

測定誤差から見たFWDセンサーの 最適配置に関する検討

亀山修一¹・松井邦人²・笠原 篤³・姫野賢治⁴・丸山暉彦⁵

¹正会員 博士(工学) 北海道工業大学講師 工学部土木工学科 (〒006 札幌市手稲区前田7条15丁目)

²フェロー会員 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)

³フェロー会員 工博 北海道工業大学教授 工学部土木工学科 (〒006 札幌市手稲区前田7条15丁目)

⁴フェロー会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112 東京都文京区春日1-13-27)

⁵正会員 工博 長岡技術科学大学教授 建設系 (〒940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

FWD測定によって得られる舗装の表面たわみから逆解析によって舗装構成層の弾性係数を推定する場合、得られる逆解析弾性係数は測定たわみに含まれる誤差の影響を受ける。本研究では、測定誤差が逆解析弾性係数に及ぼす影響度を計算し、測定誤差の影響が最小となるたわみの測定位置(最適たわみ測定位置)を遺伝的アルゴリズムによって求めた。得られたたわみ測定位置の妥当性を検証するために、モンテカルロシミュレーションを用いて逆解析を行った。その結果、たわみの測定位置を適切に選択することにより、推定される逆解析弾性係数の標準偏差が大きく減少することが分かった。また、各舗装構成層の弾性係数が変動したとき、最適たわみ測定位置がどのように変化するかについても検討した。

Key Words : FWD, measurement error, backcalculation, sensitivity analysis, optimal sensor locations, Genetic Algorithms

1. はじめに

近年、舗装の構造評価、維持修繕設計のために非破壊試験が注目され、種々の試験法が開発されてきた。これらの試験法は、①ベンケルマンビームのように舗装表面に静的な荷重を与えたとき、②ダイナフレクトのように周期的荷重を与えたときの他に、③衝撃荷重を与えたときに生じる舗装の表面たわみを測定する方法に分類される¹⁾。FWD(Falling Weight Deflectometer)はこの内③の非破壊試験法に用いられる装置であり、舗装表面に重錘を落下させたときに生じるたわみを載荷版近傍の数箇所測定する装置である。最近では、測定値の精度が高いこと、測定が迅速に行えることなどから世界的にも非破壊試験にはFWDを用いることが主流となっており、わが国でも現在20台ほど稼働している²⁾。

測定された表面たわみから間接的にその舗装の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。この種の研究は世界的に活発に行われている³⁾⁴⁾。逆解析は通常、測定された表面たわみと線形多層弾性論から得られ

る計算たわみの差の自乗和を評価関数として選定し、これを最小にする層弾性係数を決定するという一種の最適化問題として扱われる。最適化の方法としてはガウス・ニュートン法⁵⁾、拡張カルマンフィルタ⁶⁾、ベイズ法⁷⁾、遺伝的アルゴリズム⁸⁾など様々な方法が適用されている。

逆解析弾性係数に影響を及ぼす因子としては、仮定した舗装構造と実構造とのモデル誤差(層厚、ポアソン比)や測定たわみに含まれる測定誤差がある。著者らはこれら2つの誤差が逆解析弾性係数に与える影響について検討した結果、たわみセンサーの個数とともに、センサー配置も逆解析弾性係数に影響することを示した⁹⁾。

本研究では測定誤差のみを対象とし、その影響を最も受けにくいたわみ測定位置を遺伝的アルゴリズム¹⁰⁾によって求めることを目的としている。また、モンテカルロシミュレーションを用いたたわみ測定位置が逆解析弾性係数に与える影響を検討し、遺伝的アルゴリズムによって得られた最適たわみ測定位置の妥当性を検証した。さらに、アスファルト舗装の場合、表層に用いられるアスファルト層の弾性係

表-1 ELSAにより解析した各測点の表面たわみ

測点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
測定位置 (mm)	0	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
たわみ (μm)	522.5	416.9	381.7	349.7	321.1	295.8	273.3	253.5	235.8	220.1	206.0	193.2	181.7
測点	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
測定位置 (mm)	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400
たわみ (μm)	171.3	161.8	153.1	145.2	137.9	131.2	125.0	119.3	114.0	109.2	104.6	100.4	96.5
測点	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	—
測定位置 (mm)	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	—
たわみ (μm)	92.9	89.5	86.3	83.3	80.5	77.9	75.5	73.1	71.0	68.9	67.0	65.2	—

