

V—1

アスファルト舗装の層別の構造評価に関する研究

北海道大学工学部	正会員	姫野賢治
同上	正会員	菅原照雄
長岡技術科学大学建設系	正会員	丸山暉彦
北海道大学工学部		小笠原義浩

1. 緒言

アスファルト舗装の評価は、主に路面性状が道路利用者の快適性、安全性などに及ぼす影響に関連する供用性と、舗装自体の構造的な強さを表現する支持力という2つの異なった側面から行う必要があると考えられる。舗装のこれらの特性を評価するための道具や手法にはさまざまなものが提案されてきているが、このうち、舗装の支持力を評価するための道具として近年着目を浴びているものの1つにFWD (Falling Weight Deflectometer) がある。これは、載荷板を介して舗装路面に衝撃荷重を加え、これにより発生する動的なたわみを測定する装置である。筆者らは、数年前長岡技術科学大学に1機のFWDを導入し、種々の改良を施すと同時に、たわみ測定システムを開発してきた^{1)、2)}。

FWDは非破壊試験機の1つであり、舗装を構造的に破壊することなく表面たわみのみから内部の物理的性状を評価し得るという特徴を有するが、反面、内部の物理的性状の変動が表面たわみの変化に及ぼす影響、すなわち感度が小さい場合には、表面たわみからの評価結果の信頼性が十分ではない場合が想定される。本研究は、舗装の構造評価の1つとして、実測された表面たわみのみから舗装を構成する各層の現位置での弾性係数を解析的に推定する手法を開発するとともに、実国道において路床表面から順に表層表面に至るまで、建設時に各層ごとに段階的に測定されたたわみデータを用いて、このような手法の妥当性を確認することを目的とした。また、舗装各層の表面でのFWDによるたわみデータの特性を調べるためベンケルマンビームによるたわみデータとの比較も行った。

2. 本FWDの概要

本FWDのハードウェアの構成はFig. 1に示すとおりである。載荷板の直径は30cmであり、ゴムマットを介して落下重錘および介在重錘からの荷重を路面に伝える。路面での最大荷重の大きさは、標準で49.0kN、24.5kNおよび12.3kN

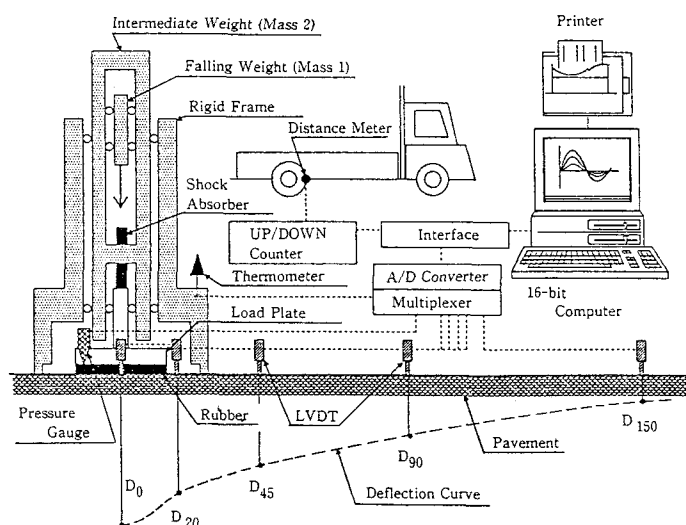


Fig.1 The Framework of Deflection Measurement System Using the FWD

の3段階に設定可能であり、路面のたわみは載荷板中心から順に0、20、45、90および150cm離れた位置に設置された5つのたわみセンサーによりリアルタイムに得られるため、たわみ量だけではなく、たわみの曲率をも知ることができる。そのほか、たわみの測定時の大気温度を知るための温度センサーおよび移動距離を知るための距離センサーもあり、圧力センサー、たわみセンサーとともに国産のパーソナルコンピュータシステムに接続され、すべての制御は運転席から1人のオペレータで行えるように設計されている。測定は、載荷荷重および各センサー位置で発生するたわみの最大値のみを記録するピークホールド測定ならびに載荷板の荷重および各センサー位置でのたわみの変化を時系列データとして記録する時系列測定の2種類の測定方法を採用した。以降、各センサー位置でのたわみ量を順に D_0 、 D_{20} 、 D_{45} 、 D_{90} および D_{150} と表し、1回の測定中のそれぞれの最大値をたとえば $D_{0, \max}$ などと称する。

