

投稿論文 (和文ノート)

**TECHNICAL
NOTE**

逆解析弾性係数におよぼす荷重分布と層間滑りの影響

松井邦人*・佐藤直俊**

舗装の非破壊試験法として、FWD 試験機を用いて舗装表面のたわみ形状を測定し、その結果から層弾性係数を推定することが行われている。この時、荷重を等分布とし、また層間には相対的な滑りが起こらないと仮定している。この仮定の妥当性を確認する必要があるかどうかを判断するため、本研究では、載荷荷重の分布状態と相接する2つの層の境界面の付着が、逆解析弾性係数に及ぼす影響を調べている。解析にはBISARを、また逆解析にはガウス・ニュートン法を用いた。

Keywords: pavement structure, backcalculation, load, interface slip, nondestructive test

1. はじめに

近年、FWDのような試験機による、表面たわみの測定値を、理論解析的な手法を用いて解釈する非破壊試験法が、舗装の実態に対する構造評価方法として脚光を浴びてきている^{1),2)}。通常、それは舗装を平行な層状構造をした弾性体でモデル化し、測定した表面たわみと舗装構造モデルの解析たわみが、できるかぎり一致するように層弾性係数を求める方法である。このような問題は逆解析と呼ばれ、種々の方法が提案されてきている(例えば文献2)の参考文献参照)。逆解析から得られた層弾性係数をここでは逆解析弾性係数と呼ぶことにする。

逆解析弾性係数は種々の誤差の影響を受けることが分かかってきており、その値がどの程度精度良く現位置の材料特性を反映しているかを判断する必要がある。逆解析弾性係数の推定値に影響を与える因子として、大別すると1)実構造と解析モデルの違い、2)測定誤差がある。2)は、偶然誤差と呼ばれ、測点数と測定回数を増やすことにより軽減できる。1)は、系統誤差を生じ、材料の構成則、層厚とポアソン比の誤差、層と層の境界条件、荷重分布等がその原因である。

測定誤差、層厚とポアソン比の誤差が逆解析弾性係数に与える影響については、すでに検討されている³⁾。UzanとLytton⁴⁾は、FWD荷重分布について、ゴムマットを用いると等分布に近づくが、ゴムマットがなければ、大きく等分布から離れる可能性があることを指摘している。

逆解析を行う時、荷重分布を等分布、また荷重の作用時に層と層の境界は完全に付着しているという仮定が一般になされている。この仮定が現実と異なっている

その影響が小さければ、このように仮定してもさしつかえない。そこで、本研究では、このような仮定が逆解析弾性係数にどの程度の影響を与えるかを検討するものである。

逆解析には、比較的簡単で効率的なガウス・ニュートン法²⁾を用いている。また弾性多層解析には、BISARを使用した。

2. 問題の定義

典型的な舗装構造は、表・基層、路盤、路床からなっている。このような構造の健全性を評価するため、現位置での非破壊試験法としてFWD試験が、輪荷重との類似性もあり特に注目を浴びている。この時、舗装構造を、表・基層、および路盤の厚さが有限で無限に広がっている平行な層状構造であり、路床を半無限体と仮定している。そして、舗装表面に荷重が作用すると、層と層の境界は完全に付着した線形弾性体として挙動し、また作用荷重は円形等分布と通常仮定している。本研究でも、逆解析では、この仮定を用いる。

荷重分布の影響を調べるため、あらかじめ複数の典型的な軸対象の荷重分布を想定し、BISARを用いて表面たわみを計算で求めておく。次に筆者等は、それ等の表面たわみを用い、等分布荷重の仮定で逆解析を行い、荷重分布の違いが層弾性係数の推定値に与える影響を評価している。

