

I-5 遺伝的アルゴリズムによる FWD たわみ測定位置の最適化 Genetic Algorithms Optimization of Measuring Positions of FWD Deflections

○亀山修一¹⁾ 松井邦人²⁾ 笠原 篤³⁾ 姫野賢治⁴⁾ 丸山暉彦⁵⁾
Shuichi KAMEYAMA Kunihito MATSUI Atsushi KASAHARA Kenji HIMENO Teruhiko MARUYAMA

【抄録】 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、推定値は測定値自体の誤差と逆解析に採用した構造モデルの誤差の影響を受ける。

本研究では逆解析の評価関数として測定誤差の逆解析弾性係数に対する感度から計算される逆解析弾性係数の共分散マトリックスの対角和を選定し、遺伝的アルゴリズムによって評価関数が最小となるたわみセンサー位置を求めた。その結果、最適センサー位置は従来FWD測定において用いられているセンサー位置とはかなり異なった位置となった。したがって、センサー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精度を向上させることができる。

【Abstract】 FWD is one of the nondestructive test equipment commonly used for evaluating pavement structural adequacy, and it is usually combined with some backcalculation method of pavement layer moduli. The calculated moduli are affected by the type of the analyzing model as well as the accuracy of the measurement.

This paper places an emphasis on determining the optimal position of each deflection sensor of FWD. The simulation was performed using Genetic Algorithms that is a powerful method for obtaining the optimal value among the huge number of combinations. It is found that determination of measuring positions of pavement deflections affects the estimated layer moduli significantly, and a careful selection of adequate measuring positions from the loading point is strongly recommended.

【キーワード】 FWD, 測定誤差, 測定位置, 逆解析, 逆解析弾性係数, 遺伝的アルゴリズム

【Key Word】 FWD, Measurement Error, Sensor Position, Backcalculation, Backcalculated Moduli, 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ペ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荷重板近傍の数箇所で測定する装置である。

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²⁾³⁾。逆解析は通常、測定された舗装の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現在まで Gauss-Newton法⁴⁾、拡張カルマンフィルター⁵⁾、ベイズ法⁶⁾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する因子としては、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。測定誤差が逆解析弾性係数に与える影響はFWDの測定回数、たわみセンサーの個数を増加させることで軽減できることが明らかになっている⁷⁾。しかしながら、測定たわみに測定誤差が含まれる場合、たわみセンサーの位置が逆解析弾性係数に及ぼす影響に関しては、現在までほとんど検討されていない。

本研究では、測定誤差の逆解析弾性係数に対する感度から計算される逆解析弾性係数解析の共分散マトリックスの対角和を評価関数とし、それを最小にするセンサー位置を遺伝的アルゴリズム(GA)⁸⁾によって求めた。

¹⁾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)
²⁾東京電機大学 理工学部建設工学科 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂, TEL:0492-96-6501)
³⁾北海道工業大学 工学部土木工学科 (〒006 札幌市手稲区前田 7 条 15 丁目, TEL:011-681-2161)
⁴⁾北海道大学 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北 14 条西 8 丁目, TEL:011-706-6205)
⁵⁾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)

Table 1 順解析により計算された測定候補点の表面たわみ(3層構造)

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 測定候補点 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| センサー位置(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 |
| 測定候補点 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
| センサー位置(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 |
| 測定候補点 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | |
| センサー位置(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 | |

2. 解析条件

本研究で用いた舗装構造は3層構造及び4層構造とした。3層構造における舗装構成層の層厚、弾性係数、ポアソン比を Fig.1 に、4層構造の層厚、弾性係数、ポアソン比を Fig.2 に示す。

最適化するたわみの測定点(以下測定候補点と称する)の範囲は載荷版中心(0mm),から半径方向に 2000 mm 離れた点までとし,測定候補点の間隔は 50mm とした。ただし,載荷版中心から 50mm, 100mm, 150mm の点は載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。この結果,測定候補点の総数は 38 点となる。

舗装体表面に 5t(49kN) 荷重が作用したとき,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)⁹⁾によって算出した。3層構造に生じる表面たわみを Table 1 に示す。