数は温度の変化にともない大きく変動することから、舗装を構成する各層の弾性係数が変動した場合、最適たわみ測定位置がどのような影響を受けるのかについても検討した。

2. 解析条件

解析する舗装として、図-1 に示すような層厚、ポアソン比、層弾性係数からなる 3 層構造のアスファルト舗装を仮定した。最適化するたわみの測定点(以下測定候補点と称する)は荷版中心点(0mm)、から半径方向に 2000 mm 離れた位置までとし、測定候補点の間隔は 50mm とした。ただし、荷版中心点から 50mm, 100mm, 150mm の点は荷版の半径内にあり、たわみを測定することができないことから対象外とした。その結果、測定候補点の総数は 38 点となる。

舗装体表面に 50 kN 荷重が作用したとき、各測定候補点に生じるたわみを多層弾性論解析プログラム (ELSA)¹¹⁾によって算出した。結果を表-1 に示す。

3. 遺伝的アルゴリズムの適用

最適たわみ測定位置を求める方法として遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms : GA) を採用した。GA とは自然界における生物集団の進化過程に着想を得たものであり、より優れた遺伝子を持つ個体同士を交配し、進化させることにより最適な遺伝子を持つ個体を抽出するという手法である。

(1) 遺伝子の表現型

仮想生物集団内の一個体は 0 ~ 2000mm の範囲の測定候補点を遺伝子として持つと仮定する。すなわち、図-2 に示すように一つの個体は 38 個の遺伝子を持っている。各遺伝子は 0 または 1 の 2 進数で表現され、

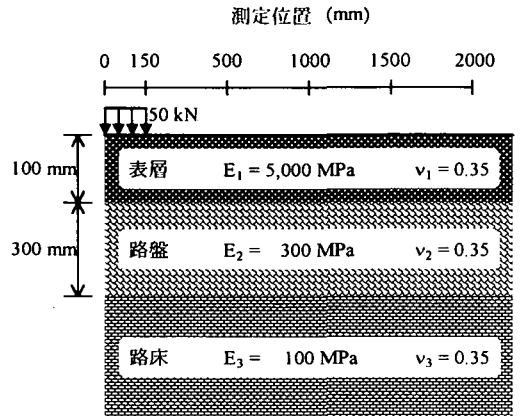
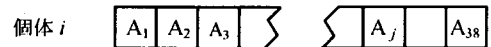
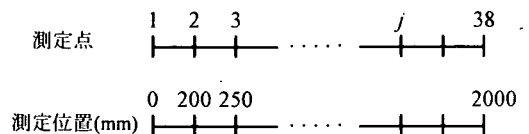


図-1 舗装構造(3層構造)



ここで A_j $\left\{ \begin{array}{l} 0 \cdots \text{測定しない} \\ 1 \cdots \text{測定する} \end{array} \right.$

図-2 遺伝子の表現方法

遺伝子が1となる時、その測点においてたわみが測定されるものとする。一個体の遺伝子配列に含まれる1の個数、すなわちたわみセンサーの個数は入力時に設定するものとした。現在使用されているFWDのセンサー数は5～10個であることから、本研究では、たわみセンサーの個数を5～10の範囲に設定した。このように表現された遺伝子を持つ個体に図-3に示すような操作を行い最適な遺伝子を持つ個体を抽出する。各段階についての説明を以下に示す。

(2) 初期集団の生成

図-2に示すような2進数で表された遺伝子をランダムに発生させ、これらを遺伝子として持つ個体を n 個生成し、初期集団とする。個体数 n が少ないほど計算に要する時間は短縮されるが、逆に少なすぎると、遺伝子の多様性が失われるため、局所解に陥ったときに、そこから脱出することが困難になる。適切な個体数は最適化問題によって異なりその規準は存在しないが、一般的に50～150の個体数で十分であると言われていることから¹²⁾、本研究では計算時間を考慮して個体数を50個とした。

(3) 評価関数の算出

今、 M 層からなる舗装構造において FWD 測定を行い、 N 個の測点において表面たわみを測定したとする。測定されたデータから逆解析によって層弾性係数を推定する場合、最適化手法にはガウス・ニュートン法が広く用いられている。これは式(1)のように、測点 i における測定たわみ u_i と多層弾性論により得られる計算たわみ z_i の差の自乗和で表される評価関数を設定し、これを最小にする層弾性係数を求める方法である。