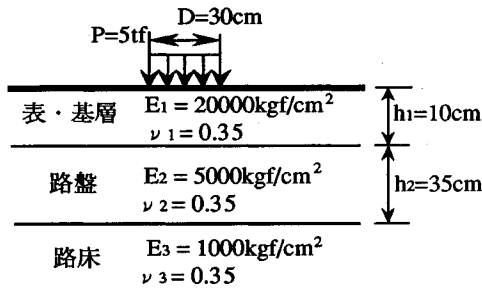
層間の滑りの影響を調べるため、表・基層と路盤の間で滑りが生じるものと仮定し、BISARプログラム中で滑りの程度の変数である $\alpha(0 \leq \alpha < 1.0, \alpha = 0$ は完全密着、 α の値が1に近づくほど滑りやすい)の値を変え、表面たわみを計算した。そのたわみを用い、層間が完全に付着しているとの仮定のもとで逆解析を行っている。そして表面たわみを計算するのに用いた層弾性係数と逆解析弾性係数の差より、すべりの影響を評価している。

* 正会員 Ph. D. 東京電機大学教授 建設工学科
(〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

** 学生員 東京電機大学大学院 建設工学科専攻

表一 図一の荷重分布モデルを用いて BISAR で解析したときの計算たわみ (単位: cm)

荷重分布	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
No.0	0.04802	0.03566	0.02436	0.02068	0.01554	0.01208	0.00969
No.1	0.04656	0.03559	0.02436	0.02068	0.01554	0.01208	0.00969
No.2	0.04507	0.03559	0.02437	0.02068	0.01554	0.01208	0.00969
No.3	0.04409	0.03559	0.02437	0.02068	0.01554	0.01209	0.00969
No.4	0.05649	0.03556	0.02436	0.02068	0.01554	0.01208	0.00969
No.5	0.05399	0.03556	0.02436	0.02068	0.01554	0.01208	0.00969
No.6	0.04643	0.03559	0.02437	0.02068	0.01554	0.01208	0.00969
No.7	0.04567	0.03559	0.02437	0.02068	0.01554	0.01209	0.00969
No.8	0.04534	0.03559	0.02437	0.02068	0.01554	0.01209	0.00969

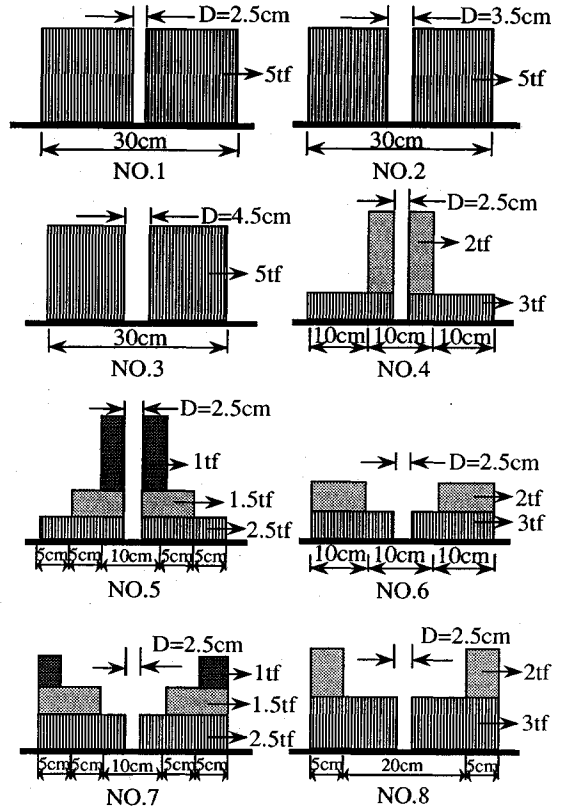


図一 舗装構造のモデル (単位: 1 tf = 9.8 kN, 1 kgf/cm² = 98 kPa)

ここでは、例題として図一に示すような舗装を考えることにする。層厚、ポアソン比の値は、実構造と解析モデルでは異なることもあるが、その影響はここでは考慮しない。次節以降に、その結果を示すことにする。

