1990.
11. Himeno, K. Watanabe, T. and Maruyama, T. : "Estimation of Fatigue Life of Asphalt Pavement." *Proceedings 6th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*", Ann Arbor, Michigan, 1987, pp.272-289.
12. Research and Development of The Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1), 9th ed., Research Report 82-2, Asphalt Institute, 1982.