

SHRPのLTPPにおける たわみデータに関する研究

吉村 啓之

正会員 前田道路(株)技術研究所 (〒243-0414 神奈川県海老名市杉久保279)

本研究では、アスファルト舗装の構造設計の基礎資料を得るために、SHRPのLTPPのFWDによるたわみのデータ解析を行い、たわみのばらつき、変動に関する特性を調査した。解析の結果、たわみは正規分布を示すこと、1番目のセンサのたわみは供用年月とともに増加するなどの知見を得た。さらに、たわみを用いたアスファルト舗装の構造設計の利用方法について述べた。

Key Words : *deflection, SHRP, LTPP, FWD, normal distribution, deflection basin, pavement design*

1. はじめに

アスファルト舗装のたわみは古くからベンケルマンビームによって測定され、最近になって FWD (Falling Weight Deflectometer) によって測定されることが多くなっている。測定されたたわみは主として舗装構造の評価、オーバーレイの設計などに用いられてきた。また、アスファルト舗装はたわみ性舗装と呼ばれるが、たわみによる舗装厚の実用的な設計方法はほとんど開発されていないのが現状である。

本研究は SHRP (Strategic Highway Research Program) の舗装の長期供用性に関する研究テーマである LTPP (Long Term Pavement Performance) のたわみデータを、アスファルト舗装の構造評価および舗装厚設計法のための基礎資料として利用することを目的に実施したものである。本文ではたわみの特性を明らかにするとともに、構造設計に対するたわみの利用方法について提案した。

2. 解析に用いたデータ

現在、既設舗装の構造評価に FWD が広く用いられている。しかし、得られたたわみは路面温度、載荷荷重に大きく影響され、数箇所での測定データではばらつきが大きいことが知られている。FWD のデータを有効利用するには、大量のデータを収集して

統計処理を行う必要がある。そこで、SHRP の LTPP のデータを収録した DataPave97¹⁾ と呼ばれる CD-ROM を利用し、FWD のたわみデータ (総数約 271 万点) を抽出して解析を行った。この CD-ROM には FWD たわみのデータ以外に、試験サイトの材料、気象、維持修繕、交通、破損などに関するデータも含まれている²⁾。表-1 は DataPave97 の GPS (General Pavement Studies) プロジェクトの種類と試験サイトの個数を示したものである。DataPave97 にはアメリカ、カナダの各州から選定された試験サイトにおいて、1989 年以降 1997 年までに測定されたデータが収められている。この中から、特に GPS 1 と GPS 2 に着目し、次の条件によって試験サイトを選定し、解析用データとした。

- (1) FWD の測定回数が 3 回以上
- (2) 舗装構成のデータがあること
- (3) 供用性のデータがあること

この結果、GPS 1 では 95 箇所、GPS 2 では 44 箇所が選定され、たわみの基礎データは約 9 万点となった。測定区間は 152m (500ft) で、OWP (車輪走行軌跡部) と BWP (非軌跡部) において 7.6m (25ft) ごとに測点が設けられている。1 測点では 1 種の載荷荷重に対してたわみを 4 回測定している。したがって、各測定区間のデータから載荷荷重ごとにデータを抽出すると、1 試験サイトでのたわみデータは標準で 168 点となる。FWD たわみの測定年月は厳密に決まっておらず、不定期に行われている。本文では以後、FWD の載荷中心のたわみを D0 たわみ、

表-1 GPS 1 のプロジェクトの種類

種類	内 容	区間数
GPS 1	粒状路盤上のアスファルト舗装	248
GPS 2	安定処理路盤上のアスファルト舗装	147
GPS 3	目地を有する無筋コンクリート舗装	134
GPS 4	目地を有する鉄筋コンクリート舗装	69
GPS 5	連続鉄筋コンクリート舗装	85
GPS 6A	アスファルト舗装上のアスファルトオーバーレイ (SHRP開始前に指定)	61
GPS 6B	アスファルト舗装上のアスファルトオーバーレイ (SHRP開始後に指定)	70
GPS 7A	コンクリート舗装上のアスファルトオーバーレイ (SHRP開始前に指定)	36
GPS 7B	コンクリート舗装上のアスファルトオーバーレイ (SHRP開始後に指定)	29
GPS 9	コンクリート舗装上のコンクリートオーバーレイ	28

