

# FWDの荷重波形が舗装構造の評価結果に及ぼす影響に関する研究

阿部長門<sup>1</sup>・姫野賢治<sup>2</sup>・上島 壯<sup>3</sup>・川村 彰<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東亜道路工業(株)技術研究所(〒232 横浜市中村町5-318)

<sup>2</sup>正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>3</sup>正会員 工学士 北海道大学助手 工学部土木工学科(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>4</sup>正会員 工博 函館工業高等専門学校助教授 土木工学科(〒042 函館市戸倉町14-1)

舗装の支持力評価のための非破壊試験法としてFWDが世界的に注目されているが、規格が確定しないままいろいろなタイプのFWD試験装置が開発されてきたため、ピーク荷重はほぼ同じ値であっても、たわみ量や舗装の推定弾性係数が公正に評価できないのではないかという可能性が指摘されている。本研究は、1台のFWD(Phoenix Road International社製)を用い、衝撃ピーク荷重がほぼ5tfとなるように重錘の質量、落下高さ、ゴムバッファの種類をいろいろに変化させ、FWDによるたわみ測定を行った。そして、これらが測定たわみおよび逆解析によって推定された舗装の層弾性係数に及ぼす影響を調べた。

1台のFWDを用い、本研究で得られた成果は以下のとおりである。

1. 重錘の質量が小さい程、すなわち落下高さが大きいほど、載荷力率が小さい。
2. 載荷力率とたわみ量は、強い正の相関がある。単位載荷力率当たりのたわみ量の変動は、およそ、載荷中心で10 $\mu$ m、載荷中心から600mm離れた点で7 $\mu$ m、1500mm離れた点で3 $\mu$ mであり、荷重載荷点に近いほど載荷力率の違いがたわみに与える影響が大きい。
3. 載荷力率が大きいほど各層の弾性係数が小さい値を示す。載荷力率が1kgf・s違えば、路床の弾性係数は3~5%変動する。

**KeyWords.** Asphalt pavement, Structural evaluation, FWD, Analytical data correction, Loading time, Power factor of load

## 1. 緒言

舗装の構造的な支持力評価のための非破壊試験法の1つとしてFWD(Falling Weight Deflectometer)が世界的に注目されている。FWDはたわみ測定装置の一つであり、1970年代始めにアムステルダムシェル石油中央研究所で開発されたものが基本となり、その後欧州、米国、日本、中国で開発製造され、近年では世界各国に普及している。

FWDは、現在全世界で300台余りが保有されており、わが国においても、1983年に運輸省港湾技術研究所および北海道工業大学に、また、1987年に建設省土木研究所および新東京国際空港公団に導入されて以来、現在は行政機関、民間会社、大学の各分野で20台以上が稼働し、今後もますます増加していく傾向にある。これらの機種の基本構造は同一であるが、寸法や仕様などの細部についてはかなりの多様性が認められる。したがって、どの機械で測られたかが測定結果に重要な意味を持つ可能性があるし、また、これらを用いて測定されたデータの利用技術についても各所有機関にまたがる共通認識が確立しているとは言えないため、将来、異なる装置によって測定された種々のデータを比較

する場合などに不都合が生じる懸念がある。この違いを補正する方法には、統計的手法に基づくものと、力学的的手法に基づくものとがあるが、次々に新しい機械が作られ、また、今後世界レベルで情報の交換を行うような可能性を考えると、以上の問題を力学的にとらえることの意義は極めて高いものと考えられる。

以上のような観点に立ち、本研究では、1台のFWDを用い、衝撃ピーク荷重がほぼ5tf(49kN)となるように重錘の質量、落下高さ、重錘を受けとめるゴムバッファの種類をいろいろに変化させ、FWDによるたわみ測定を行った。そして、その載荷波形に注目し、ピーク荷重のみならず、載荷力率をも考慮に入れながら、力学的な視点で、測定たわみ、および、逆解析により求められる弾性係数について比較検討を行った。