3. たわみデータ調査の概要

FWDおよびベンケルマンビームを用いた路面たわみの測定は、平成元年2月から3月にかけて、国道17号線深谷バイパス（埼玉県）において実施した。調査箇所は1から4までの4つの工区に分け、Fig. 2に示すように、各工区ごとに舗装構造を変えて設計された。ただし、工区1と工区2とは、舗装構造は同一で、路床の下地盤改良厚さが異なるだけである。たわみの測定は、各工区ごとに10～20mおきに5～9点で実施した。なお、ベンケルマンビームによるたわみ測定は上層路盤以下は24.5kN、またそれ以外は44.1kNの輪荷重で実施し、結果は舗装試験法便覧により標準荷重に補正をおこなった。またFWDによるたわみ測定は2. で述べた3通りの荷重に対して実施し、必要に応じて原田らの式³⁾により温度補正を行った。

4. 舗装構成層の弾性係数の逆解析手法

舗装構成各層の厚さ、弾性係数およびポアソン比が与えられた場合に、特定の外力に対して舗装表面に発生するたわみは一義的に決まるが、逆にたわみが与えられた場合に厚さや弾性係数等を推定することは一義的である保障はなく、また、これを解析的に行う場合には多層弾性構造解析をサブプログラムとして内包す

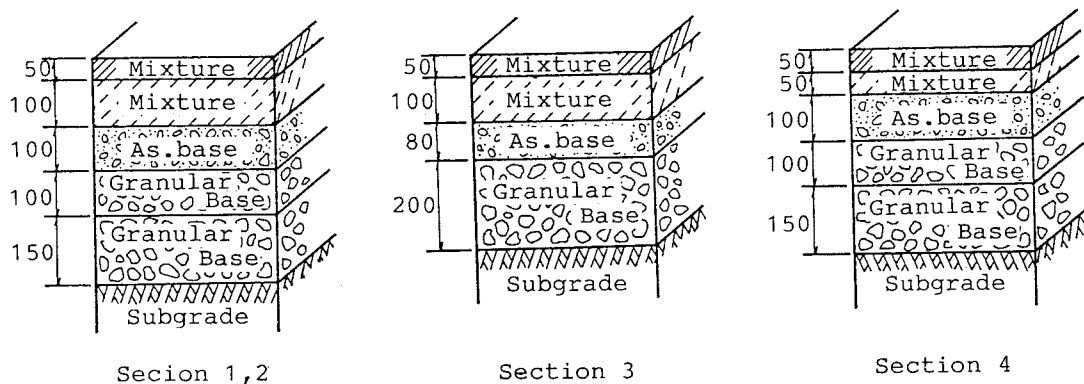


Fig.2 Pavement Structures Used for the Analyses and the Measurements (Unit:mm)

るためにアルゴリズムが複雑になって、わが国ではようやくその試みが開始された段階にある⁴⁾。筆者らは、かつて多層弾性構造問題をパソコン上で解析するソフトウェア（ELSA）を開発した⁵⁾が、今回、これをサブプログラムとして取り込みパソコン上で稼働し得る逆解析用のソフトウェアを新たに作成した。構成層の弾性係数の変化がたわみの変化に及ぼす影響は小さい上に非線形性が強く、非線形最小自乗法としてもこのような条件に対応可能なものを採用することが望ましいが、パソコン上で稼働が可能であることを主要な条件としたため松井ら⁶⁾にならない、収束性は若干低下するものの計算量が比較的少なくて済むGauss-Newton法を採用した。

5. 結果および考察

5.1 たわみの測定結果

Fig. 3は、49kNの荷重に対する表層表面におけるFWDたわみを温度補正をせずに示したものである。この図より、 $D_{150.\max}$ については、工区の違いによる有意な差は認められず、同一工区内における変動と同程度の変動を有していることがわかった。。このことは、舗装表面から比較的深い位置における支持力がほぼ一定している²⁾こと、すなわち、路床の支持力の変動が全工区にわたってほとんどないことを示している。一方、載荷中心に近い位置で測定されたたわみ（ $D_{0.\max} \sim D_{45.\max}$ ）は工区間に優位差があり、特に舗装厚