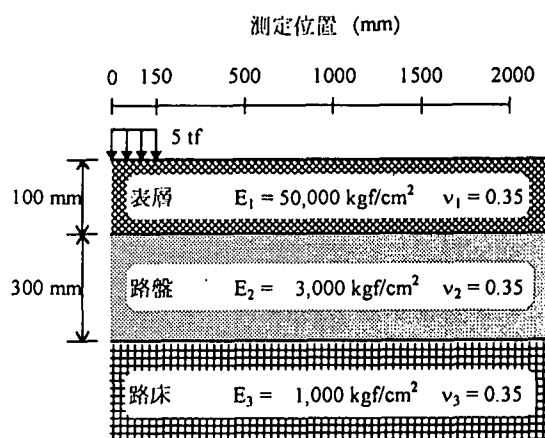


Fig.1 舗装構造(3層構造)

3. 遺伝的アルゴリズムの適用

センサー位置の最適化の手法として遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた。本研究で採用した GA は,ランダムに生成した仮想生物の適応度を算出し,適応度の低い個体を淘汰し,残った適応度の高い個体だけに,交叉,突然変異などの遺伝子オペレーターを作用させ,次世代の集団を形成させる過程を繰り返し,最適な遺伝子を持つ個体を抽出するというものである。

(1) 遺伝子の表現方法

一つの個体の遺伝子配列は 0~2000mm の範囲の測定候補点を表すと仮定する。つまり Fig.3 に示すように,個体は 38 個の遺伝子を持っており,これは 0~2000mm の範囲のたわみ測定点に対応している。各遺伝子は 0 または 1 で表現され,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,すなわち測定点数は入力時に設定するものとし,今回の解析では測定点数を 5~10 とした。これは現在使用されている FWD 試験装置の大部分が,操作性および経済性などの面から,センサーの個数を上記の範囲内としていることによる。

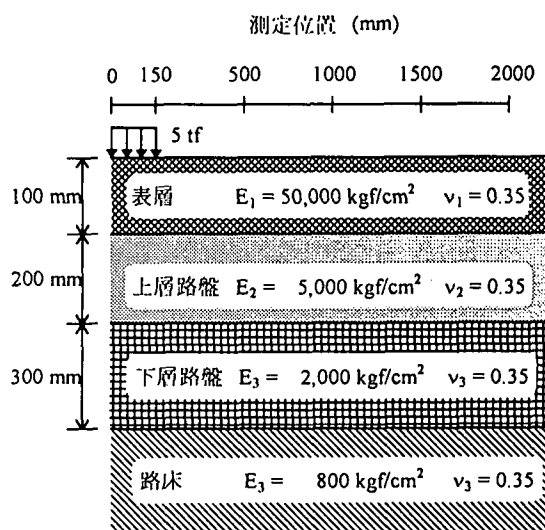


Fig.2 舗装構造(4層構造)

このように表現された遺伝子を持つ個体にFig.4に示すような操作を行い、世代交代を繰り返すことによって最適な遺伝子からなる個体を抽出する。各段階の説明を以下に示す。

(2) 初期集団の生成

Fig.3に示すようなバイナリ形式で表される遺伝子をランダムに発生させ、これらを38個の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、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する問題によって異なり一定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¹⁰⁾、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を行い、層弾性係数を推定する方法としては Gauss-Newton 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 の残差平方和で表される評価関数を設定し、それを最小にする層弾性係数を繰り返し計算により求めるものである。

$$R_i = \sum_{k=1}^N \sqrt{w_k (u_i - z_i)^2} \quad (1)$$

ここで、

- R_i : 個体 i の評価関数
- k : たわみの測定点 ($1 \sim N$)
- w_k : 測定位置における重み
- z_i : 計算たわみ
- u_i : 測定たわみ

各センサーにおけるたわみの測定誤差はランダムであり、センサー間に相関はないと仮定すると、逆解析弾性係数のたわみ測定誤差に対する感度は式(2)によって計算される¹¹⁾。

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

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

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。

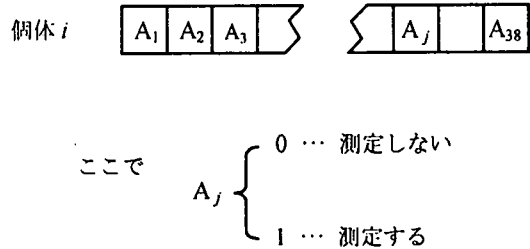
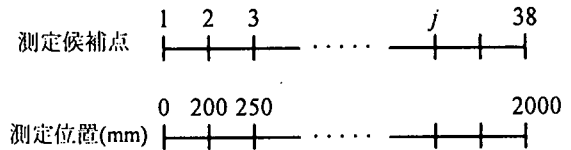