3. 荷重分布状態の影響

舗装表面に作用する FWD 試験荷重は、等分布をしていると考えられているが、実際にどのように分布しているか明らかではない。荷重分布は、多分に荷重伝達機構により異なってくるであろう。すなわち、荷重の載荷版と舗装表面における接触応力は、それぞれの剛性により異なってくる。また、荷重と表面たわみの関係は、弾性解析で評価できるとして計算している。FWD 試験では、載荷面中央のたわみを計測できるのが大きな特色であり、またこの値が、表・基層の弾性係数の推定値に特に大きく影響することが分かっている。ここでは、荷重分布状態の影響を調べるため、荷重の大きさを 5 tf として、その荷重が半径 15 cm に種々の形で分布していると想定した。荷重分布状態は図二に示す通りで、いずれも軸対称になっている。BISAR を用いて、これらの荷重分布に対する表面たわみを計算した。たわみ計算値は、載荷面中央を含む D0 (0.0 cm), D1 (20 cm), D2 (45 cm), D3 (60 cm), D4 (90 cm), D5 (120 cm), D6 (150 cm) の 7 点である。ここに () 内の数字は載荷点からの距離を示している。計算たわみの結果を表一に示した。NO.0 は、半径 15.0 cm で円形等分布し



図二 荷重分布モデル (単位: tf, 1 tf = 9.8 kN)

ている荷重による表面たわみである。この表から明かなように、荷重分布が変わっても、D0 を除く D1 から D6 のたわみ値は変わらない。それぞれの荷重分布に対し、表一の D0 ~ D6 の 7 点のたわみを用い、5 tf の荷重が半径 15 cm で等分布していると仮定して逆解析を行った。その結果を表二に示す。

また、D0 を除く D1 ~ D6 の 6 点のたわみを用いて同様に逆解析を行い、その結果を表二に合わせて () 内に付記した。荷重分布により、逆解析が大いに異なってくるのが明かである。この結果は、正しい荷重分布を用いて逆解析できない限り、D0 の値を無視するのが良いことを示している。

表一 等分布荷重として逆解析した層弾性係数推定値 (単位: kgf/cm², 1 kgf/cm²=98 kPa)

弾性係数	E1	E2	E3
No.1	28301(20000)	4742(5000)	992(1000)
No.2	40708(20000)	4453(5000)	987(1000)
No.3	51413(20000)	4257(5000)	986(1000)
No.4	5176(19656)	5956(5021)	1038(1000)
No.5	6921(19656)	5742(5021)	1030(1000)
No.6	29238(20000)	4717(5000)	992(1000)
No.7	35161(20000)	4575(5000)	989(1000)
No.8	38105(20000)	4511(5000)	988(1000)

4. 層間滑りの影響

輪荷重の作用時に、舗装を構成している層と層の境界面で滑りが生じているかどうかについては必ずしも明らかにしていない。もし、層間に滑りが生じることがあり、それが滑りがないと仮定して逆解析し、求めた層弾性係数の推定値に顕著な影響を与えることがあるならば、現象として滑りが起こるのかどうかを確認する必要がある。

BISAR では、軸対称のとき滑りに対する考え方は、以下ようになる。第 i 層と第 $i+1$ 層の境界を第 i 境界面とすると、この境界面における連続条件より

$$i\sigma_{zz} = i+1\sigma_{zz}, i\tau_{rz} = i+1\tau_{rz}, iu_z = i+1u_z$$

連続域 (境界面で滑りが起こらない領域) では、

$$i\tau_{\max} < \sigma_{\text{adh},i} - \gamma_i i\sigma_{zz}, iu_r = i+1u_r$$

滑動域では、

$$i\tau_{\max} = -\gamma_i i\sigma_{zz}$$

ただし、 $i+1\sigma_{zz}, i+1\tau_{rz}, i+1u_z, i+1u_r$ はそれぞれ第 $i+1$ 層の第 i 境界面における垂直応力、せん断応力、垂直変位、半径方向変位を意味している。さらに、 $\tau_{\max} = |\tau_{rz}|$ 、 $\sigma_{\text{adh},i}$ は第 i 境界面の接着力、 γ_i は第 i 境界面における摩擦係数である。連続域と滑動域が混在する時、その境界を定めるための繰り返し計算が必要となり、またアルゴリズムも複雑になる。そこで BISAR では、連続域と滑動域のどちらか一方が境界面全体を支配しているという両極端の場合を考えている。