表-2 載荷荷重別のたわみの変動係数の平均値

荷重	変 動 係 数 (%)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D150
2.7tf	17.3	16.1	15.7	15.4	15.4	15.2	16.2
4.1tf	16.7	15.6	15.3	15.1	15.1	15.2	15.8
5.4tf	16.0	15.3	15.1	15.0	15.0	15.1	15.7
7.3tf	15.9	14.8	14.7	14.7	14.9	15.1	15.7

表-3 変動係数のばらつき (4.1tf 荷重相当)

項 目	変 動 係 数 (%)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D150
平均値	16.7	15.6	15.3	15.1	15.1	15.2	15.8
最大値	45.2	44.0	44.6	41.1	41.4	51.5	70.1
最小値	4.1	4.1	3.6	5.2	5.4	5.2	4.7

載荷中心から 150cm 離れた箇所でのたわみを D150 たわみと呼び、試験サイトは SHRP の州コードと SHRP ID を組み合わせて表記する。

3. たわみのばらつき

(1) 荷重のちがい

FWD によるたわみは、重錘の落下高さに応じて 4 種類の載荷荷重で測定されている。図-1 は GPS 1 の 16-1010 試験サイトの各測点での D0 たわみを載荷荷重ごとにプロットしたものである。D0 たわみは荷重に対して線形性を示すことが確認できる。D0 たわみ以外のたわみも同様な傾向が認められた。次に、各試験サイトごとに各センサの平均値と標準偏差を計算して変動係数を求めたところ、平均値が約 15 % になり、荷重のちがいによる D0 たわみの変動係数の差はみられなかった。表-2 に解析結果を示す。

以降の解析は FWD の測定年月が最も古いデータで、2 番目の落下高さ (4.1tf 載荷荷重に相当) のデータを中心に用いて行うことにした。

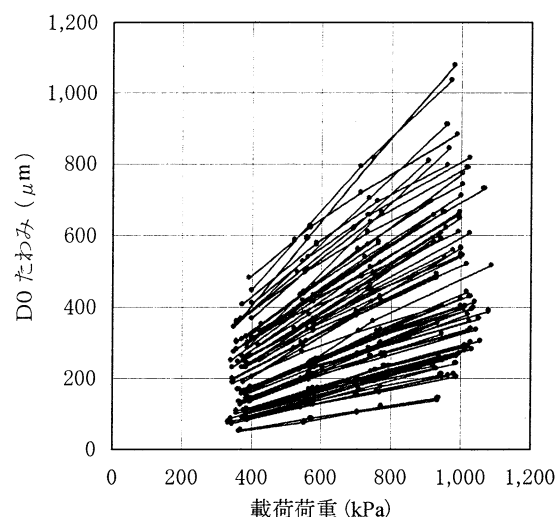


図-1 D0 たわみと載荷荷重
(16-1010 サイト)

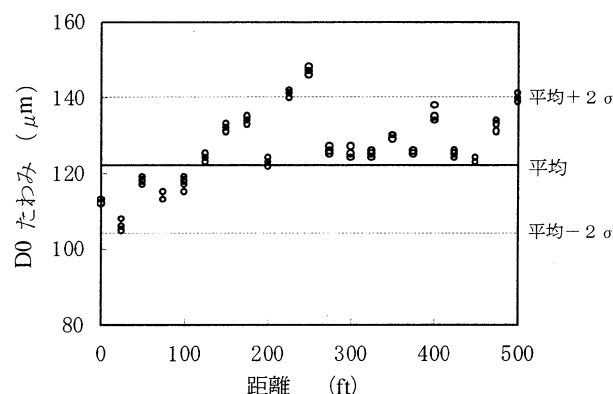


図-2 D0 たわみのばらつき (測点別)
(16-1010 サイト)

(2) センサのちがい

センサの載荷中心からの測定距離は、試験サイト、FWD 試験機の種類によって若干異なっているが、GPS 1 と GPS 2 では、0, 203, 305, 457, 610, 914, 1,524mm が標準となっている。試験サイトごとに各センサが示すたわみの変動係数のばらつきを求めたところ、表-3 に示すように、D150 センサを除けば、変動係数は約 5 ~ 50 % の値を示し、AASHTO の設計ガイド³⁾ で報告されている 15 ~ 45 % と同程度の値であった。センサのちがいによるたわみのばらつきはほぼ一定であると考えられる。