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

ここで、

- f : 評価関数
- i : たわみの測定点 ($1-N$)
- w_i : 重み係数
- z_i : 計算たわみ
- u_i : 測定たわみ

各測点におけるたわみの測定誤差はランダムであり、測点間に相関はないと仮定すると、逆解析弾性

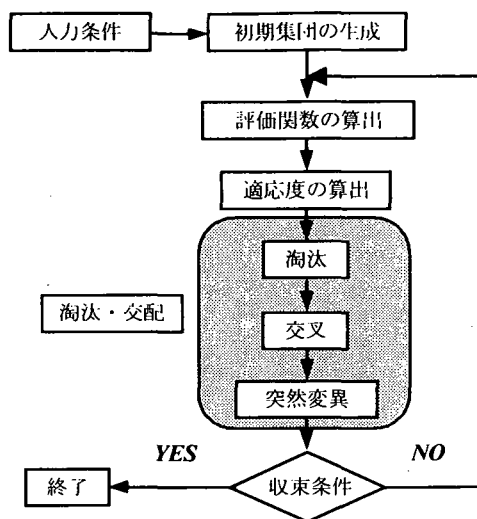


図-3 遺伝的アルゴリズムの流れ

係数のたわみ測定誤差に対する感度は式(2)によって表される¹³⁾。

$$\sum_{j=1}^M \left(\sum_{i=1}^N \frac{\partial z_i}{\partial E_j} \frac{\partial z_i}{\partial E_k} \right) \lambda_{jl} = \frac{\partial z_l}{\partial E_k} \quad (2)$$

$$(l = 1, \dots, N) \quad (k = 1, \dots, M)$$

ここに、 $\lambda_{jl} = \frac{\partial E_j}{\partial u_l}$ 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。

各測点のたわみの真値を u_0 、誤差を Δu_l とすると、 j 層の弾性係数 E_j はすべての測点における誤差の影響を受けることから、

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

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

ここで、

$$u_0 = (u_{01}, u_{02}, \dots, u_{0N})^T$$

$$\Delta u_0 = (\Delta u_{01}, \Delta u_{02}, \dots, \Delta u_{0N})^T$$

と書くことができる。

測点*i*のたわみの分散を σ_i^2 ($i = 1, \dots, M$)とすると、 R 回測定したときの平均たわみの分散は σ_i^2/R であることから、式(3)より、逆解析弾性係数の共分散マトリックスは式(4)のように書くことができる。

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

ここで、

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

$$\begin{bmatrix} \sigma_1^2/R & & & 0 \\ & \sigma_2^2/R & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \sigma_N^2/R \end{bmatrix}$$

式(5)で表される共分散マトリックスの対角和を評価関数*J*とした。

$$J = \text{Trace} \left([\sigma_{EE}^u] \right) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial E_j}{\partial u_i} \right)^2 \left(\frac{\sigma_i^2}{R} \right) \quad (5)$$

式(5)によって評価関数*J*を算出するためには、各センサーにおける測定たわみの標準偏差を一定とする必要があることから、すべてのセンサーにおける測定たわみの標準偏差 σ を $2\mu\text{m}$ と仮定した。この値は、同一地点の繰り返し測定における測定たわみの変動係数は約2%程度であると報告されていること¹⁴⁾、およびASTM¹⁵⁾におけるFWDセンサーの精度に関する規格($2\mu\text{m}$ 以下あるいは指示値の2%以下)などを参考として決定した。

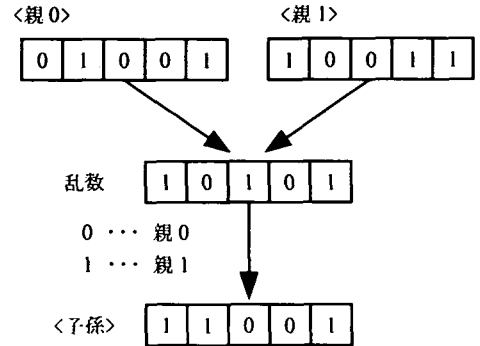


図-4 一様交叉方法

(4) 適応度の算出

式(6)によって評価関数*J*を適応度*F*に変換する。

$$F = U - J \quad (6)$$

*U*の値の決定には、スケーリングウィンドウ¹⁶⁾を採用し、検索の進行に応じて*U*を変化させた。今回の解析ではスケーリングウィンドウサイズを10とし、過去10世代中の評価関数*J*の最大値を*U*とした。

(5) 淘汰および交配

個体を適応度の大きい順に並べ替え、適応度の低い個体を淘汰率に応じて消滅させる。この操作により減少した個体は、残った適応度の高い個体を交配させ新しい個体を生成することで補う。本研究では淘汰率を0.6に設定し、適応度の低い個体を淘汰した。その後、以下に示すような交叉および突然変異により新しい個体を生成した。

a) 交叉

淘汰を経て生き残った個体の中から、親となる個体をランダムに2個選択し、これらに図-4に示すような一様交叉¹⁷⁾を適用し、1つの新しい個体(子孫)を生成する。この際、親は何回でも子孫の生成に参加できるものとする。

b) 突然変異

交叉によって新しく生成した個体の遺伝子を突然変異率に応じて反転させる。すなわち突然変異によって、遺伝子が0のものは遺伝子が1に、遺伝子が1のものは遺伝子が0に変わる。突然変異は淘汰および交叉によって均一化しがちな遺伝子に多様性を持たせ、集団が局所解に陥ったときに、そこから脱出

