

FWD による舗装の非破壊試験に関する研究

丸 山 暉 彦* ・ 後 藤 巖* ・ 阿 部 長 門*
姫 野 賢 治** ・ 土 屋 雷 蔵*** ・ 林 正 則†

Nondestructive Pavement Testing by the Falling Weight Deflectometer

Teruhiko MARUYAMA, Iwao GOTO, Nagato ABE
Kenji HIMENO, Raizo TSUCHIYA and Masanori HAYASHI

The development and practical application of the falling weight deflectometer (FWD) which is a nondestructive testing equipment to define the shape of the deflection basin, are described. The estimation of the structural condition of the pavements in Nagaoka city, Niigata prefecture is performed. The procedure is based on multi-layered elastic theory to backcalculate elastic moduli from FWD deflection data. The study has indicated that it is possible to evaluate pavement structural defect without destroying the pavement.

key words: FWD/NDT/PMS/pavement/deflection/layered theory.

1. はじめに

道路舗装が新設されたばかりのときは、自動車の走行が滑らかで、安全かつ快適なサービスをユーザーに提供できる。しかし、時が経つにつれて、舗装表面が荒れ、ひび割れが入り、凹凸が激しくなってきた、道路のサービス水準が低下してくる。これをそのまま放置しておくと舗装は破壊してしまい、自動車の走行が不可能となるが、もっと以前の適切な時期に、適切な補修をしておくと、道路の機能は回復し、舗装の寿命は延びる。このような舗装のサービス水準の低下、回復の繰返しのことを舗装のライフサイクルといっている。このライフサイクルを予測して、最適な補修時期に、最適な補修工法を施すことができれば、道路ストックの寿命を延ばすことができ、最も経済的な道路管理が可能となる。すなわち、医師が患者を種々の方法で診察し、病状に応じて最も適切な治療方法を選ぶのと同じことを、道路に対しても行おうとするものである。道路舗装のライフサイクルは、舗装構造、気象条件、

交通量によって異なるために、道路ごとのきめ細かい検討が必要となる。本研究は、道路のサービス水準を表す因子として、たわみ量を採用し、地方道路のライフサイクルを把握して、最適な道路維持管理システムを構成しようとするものである。

本研究のたわみ測定には、Fig. 1 に示すような Falling Weight Deflectometer (FWD) という装置を使用している。これは路面上に載荷円板を置き、その上に錘りを落下させて路面に衝撃荷重を加え、道路を振動させるものである。この振動を、荷重直下とその周辺に設置された 5 個の変位センサーによって計測し、路面のたわみ形状を求める。これは、あたかも医師が患者の身体に手をあて、指先で軽くたたいて、患部を発

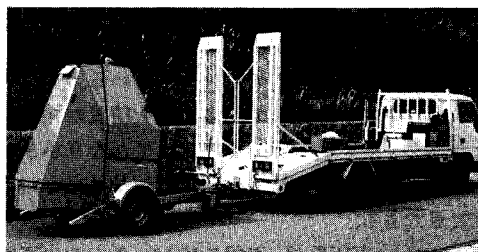


Fig. 1 An Appearance of the Falling Weight Deflectometer Hauled by a Truck

原稿受付：昭和 63 年 4 月 2 日

*長岡技術科学大学建設系

**東京工業大学工学部

***旭北陸建設弘済会

†東亜道路工業㈱

見しようとするのに似ている。載荷円板やセンサーの設置、荷重の載荷、振動の測定等はすべて、トラックの助手席に積込まれたコンピューターからの指示により自動的に行われる。このため高速、大量のデータ収録ができ、信頼性の高い検討が可能となっている。アスファルト舗装のたわみ量は温度によって変わるため、測定地点における気温と路面温度を測定している。これとは別に、舗装体内温度測定場を長岡技術科学大学構内に設け、地中の深さ方向の温度分布を測定しており、FWD たわみ測定時の舗装内部温度を推定するようにしている。

舗装の評価には、路面性状に関連する供用性評価と、舗装自体の支持力に関連する構造評価という2つの異なった側面がある。人体の健康診断において問診、触診のほか、種々の検査方法があるのに似ている。前者の供用性とは、舗装が交通に供し得る能力のことであり、道路利用者の主観により快適性、安全性の観点から定められる「サービス水準」や、道路管理者の主観により維持修繕の必要性から定められる「維持管理水準」等がある。これらの指標は、路面の縦断凹凸、わだち掘れ量、ひび割れ率等の管理項目によって表現されているため、レーザーや連続写真による自動測定を用いて機械的に定量化することが可能であって、一般国道、高速自動車国道を中心にこれらの測定結果をデータベース化する努力も精力的に行われている。