(3) 分布形状

各試験サイトのたわみは測点ごとにプロットしてみると図-2 に示すようにばらついていることが多いが、1 試験サイトの全測点のデータを測定年月ごとにまとめてみると正規分布を示すことがわかった。一部のサイトでは対数正規分布を示す結果も得

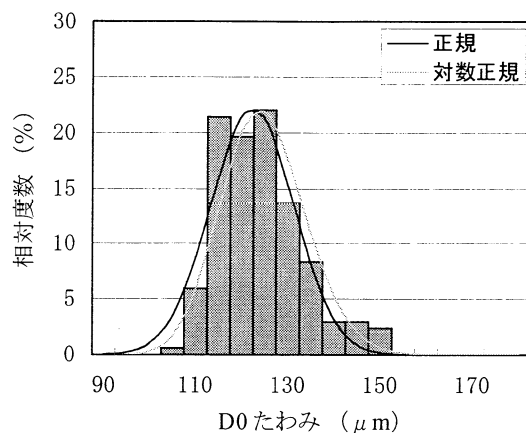


図-3 D0 たわみの度数分布
(16-1010 サイト)

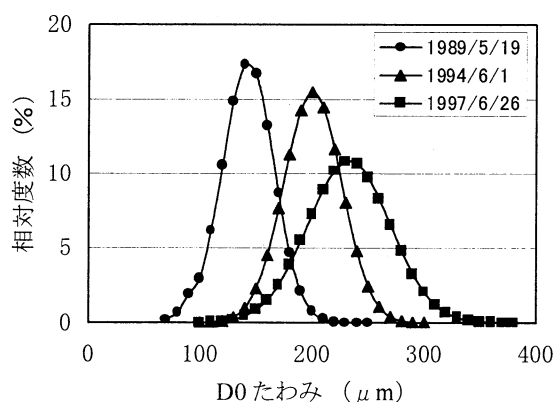


図-4 D0 たわみの度数分布形状の変化
(16-1010 サイト)

られているが、図-3に示すように分布形状が酷似していることから、正規分布を示すと考えた。

(4) 分布形状の変化

各試験サイトの解析結果によると、供用年月が経過するにつれて、亀甲状クラックなどが発達した試験サイトでは、D0 たわみの平均値が高く、標準偏差が大きくなることが多くみられた。図-4は一例としてGPS 1の16-1010サイトにおけるたわみを測定年月ごとにヒストグラムを求め、重ねて示したものである。D0 たわみの分布形状は供用年月とともにピークを示す値が大きくなるとともに、平らにつぶれていく傾向が認められた。これは建設当初、同一舗装構造区間において均一なたわみを示すが、舗装が破損するにつれてたわみの大きな箇所が発生し、たわみの分布幅が広がったためと考えられる。他のサイトでも同様な傾向が認められている。

(5) 試験サイトの気候のちがい

試験サイトは気候条件によって次の4種類に分類

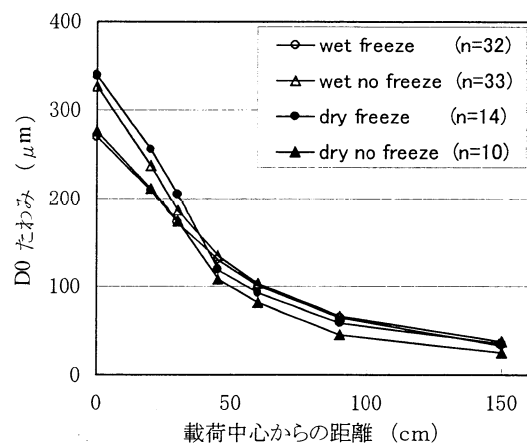


図-5 気候区分別のたわみ曲線

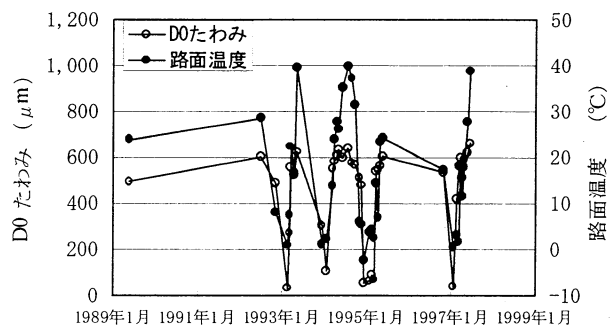


図-6 D0 たわみと路面温度
(30-8129 サイト)