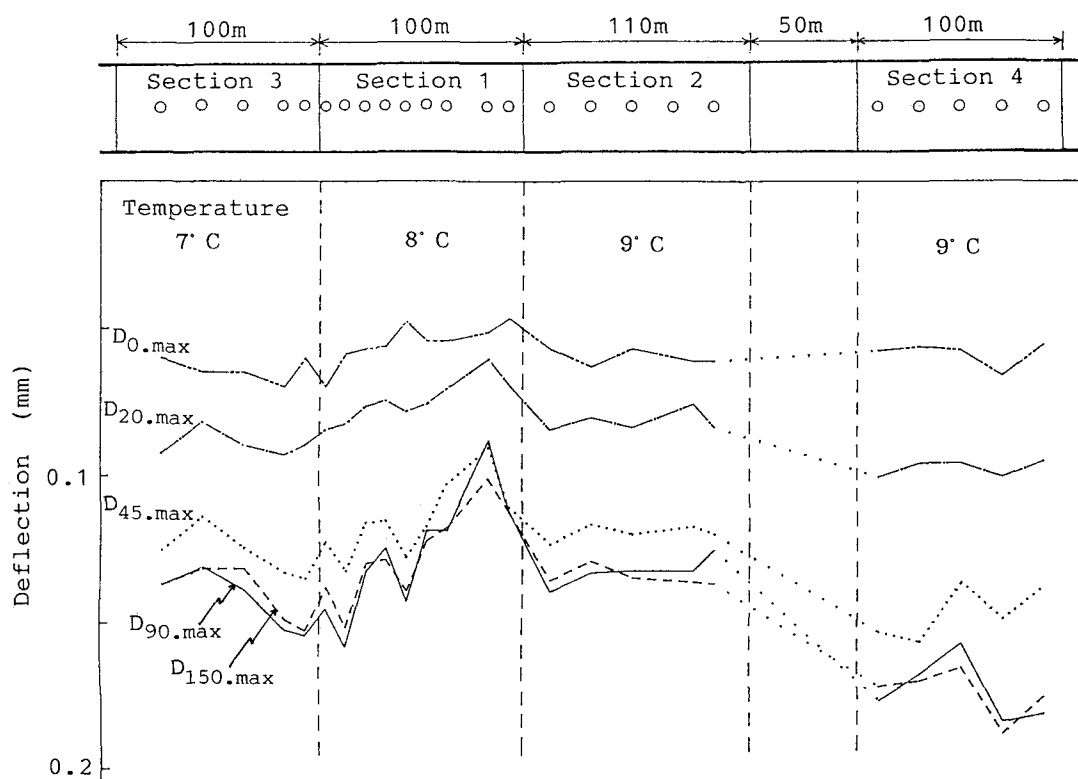


Fig.3 Changes of Measured Deflections along the Lane

の小さい工区4において大きな値を示していることがわかる。なお、1工区内のすべてのたわみ測定に要した時間は10～25分程度であり路面温度の差異は無視し得る。

Fig. 4は、路床、下層路盤および表層の各層の表面における温度補正後のFWDたわみをベンケルマンたわみと比較して全工区について示したものである。かつて表層表面について報告された¹⁾のと同様、両者の相関は非常に弱く、特に、下層路盤表面で測定したたわみにおいては、負の相関を有していることがわかる。

5.2 層別の弾性係数の解析結果

逆解析の解の安定性を高めるため、各工区の各層ごとに測定されたたわみと輪荷重のすべての平均値を1つの測定結果とみなして、上記4.の方法に従って各層ごとの弾性係数を推定した。この推定結果の例をTable 1に示す。この表より、以下のことがわかる。

①すべての解析ケースにおいて、個別に推定された路床の弾性係数はほぼ同一の値を示している。このことはFig. 3からも推定できることであるが、路床の支持力は現行のアスファルト舗装要綱でも構造設計上重要な因子として扱われており、非破壊で路床の支持力が安定して求められることの意義は大きいであろう。なお、この工区における路床の設計CBR値は56%であった。

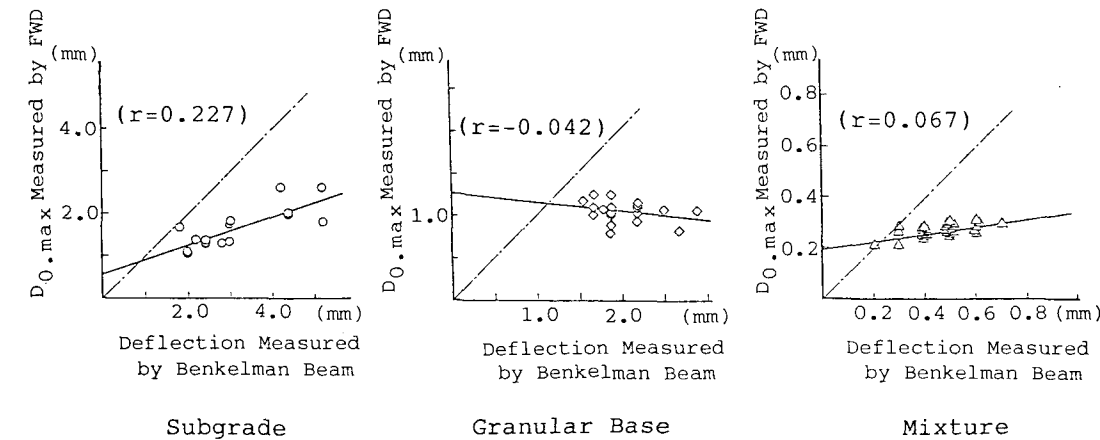


Fig.4 Relationships between Deflections by the Benkelman Beam and the FWD

Table 1 List of Analyzed Elastic Moduli of Each Layers

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Mixture				8419
Asphalt Base			9384	17334
Granular Base		326	89	59
Subgrade	116	115	129	171