特に全域で滑動が起こるためには $\gamma_i = 0$ でなければならない。このような条件の基で、両極端条件を一つの条件にまとめている。

$$(1 - \alpha_i)(i+1u_r = iu_r) = \alpha_i \beta_i i\tau_{rz}$$

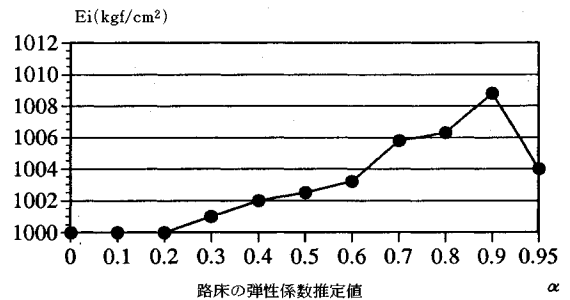
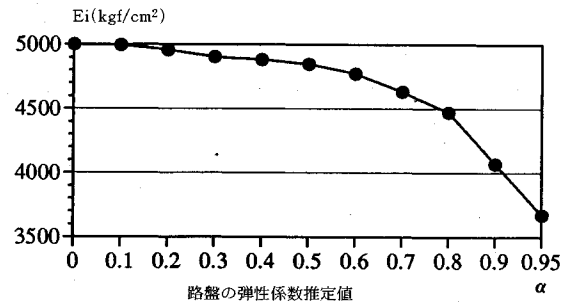
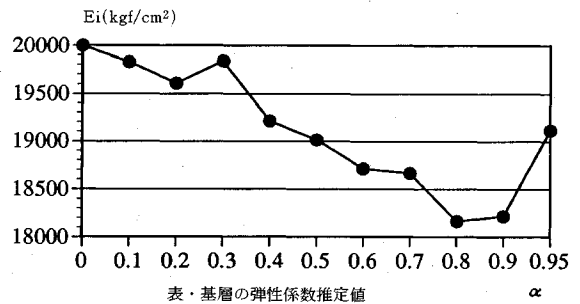
ここに、 α_i は第 i 境界面における摩擦指数であり、 $0 \leq \alpha_i < 1$ となる。また、 β_i は次元を合わせるために導入された係数であり、

$$\beta_i = \frac{(1 + \nu_i)}{E_i} \cdot a$$

としている。 ν_i 、 E_i はそれぞれ第 i 層のポアソン比と弾

表一 表・基層と路盤の間が滑動する場合で BISAR から得られる計算たわみ (単位: cm)

α	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
0.0	0.0480	0.0356	0.0244	0.0207	0.0155	0.0121	0.0097
0.1	0.0481	0.0356	0.0244	0.0207	0.0155	0.0121	0.0097
0.2	0.0483	0.0357	0.0244	0.0207	0.0155	0.0121	0.0097
0.3	0.0484	0.0358	0.0244	0.0207	0.0155	0.0121	0.0097
0.4	0.0487	0.0359	0.0244	0.0207	0.0155	0.0121	0.0097
0.5	0.0489	0.0360	0.0244	0.0207	0.0155	0.0121	0.0097
0.6	0.0493	0.0362	0.0245	0.0207	0.0155	0.0121	0.0097
0.7	0.0498	0.0365	0.0245	0.0207	0.0155	0.0120	0.0097
0.8	0.0507	0.0370	0.0246	0.0208	0.0155	0.0120	0.0096
0.9	0.0525	0.0381	0.0250	0.0209	0.0154	0.0119	0.0096
0.95	0.0544	0.0395	0.0256	0.0212	0.0155	0.0119	0.0095



図一 逆解析から得られた各層の弾性係数推定値 (単位: kgf/cm², 1 kgf/cm²=98 kPa)