Fig.3 遺伝子の表現方法

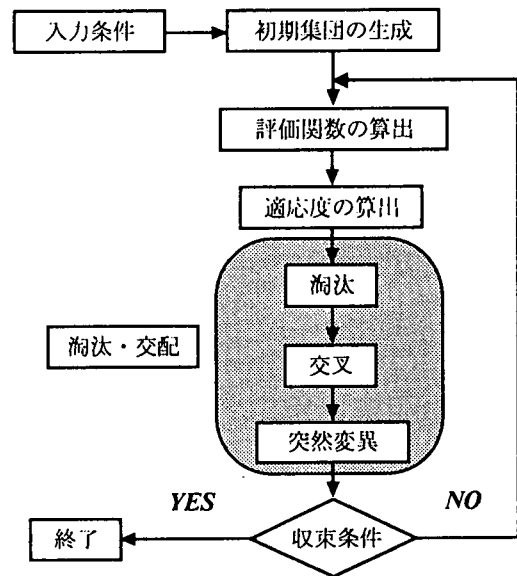


Fig.4 遺伝的アルゴリズムの流れ

各測点のたわみの真値を u_0 、誤差を Δu_k 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、式(3)のように書くことができる。

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

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

ここで

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

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

測点 k のたわみの分散を σ_k^2 ($k=1, \dots, N$) とすると, R 回測定したとき, 測点 k のたわみの分散は σ_k^2/R となることから, 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⁷⁾.

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

ここで

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

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

この共分散マトリックスのトレースを評価関数 J とする. ASTM によると¹²⁾, FWD のたわみセンサーの測定精度は $2\mu\text{m}$ 以下あるいは指示値の 2% 以下と規定されている. 本研究ではすべてのセンサーで測定されるたわみの標準偏差 σ_i を $2\mu\text{m}$ で一定と仮定し, 式(5)から各個体の評価関数 J を計算した.

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

(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¹³⁾を採用し, 検索の進行に応じて U を変化させる. 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.

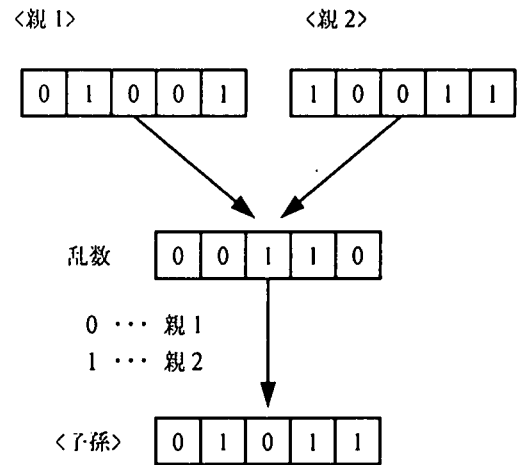


Fig.5 一様交叉方法

(5) 淘汰及び交叉

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なわれる. すなわち, 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 Fig.5 に示すような一様交叉法¹⁴⁾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. 通常, 一様交叉法では 2 つの親から 2 つの子孫を生成するが, 本研究では交叉の機会を増やし, 親となる個体の遺伝子に多様性を持たせるため, 1 つの個体を生成するものとした. なお, 淘汰率を 0.6 に設定した.

(6) 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. 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.

(7) 収束判定

最大世代 G_{max} に至るまで繰り返し計算を行い, G_{max} 内において得られる最良個体の遺伝子を解とする. 本研究では最良の遺伝子を持つ個体を必ず次の世代に残す方法を採用していることから, G_{max} 世代における評価関数の最小値を与えるセンサー位置が最適センサー位置となる. また, センサーの個数を変動させても, 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 G_{max} は 2000 世代とした.