本研究で使用したFWDは、Phoenix Road International社製のFWDのものであり、これは単重錘式、車載型のものであり、たわみセンサーには速度計であるジオフォンを採用しており、荷重載荷点より0, 200, 300, 450, 600, 750, 900, 1500, 2000mmの位置に合計9個設置されている。

以下、これらの位置でのたわみ量を、 $D_0$ ,  $D_{200}$ ,  $D_{300}$ などと表すこととする。

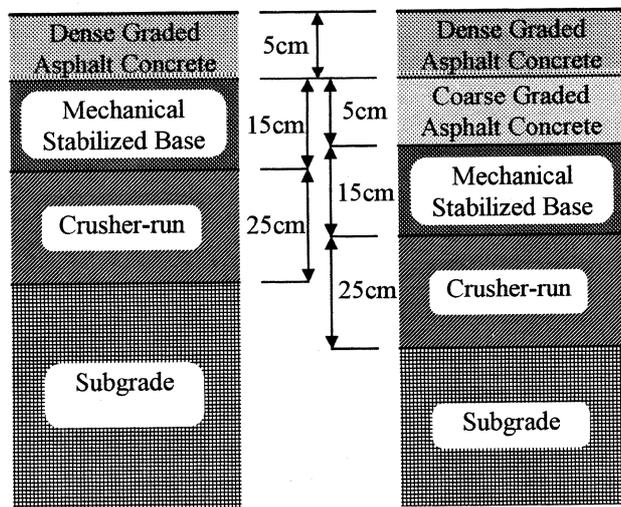
## 2. 測定方法

### (1) 試験工区

FWDを用いたたわみ測定試験は、東亜道路工業(株)白井合材工場(千葉県印旛郡白井町平塚 2722)内に設けられた舗装構造の異なるA, B, Cの3つの舗装工区で行った。本研究では、このうち、A, B両工区のものについて触れる。これらの舗装構成はFigure 1 (a), (b)に示すとおりである。

測定は、平成5年11月13日に、各工区とも、位置を変えて3測点で、また、各測点で3回の測定を行った。

なお、本研究のため全ての測定に要した時間は約150分間であったが、その間の路面温度の変化は1K以内であり、路面温度によるたわみの補正は行わなかった。



(a) Section A

(b) Section B

Figure 1 Cross sections of test pavements

### (2) 測定条件

約5tf(49kN)の衝撃荷重を発生させるために変化させた、重錘の質量、重錘の落下高さおよびゴムバッファの種類組み合わせはTable 1に示すとおりである。また、ゴムバッファについては、ゴムの種類を定性的にソフト、ミディアム、ハードの3段階に変化させた。重錘の落下高さは、各ゴムの種類ごとに、ピーク荷重が5tf(49kN)になるように重錘の質量に応じて決定した。なお、この装置を用いた通常の状態では、ゴムバッファの硬さはソフト、重錘質量は220kg、落下高さは190mm、すなわち、Table 1のS<sub>2</sub>の状態ですら約5tf(49kN)の衝撃ピーク荷重を発生させ、たわみ測定を実施している。

ここで注意すべきことは、ゴムの硬さ、落下重錘の質量および落下高さという3つの因子は互いに独立ではなく、ピーク荷重がほぼ5tfになるようにするために、

これらのうちの2つが決まれば他の1つは必然的に決定されるということである。

Table 1 Test conditions in the field

Stiffness of rubber bumper	Code	Mass of falling weight [kg]	Falling height [mm]
Soft	S <sub>1</sub>	250	170
	S <sub>2</sub>	220	190
	S <sub>3</sub>	190	220
	S <sub>4</sub>	160	270
	S <sub>5</sub>	130	305
Medium	M <sub>1</sub>	130	120
	M <sub>2</sub>	100	200
Hard	H <sub>1</sub>	100	160

## 3. 解析方法

### (1) 荷重及びたわみの補正

各測定条件ごとに、A, B, C各工区ごとに3つの測定点を設け、各測定点3回の平均荷重および各センサー位置での平均たわみ量を算出し、それぞれ各工区、各測点のデータとした。以下の解析には、これらの荷重、たわみ量を各工区毎に平均し、ピーク荷重5tf(49kN)になるように、線形補間を行って、5tf(49kN)荷重でのたわみ量になるように補正した。