されている。

- 1) wet, freeze
- 2) wet, no freeze
- 3) dry, freeze
- 4) dry, no freeze

気候条件によってたわみにちがいが生じているかを調べた。図-5は気候区分ごとのたわみ曲線の平均値をプロットしたもので、大きな差は認められなかった。

4. D0たわみの変化

(1) 温度による変化 (季節変化)

たわみはアスファルト舗装体の温度によって大きく影響され、測定たわみを標準温度に補正する必要性が指摘されている⁴⁾。図-6はGPS 1の中で年間の温度差が大きい試験サイト(30-8129)のD0 たわみの変化を示したものである。D0 たわみは路面温度に影響されて増減していることがわかる。しかし、測定回数が多ければ図-6に示すように夏季、

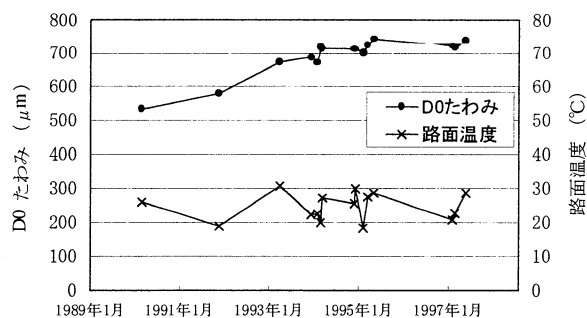


図-7 供用年月による D0 たわみの変化
(48-3739 サイト)

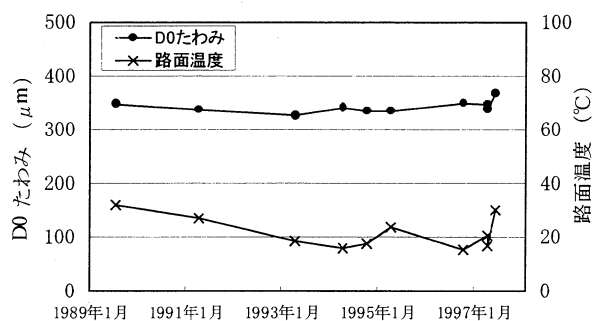


図-8 供用年月による D0 たわみの変化
(8-1053 サイト)

冬季に測定したたわみデータを変動幅の上限，下限としてとらえることができる．夏季，冬季のデータを除いて路面温度が同程度のたわみだけをプロットすれば，たわみの温度補正をせずに解析を行うことも可能となる．たわみの測定は路面温度が 20 °C 前後の時期に実施することが望まれる．

(2) 供用年月による変化

たわみの測定回数が多い試験サイトでの供用年月にともなう D0 たわみの変化を調査した．図-7 は GPS 1 の 48-3739 サイトにおける D0 たわみの変化を示したものである．図には路面温度が 20 ～ 30 °C のデータをプロットした．図から，D0 たわみは路面温度がほぼ一定であるにもかかわらず，供用年月とともに徐々に上昇する傾向にあることがわかる．他のサイトでも同様な結果が得られることが多かった．しかし，図-8 に示す 8-1053 サイトのようにほとんど変化せず，ほぼ一定の値を示す試験サイトもあり，必ずしも増加する傾向を示すとは限らない．

(3) 破損との関係

DataPave97 に収められている路面の破損に関する調査は，FWD の調査年月とは異なる時期に行われている．D0 たわみと抽出した破損データとの時系列の変化を調べた．図-9 は 16-1010 サイトの D0

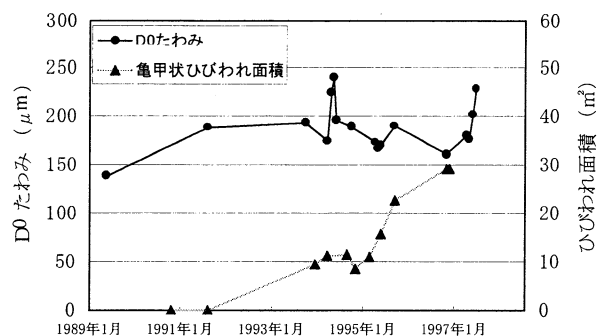


図-9 D0 たわみと破損の変化
(16-1010 サイト)