(Unit:MPa)

②下層路盤上でのたわみ測定データに基づく解析ケース2において、粒状路盤の弾性係数は他の解析ケースより相対的に高くなった。この原因は必ずしも明らかではないが、解析ケース2だけが測定時に粒状材が表面に露出しており、解析ケース3、4では直上にアスファルトを含む弾性係数の高い層が存在していたことが影響していたものと考えられる。ただし、このことが、解析上の問題なのか、舗装が実現象として力学的にそのように挙動することによるのかは現時点では判然とせず、より詳細な検討を要する。

③基層表面でのたわみ測定データに基づく解析ケース4において、アスファルト安定処理の弾性係数が基層のものより高く、アスファルト安定処理層上でのたわみに基づいた解析ケース3の場合とかなり異なった値を示している。

なお、例として工区3を選んだのは、層数が少ないほど解析上の解が安定しやすいためである。

5.3 実測たわみと解析たわみの比較

Fig. 5は、FWDによる実測最大たわみと、逆解析により求められた弾性係数を入力値としてELSA⁵⁾によって計算したたわみを比較したものである。これより、解析たわみは実測たわみと非常によく一致しており、本逆解析手法は妥当なものであることがわかる。ただし、弾性係数の変化がたわみに及ぼす感度が比較的小さく、たわみ量の僅かな変化が解析した弾性係数に大きく影響し、結果的に値が非常識的な場合がある。

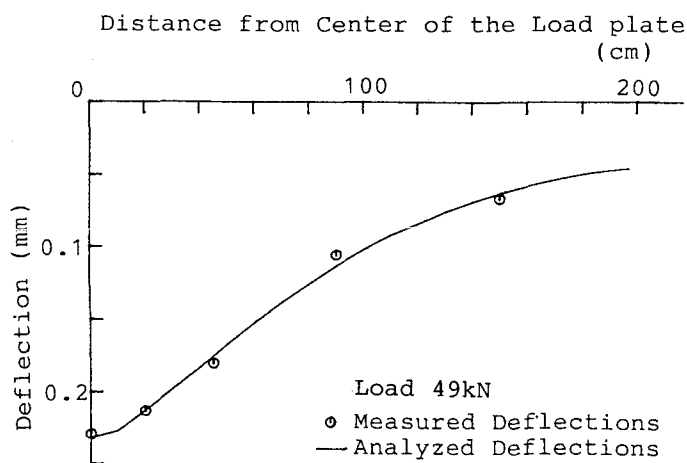


Fig.5 Comparison of Measured and Analyzed Surface Deflections

6. 結言

本研究では、パソコンで弾性係数の逆解析が行えることを条件としたために単純なGauss-Newton法を用いたが、与えられたたわみデータに対して解がより安定して求まるようにアルゴリズムの改良が必要であると思われる。特に、本手法を用いた場合、順解析により人為的に作成したたわみデータに対してはほぼ確実に収束して解が求まるのであるが、FWDによる実たわみに対しては人間がヒューリスティックに評価する限りほとんど同等であると思われる2つの測定たわみであるのにもかかわらず、一方はすぐ収束するのに、他方は初期値をどのように選定しても決して収束しようとしないうような例が見られた。このことは単に解析上だけの問題ではなく、たわみセンサーの精度や載荷荷重の大きさも含めて総合的な検討を加える必要があるものと思われる。

FWDたわみデータと本手法を組み合わせることにより、路床の支持力は安定して評価し得ることがわかったので、現在のように路床土のコア採取を行わなくとも、既設舗装における路床の支持力が推定できる可

能性を示唆していると言えよう。

最後に、深谷バイパスにおいて各層別にFWDたわみを測定する機会を与えて頂き、また貴重な資料を御恵送頂いた建設省土木研究所舗装研究室の皆様には厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 姫野賢治ほか：FWDによる舗装のたわみ測定システムの開発に関する研究、東京工業大学土木工学科研究報告、No. 38、pp. 51-67、1987
- 2) 丸山暉彦ほか：FWDによる舗装の非破壊試験に関する研究、長岡技術科学大学研究報告、第10号、pp. 119-127、1988
- 3) 原田尚幸ほか：FWDたわみの温度補正、第44回土木学会年次学術講演会講演概要集、V-21、pp. 96-97、1989
- 4) 松井邦人ほか：多層弾性舗装構造の逆解析法の考察、第43回土木学会年次学術講演会講演概要集、V-41、pp. 130-131、1988
- 5) 姫野賢治ほか：パソコン用多層弾性構造解析プログラム（ELSA）の開発、第18回日本道路会議一般論文集、pp. 338-339、1989
- 6) 松井邦人ほか：多層弾性論とFEMに基づく舗装構造の逆解析、第18回日本道路会議一般論文集、pp. 340-341、1989