他方、後者の舗装の構造的な支持力の評価については、舗装を表層から順次切削し、各層の強度等を調べる破壊探査法があるが、この方法は多大な労力を要するために一般的でない。このため、荷重を加えたときの路面のたわみ量やその曲率、あるいは振動、加えたときの弾性波の伝播速度等に着目した非破壊探査法が注目されるようになってきた。たわみ測定装置のうち、国内国外で最も頻繁に利用され、データの蓄積も大きいものはベンケルマンビームおよびダイナフレクトである。ベンケルマンビームは支持脚の沈下の影響を除去できないこと、荷重、載荷速度の大きさにばらつきが大きいこと、装置が安価である割には1測点当りの単価が高くつくこと等の欠点を有している。ダイナフレクトは再現性には優れているが最大荷重が約1トンでトラックや航空機の輪荷重に比べてかなり小さいこと、波形が正弦波で実現象との対応が付けにくいこと等が欠点である。

これに対し、FWD は、装置自体が大きくやや高価ではあるが、以上の欠点をおおむね克服しており、米国でもすでに11の州で利用されるに至っている。特に、

第2のAASHO 道路試験とも呼ばれているSHRP計画 (Strategic Highway Rehabilitation Program) においても、たわみの標準測定装置に位置づけられており、これに伴い国際会議においてもFWDに関する論文が数多く発表されるようになってきている。

本研究は、スウェーデン KUAB 社製のFWDを長岡技術科学大学に導入し、主に長岡市内における国道、県道の実状にあったたわみ測定システムを開発したので、その結果を報告するものである。

2. 調査地点の選定及び測定方法

FWDによる測定対象地点は、新潟県長岡土木事務所および長岡警察署の管内であること、交通量が比較的小さいこと、近い将来に修繕される可能性のあることなどを考慮して、国道で18区間、県道で15区間の計33箇所を選定した。測定は原則として年に1~2度行うが、これらのうちの10区間は、2~3カ月に1度測定を行う重点調査区間とした。1測定区間の長さは通常100~200mであり、測定間隔を5~10mとして1区間内で20点の測定をすることとした。測定位置は一般車の外側車輪通過位置を標準とした。

Fig. 2のように、荷重点直下のたわみを D_0 とする。そこから半径方向(縦断方向)へ、20cm離れた地点におけるたわみを D_{20} とし、以下45cmにおいて D_{45} 、90cmにおいて D_{90} 、150cmにおけるたわみ量を D_{150} とする。 D_0 の値は、最小値で約0.15mm、最大値で約2.0mmであった。

Fig. 3にFWDの落下荷重により路面に与えた荷重パルスの形状を示す。ピーク荷重の大きさは約5トン、

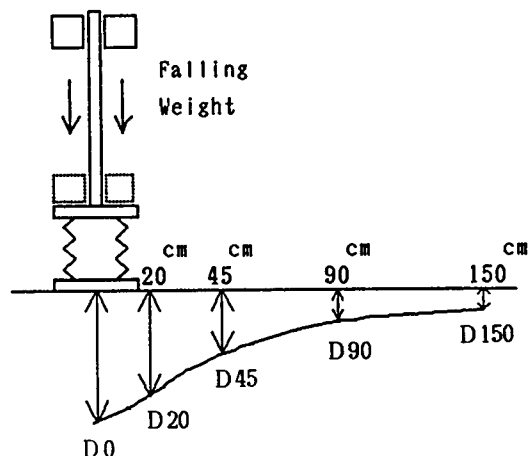


Fig. 2 Pavement Deflection Basin by the Falling Weight Deflectometer

荷重の立ち上がりからピークに達するまでの時間は約 30 ms であり、これは輪荷重 5 トンの大型車が約 70 km/h の速度で通過したときに路面が受ける衝撃荷重の形状にはほぼ等しい。

3. FWD によるたわみ測定値の再現性

FWD 測定値自身のばらつきを確認するために、温度変化の小さいと思われる曇っている日に、大学構内のアスファルト舗装道路の一測点において 100 回の測定を行った。この結果載荷点直下のたわみ D_0 の変動は、Fig. 4 に示すように、平均値が 0.333 mm、標準偏差が 0.0048 mm、変動係数が 1.5% であった。載荷点より最も離れた位置におけるたわみ D_{150} の場合でもその変動係数は 16% であった。