表-4 D150 たわみの特性

路床の種類	粘土	シルト	砂	砂利他
材料コード (SHRP)	51～53	54～56	57～60	61～65
個数	34	12	40	9
D150 の平均値 (μm)	36.1	39.5	34.0	28.3
D150 の標準偏差 (μm)	15.5	17.2	12.3	12.6

たわみの平均値と亀甲状クラックの発生面積との関係を示したもので，舗装の破損の増加とともに D0 たわみの平均値も増大していることがわかる．他のサイトでも同様な結果が得られている．一方，破損の小さい区間では供用年月が長くなっても，平均値がほぼ一定の値を示すことが多いが，標準偏差が若干大きくなる傾向が見いだせた．これらのことから，亀甲状ひびわれのような構造的な舗装の破損によって D0 たわみが上昇する箇所が増えることが指摘できる．D0 たわみを継続的に測定し，データを蓄積した解析を行うことによって，舗装の構造評価の手法を確立することが可能となる．

5. D0 たわみと舗装構造

(1) 舗装構造によるちがい

a) 路床の種類

路床の種類によってたわみ曲線に差がみられるかどうかを GPS 1 のデータを用いて調査した．路床は粘土，シルト，砂，砂利他の 4 種類に分類した．表-4 は路床の支持力と相関があると報告⁵⁾されている D150 たわみの平均値と標準偏差をまとめたものである．路床が砂利他の D150 たわみの値が低いことを除けば，D150 たわみは路床の種類によって大きな差がないことがわかった．図-10 に路床の種類ごとのたわみ曲線を示した．図から，路床の種類によるたわみ曲線の大きなちがいは見出せなかつ

