

[討議・回答]

マイナ ジェイムス  
 横田 漢 共著  
 松井 邦人  
 黒林 功

“Influence of Correlation among Deflection Data on the Back Calculation Results” への討議・回答

(土木学会論文集, No. 648/V-47, 2000年5月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

上浦正樹 (北海学園大学)

Masaki KAMIURA

繰返し測定に基づく FWD のたわみ測定に関して、各測定結果がばらつくことはよく知られている。この原因は究明されつつあるが、たわみのばらつきの相関はないと考えられ、多くのケースでは、この平均から逆解析によって舗装の各層の弾性係数を推定している。

屠り「機種、測定条件によってたわみの測定誤差が存在し、舗装の逆解析においてはこのたわみの測定誤差が逆解析結果に大きな影響を与えるとして」ことから、安定した逆解析方法を確立する上で、本論文は重要な示唆を与えている。

とくに、測定誤差の相関がある場合とない場合とでは、逆解析における各層の弾性係数のばらつきに違いがあることを明らかにし、相関が大きいとき逆解析結果の精度がよくなり、小さいときばらつきは大きくなるとして、ばらつきの相関に着目したときわめて重要な論点である。

一方、本論文では、FWD の載荷荷重が明確になっていないが、載荷によって生ずる舗装各層のひずみは弾性係数の推定に影響を与え、ばらつきの原因となると考えられる。そこで、弾性係数を推定するにあたり各層の弾性係数とひずみの関係について討議したい。

本論文では、FWD を使用しており、機種によっては 98 kN まで載荷が可能である。載荷荷重は不明だが、ばらつきを消去するため 49 kN に補正したとしている。本論文で対象となった建設省土木研究所 609 工区のアスファルト舗装では、49 kN を載荷したとき各層上面の深さ方向のひずみは  $10^{-3}$  のオーダーである。木幡ら<sup>2)</sup>の粒状材の室内三軸試験では最大主応力 ( $\sigma_1$ ) 方向で  $10^{-3}$  オーダー以上のひずみでは、弾性係数 (変形係数) はひずみ依存性があるとしている。

Uzan<sup>3)</sup> は、拘束圧  $\sigma_3$  の条件により同じ軸ひずみレベルでも復元弾性係数  $M_r$  が 2 倍以上異なるとしている。また、特に路床強度が大きい場合で載荷点直下から離れたたわみを用いて逆解析をすると推定される弾

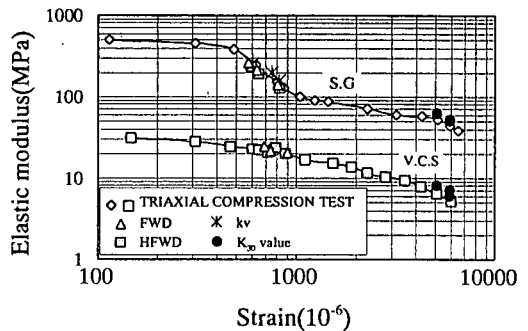


図-1 ひずみと弾性係数の関係<sup>4)</sup>

性係数は大きくなる傾向にあることから、Ullidtz<sup>4)</sup> はベットロックの存在を仮定して載荷点直下の弾性係数に換算する方法を提案<sup>5)</sup>している。これは載荷点から離れるにつれ、全体のひずみが小さくなり、舗装表面のたわみに対する路床の影響が増して弾性係数が大きくなる傾向を示しているものと考えられ、弾性係数がひずみに影響を受けることを意味しているものと推論される。

阿部ら<sup>6),7)</sup> は、FWD 試験、小型 FWD 試験、平板載荷試験、室内三軸試験の各試験から求められる弾性係数とひずみの関係を検討している (図-1)。ここでは路盤・路床材料ごとに傾向を異なる (S.G. は粒状碎石、V.C.S. は関東ロームを意味している) が、ひずみを同一とすれば各材料でほぼ同じ弾性係数となることが報告されている。

以上から弾性係数を推定するうえでは、ひずみを考慮することが重要であると考え、討議者のコメントに対し著者らのご意見を賜りたい。なお、討議者のコメントに対して的を射ていない、あるいは理解不足であるとすれば、それは討議者の浅学非才によるものであり、深謝させて頂きたい。

参考文献

- 1) 屠偉新, 丸山暉彦, 高橋修: 拡張ベイズ法による舗装弾性係

数の逆解析に関する基礎的研究, 舗装学論文集, Vol. 1, pp. 49-56, 1996.