### (2) 載荷力率の概念

今回の測定では、衝撃ピーク荷重はいずれの場合もほぼ5tf(49kN)になるように重錘の質量、落下高さ、ゴムの硬さを調整したが、荷重がピークに至るまでの時間や、荷重の時間的な変化、すなわち波形が載荷条件ごとにまちまちであったため、荷重が路面に及ぼす影響を示す力学的な指標の1つとして、Figure 2に示すように、時間～荷重関係において、荷重がかかり始める時間から荷重がピークに達するまでの間の荷重曲線と時間軸の間の面積を求め、これを載荷力率と定義した。ただし、荷重は徐々に増加するためにかかり始めた時間の特定が困難なこと、実験条件によっては必ずしも荷重のピークが明確には現れないことなどを考慮に入れ、ピーク荷重の20%の大きさの荷重がかかった時間を載荷開始点、ピーク荷重の80%以上の荷重がかかっている部分のこの値より上の面積の重心位置をピーク荷重時間と考え、この間を時間範囲とする波形の面積を用いた。これにより、荷重波形が大きく異なるような他

機種との比較も定量的に行えることが可能になったものと考えられる。

ここで定義した荷重力率は、Figure 2の記号に従うと、

$$PF = \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt$$

ここに、

- PF: 荷重力率(kgf・s)
- t<sub>1</sub>: 荷重開始点(s)
- t<sub>2</sub>: ピーク荷重時間(s)
- P(t): 動的荷重(kgf)
- t: t(s)

である。

荷重力率の計算には、Simpson則を用いた。

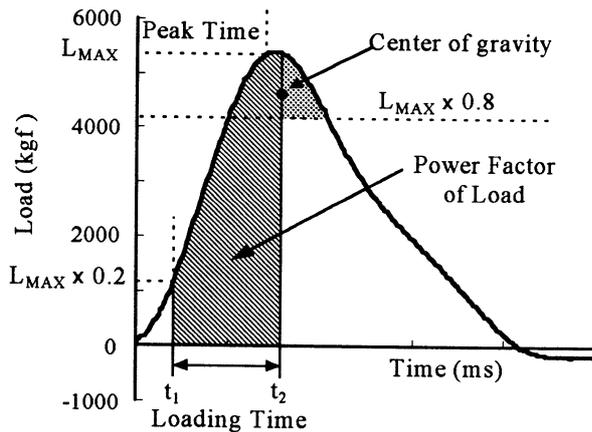
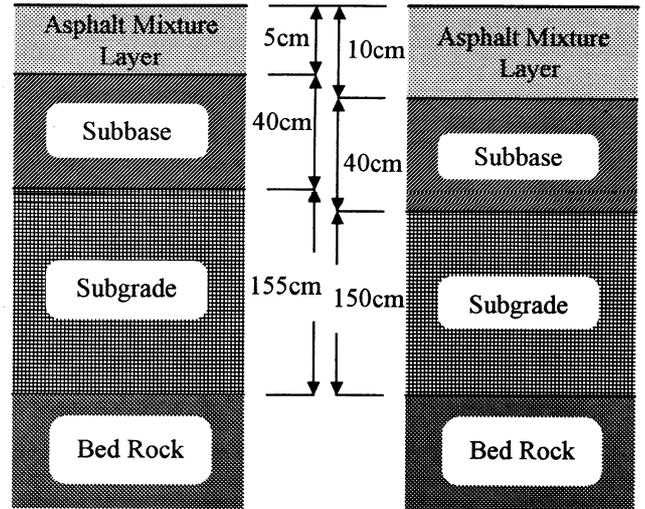