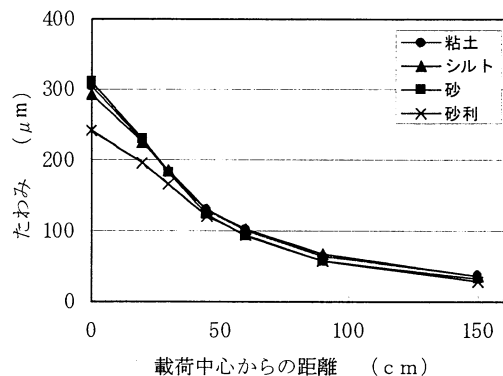


図-10 路床のちがいによるたわみ曲線

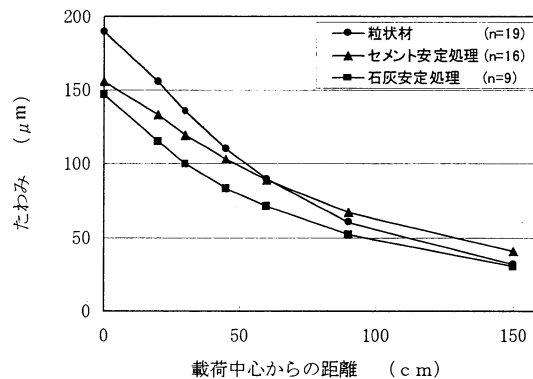


図-12 路盤のちがいによるたわみ曲線

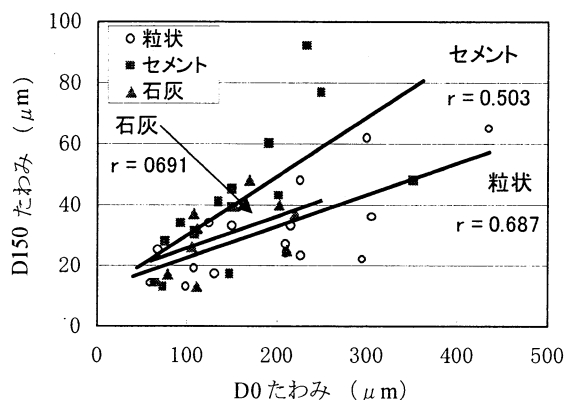


図-11 路盤のちがいによるたわみの特性

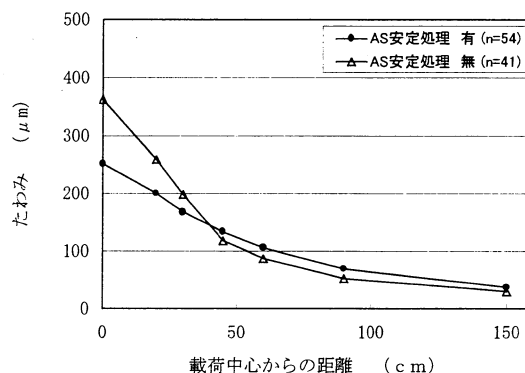


図-13 アスファルト安定処理路盤の有無によるたわみ曲線

た。これより路床のちがいをたわみ曲線から明らかにすることは困難と考えられる。

b) 路盤の種類

GPS 1 の試験サイトの路盤はほとんどが粒状材であるため、GPS 2 のデータを用いて路盤の種類のちがいによるたわみの解析を行った。D0 たわみを路盤の種類別に整理した結果を図-11に示す。路盤の種類は粒状材、セメント安定処理、石灰安定処理の3種類である。図から、安定処理路盤のD0 たわみは粒状路盤に比べて平均値が小さく、安定処理の効果がみられる。また、図-12に示すように粒状材のたわみ曲線は載荷中心から45～60cm付近で折れ曲がっているのに対し、安定処理路盤のたわみ曲線はなめらかな形状を示している。これは安定処理路盤の混合物層が版としての効果を発揮しているためと考えられる。

c) アスファルト安定処理路盤の有無

GPS 1 のデータを用いて、舗装構成中のアスファルト安定処理路盤の影響を調べた。図-13はアスファルト安定処理路盤を含む舗装と、含まない舗装におけるたわみ曲線を示したものである。図から、前項と同様にアスファルト安定処理を含まない舗装のたわみ曲線が載荷中心から45cm付近で折れ曲がっ

ているのに対し、アスファルト安定処理路盤を含む舗装のたわみ曲線はなめらかに減少していることがわかった。アスファルト安定処理路盤の版としての効果が認められる。

(2) 舗装厚との関係

GPS 1 の試験サイトの舗装構成は変化に富んでいるため、TA（舗装各層を表層および基層用加熱アスファルト混合物で設計したときの必要厚さ）、アスファルト混合物層の厚さとD0 たわみとの関係を調べた。各舗装構成のTAはAASHTOの設計ガイド³⁾の相対強度係数を用いず、アスファルト舗装要綱の等値換算係数で計算した。アスファルト混合物層の厚さは表層、基層およびアスファルト安定処理路盤の厚さを加算したものである。D0 たわみとTA、アスファルト混合物層の厚さの関係を図-14、15に示す。図から、TAとD0 たわみの相関係数は低い、アスファルト混合物層の厚さとD0 たわみは高い相関関係があり、アスファルト混合物層が厚いほどD0 たわみは小さくなることが認められた。路盤の種類・層厚、路床の種類が異なるにもかかわらず、相関関係が得られたことは、アスファルト混合物層の厚さの重要性が指摘できるとともに、D0