次に、1 測定区間内でのたわみ測定値の再現性を確認するために、国道 404 号線長岡市新産センター内で、片側 2 車線 160 m の区間の測定を実施した。まず、20 点のたわみ測定を 8 m おきに行い、終端に達してから最初の測点に戻り、2 度目の測定を行い、2 回の測定結果を比較した。ただし、なるべく同一箇所での測定となるように路面にマーキングを行い、第 1 回目は午前 10:02~10:30 に、第 2 回目は午前 10:38~11:06 に測定を行った。第 1 回測定時の気温は 12°C、第 2 回測定時の気温は 14°C であった。測定路線に沿ってプロットしたたわみ量 D_0 を Fig. 5 に示す。第 1 回目と比べて、第 2 回目の測定たわみ量の方が若干大きいという傾向がみられるが、その差は小さい。若干の差の原因は、気温・路面温度の変化および測定位置の変動によるものと考えられ、測定値の再現性が非常に高いものであることが確認された。なお、Fig. 5 においてたわみ

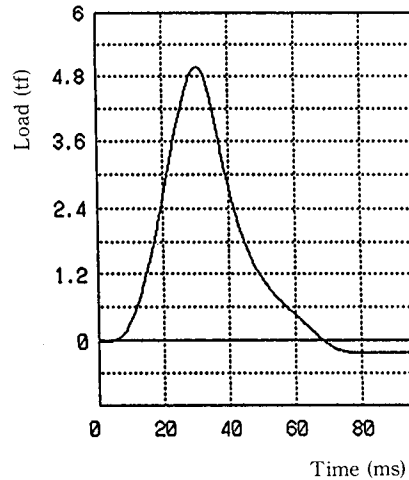


Fig. 3 The Shape of a Loading Pulse Produced by the Falling Weight

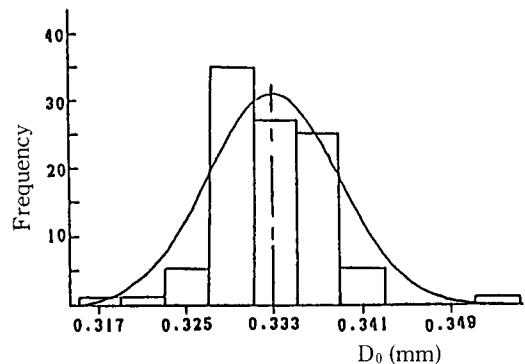


Fig. 4 Distribution of the Deflection D_0 at a Single Point

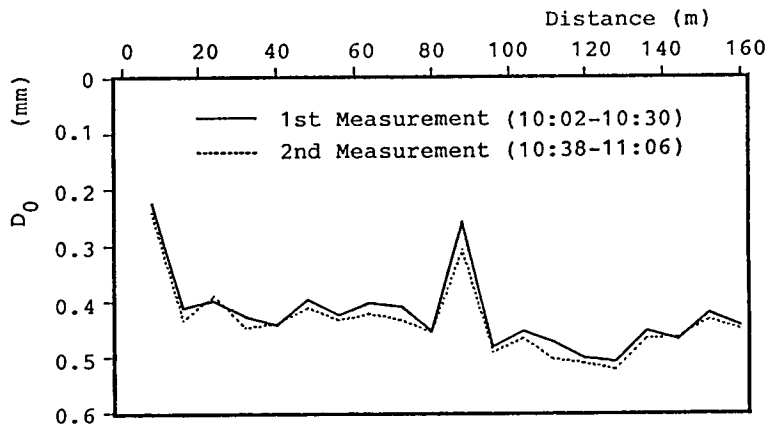


Fig. 5 Comparison of Deflections Measured by the FWD

量が極端に小さい箇所があるが、ここにはボックスカルバートが埋設されていることが確認されている。また、この前後の裏込め部では、逆にたわみ量が大きくなっていることもわかる。

4. 舗装構造とたわみ量

わが国ではアスファルト舗装要綱²⁾で定められている交通量区分(Table 1)を大まかな設計交通量として、舗装構成層の材料や厚さを決めている。今回の測定箇所内、この交通量区分の判明している区間が、14箇所あった。これらの区間における平均たわみ量を、交通量区分に対してプロットすると Fig. 6 のようになった。