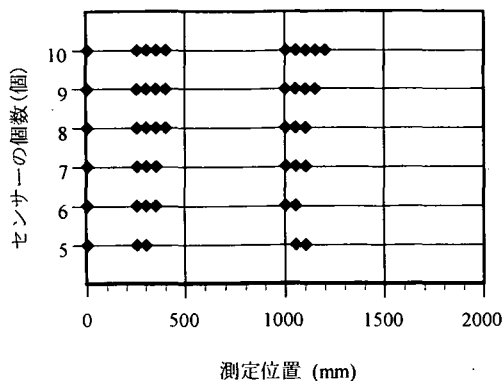


図-5 最適たわみ測定位置

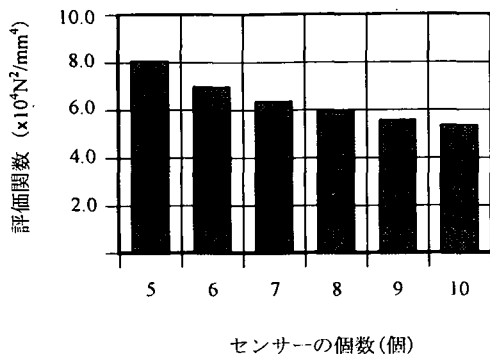


図-6 センサーの個数と評価関数の関係

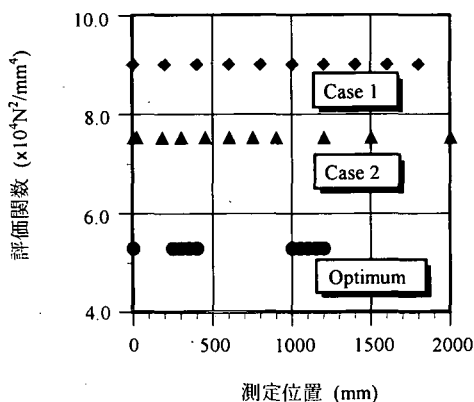


図-7 測定位置と評価関数の関係(10点測定)

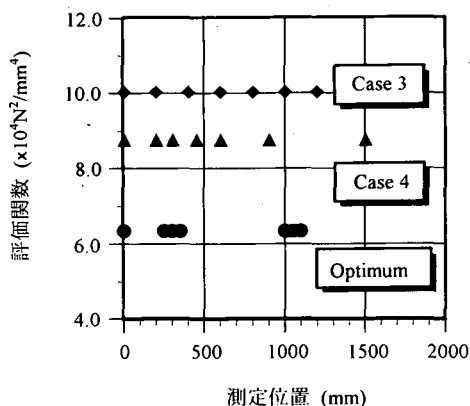


図-8 測定位置と評価関数の関係(7点測定)

する可能性を高める効果がある。なお、突然変異率は0.1に設定した。

(6) 収束判定

最大世代交代数 G_{max} に至るまで繰り返し計算を行い、この世代数内において評価関数 J が最小となる個体、すなわち G_{max} 内における最良個体が持つ遺伝子を解とする。本研究では2000世代以降、評価関数の減少が見られなかったことから、最大世代交代数 G_{max} を2000世代とした。

4. 最適たわみ測定位置

センサー数を5～10個に設定し、評価関数が最小となるたわみ測定位置をGAにより求めた。センサーの個数と最適たわみ測定位置の関係を図-5に、算出

された評価関数との関係を図-6に示す。

図-5は、最適たわみ測定位置が載荷版中心点、200～400mm、および1000～1200mmの3領域に分布することを示している。センサー数を増加させると、200～400mmと1000～1200mmの範囲内においてのみ測点が増加し、この範囲以外の測点は生じない。また、センサー数の増加にともない最適測定位置の評価関数が減少することが図-6から分かる。これはセンサー数が増加することにより推定される逆解析弾性係数の精度が向上することを意味する。

センサー数が10個と7個の場合について、図-7、図-8に示すような測定位置を設定し、計算される評価関数を比較した。ここでCase 1、Case 3はたわみ測定点を載荷版中心点から200mm毎に配置しており、Case 2(0, 200, 300, 450, 600, 750, 900, 1200, 1500, 2000mm)およびCase 4(0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200mm)は従来のFWD測定において用いられてい