- 2) Kohata, Y., Tatsuoka, F., Wang, L., Hoque, E. and Kadaka, T.: Modelling the non-linear deformation properties stiff geomaterials, *Geotechnique*, Vol. 47, No. 3, pp. 563-580, 1997.
- 3) Uzan, J.: Characterization of granular material, Transportation Research Record, No. 1022, pp. 52-59, 1985.
- 4) Ullidtz, P.: Pavement Analysis, Developments in Civil Engineer 19, Elsevier, 1987.
- 5) Rohde, G. T., Smith, R. E. and Scullion, T.: Pavement deflection analysis on section where the subgrade may vary in stress with depth, Proceeding 7th International Society for asphalt Pavement, Vol. 3, ISAP, pp. 280-295,

Austin, TX, 1992.

- 6) Abe, N., Sekine, E., Kamiura, M. and Maruyama, T.: Evaluation of Bearing Capacity of Base Course & Subgrade by Falling Weight Deflectometer, 3rd International Conference on Road & Airfield Pavement Technology, Vol. 2, pp. 2490-1499, 1998.
- 7) Kamiura, M., Sekine, E., Abe, N. and Maruyama, T.: Stiffness evaluation of the subgrade and granular aggregates using the portable FWD, Proceeding 5th International Society for unbound aggregates in road construction, pp. 217-223, 2000.

(2000.11.20 受付)

## ▶ 回答者 (Closure)

—————マイナ ジェイムス (日本舗道(株))・横田 漢 (宮崎大学)・松井 邦人 (東京電機大学)  
*James MAINA, Hiroshi YOKOTA and Kunihito MATSUI*

### 1. はじめに

FWD 試験機で測定した舗装の表面たわみから、最小二乗法の概念に基づき舗装を構成する各層の弾性係数を推定している。中川等<sup>1)</sup>によると最小二乗法を適用するには次のような前提条件が満たされてなければならない: 1) 測定値の誤差には偏りがない (誤差の平均値はゼロ), 2) 測定値の誤差の分散は既知, 3) 各測定は互いに独立であり, 共分散はゼロ, 4) 誤差の分布形は正規分布。

FWD 試験を繰り返し行なう時, 各測点のたわみデータの間には相関がないと言うのが一般的な理解である。しかし, FWD 研究会が過去に行なってきた共通試験のデータを見る限り, 必ずしも無視できるほど共分散は小さくない。したがって最小二乗法の前提条件を必ずしも満たしていない。本論文では, 各測定で相関があるとき, 最小二乗法を適用できるのか, 相関が強ければ逆解析結果にどのように影響するのかを検討している。その結果, 前者については最小二乗法の概念を適用して良いということ, 分散が同じでも各測定の間で正の相関があれば, 逆解析結果 (層弾性係数や設計に関連するひずみ) のばらつきは小さくなることが明らかになった。

現在 FWD 試験機のキャリブレーションが重要であるという認識が高まっている。上記のことから, “たわみセンサーごとにキャリブレーションするだけでなく計測システムとしての特性を把握することも明らかに重要である” ということができる。

### 2. 討議について

討論者は「弾性係数を推定する上でひずみを考慮することが重要である」と考えるが, 著者等はどうのように考えているか」ということであり, 本論文が意図してことと若干観点が異なる。しかし, 非常に重要な御指摘であるので著者等の考えを述べさせていただきたい。

舗装構造を対象とする逆解析に関する研究は 20 年 (わが国では約 10 年) にもなるが, TRB も指摘しているように, 逆解析結果は必ずしも十分な信頼が得られていない<sup>2)</sup>。

その原因は 1) 試験機にかかわるもの, 2) 舗装の物理モデルにかかわるもの, 3) 逆解析アルゴリズムにかかわるもの, がある。1) と 2) の誤差が逆解析アルゴリズムの不安定性と相まって, しばしば工学的に判断して受け入れ難い結果となっている。

3) は打切り特異値分解, チカノフ法などの適切化法を取り入れることにより, 不安定性の影響を低減できる。討論者が述べている屠らの論文は拡張ベイズ法を用いており, 一種の適切化と考えることができる。1) の測定誤差が逆解析結果に及ぼす影響は非常に大きい, しっかりとキャリブレーションを行うことにより, その影響を低減できる。2) の FWD 試験に対して舗装をどのようにモデル化するのが良いのかについてはまだ統一された考えはなく, 曖昧模糊としたものがある。このモデル化が最も重要な課題であると考えている。