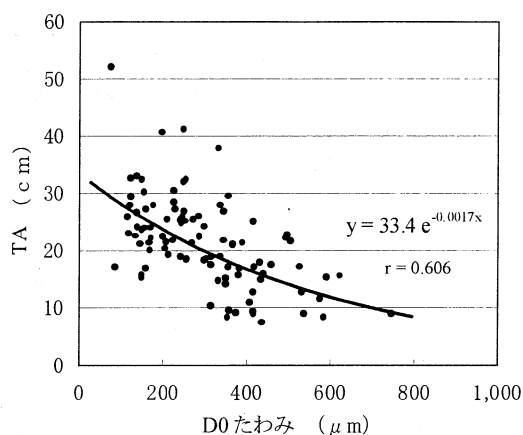


図-14 D0 たわみと TA

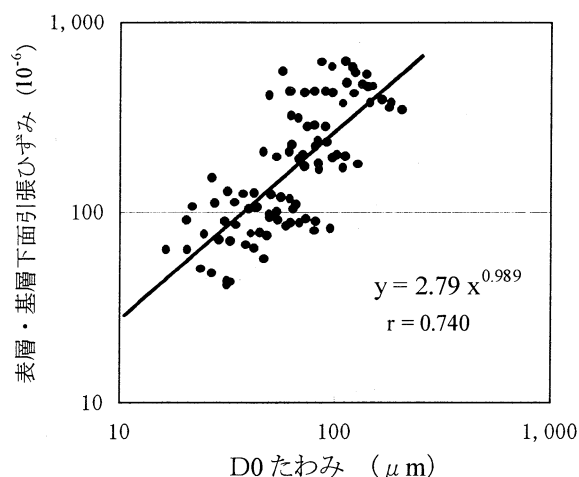


図-16 D0 たわみと表層・基層下面ひずみ

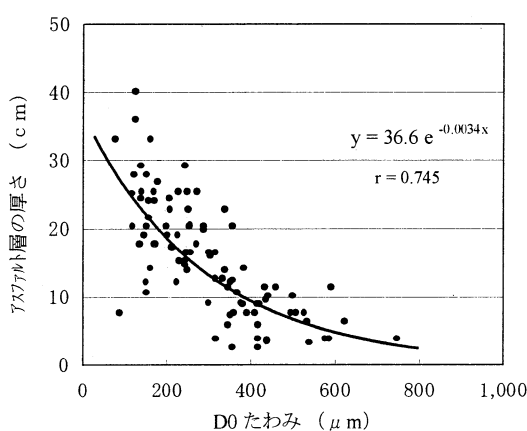


図-15 D0 たわみとアスファルト層の厚さ

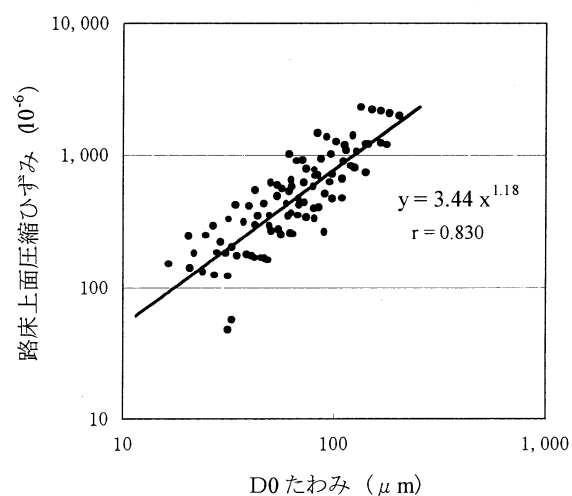


図-17 D0 たわみと路床上面ひずみ

たわみによる舗装構成の設計曲線としての可能性があると考えられる。

6. たわみの利用方法

(1) 舗装体中のひずみとの関係

多層弾性理論を用いたアスファルト舗装の理論的設計法は、入力条件を設定し、舗装体中の基準となるひずみを計算し、基準値を満足するように舗装厚を決定するものである。そこで、多層弾性理論を用いて計算したアスファルト舗装の表面たわみ (D0 たわみ) と、設計基準のアスファルト混合物層下面の水平方向引張りひずみ、路床上面の垂直方向圧縮ひずみの関係を調べてみた。結果を図-16, 17に示す。計算に用いた舗装構成はアスファルト舗装要綱の付録の設計例⁶⁾に基づき、弾性係数などの入力条件は表-5に示すように設定した。D0 たわみとひずみはばらつきはあるが、ひずみが大きくなるにつれて D0 たわみも大きくなる傾向が認められる。弾性

表-5 入力条件

種 類	材 料	弾性係数 (N/mm ²)			ポアソン比
		上限	中央	下限	
表層・基層	アスファルト混合物	9,800	5,900	980	0.35
上層路盤	瀝青安定処理	7,800	4,700	780	0.35
	粒調砕石	980	490	200	0.35
下層路盤	クラッシュラン	490	200	100	0.35
路 床	—	(100×設計CBR) *			0.35

* : 単位が kgf/cm²

理論による設計法に用いられるひずみの代わりに、表面たわみを設計基準として用いることの可能性が高いと考えられる。

(2) 測定値と計算値の比較

GPS 1 の試験サイトの舗装構造に対して多層弾性理論を用いて D0 たわみを計算し、測定値の D0 たわみとの比較を試みた。舗装各層の弾性係数は表-5に示す値 (中央値) を用い、路床の弾性係数は 9.8 ~ 98 N/mm² (100 ~ 1,000 kgf/cm²) に変化させた。計算値と測定値をプロットして両者が比較的良好一致