Figure 2 Concept of power factor of load

### (3) 逆解析

本研究では、落下重錘の質量、落下高さ、ゴムバッファの硬さなどの実験条件の違いによるたわみの大きさの違いを検討しただけではなく、荷重補正されたたわみデータから、多層弾性理論(ELSA)をサブルーチンに組み込んだ舗装構成各層の弾性係数の逆解析ソフト(LMBS)を用いて、弾性係数を推定した<sup>1)</sup>。ただし、ここでは、Figure 1(a), (b)の舗装構成をFigure 3(a), (b)のようにモデル化し、また、路面から2mの深さにベドロックを仮定した。これにより、各工区を、アスコン層、路盤、路床の3層構造モデルとした。なお、以降、アスコン層、路盤、路床各層の弾性係数をそれぞれ、E<sub>1</sub>、E<sub>2</sub>、E<sub>3</sub>と呼ぶこととする。



(a) Section A

(b) Section B

Figure 3 Modelled pavement structures for backcalculation

## 4. 解析結果および考察

### (1) 荷重波形

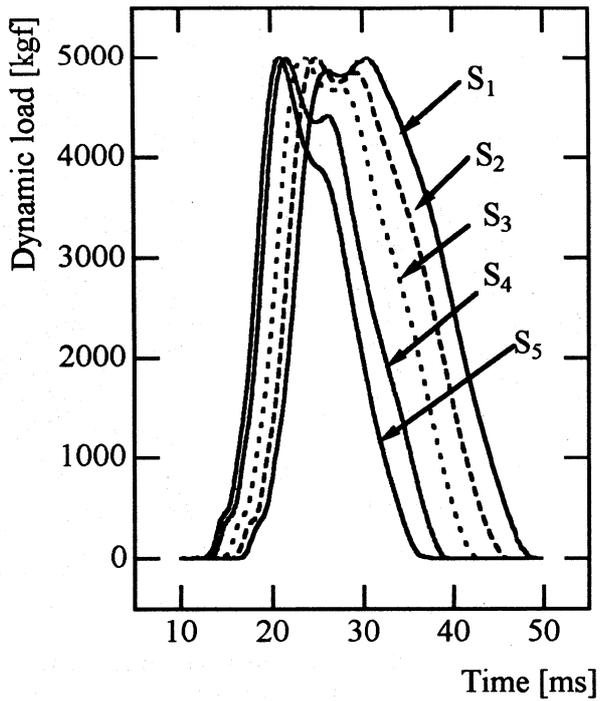
ゴムバッファのゴムの硬さがソフトで、重錘の質量および落下高さを変えた場合のA工区、B工区での荷重波形をそれぞれFigure 4(a), (b)に示す。また、逆に、ゴムの硬さを変化させた場合のA工区、B工区での荷重波形をそれぞれFigure 5(a), (b)に示す。

Figure 4(a), (b)より、ゴムバッファのゴムの種類がソフトの場合には、重錘の質量の大きさにかかわらず、荷重波形は2つのピークを持つことが分かる。すなわち、一旦1つのピーク荷重が加わった後、柔らかいゴムに若干押し戻されながらも荷重が再び路面を押しつけることが起きている。いわゆる複重錘型のFWDは、まさにこのような現象を制御し、ピークをなめらかにするために開発されたものである。