る測定位置である。それぞれのセンサー位置と最適位置における評価関数を図-7、図-8に示す。

これらの図より、Case 2、Case 4のような従来用いられているたわみ測定位置の評価関数は、測点を等間隔に配置するCase 1、Case 3より小さくなるが、最適なたわみ測定位置と比較した場合、かなり大きな値を示すことが分かる。したがって、最適たわみ測定位置におけるたわみから推定される逆解析弾性係数のばらつきは、Case 1～Case 4のような測定位置から推定される逆解析弾性係数より小さくなり、逆解析の精度が向上すると考えられる。

5. モンテカルロシミュレーションによる最適測定位置の検討

最適なたわみ測定位置におけるたわみから推定される逆解析弾性係数の標準偏差と他の測定位置から得られる逆解析弾性係数の標準偏差を比較し、最適たわみ測定位置の妥当性を検討するためにモンテカルロシミュレーションをおこなった。

今、各測点におけるたわみの母集団の標準偏差(σ_t)を $2\mu\text{m}$ と考える。測定たわみの平均値の期待値は母平均であり、分散は、 σ_t^2/R (R は測定回数)で与えられる。したがって平均たわみの標準偏差は図-9のように測定回数の増加にともなって減少する⁹⁾。

シミュレーションを行うに当たり、舗装構造は図-1に示した通りとし、同一地点における測定たわみは正規分布すると仮定する。測定回数を1～10回、センサー数を10個とし、図-7に示した最適たわみ測定位置およびCase 2の測定位置におけるたわみをELSAによって算出し、この値がたわみの平均値、その標準偏差が図-9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。これらのデータを測定たわみとし、ガウス・ニュートン法を用いた逆解析プログラム(LMBS)¹⁰⁾により逆解析弾性係数を推定した。測定回数と表層の逆解析弾性係数(E_1)の標準偏差の関係を図-10に、路盤の逆解析弾性係数(E_2)との関係を図-11に、そして路床の逆解析弾性係数(E_3)との関係を図-12に示す。

図-10、図-11から、たわみ測定位置を最適な位置に設定した場合とCase 2を比べると、表層と路盤の逆解析弾性係数の標準偏差が小さくなっていることが分かる。たわみ測定点を最適な位置に設定し、測定回数を3回とした場合に得られる標準偏差と同等の標準偏差を得るためには、たわみ測定位置を

