

ダイナフレクトによるたわみ測定値の利用 に関する 2, 3 の考察

SEVERAL CONSIDERATIONS ON THE USE OF DYNAFLECT

達 下文 一*・阿 部 頼 政**・阿 部 忠 行***

By Fumiitu TATSUSHITA, Yorimasa ABE and Tadayuki ABE

1. 序 論

わが国の道路舗装は、簡易舗装を含めると舗装率にして 40% をすでに超えており、特に重交通街路においては維持修繕の時代へと移行しつつある。維持修繕の要否を判断する力学的試験としては、従来ベンケルマンビームによるたわみ測定が広く利用されてきたが、この方法は、測定に時間がかかることや作業に危険が伴うことなどのため、交通量の多い道路ではこの測定が年々困難となってきている。

たわみ測定をより安全に、迅速に、正確にという要望は国際的なものであり、これまでダイナフレクト、デフレクトグラフ、フォーリングウェイトデフレクトメータなどが開発されてきた。このうち、東京都においてはダイナフレクトを中心に研究を進めてきており、本論文は、その測定値の解析に関する基礎的研究を報告するものである。

ダイナフレクトは、1966 年以來、米国のテキサス州、バージニア州、ユタ州などで舗装構造の検討に用いられてきている。わが国でも、運輸省港湾技術研究所¹⁾、建設省土木研究所²⁾などが積極的にこの研究に取り組んできたが、まだその使用法が確立されるまでには至っていない。これは、舗装のたわみと寿命の関係が必ずしも明確にはなっていないこと、また、この関係を明らかにするには継続的な測定が必要であり長い年月がかかることなどが大きな原因として挙げられよう。

以上のように、現場試験による直接的な対応が困難な場合、有効な研究手法として多層弾性論が広く利用されている。先に挙げた米国の各州でも多層弾性論によってダイナフレクトの測定値を解析している例がほとんどで

あり、舗装各層のヤング率の推定、舗装構造の評価に Michalak³⁾、Swift⁴⁾、Peterson⁵⁾、Vaswani⁶⁾らの研究が利用されている。しかし、各研究者の提案している手法がそれぞれ異なっておりその間に統一がないこと、多層弾性論の適用性に関する考察が断片的であること、理論の確証となる実測例が少ないことなどの難点があり、わが国の舗装の構造解析にそのまま利用するわけにはいかない。

以上のような背景を踏まえ、著者らは、海外の研究を参照しながらダイナフレクトの測定値と多層弾性論の整合性を中心に研究を進めてきた。まだ不十分な点も多いが一応の成果が得られたのでここに報告するものである。

2. ダイナフレクトによるたわみ測定法

ダイナフレクトは、図-1 に示すように 2 輪を通して舗装に載荷する動荷重発生装置、たわみ検出のためのセンサ ($S_1 \sim S_6$) と、これらの制御装置および測定装置とから構成されている。

動荷重は、被けん引車の自重 750 kgf を中心とした振幅 225 kgf、振動数 8 Hz の正弦波で与えられ、2 つの剛性車輪を通じて舗装に伝達される。センサは、車輪を

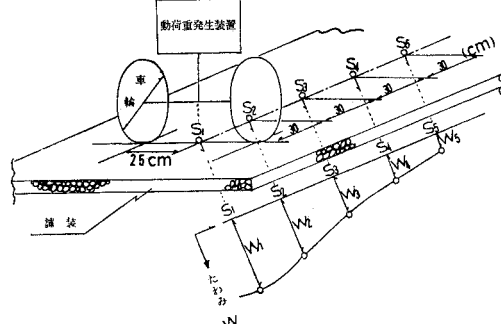


図-1 ダイナフレクトによる測定法の概要

* 正会員 東京都土木技術研究所技術部長

** 正会員 工博 日本大学助教授 理工学部

*** 正会員 東京都第一街路整備事務所

結ぶ線分の垂直二等分線上に 30 cm 間隔で 5 つ配置されており、これらが動荷重によって生ずる振動速度を検出し、さらに制御・測定装置がこの振動速度をたわみ量に変換する。