設計交通量が同じであっても、供用年数や損傷の程度及び測定時の温度が異なるので、たわみが一意的に決まるものではないが、各舗装構造に対する標準的なたわみ量がこの図より推測される。Fig. 6 において下限のラインは供用開始前もしくは供用開始直後の舗装に対応するものであり、上限のラインは破損の大きい舗装に対応するものである。

5. ベンケルマンビーム試験との比較

先に述べた国道 404 号線新産センター内において、FWD によるたわみ量とベンケルマンビームによるたわみ量とを比較した。ベンケルマンビーム試験に用いた測定車はタンデム車であり、軸重 9180 kg、接地圧 6.2 kg/cm² となるように積載重量を調整して、後後軸左輪により载荷を行って復元たわみを測定した。延べ 320 m の区間において両試験装置により 4 m おきに 80 点のたわみ量を測定し、両者の関係を相関図によって示したのが、Fig. 7 である。相関係数は 0.57 とあまり大きくはなく、両試験は別種のものと考えの方が妥当であろう。

Fig. 8 は、その結果を縦断図として比較したものである。これより、両者の傾向は比較よく似ているが、ベンケルマンビーム試験によるたわみ量は FWD のものよりその絶対値、変動ともに大きいことがわかる。なお、ベンケルマンビーム試験によるたわみ量が高いのは、路面が後後軸からも荷重を受けたこと、FWD による場合よりも载荷時間がかかなり長いことによるものと思われる。

6. 多層構造理論による弾性係数の推定

今回測定を実施した区間のうち、舗装構造が明確にわかっているところから、2 箇所選んでたわみ量の計

Table 1. Rank of Traffic Volume Defined by Japan Asphalt Pavement Manual²⁾

| Rank of Traffic Volume | Daily Directional Volume of Heavy Vehicle |
|------------------------|---|
| L | below 100 |
| A | 100 ~ 250 |
| B | 250 ~ 1000 |
| C | 1000 ~ 3000 |
| D | over 3000 |

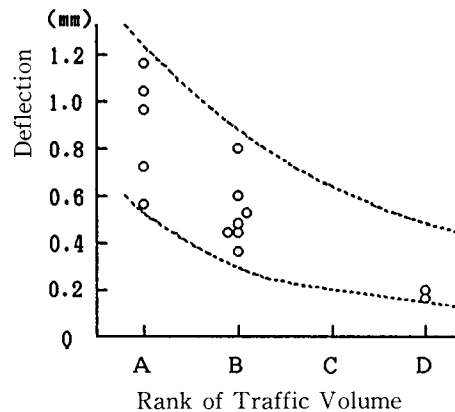


Fig. 6 Relation of FWD Deflection and Pavement Structure

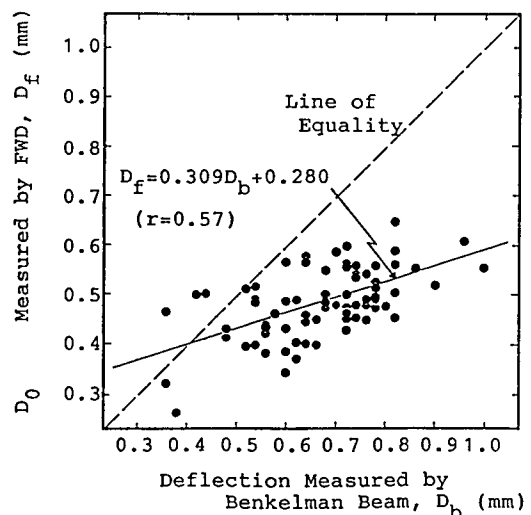


Fig. 7 Relationship between Measured Deflections by Benkelman Beam and the FWD

算を実施した。一つは国道404号線深沢バイパスで、もう一つは国道8号線長岡バイパスの堺町地区である。それぞれの舗装構成を、Fig. 9に示す。

この2つの舗装に対して、多層構造計算プログラムCHEV5Lを適用してたわみを計算した。本プログラムは、Burmister^{3)~5)}によって解かれた厳密解を米国の石油化学メーカー Chevron社がプログラム化したもので、舗装構造解析のために、各方面で利用され高い評価を得ているものである。