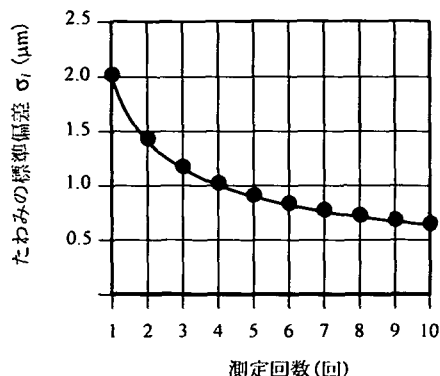


図-9 たわみの標準偏差と測定回数

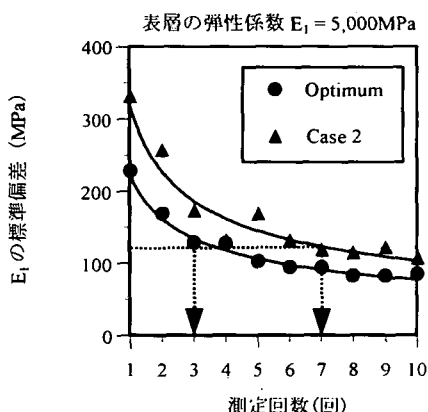


図-10 測定回数と E_1 の標準偏差の関係

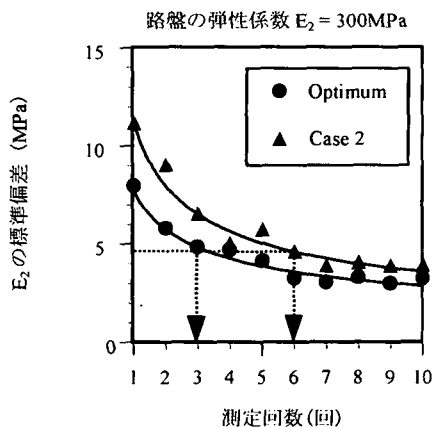


図-11 測定回数と E_2 の標準偏差の関係

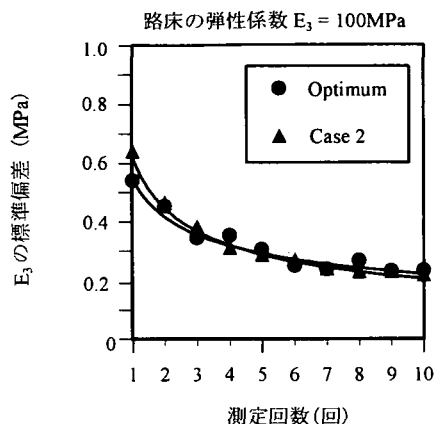


図-12 測定回数と E_3 の標準偏差の関係

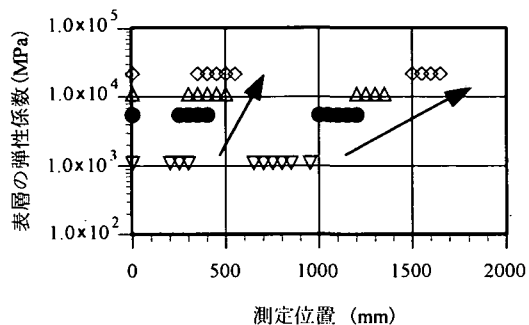


図-13 表層の弾性係数と最適たわみ測定位置 (10点測定)

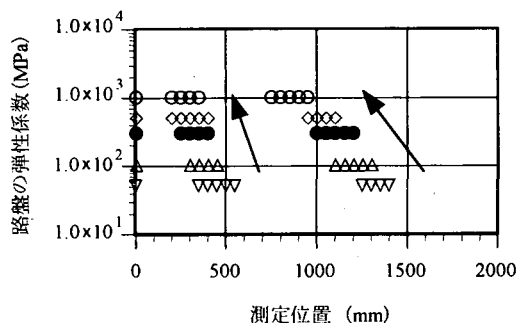


図-14 路盤の弾性係数と最適たわみ測定位置 (10点測定)

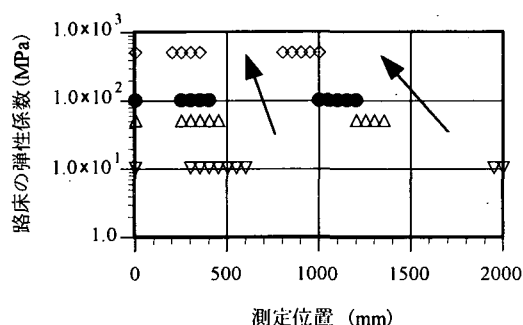


図-15 路床の弾性係数と最適たわみ測定位置 (10点測定)

Case 2とした場合、 E_1 の推定には7回、 E_2 の推定には6回もの測定が必要となる。このことは、たわみ測定位置を適切に選択することにより、少ない測定回数で精度の良い逆解析弾性係数が推定できることを示している。また、最適測定位置とCase 2の両者のたわみから推定される逆解析弾性係数の標準偏差は、 E_1 において最もその差が大きくなっており、 E_3 においてはほとんど差がない。したがって、たわみ測定位置を適切に選択することで、推定される表層および路盤の逆解析弾性係数の標準偏差を小さくすることが可能であり、推定値の精度の向上が期待できる。

6. 弾性係数の変動と最適たわみ測定位置

アスファルト混合物は温度の変化とともに弾性係数が変化することから、図-1に示した舗装構造において、表層の弾性係数 E_1 のみを1,000 ~ 20,000MPaの範囲で変動させ、それぞれの場合における最適なたわみ測定位置をGAによって求めた。センサー数を10個としたときに得られた最適なたわみ測定位置と表層の弾性係数との関係を図-13に示す。表層の弾性係数が増加しても最適測定位置には必ず載荷版中心点が含まれている。しかしながら他の測点は表層の弾性係数の増加にしたがいより遠方へ移動する。この傾向は特に載荷版中心点から、最も離れた

位置にある測点において顕著である。表層の弾性係数が変動する場合、たわみ測定位置は荷版中心点および 200 ~ 500mm の範囲が適当であると考えられるが、荷版から最も離れた測点は弾性係数の変動にとまって大きく移動することから一概に適切な範囲を決めることができない。

E_1 , E_3 を一定とし、路盤の弾性係数 E_2 を 50 ~ 1,000MPa の範囲で変動させときに得られる最適たわみ測定位置を図-14 に示す。また、 E_1 , E_2 を一定とし、路床の弾性係数 E_3 を 10 ~ 500MPa の範囲で変動させたときの最適測定位置を図-15 に示す。これらの結果から路盤と路床においても表層の場合と同様に弾性係数が変動しても荷版中心点は変動しないが、他の測点は表層の結果とは逆に弾性係数が増加するにしたがって荷版近傍へと移動することが分かる。この傾向は荷版中心点から最も離れた測点において顕著であり、弾性係数の変動にとまって測定位置が移動する。