ダイナフレクトによるたわみ測定法の概要は以上のとおりである。序論で述べたように、ダイナフレクトには

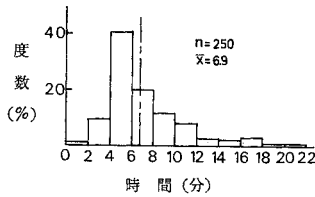


図-2 作業時間の分布図

安全、迅速かつ再現性のある正確な測定が期待されている。安全性については測定が制御車内にある技術者のワンマンコントロールなので問題は無い。迅速性についてみると、都内の道路の測定例では図-2のように1回平均約7分であるが、操作に慣れれば2~3分と思われるのでほぼ満足できるものといえよう。また、再現性についても、ベンケルマンビームに比べダイナフレクトが優れているとの報告がある⁵⁾。

3. 荷重の検討

多層弾性論においては、一般に交通荷重を円形等分布の静的載荷と仮定して解析する。これに対し、ダイナフレクトによるたわみ測定の載荷は動的であり、荷重の接

表-1 計算上の仮定

	ヤング率	ポアソン比	厚さ
舗装	10 000 kgf/cm ²	0.5	60 cm
路床	300 kgf/cm ²	0.5	半無限

地面も長方形に近く、さらに載荷輪も剛性に近いものである。したがって、ダイナフレクトによる測定値を多層弾性論で解析するには、この載荷条件の相違による影響を検討しておく必要がある。そこで、NASTRAN (NASA Structural Analysis...IBM 所属)、BISAR (東京都土木技術研究所所属) を用いて、表-1 に示す仮定と次のような載荷条件のもとにたわみ量 ($W_1 \sim W_5$) を計算した。なお、BISAR は一般に広く利用されているプログラムであるが円形等分布荷重以外には適用できないため、有限要素法を用いた解法で各種の荷重に適用できる NASTRAN をここでは併用したことを付け加えておく。

- ① 450 kgf の集中荷重 (NASTRAN)
- ② 450 kgf, 半径 6 cm の円形剛性荷重 (NASTRAN)
- ③ 450 kgf, 半径 6 cm の円形たわみ性荷重 (BISAR)

なお、ここで荷重の 450 kgf, 載荷半径の 6 cm は、佐藤・福手の研究¹⁾を参考にして決定したものである。

計算結果は、表-2 に示すとおり載荷条件の相違はダイナフレクトのたわみ量にほとんど影響しない。この計

表-2 たわみ量の計算結果 ($\times 10^{-2}$ mm)

荷重条件	たわみ W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
① 集中荷重	1.917	1.651	1.302	0.979	0.694
② 剛性荷重	1.915	1.650	1.300	0.978	0.694
③ たわみ性荷重	1.913	1.650	1.301	0.978	0.693

算例だけで十分とはいえないが、表-2 の精度から判断すれば表-1 の条件を変えてもほぼ同様の結果が得られるものと推定できる。すなわち、ダイナフレクトの長方形剛性荷重は、円形たわみ性荷重に変換しても大きな影響はないと判断できる。

動的載荷の影響については、計算方法や荷重のとり方に問題がありここに報告するほどの成果が得られなかった。今後の研究課題としたい。

4. ヤング率の推定

多層弾性論では、舗装を構成する各層の力学的性質をヤング率とポアソン比で表現する。両者のうち、特にヤング率が各種の計算値に大きな影響を与えることはいうまでもない。そのため、ここ 10 数年来、ヤング率の決定方法が多くの研究者によって検討されてきた。

ダイナフレクトは、5 点のたわみを同時に測定できることから、これを利用したヤング率の推定法がいくつか提案されている。本章ではそのうち、Michalak ら²⁾と Swift³⁾ の方法の妥当性とその応用を、実測値と対比させながら検討する。