性係数、そして a は、円形等分布荷重の載荷半径である。クーロン摩擦の概念を適用すると境界面でせん断応力が小さい領域では滑りが生じない。しかし、BISAR のモデル化では、 $\alpha=0$ でない限り第 i 層と第 $i+1$ 層の間

で相対変位（滑り）が生じることになる。境界条件の違いは、境界面上のせん断応力に大きく影響するが、表面たわみに与える影響は小さいことが予測される。

図-1のモデルにおいて、表・基層と路盤の間で滑りが生じるものと仮定し、BISARを用いて α の値を変え、D0からD6におけるたわみを計算した。その結果を表-3に示す。次に、完全付着のモデルを用い、表-3の値を表面たわみデータとして逆解析して各層の弾性係数を求めた。その結果を図-3に示す。この図より、その影響は、表・基層で約10%、路盤で約25%、路床では1%ほどになる。実舗装では、層と層の境界はどちらかと言うとラフ($\alpha=0$)に近い状態であると思われる。従って、滑りが層弾性係数の推定値に与える影響は比較的小さいことが予測される。

5. おわりに

舗装の非破壊試験は、FWD試験機の出現で急速に発展していくであろう。計測されたデータをいかに整理し、いかに有益な情報を正確に抽出するかが今後重要な課題である。幸い逆解析手法はいろいろな分野で精力的に研究されている。手法に付いては他分野の成果を参考にできるとしても、舗装の抱えている本質的な特性や問題点は専門家でないとう理解できないであろう。舗装の構造評価においても、舗装構造モデルをできるだけ単純なもので、未知パラメータの数を少なく、かつその特性をしっかりと反映できることが良い。そのためには、非破壊試験に関わる問題点を予め整理することが重要となる。

FWD試験の大きな特色の一つは、載荷点におけるたわみを測定できることである。しかし、本論文の計算結果は、逆解析を行う時、載荷点のたわみを含めると、特に表・基層の弾性係数の推定値が大きく変わる可能性が

あることを示している。従って、載荷版中央(D0)のたわみを用いるとき、荷重分布を正確に調べ、できるかぎり実荷重分布を用いて逆解析することが重要である。また、層間の滑りが層弾性係数の推定値にどの程度の影響を与えるかは一つの関心事である。検討した結果、層と層の境界が完全にスムーズ(摩擦係数=0)の状態に近くない限り、層弾性係数の推定値に与える影響は小さいと言えるであろう。

謝辞：本研究の開始から終了まで有益なアドバイスを頂いた北海道工業大学教授、笠原篤先生に深く感謝致します。有益なコメントをいただいた、北海道大学工学部土木工学科、姫野賢治先生に謝意を表します。また、東京電機大学建設工学科4年、小柳勉と丹野徳人の両君には、原稿作成に大いに協力してくれたことに対し感謝します。本問題の解析には、BISARを使用したことを記し、関係者に感謝致します。

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. 15~19, 1985年。
- 2) 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。
- 3) 井上武美・松井邦人・三瓶辰之：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, 土木学会論文集, 第433号/V-15, pp. 177~185, 1991年8月。
- 4) Uzan, J. and Lytton, R.L.: Analysis of pressure distribution under falling weight deflectometer loading, Jour. of Transp. eng. ASCE, Vol. 116, No. 2, pp. 246~250, 1990. (1991. 10. 3 受付)

EFFECTS OF LOAD DISTRIBUTION AND INTERFACE SLIPPAGE ON BACK-CALCULATED YOUNG'S MODULUS

Kunihito MATSUI and Naotoshi SATO

As a nondestructive test for pavement structure, its layer stiffnesses are commonly estimated from a set of surface deflection data measured by FWD test. Assumptions commonly made in backcalculation are uniform loading and completely bonded interface between two adjacent layers along with linear elastic theory based on small deformation. In order to judge whether it is important to confirm the assumptions, effects of load distribution and slippage between the layers on backcalculation stiffnesses are examined. BISAR is used for the analysis and Gauss-Newton method is employed for the backcalculation.