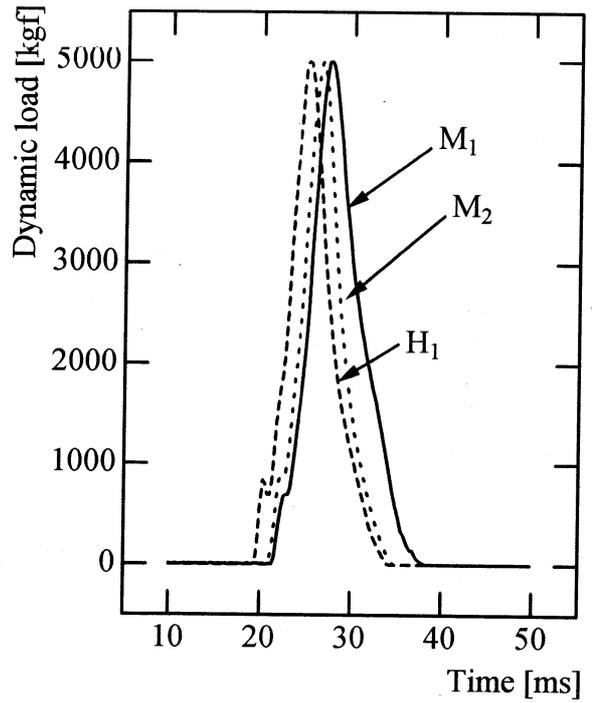
また、Figure 5(a), (b)より、ゴムが硬くなると荷重がピークになるまでの時間及び路面に荷重が加わりやがてゼロになるまでのトータル荷重時間はともに短くなり、ピークの位置が顕著になる。さらに、ゴムの種類が同じならば重錘の質量が小さいほど、つまりそれに応じて落下高さが大きいほど波形の立ち上がり早く、荷重がピークに達するまでの時間も早いことが分かる。

### (2) 荷重力率がたわみ曲線の形状に及ぼす影響

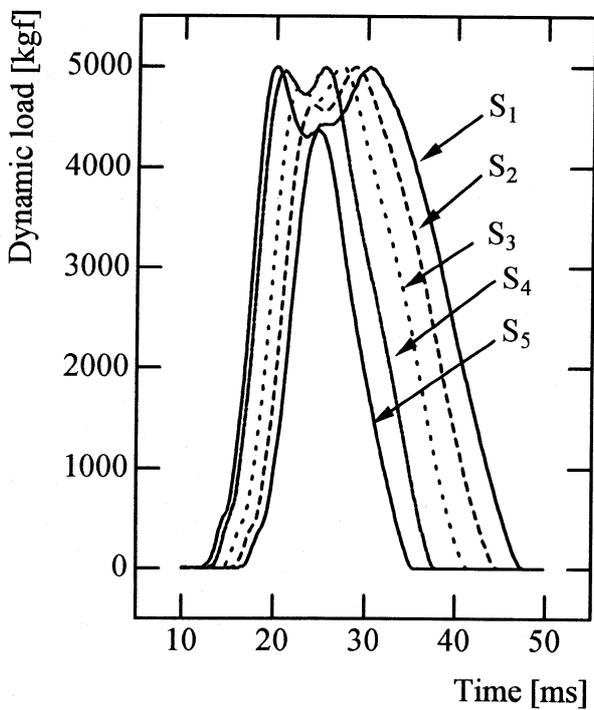
Figure 6(a), (b)は、A工区における各実験条件でのたわみ曲線を並べたものであるが、ピーク荷重