(1) Michalak らの方法

これは、各層の相対的な剛度 (Stiffness Coefficient, 以下剛性係数 S とする) を仮定してたわみを計算し、ダイナフレクトによる 5 つの実測値との誤差が最小になるような剛性係数 S を、繰り返し計算を行って決定する方法である²⁾。数多くの計算が必要になるため Michalak らは SCIMP (Stiffness Coefficient in Multilayer Pavement の略) というプログラムを発表している。このプログラムを利用すれば、ダイナフレクトの測定値をインプットすることにより、各層の剛性係数 $S_1 \sim S_n$ の値を求めることができる。しかし、SCIMP の実用性について検証がほとんどないこと、剛性係数とヤング率の関係が明らかにされていないことなどから、わが国ではまだ広く利用されるには至っていない。

著者らは、ダイナフレクトの測定値から各層のヤング率が推定できれば、舗装の構造解析が便利となることから試験舗装を通して SCIMP とヤング率の検討を行った。

試験舗装の構造は図-3 に示す 5 種類である。砂層から順に舗設しながら各層の境界でダイナフレクトによ

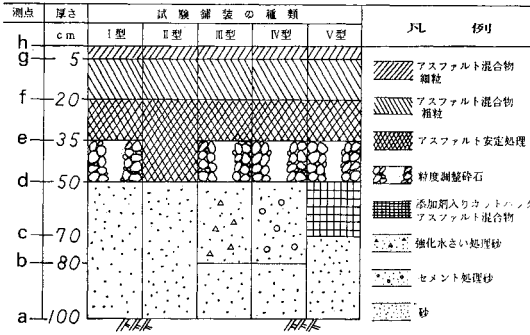


図-3 試験舗装の構造

表-3 試験舗装における各材料のヤング率
(単位: kgf/cm²)

アスファルト混合物細粒	アスファルト混合物粗粒	アスファルト安定処理	粒度調整碎石
110 000 ~130 000 (120 000)	40 000 ~60 000 (50 000)	23 000 ~26 000 (24 000)	2 500~3 900 (3 200)
強化水さい処理砂	セメント処理砂	砂	地盤
2 000	5 500	740~980 (870)	200~400 (300)

注) カットバックアスファルトは測定不能であった。

りたわみを測定し、さらにはかけやによる板たたき法でP波を測定し、これからヤング率を算出する弾性波試験を実施して⁶⁾ヤング率(表-3)を求めた。

SCIMP による剛性係数の計算では、砂層の剛性係数を 0.30~0.70 まで 0.05 刻みにとってそれぞれに対応する上層の剛性係数を求め、次の段階では砂層およびその上層の剛性係数を既知としてさらにその上の層の剛性係数を求めるという方法を順次繰り返した。その結果、砂層の剛性係数 9 種類に対応した各層の剛性係数が求められたが、このうち、粒度調整碎石層の剛性係数がアスファルト混合物層の剛性係数に比較して異常に大きくな

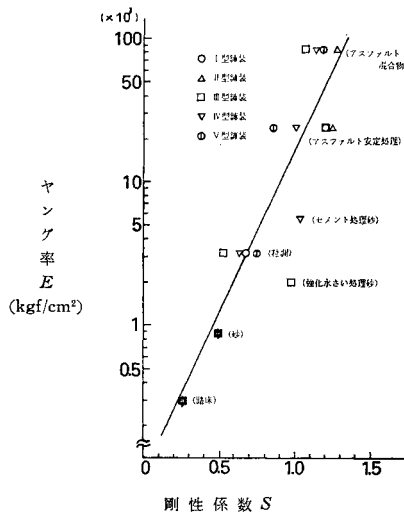


図-4 剛性係数とヤング率の関係

ったり、反対に砂層の剛性係数より小さくなるなどの矛盾が最も少ないものは、砂の剛性係数が 0.50 の場合であった。

この値に対応した各層の剛性係数と、弾性波試験より求めたヤング率の関係を 図-4 に示す。なお、剛性係数の計算ではアスファルト混合物層を一層としたので、ヤング率は細粒と粗粒の算術平均値を用いてプロットしてある。図-4 における相関係数は 0.93、回帰式は次のとおりである。

$$\log E = 2.3 S + 1.9 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、E: ヤング率 (kgf/cm²)