アスファルト層の弾性係数は、Van der Pole⁶⁾のノモグラフより算定した。このノモグラフを用いるために必要な条件のうちアスファルト混合物の温度は、大学構内に設けた舗装温度測定場におけるデータから求めたアスファルト混合物層の平均温度とした。載荷時

間は、FWDの荷重パルスの立ち上がり時間から、荷重がゼロに戻るまでの時間とした。抽出アスファルトのPI、軟化点及び混合物の骨材充填率は、新潟県内の約70カ所の道路におけるアスファルト混合物の抽出試験のデータを参考にして定めた。以上の条件をTable 2に示す。

路床弾性係数は、次節に述べる方法により一意的に定めることができる。アスファルト安定処理層、上層路盤、下層路盤の弾性係数は、Marchionnaら⁷⁾の研究を参考にして定めた。各層のPoisson比は、Craggら⁸⁾、Claessenら⁹⁾、姫野ら¹⁰⁾の研究を参考にした。

以上のようにして決定した入力因子の値を、Table 3に示す。これらの値を用いてたわみを計算したときの結果を、Table 4に示す。国道404号、国道8号、い

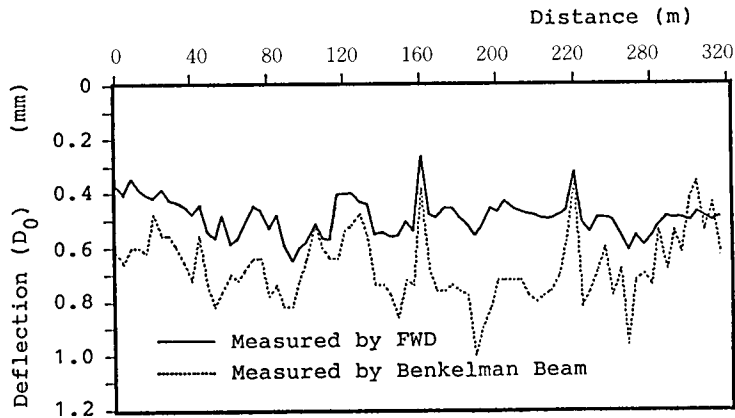


Fig. 8 Comparison of Measured Deflections by Benkelman Beam and the FWD

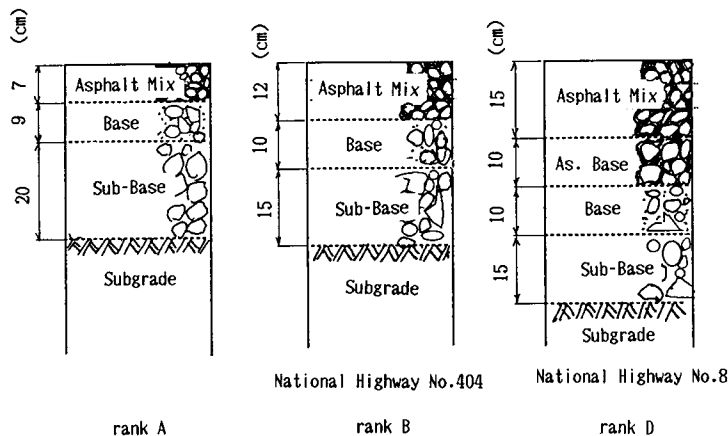


Fig. 9 Pavement Structure Used for the Analysis and Traffic Volume Rank

ずれの結果も、計算値と測定値は、非常によく一致した。このことより、舗装構造を知ることができれば、FWDの測定結果と多層構造理論を併用することにより、舗装構成層の各層の弾性係数を推定することが可能であることがわかる。

7. 載荷点から離れた位置におけるたわみと路床弾性係数の関係

Fig. 10はLyttonら¹¹⁾が与えたもので、4層の舗装構造の上に荷重が載荷されたときの、荷重の影響範囲の概念図を示したものである。この概念によると、荷重中心から離れた地点では、上の方にある層は荷重を受けていないので、たわみに与える寄与は小さいことがわかる。すなわち、荷重中心から離れたところにおけるたわみは、下の方にある層の弾性圧縮量に強く依存することになる。これを確認するために、荷重中心から150 cm離れた地点におけるたわみ D_{150} と路床弾性係数の関係を、CHEV5Lによって求めた。計算に用いた舗装構造は、モデルケースとしてA交通、B交通、D交通に対応するものをそれぞれ選んだ。その舗装構成はFig. 9に示した通りである。