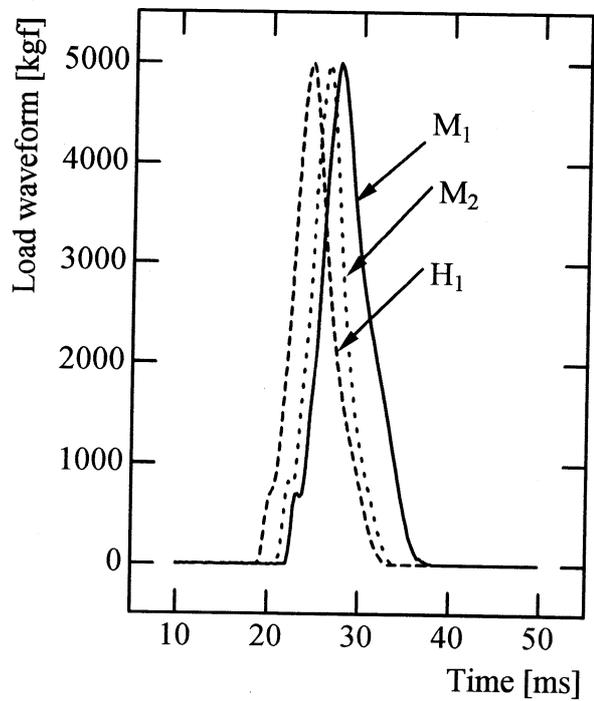
**Fig.4 (a) Load waveform (Section A)**



**Fig.5 (a) Load Waveform (Section A)**



**Fig.4 (b) Load waveform (Section B)**



**Fig.5 (b) Load waveform (Section B)**

はどれも一様に5tfであるにもかかわらず、たわみ曲線については非常に大きな多様性が認められ、たわみ曲線の形状そのものはほぼ同様な形をしているものの、その値にはとても大きな違いがあり、荷重点直下でのたわみの最小と最大の値には、1:1.7ほどの違いのあることがわかる。

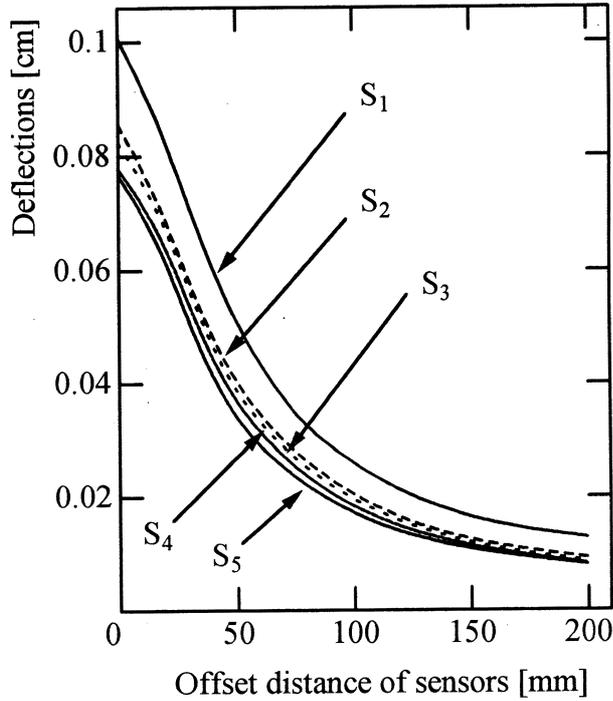


Fig.6 (a) Deflection Curves (Section A)

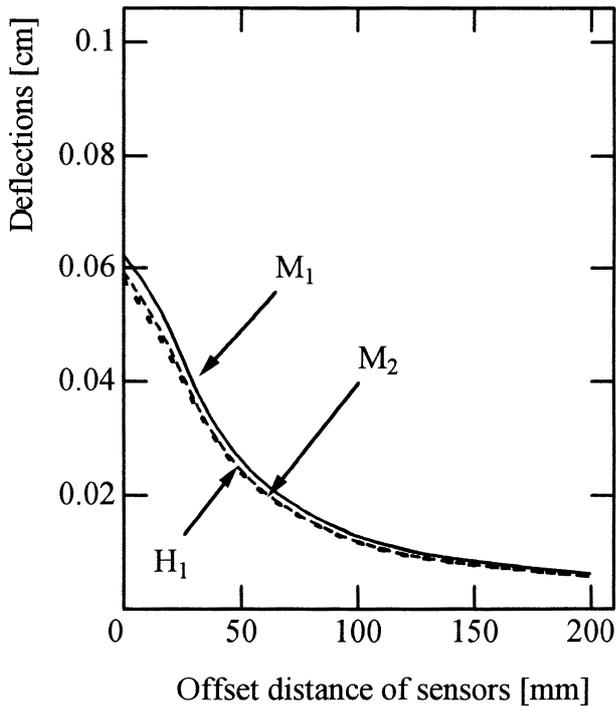


Fig.6 (b) Deflection Curves (Section A)

また、Figure 7は、A工区での荷重率とピークたわみ量の関係を示したものであるが、荷重率とたわみ量は相関の高い正比例関係にあり、舗装の応答を示すたわみは荷重の荷重率に左右されていることが分かる。1台のFWDを用いる限り、荷重率とたわみ量は、強い正の相関がある。単位荷重率当たりのたわみ量の変動は、およそ $D_0$ で $10\mu\text{m}$ 、 $D_{600}$ で $7\mu\text{m}$ 、 $D_{1500}$ で $3\mu\text{m}$ であり、荷重荷重点に近いほど荷重率の違いがたわみに与える影響が大きい。