S: 剛性係数

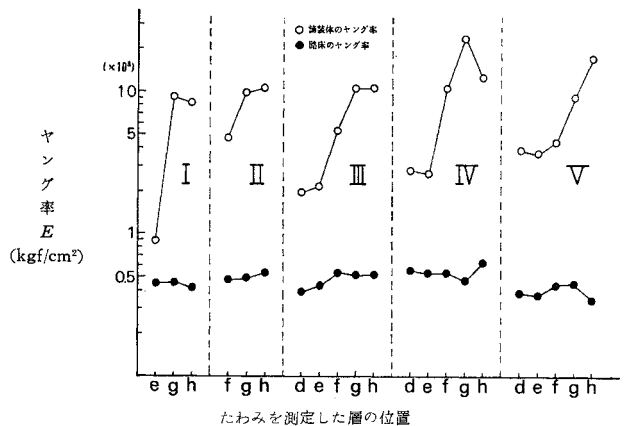
砂層の剛性係数を 0.5 としたと、図-4 の相関にかなりばらつきがあることなど、今後さらに検討を加える必要はあるが、ダイナフレクトの測定値から SCIMP を利用して剛性係数を求め、式 (1) よりヤング率に変換することが一応可能となった。

(2) Swift の方法

Swift は、ダイナフレクトから得られる 5 つのたわみ量を用いて舗装と路床のヤング率を求める図解法を提案している^{4), 7)}。これは測定より得られるたわみ量が 2 層弾性論で計算されるたわみ量と一致するという前提のもとにヤング率を逆算する方法で、舗装のヤング率は路盤、表層などが一体となったものとして算出される。

図-5 は、試験舗装におけるダイナフレクトの測定値から、Swift の図解法により求めた舗装と路床のヤング率を示したものである。なお、図の横軸の記号はたわみを測定した層の位置を示す。

図から、路床のヤング率がほぼ一定であること、そして当然のことではあるが層の位置が高くなるほど舗装のヤング率が大きくなるのがわかる。以下、Swift の図解法により求めたヤング率の妥当性について検討する。



(I, II, ...V, d, e...h 等の記号は 図-III の測定位置に対応する)

図-5 Swift の図解法より求めたヤング率

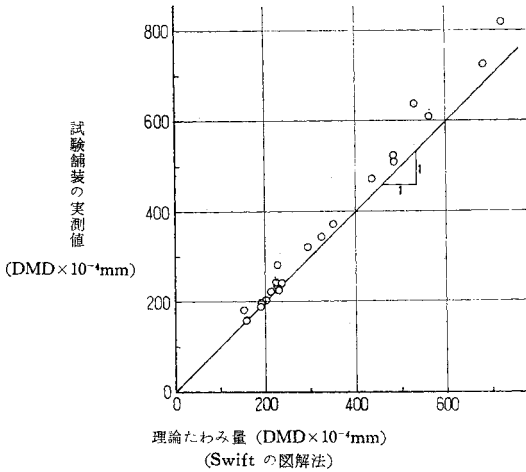


図-6 理論たわみ量と実測たわみ量の比較

図-6 は、ダイナフレクトの荷重と載荷半径をそれぞれ 450 kgf、6 cm、ポアソン比を 0.5 と仮定し、ヤング率は図-5 の値を使用して BISAR により計算した最大たわみ（理論値）と実測値の最大たわみ（DMD）を比較したものである。実測値の方が理論値より若干大きめではあるものの両者はほぼ一致しているといえる。これは、Swift の図解法の精度がよいこと、さらにはその前提となっているもの、すなわちダイナフレクトにより測定される値が 2 層弾性論の計算値と一致するという仮定の妥当性を示すものである。

Swift の図解法により求めた路床のヤング率は 300～600 kgf/cm² の範囲にあり、先に弾性波試験で得た値 200～400 kgf/cm² と比較するとほぼ 1.5 倍になるが、現時点で得られる各種推定法では研究者によって 5 倍ぐらいの相違があることを考慮すると⁹⁾、この程度の差はやむを得ないものといえる。舗装のヤング率に関しては、Swift 法では舗装を一体としたヤング率、弾