現在, 逆解析で使用される舗装構造モデルには次のようなものがある。

- i) 最下層を半無限とする多層弾性構造

ii) 粒状材料に対して拘束圧を考慮した多層構造モデル

iii) 最下層に見掛けのベドロックを挿入するモデル

実体を正しく模擬できるモデルを用いなければ逆解析結果は誤ったものとなることは明らかである。構造モデルの他にも、次のよう因子が逆解析に影響すると思われる。

i) 荷重分布<sup>3)</sup>

Saint Venant の原理によると、載荷点近くの表面たわみは荷重の大きさだけでなくその分布の仕方にも大きく影響を受けるが、載荷点から十分に離れた点のたわみは荷重分布の影響を全く受けない。逆解析を行うとき、一般に載荷点たわみを重要視しており、また荷重を等分布と仮定している。しかし、載荷板中央が  $D_0$  たわみ測定のため空洞になっていること、路面に凹凸や傾斜があることなどを考えると荷重等分布の仮定は必ずしも適切でない。

ii) 表・基層の非線形温度分布

表・基層の温度分布は一律でなく、常に深さ方向に変動している。また弾性係数は温度依存性が強いことから深さ方向に変化するものと思われる。しかし、逆解析を行なう時、弾性係数は一律であると仮定している。深さ方向の温度変動の影響についてはほとんど検討されていない。

iii) 静的解析と動的解析

FWD 試験は衝撃試験であるので荷重や測定たわみは時系列データとなる。これまで荷重とたわみのピーク値を用いて準静的データと見なして逆解析を行ってきた。しかし、静的逆解析に対して限界があり、動的解析に基づく逆解析が目されてきている<sup>4),5)</sup>。

舗装表面に荷重が作用すると、舗装は線形挙動ではなく非線形挙動をするという事は周知の事実である。舗装を構成する各層の弾性係数を推定するときひずみ依存性は無視することはできない。しかし、そのために非線形構成則を構築することは容易ではなく、実務的な観点からも適切ではない。多層弾性モデルを用いて逆解析で推定できる弾性係数は、あくまで作用荷重に対応する見掛けの層弾性係数である。したがって、標準荷重レベル（例えば設計荷重）でたわみを測定することが、現在できる最善の策である。

討論者が指摘しているようなひずみの荷重依存性を考慮して弾性係数を推定するためには、少なくとも非線形構成則が完備していなければならない。そのためには、計器を埋設した舗装を構築し、FWD 試験、静的載荷試験、載荷した状態での原位置試験（例えばコーンペネトレメータ）、およびその試験舗装から不攪乱資料を採取して3軸試験を行ない、データを集積する必要がある。

### 3. おわりに

FWD 試験データから舗装を診断する時、どのような物理モデルを構築するのが良いかはまだ結論が出ていない。討論者は弾性係数を推定する時ひずみを考慮することが重要ではないかと指摘している。著者等も全く同感である。FWD 試験で表面たわみを計測するとき、あわせて舗装内部でひずみを測定することができれば舗装の物理モデルを構築することも容易であろう。しかし、現実そのようなひずみを計測することができないのが悩みの種である。舗装構造は、天気の影響を受け、季節変化の影響を受けその様相を変化する、簡単に見えながらも非常に複雑で奥深く、それをどのように物理モデルで表すか一層興味をおぼえる。

### 参考文献

- 1) 中川 徹, 小柳義夫: 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会, 1987.
- 2) FWD 研究会: FWD に関する研究 (1999 年度報告), pp. 40-41, 1999. 12.
- 3) 松井, 佐藤: 逆解析弾性係数におよぼす荷重分布と層間すべりの影響, 土木学会論文集, No. 451/V-17, pp. 333-336, 1992. 8.
- 4) Dong, Q., Matsui, K. and Yamamoto, K.: Time Domain Backcalculation of Pavement Structure Using 3D FEM with Ritz Vector Method, Proceedings of the second International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design, and Research, Charleston, West Virginia, October, 11-13, 2000.
- 5) Chatti, K. and Kim, T. K.: A Simple Dynamic Backcalculation Procedure for FWD Testing of Rigid Pavements, TRB, 80th Annual Meeting, Washington, D. C. January 7-11, 2001.

(2001.7.24 受付)