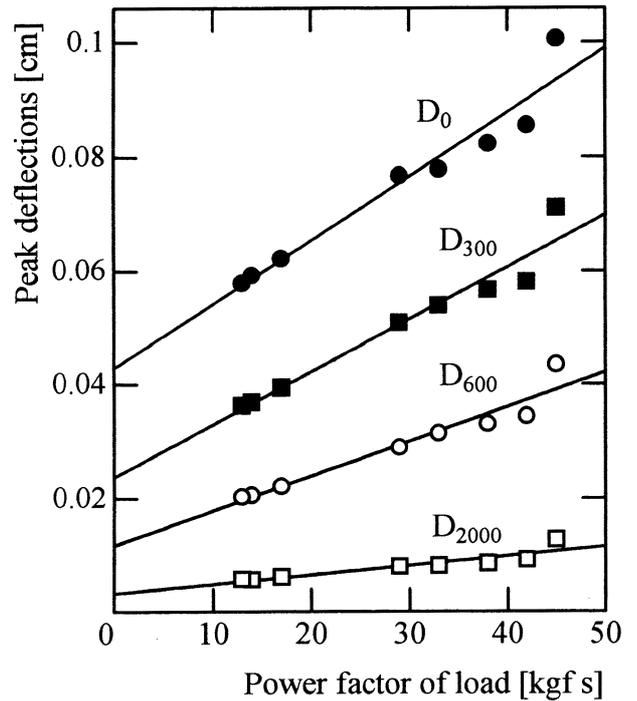


Fig.7 Power factor of load vs Peak deflection

### (3) 荷重率が推定弾性係数に及ぼす影響

最終的に、FWDを用いた舗装構造の評価は、測定された各センサーでのたわみ量を逆解析することで舗装各層の弾性係数を推定し、これに基づいて行われる。本項では、以上のように、荷重率によって影響を受けるたわみデータを用いた場合、この荷重率の違いが逆解析によって推定された弾性係数にどの程度の影響を及ぼすかを調べた。A、B各工区における各層の弾性係数と荷重率との関係をFigure 8 (a), (b)に示す。Figure 8 (a), (b)より、各工区において、荷重率が高いほど各層の弾性係数が小さい値を示す傾向が分かる。路盤の弾性係数 $E_2$ がややばらついているものの、アスコン層の弾性係数 $E_1$ と路床の弾性係数 $E_3$ は各工区ともかなり安定した値を示している。

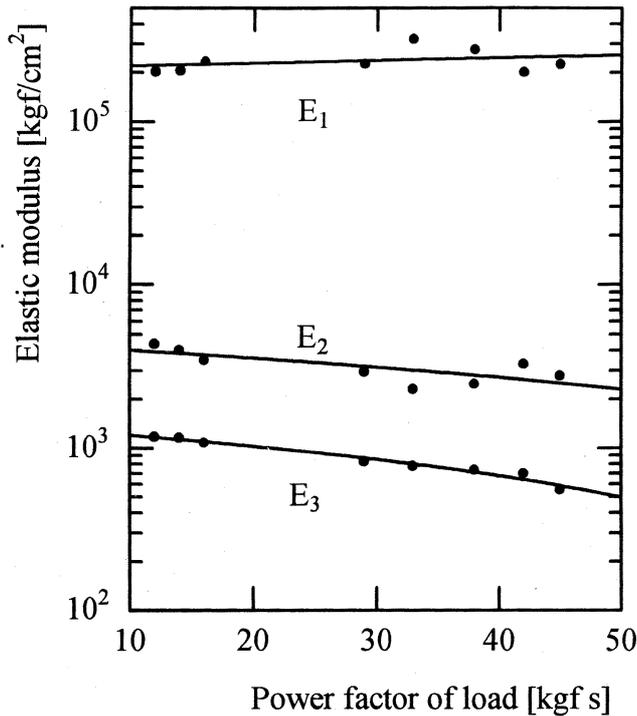


Fig.8 (a) Estimated elastic modulus vs Power factor of load (Section A)