計算に使用した各層の弾性係数及びポアソン比の範囲は、Table 5の通りである。各層の弾性係数の値を

変えてA, B, D交通に対応するものについて、それぞれ40, 70, 50組の値について、たわみを計算した。その他の入力データは、Table 3で用いたものを使用した。

Fig. 11に、路床弾性係数と荷重中心から150 cm離れた地点におけるたわみ量 D_{150} の関係を示す。プロットの数はいっとも多いのだが、ほとんど重なってしまうので、各設計交通量につき一つだけをプロットした。これまでにFWDの測定によって得られた D_{150} の値は、0.08~0.32 mmの間にある。この図より、路床以外の層の弾性係数は、 D_{150} に影響を与えないこと、舗装構造の相違は D_{150} に影響を与えないことがわかる。路床弾性係数の小さいところでは、 D_{150} のとる値が少し

Table 2. General Physical Properties of Extracted Binders and Mixtures in Niigata

| | National Highway 8 (Sakai) | National Highway 404 (Fukasawa) |
|--------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Binder : | | |
| Penetration Index | -1.0 | -0.6 |
| Softening Point [°C] | 55.0 | 58.0 |
| Mixture : | | |
| Volume Concentration [%] | 82.0 | 86.0 |
| Temperature [°C] | 7.8 | 20.0 |
| Loading Time [ms] | 68.0 | 70.0 |

Table 3. Material Properties of the Pavements and Loading Conditions Used for Mechanical Analysis

| | National Highway 404 | | | National Highway 8 | | |
|-------------------------|----------------------|------------------------------------|-----------------|--------------------|------------------------------------|-----------------|
| | Thickness cm | Young's Modulus kg/cm ² | Poisson's Ratio | Thickness cm | Young's Modulus kg/cm ² | Poisson's Ratio |
| Asphalt Mixture | 12 | 95000 | 0.45 | 15 | 150000 | 0.45 |
| Asphalt Treated Base | ... | ... | ... | 10 | 80000 | 0.45 |
| Base Course | 10 | 4500 | 0.40 | 10 | 9000 | 0.40 |
| Subbase Course | 15 | 2400 | 0.40 | 15 | 3500 | 0.40 |
| Subgrade | ∞ | 1200 | 0.35 | ∞ | 1200 | 0.35 |
| Load | 5052 kg | | | 5019 kg | | |
| Radius of Loading Plate | 15 cm | | | 15 cm | | |

Table 4. Calculated Deflections and Measured Deflections (mm)

| | | D_0 | D_{20} | D_{45} | D_{90} | D_{150} |
|----------------------|------------|-------|----------|----------|----------|-----------|
| National Highway 404 | Calculated | 0.369 | 0.319 | 0.233 | 0.135 | 0.079 |
| | Measured | 0.368 | 0.326 | 0.238 | 0.134 | 0.079 |
| National Highway 8 | Calculated | 0.188 | 0.173 | 0.153 | 0.118 | 0.082 |
| | Measured | 0.189 | 0.176 | 0.156 | 0.114 | 0.086 |

広がるが、両者の関係は一意的であるといつてよい。

すなわち、FWDの測定値のうち、荷重中心より150 cm離れた点におけるたわみ D_{150} から、路床弾性係数を求めることができる。

Fig. 12は同様に、荷重載荷直下のたわみ D_0 と路床弾性係数の関係をプロットしたものだが、これには上述したような一意的な関係は認められない。

8. FWDによる一般道のたわみ測定結果の例

Fig. 13は、一般国道351号線越路町市街地におけるFWDたわみ測定結果を D_0 と D_{150} の縦断面図として示したものである。ここでは、 D_{150} の値は小さく変動も少ない。すなわち、路床強度が高く安定していることがわかる。しかし、 D_0 については一部非常に大きいと

ころがみられる。ここは、細かいクラックが多数入っていた箇所であるが、舗装構成層のうち上の方にある層が悪いのであろうと判定することができる。

Fig. 14は、一般国道351号線長岡市浦瀬町付近の水田地帯における D_0 と D_{150} の縦断面図である。測定区間の中央部に埋設管が横断しており、そこではたわみが小さくなっているが、 D_0 、 D_{150} とも右の方へ行くほど値が大きくなっている。とくに D_{150} は、0.1 mmから0.3 mmまで変化しており、先述したFig. 11によると、路床弾性係数は約1000 kg/cm²から300 kg/cm²まで変化していることになる。荷重載荷点直下のたわみ D_0 も右の方へ行くほど大きくなり、変動も大きくなっている。