4. 最適センサー位置

センサー個数を5～10個に設定し、評価関数が最小となるセンサー位置をGAにより求めた。3層構造におけるセンサーの個数と最適センサー位置の関係をFig.6に、そのときに計算された評価関数との関係をFig.7に示す。また、4層構造におけるセンサー個数と最適センサー位置の関係をFig.8に示す。

Fig.6から、最適センサー位置はセンサーの個数に関わらず、載荷版中心(0mm)、200～400mm、及び1000～1200mmの3領域に分布することが分かる。センサーの個数を増加させると、200～400mmと1000～1200mmの範囲内においてのみ測点が増加し、これらの領域以外には測点は表れない。また、Fig.7に示すように、センサーの個数の増加に伴い評価関数が減少することから、センサーの個数を増加させることにより、逆解析弾性係数に及ぼす測定誤差の影響を軽減できることが分かる。

4層構造における最適センサー位置は、Fig.8に示すように、0mm、200～350mm、600～750mm及び1800～1950mmの4領域に分布しており、3層構造の場合よりも載荷版から離れた測点グループ(1800～1950mm)が含まれる結果となった。センサーの個数を変動させても、3層構造と同様、200～350mm、600～750mm及び1800～1950mm周辺においてのみ測点の変動するだけであり、この領域以外には測点は表れない。

3層構造でセンサーの個数が10個と7個の場合について、Table 2に示すような測定位置を設定し、評価関数を計算した。ここでCase 1、Case 3はセンサーを載荷版中心から200mm毎に配置しており、Case 2及びCase 4は従来のFWD測定において用いられているセンサー位置である。それぞれのセンサー位置の組み合わせにおける評価関数と最適センサー位置の評価関数をFig.9、Fig.10に示す。

これらの図より、Case 2、Case 4のような従来のFWD測定において用いられているセンサー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、最適センサー位置と比較した場合、かなり大きな値となることが分かる。したがって、最適センサー位置で測定されたたわみから推定される逆解析弾性係数はCase 1～Case 4のようなセンサー位置から推定される逆解析弾性係数よりも測定誤差の影響を受けにくいと言える。

5. 結論

本研究で得られた結論は以下に示す通りである。

- 各たわみセンサーにおける測定誤差は一定であり、相関がないとし、各センサーにおける測定誤差の逆解析弾性係数に対する感度を計算した。そして測定誤差が逆解析弾性係数に及ぼす影響が最小となるたわみセンサー位置を遺伝的アルゴリズムによって求めた。

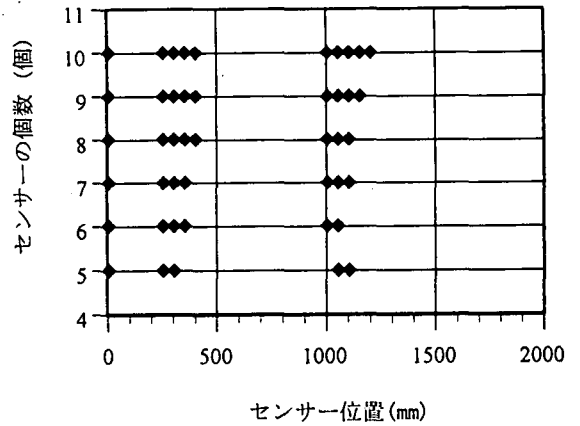


Fig.6 最適センサー位置(3層構造)

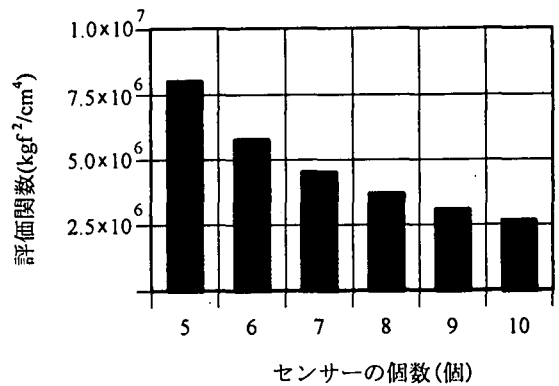


Fig.7 たわみセンサーの個数と評価関数の関係(3層構造)

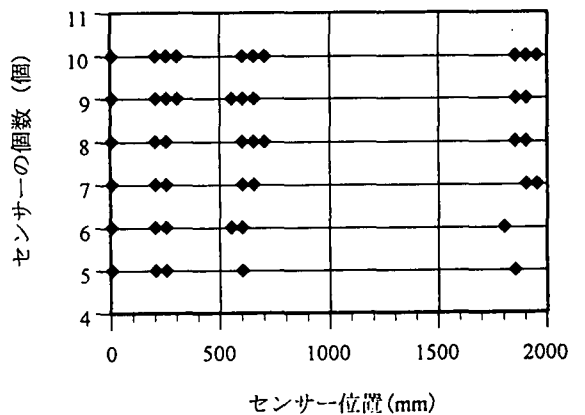


Fig.8 最適センサー位置(4層構造)