7. 4層構造における最適たわみ測定位置

舗装構造として図-16 に示すような4層構造からなるアスファルト舗装を仮定し、GA によって 0 ~ 2000mm の範囲内におけるたわみセンサーの最適位置を求めた。センサー数を 10 個としたときに得られる最適たわみ測定位置および評価関数を図-17 に示す。また、たわみセンサーの位置を図-17 の Case 5(荷版中心点から 200mm 毎に配置)、Case 6(0, 200, 300, 450, 600, 750, 900, 1200, 1500, 2000mm に配置)の 2 通りに設定し、算出される評価関数を比較した。なお Case 6 は実際の FWD 測定において用いられているセンサー位置である。

図-17 より、4層構造における最適たわみ測定位置は 0mm, 200 ~ 350mm, 600 ~ 700mm, 1850 ~ 2000mm の4領域に分布していることが分かる。また、図-7 に示した3層構造における最適たわみ測定位置と比較すると、最遠点の測点はより荷版から離れた位置になることが分かる。

センサー数を10個とし、表層の弾性係数 E_1 のみを 500 ~ 30,000MPa と変動させ、たわみの最適測定位置を求めた。結果を図-18 に示す。この結果から E_1 が増加するにつれ、荷版中心点以外の測点はより荷版から離れた位置へと移動することが分かる。この傾向は最遠点の測点において顕著であり、 E_1 の変動とともに測定位置が大きく変わる。 E_1 が増加し、

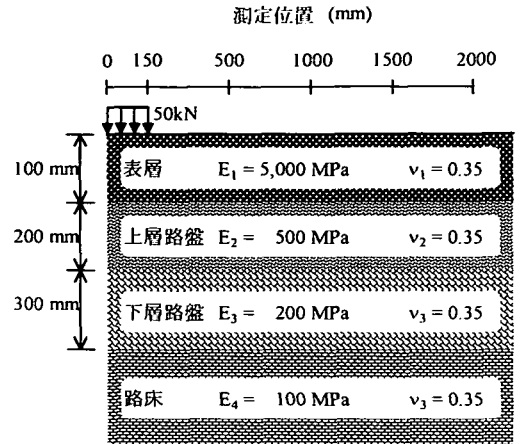


図-16 舗装構造(4層構造)

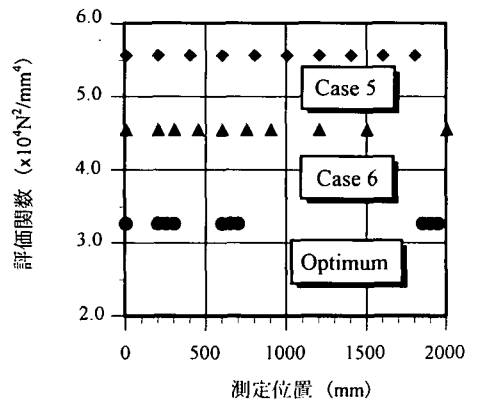


図-17 測定位置と評価関数の関係(10点測定)

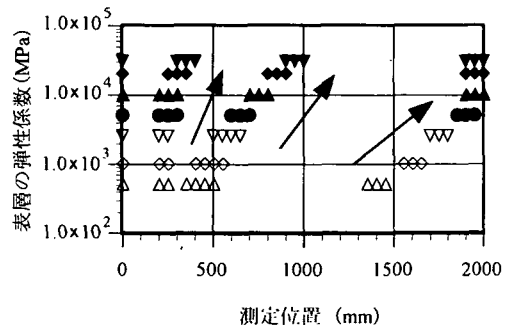


図-18 表層の弾性係数と最適たわみ測定位置(10点測定)

10,000MPaとなると、最遠点の測点は2000mmに達する。このことからE₁が10,000MPa以上となると、たわみの最適測定位置は2000mm以遠になると考えられる。

8. 結論

各測定点におけるたわみの標準偏差を一定と仮定し、各測定点におけるたわみ測定誤差の逆解析弾性係数に対する感度を計算し、測定誤差の影響が最小となるようなたわみ測定位置を遺伝的アルゴリズムによって求めた。本研究で得られた結論を要約すれば以下ようになる。