この地点は、センターライン付近にクラックの入

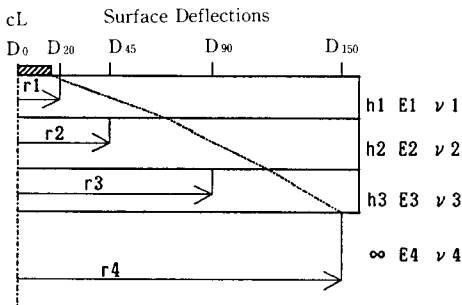


Fig. 10 Four-Layer Elastic Representation of a Pavement System¹¹⁾

Table 5. Range of Young's Modulus and Poisson's Ratio Used for Mechanical Analysis

| | Young's Modulus (kg/cm ²) | Poisson's Ratio |
|------------------|---------------------------------------|-----------------|
| Asphalt Mix | 50000 ~ 180000 | 0.45 ~ 0.49 |
| As. Treated Base | 16000 ~ 90000 | 0.45 ~ 0.49 |
| Base Course | 3000 ~ 9000 | 0.40 |
| Subbase Course | 1300 ~ 4000 | 0.40 |
| Subgrade | 250 ~ 1300 | 0.35 |

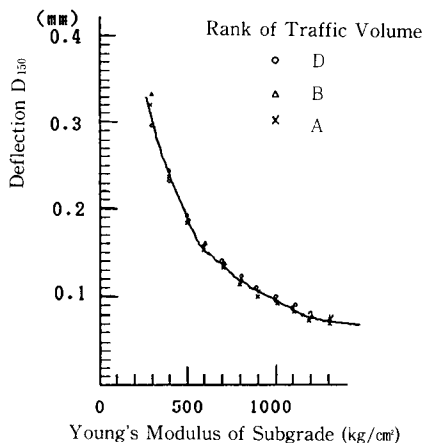


Fig. 11 Relationship between Deflections Apart from the Loading Point D_{150} and Young's Modulus of Subgrade

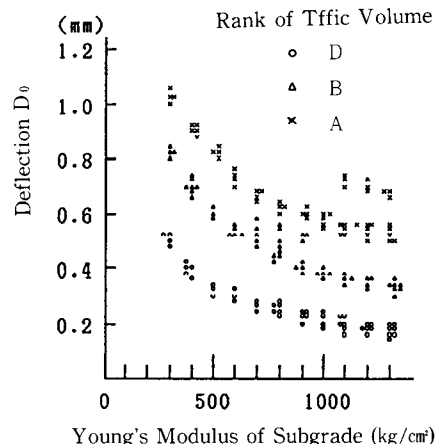


Fig. 12 Relationship between Deflections Just Under the Loading Point D_0 and Young's Modulus of Subgrade

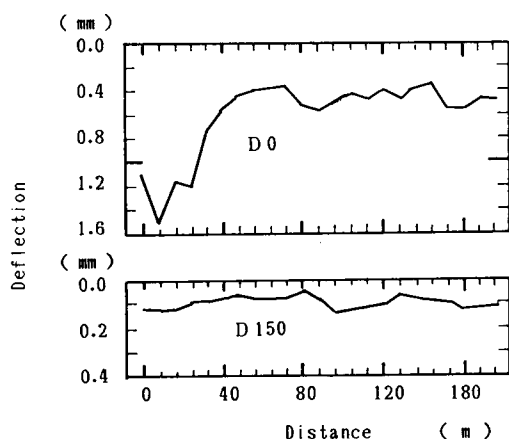


Fig. 13 Profile of FWD Deflection Data on National Highway 351 (Koshiji)

ているところであるが、ここでは舗装構成層の上の層だけでなく、路床の強さにも問題のある可能性がある。このように、FWDの測定値を有効に用いれば、舗装の損傷要因をある程度推測することが可能になると思われる。