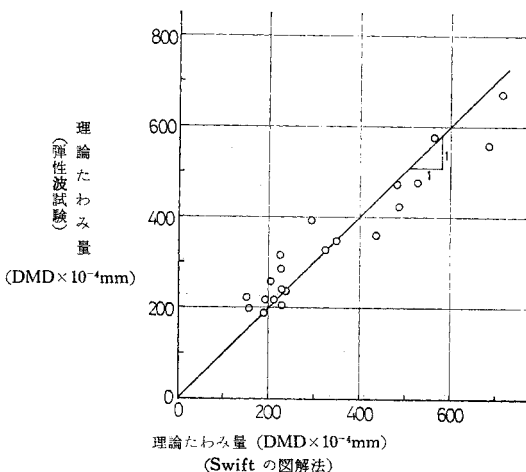


図-7 理論たわみ量の比較

性波試験では各層のヤング率が得られているので直接比較することはできない。そこで、荷重、ポアソン比などの仮定は図-6 と同様にし、Swift 法のヤング率、弾性波試験のヤング率をそれぞれ使用して BISAR で計算した最大たわみにより両者を比較することにした。図-7 に計算結果を示す。図から明らかなように両者の相関はよく、Swift 法、弾性波試験ともほぼ同程度のヤング率を得ていたと推定できる。

(3) ダイナフレクトと多層弾性論

前節までの考察によって、Michalak 法、Swift 法、弾性波試験からそれぞれ得られたヤング率の間には、かなりよい相関のあることが明らかとなった。前 2 者の方法では、ダイナフレクトによる測定値と多層弾性論による計算値は一致するという大きな仮定が入っているが、その仮定のもとに求められたヤング率が弾性波試験によるヤング率と大差がないということは、仮定が妥当であったことを意味するものであろう。すなわち、ダイナフレクトも多層弾性論も舗装への利用法はまだ確立されたものではないが、両者が結びついたことによりそれぞれの特徴と過去の研究実績を互いに利用できる可能性が強くなったといえる。

5. 舗装構造の評価法

ダイナフレクトでは 5 点のたわみが同時に測定できることから、これらの値を単独にあるいは種々に組み合わせた指数 (Index) が Peterson⁵⁾、Vaswani⁶⁾ らによっていくつか提案され、舗装構造の評価に用いられている。このうち、いかなる指数が舗装構造を的確に評価するかは、今後の研究によって判定されるであろうが、ここでは、ダイナフレクトと多層弾性論の関係という立場から各種の指数を考察してみたい。

(1) 指数の種類

現在までに提案された代表的な指数と図-8 のたわみ ($W_1 \sim W_5$) との関係は以下に示すとおりである。

- ① DMD (Dynalect Maximum Deflection)⁵⁾
DMD = W_1 (2)
- ② SCI (Surface Curvature Index)⁵⁾
SCI = $W_1 - W_2$ (3)

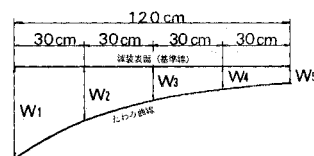


図-8 ダイナフレクトの測定位置

- ③ SCI (Base Curvature Index)⁵⁾
 $BCI = W_4 - W_5 \dots\dots\dots (4)$
- ④ S (Spreadability)⁶⁾
 $S = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 / 5 \dots\dots\dots (5)$
- ⑤ A (Area)⁶⁾
 $A = (\text{基準線とたわみ曲線で囲む面積}) / 2 \dots\dots (6)$
- ⑥ R
 $R = W_1 - W_5 \dots\dots\dots (7)$

このうち、DMD は最大たわみで、SCI、BCI はそれぞれ表層と下部層の特性を示すものといわれている。また、S、A、R は、計算式のようにたわみ曲線全体を指数化して、構造を評価しようとするものである。

(2) 理論と実測による検討

前節に述べた 6 種類の指数は、それぞれ異なった値を有するが互いに独立とは限らない。2 つの指数の間に強い相関があれば研究の初期の段階では一方の因子を採用するだけで済むはずである。この点を確認するため、理論と実測の両面から各指数間の相関を検討した。