- ここで対象とした3層構造の場合、最適なたわみの測定点は0mm, 200 ~ 400mm, 1000 ~ 1200mmの3つの範囲内に位置し、たわみセンサーの数が5 ~ 10個の範囲で変化してもこの範囲には変化がない。
- モンテカルロシミュレーションを適用し、最適たわみ測定位置とそれ以外のたわみ測定位置におけるたわみから逆解析弾性係数を推定した。最適たわみ測定位置から推定される表層および路盤の逆解析弾性係数の標準偏差は他の測定位置から得られる逆解析弾性係数の標準偏差と比べ、かなり小さくなることが分かった。したがって、たわみ測定位置を適切に選択することにより、表層、路盤の逆解析弾性係数の精度を向上させることが可能であり、従来と同程度の精度を得るために必要な同一地点でのFWDの測定回数を低減できる。
- 表層、路盤および路床の弾性係数を変動させたとき、最適たわみ測定位置がどのような影響を受けるのかを検討した。その結果、各層の弾性係数を変動しても載荷版中心点は移動しないが、載荷版中心点以外の測点は表層では弾性係数が増加するにしたがってより載荷版から離れた位置へ移動し、路盤および路床では弾性係数の増加にともないより載荷版近傍へと移動する。
- ここで仮定した4層構造におけるたわみセンサーの最適位置は0mm, 200 ~ 350mm, 600 ~ 700mm, 1850 ~ 2000mmの4領域に分布しており、3層構造と比べるとより載荷版から離れた測点を必要とする。また載荷版中心点以外の測点は表層の弾性係数の変動にしたがい、より載荷版から離れた位置へと移動する。

このようにたわみセンサー位置は推定される逆解析弾性係数に大きな影響を及ぼすことから、センサー位置を可変とすることができる FWD 試験装置の開発が望まれるであろう。

参考文献

- 1) 笠原篤, 岳本秀人, 伊藤保彦, 古川真男: フォーリング・ウェイト・デフレクトメータについて, 舗装, Vol.20, No.6, pp.15-23, 1985.
- 2) FWD研究会: FWDに関する研究(その2), 1995.
- 3) Bush III, A. J. and Baladi, G. Y.: *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of moduli*, ASTM special technical publication, 1026, ASTM publication code number 04-010260-08, ASTM, 1989.
- 4) von Quintus, H. L., Bush III, A. J. and Baladi, G. Y.: *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of moduli: Second Volume*, ASTM special technical publication, 1198, ASTM publication code number 04-011980-08, ASTM, 1989.
- 5) Inoue, T. and Matsui, K.: Structural analysis of asphalt pavements by FWD and backcalculation of elastic layered model, *3rd International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Vol.1, pp.425-434, 1990.
- 6) 松井邦人, 井上武美, 三瓶辰之: 拡張カルマン・フィルタによる舗装の逆解析, 第25回土質工学会研究発表会, pp.1835-1836, 1990.
- 7) 三瓶辰之, 松井邦人, 井上武美: 舗装構造の逆解析における各種手法の比較, 土木学会論文集, No.442/V-16, pp.237-240, 1992.
- 8) 亀山修一, 姫野賢治, 丸山暉彦, 笠原篤: 遺伝的アルゴリズムを用いた舗装体の層弾性係数の逆解析, 土木学会論文集, No. 550/V-33, pp.195-204, 1996.
- 9) 松井邦人, 笠原篤, 岡田貢一: 逆解析弾性係数係数に対するたわみと構造モデル誤差の影響, 土木学会論文集, No.526/V-29, pp.55-62, 1995.
- 10) Goldberg, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- 11) 姫野賢治: パソコンによる舗装の多層弾性構造解析, アスファルト, Vol.32, No.161, pp.65-72, 1989.
- 12) 伊庭斉志: 遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社, 1994.
- 13) 松井邦人, 井上武美, 三瓶辰之: 弾性多層構造の逆解析におけるモデル誤差・測定誤差に対する感度, 土木学会論文集, No.454/III-20, pp.11-17, 1992.

- 14) FWD研究会 : FWDに関する研究, pp.28-32, 1993.
- 15) ASTM: The Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device, D4694-87
- 16) Schraudolph, N. N.: A User's Guide to GAUCSD 1.4, *Computer Science & Engineering Dept.*, UCSD, 1992.
- 17) 安居院猛, 長尾智晴 : ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂, 1994.
- 18) 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, pp.401-410, 1990.

(1996. 6. 10 受付)

OPTIMAL SENSOR LOCATIONS FOR FWD TEST IN VIEW OF MEASUREMENT ERRORS

Shuichi KAMEYAMA, Kunihito MATSUI, Atsushi KASAHARA,
Kenji HIMENO and Teruhiko MARUYAMA

When layer moduli are backcalculated from a set of surface deflections measured by FWD, it has been known that the backcalculated moduli are affected by measurement errors as well as model link error. This paper presents a genetic algorithm based method that minimize the effect of measurement errors on the moduli. To confirm the validity of the method presented herein, layer moduli are backcalculated by using Monte Carlo simulation and a set of measurement locations which is different from the optimal set. Finally, this paper examines how optimal sensor locations change when the moduli of layers that compose pavement vary.