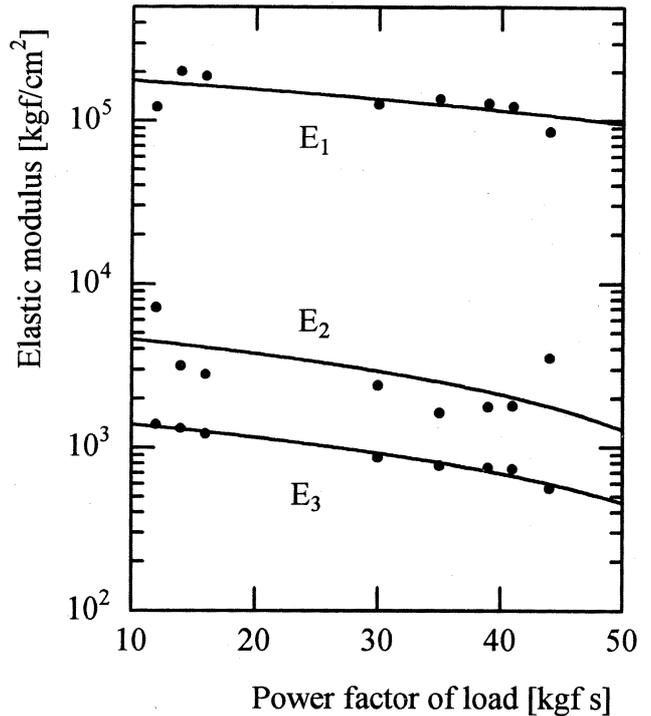


Fig.8 (b) Estimated elastic modulus vs Power factor of load (Section B)

## 5. 結言

アスファルト舗装の弾性係数は温度依存性が高いため、FWD試験でのたわみ測定結果を用いて舗装構造の弾性係数を推定する場合、温度に対してのたわみ補正が必要とされている。さらに本研究によって、載荷時間の指標である載荷力率にたわみが大きく影響を受け、FWDによる舗装支持力の評価を行う上で無視できない要因であることが確認された。ゴムバッファ、重錘の質量や落下高さの異なるFWD装置間の比較を行うには載荷力率などで補正し、標準たわみ、標準弾性係数を用いる必要がある。

謝辞： 本研究は、元北海道大学工学部土木工学科学生、現福建設計コンサルタント職員、田村整君に解析の手伝いをして頂いた。ここに謝意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) Himeno, K., Maruyama, T., Abe, N. and Hayashi, M.: The Use of FWD Deflection Data in the Mechanistic Analysis of Flexible Pavements, *Procs. the 3rd Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Trondheim, Volume 1, pp.401-410, 1990.
- 2) FWD研究会, FWDに関する研究(その2), 1995.
- 3) (社)日本アスファルト協会, アスファルト誌, 175号.

(1996. 10. 14 受付)

## INFLUENCE OF LOADING WAVEFORM OF FWD ON STRUCTURAL ANALYSIS OF ASPHALT PAVEMENTS

Nagato ABE, Kenji HIMENO and Tsuyoshi KAMIJIMA

FWD (Falling Weight Deflectometer) is a nondestructive testing equipment used worldwide for pavement structural evaluation. Many manufacturers developed various types of FWD equipment which have almost identical peak loads. However, diversity can be found in the other specifications, and this may cause difference in measured deflections and pavement layer moduli backcalculated based on them.

Pavement surface deflections are measured in this study, varying weight and height of falling mass and type of rubber buffer of an FWD (manufactured by Phoenix Road International Co., Ltd.), so that various loading waveforms can be obtained, keeping the peak load almost identical. And influence of loading waveform of FWD on backcalculated pavement layer moduli is examined.