9. 結 論

本研究の結論を以下に述べる。

- 1) FWDは、実際の走行荷重と類似した衝撃荷重を路面に加え、動的な路面のたわみ形状を測定することができる。
- 2) FWD測定値自身のばらつきはほとんどなく、FWD測定値の再現性は非常に高い。
- 3) ベンケルマンビーム試験による測定たわみとFWDによる測定たわみとの関係はあまり強くなく、両者は別種の測定装置であると考えたほうがよい。
- 4) FWDにより求められた路面のたわみ形状は、多層構造理論より求められるたわみ形状とよく一致し、舗装構成層の厚さが判明していれば、各層の弾性係数を高い精度で推定することが可能である。ただし、ここでいう舗装構成層の弾性係数とは、多層構造理論の計算に用いるパラメーターとしてのみかけの弾性係数であって、実測値としての弾性係数ではない。力学試験から求められる材料の変形係数との対応は今後の研究課題である。
- 5) 載荷点から150 cm離れた地点におけるたわみ D_{150} は路床弾性係数と一意的な関係にある。すなわち D_{150} の値から直ちに路床弾性係数を知ることができる。

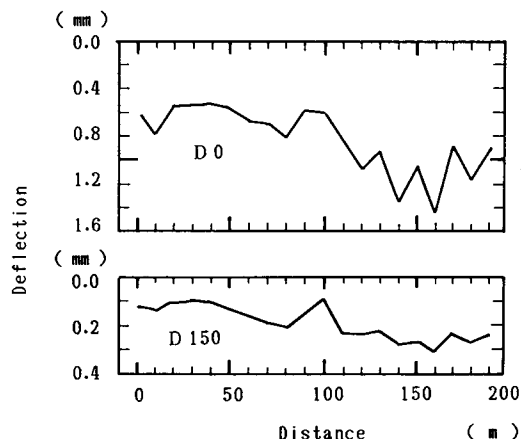


Fig. 14 Profile of FWD Deflection Data on National Highway 351 (Nagaoka Uruse)

- 6) FWDたわみ測定の結果から舗装内部の欠陥箇所の位置を推測することができ、FWDを道路舗装の診断システムとして活用することが可能である。

謝 辞

本研究は昭和62年度より長岡技術科学大学技術開発センター研究プロジェクトとして遂行されているものである。本研究をまとめるにあたり長岡技術科学大学機械系伊藤廣教授、建設系清水敬二教授、長瀬龍彦助教授、および北海道工業大学の笠原篤教授に御助言を頂いた。建設省土木研究所舗装研究室、建設省北陸地方建設局長岡国道工事事務所、ならびに新潟県長岡土木事務所からは道路のたわみ測定に際し、絶大な御協力を頂いた。また、ベンケルマンビーム試験の測定並びに抽出試験データについては福田道路(株)の御協力を得た。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Smith, R.E. and Lytton, R.L., "Operating Characteristics and User Satisfaction of Commercially Available NDT Equipment", TRR1007, pp. 1-10, 1985.
- 2) 日本道路協会, アスファルト舗装要綱, p. 6, 1978.
- 3) Burmister, D.M., "The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems. I.", J. of Applied Physics, Vol. 16, February, pp. 89-94, 1945.
- 4) Burmister, D.M., "The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems. II.", J. of Applied Physics, Vol. 16, March, pp. 126-127, 1945.
- 5) Burmister, D.M., "The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems. III.", J. of Applied Physics, Vol. 16, May, pp. 296-302, 1945.

- 6) Van der Pole, C., "Time and Temperature Effects on the Deformation of Asphaltic Bitumens and Bitumen-Mineral Mixtures", SPE Journal, September, pp. 47-53, 1955.
- 7) Marchionna, A., Cesarini, M., Fornaci, M.G. and Malgarini, M., "Pavement Elastic Characteristics Measured by Means of Tests Conducted with the Falling Weight Deflectometer", TRR1007, pp. 46-52, 1985.
- 8) Cragg, R. and Pell, P.S., "The Dynamic Stiffness of Bituminous Road Materials", Proc. of AAPT, Vol. 40, pp. 126-193, 1971.
- 9) Claessen, A.I.M., Edwards, J.M., Sommer, P.M. and Uge, P., "Asphalt Pavement Design—The Shell Method", Proc. of 4th ICSDAP, pp. 39-74, 1977.
- 10) 姫野賢治, 渡辺隆, 丸山暉彦, 「アスファルト舗装の疲労寿命予測システムに関する研究」, 土木学会論文集, 378/V-6, pp. 176-185, February, 1987.
- 11) Lytton, R.L. and Smith, R.E., "Use of Nondestructive Testing in the Design of Overlays for Flexible Pavements", TRR 1007, pp. 11-20, 1985.