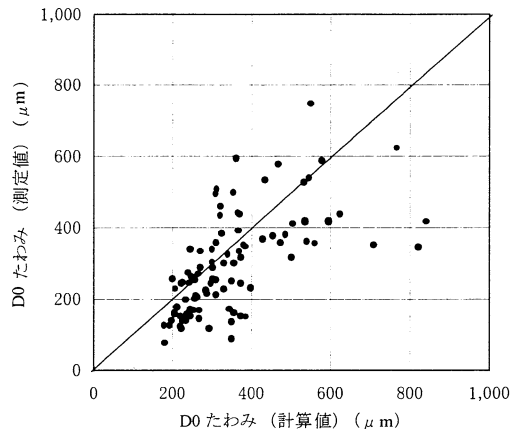


図-18 D0 たわみの計算値と測定値

するときの路床の弾性係数を求めた。その結果、路床の弾性係数が $98 \text{ N/mm}^2 (1,000 \text{ kgf/cm}^2)$ のときに比較よく一致することがわかった。結果を図-18に示す。舗装各層の弾性係数に標準的な数値を与えることによって、妥当な結果を得ることができた。このことは、GPS 1 の試験サイトでの弾性係数を大まかに推定できることを意味している。しかし、本研究での舗装各層の弾性係数の設定が限定されているため、今後、さらに詳細な検討を行っていく必要がある。

(3) 舗装厚の設計法の基礎

本研究で得られた知見をもとに、舗装構造の設計に対する D0 たわみの利用方法について述べる。まず、舗装厚の設計にあたり、各層の厚さと種類に応じた等値換算係数を用いて TA を算出する。次に、各層の弾性係数、ポアソン比を設定して多層弾性理論を用いて表面たわみ (D0 たわみ) を計算する。このデータを図-14で得られた TA と D0 たわみの回帰式上にプロットされるかどうかで舗装厚をチェックする方法が提案できる。ただし、この方法には交通量他の因子が考慮されていないため、今後の検討課題としたい。

7. 結論

- (1) FWD の D0 たわみデータは正規分布をなし、供用年月とともに分布形状が変化する。その変化は舗装の破損の程度によって異なる。

- (2) たわみは舗装体の温度によって大きく影響されるが、測定回数を多くとることによって、たわみの増減を変動幅として把握することができる。
- (3) 同一舗装構造区間の D0 たわみの平均値は舗装の破損が増加するにつれて高くなる傾向にある。
- (4) 安定処理路盤のたわみ曲線は粒状路盤よりもなめらかな形状を示し、安定処理の版としての効果がみられた。
- (5) D0 たわみは舗装厚が厚いほど小さい値を示し、特に TA よりもアスファルト混合物層の厚さの影響を強く受けている。
- (6) D0 たわみは理論的設計法の設計基準となるアスファルト層下面の引張ひずみ、路床上面の圧縮ひずみと正の相関関係がある。
- (7) D0 たわみの測定値は多層弾性理論によって求めた計算値とほぼ一致する。
- (8) D0 たわみは舗装構造の評価以外に、舗装厚の設計法の指標として利用できる。

8. おわりに

本研究は 1997 年に提供された DataPave97 のデータを用いて解析を行ったものであるが、データを大量に補充して、1999 年 4 月から提供をはじめた Ver.2 のベータ版の解析は未着手である。膨大なデータを用いた LTPP に関する研究成果は世界中で続々と発表されており、今後またわみの特性を調査し、詳細な解析を行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) <http://datapave.fhwa.dot.gov>
- 2) S. Rowshan and S. Harris : Long-term Pavement Performance Information Management System Data Users Guide, FHWA Report No.FHWA-RD-93-094, 1993
- 3) American Association of State Highway and Transportation Officials : AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington,D.C., 1986
- 4) 雑賀義夫, 阿部長門, 姫野賢治, 丸山暉彦 : FWD から得られる特性値の温度補正に関する検討, 舗装, Vol.30, No.8, pp.10 ~ 15, 1995
- 5) 丸山暉彦, 姫野賢治, 林正則 : FWD による舗装診断システム, 舗装, Vol.23, No.11, pp.16 ~ 20, 1988
- 6) (社) 日本道路協会 : アスファルト舗装要綱, 324p., 1992

STUDY OF CHARACTERISTIC FOR SHRP LTPP DEFLECTION USING FWD

Hiroyuki YOSHIMURA

This paper describes properties of SHRP LTPP deflections using FWD and investigates the dispersion and variable of deflection data. From the results of the analysis, it was found that deflections collected from test section showed normal distribution and sensor 1 deflection was increased with time gradually.

Furthermore, a simplified deflection-based flexible pavement design procedure was proposed.