Table 2 センサー位置と評価関数

| センサー数 | ケース | センサー位置(mm) | 評価関数(kgf ² /cm ⁴) |
|-------|---------|---|--|
| 10 | Optimum | 0, 250, 300, 350, 400, 1000, 1050, 1100, 1150, 1200 | 5.286×10 ⁶ |
| | Case 1 | 0, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800 | 9.006×10 ⁶ |
| | Case 2 | 0, 200, 300, 450, 600, 750, 900, 1200, 1500, 2000 | 7.520×10 ⁶ |
| 7 | Optimum | 0, 250, 300, 400, 1000, 1050, 1100 | 6.316×10 ⁶ |
| | Case 3 | 0, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 | 1.000×10 ⁷ |
| | Case 4 | 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1500 | 8.740×10 ⁶ |

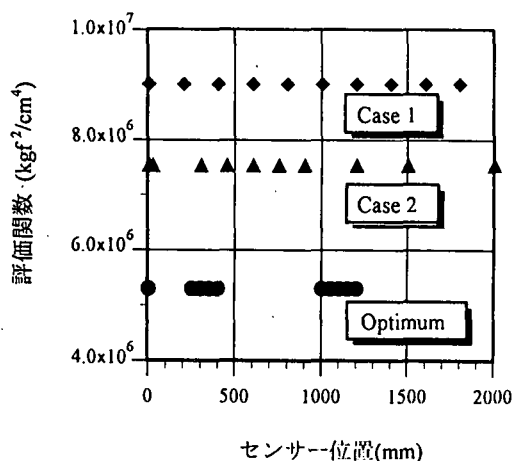


Fig.9 センサー位置と評価関数の関係(10点測定)

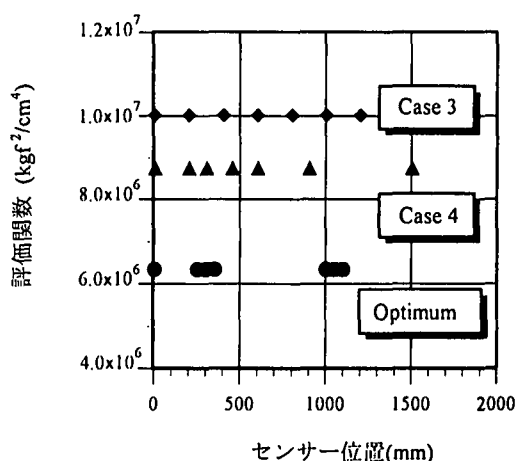


Fig.10 センサー位置と評価関数の関係(7点測定)

- 3層構造の場合、最適センサー位置はは載荷版中心(0mm)、200~400mm及び1000~1200mmの3領域に、4層構造における最適センサー位置は0mm、200~350mm、600~750mm及び1850~1950mmの4領域に分布し、センサー個数が5~10個の範囲で変動しても、この範囲以外に測点は表れないことが分かった。
- 最適センサー位置の評価関数と従来のFWD測定において用いられているセンサー位置の評価関数を比較したところ、最適センサー位置の評価関数の方がかなり小さな値となった。したがって、センサーを適切に配置することにより、より測定誤差の影響を受けにくい逆解析弾性係数を推定することが可能である。

参考文献

- 1) 笠原篤, 岳本秀人, 伊藤保彦, 古川真男: フォーリンク・ウェイト・テフロンテープについて, 舗装, Vol.20, No.6, pp.15-23, 1985.
- 2) 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.
- 3) 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.

- 4) 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
- 5) 松井邦人, 井上武美, 三瓶辰之: 拡張カルマン・フィルター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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Gordberg, D.E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- 9) 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.
- 10) 伊庭齊志: 遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社, 1994.
- 11) 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.
- 12) ASTM: The Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device, D4694-87
- 13) Schraudolph, N. N.: A User's Guide to GAUCSD 1.4, Computer Science & Engineering Dept., UCSD, 1992.
- 14) 安居院猛, 長尾智晴: ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