まず理論面では、舗装厚、ヤング率を表-4 に、荷重条件やポアソン比は前節までと同様に仮定して、すべての組合せ 168 種につき BISAR で $W_1 \sim W_5$ を求め、前節 ①~⑥ により各指数を計算し、さらに各指数間の相関を検討した。相関の一例を図-9 に示す。この場合、A と DMD の相関係数は 0.97 であり、両者はほ

表-4 理論計算上の仮定

舗装厚 (cm)	20	40	60	80
舗装体のヤング率 (kgf/cm ²)	1 000	5 000	10 000	
	20 000	50 000	100 000	
路床のヤング率 (kgf/cm ²)	100	300	500	1 000
	3 000	5 000	10 000	

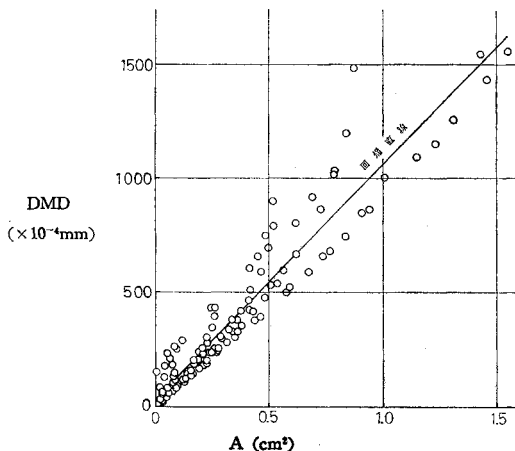


図-9 A と DMD の関係 (理論値)

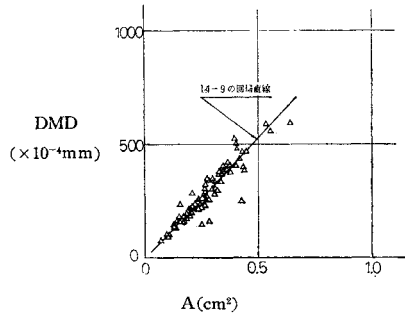


図-10 A と DMD の関係 (実測値)

表-5 各指数間の相関係数

理論 実測	DMD	SCI	BCI	S	A	R	σ_z	ϵ_t
DMD	—	0.80	0.95	0.10	0.97	0.93	0.03	0.14
SCI	0.71	—	0.72	-0.31	0.65	0.94	-0.35	-0.16
BCI	0.89	0.70	—	-0.09	0.93	0.90	0.03	0.21
S	-0.19	+0.61	+0.43	—	0.24	-0.13	-0.87	0.18
A	0.93	0.39	0.55	-0.02	—	0.83	0.17	-0.24
R	0.85	0.51	0.50	-0.34	0.27	—	-0.20	0.01

んど同一の意味をもっているといえよう。

実測は、環状 7 号線の 117 点について行い、理論の場合と同様の手順で各指数間の相関を検討した。図-10 にその一例を示す。A と DMD の関係をプロットした点に理論値で求めた回帰線の周囲に集中している。これは、ダイナフレクトの測定値と多層弾性論による理論値がほとんど一致することを間接的に証明しているものであろう。

各指数間の相関係数をまとめて表-5 に示す。表で対角線の右半分は理論によるもの、左半分は実測によるものである。なお、ここで理論値のみではあるが、路床上面に作用する垂直応力 σ_z と舗装下面の引張ひずみ ϵ_t も検討項目に加えた。両者の対応する相関係数を比較すれば次のような考察が得られる。

① 理論値で相関の高いものは実測値でも同様である。一般に後者の相関係数は前者のそれよりも小さい。これは、環状 7 号線の舗装に厚いものが多くたわみ量が全体的に小さいこと、実測には誤差が伴うなどの原因によるものと思われる。

② DMD は、SCI、BCI、A、R と相関が高い。したがって以上の指数それぞれの特徴を利用した研究は将来の課題として、当面は DMD でこれらを代表させることができる。

③ S は、DMD との相関が低く、路床上面に作用する垂直応力 σ_z との相関が高い。 σ_z を基準とする解析には S の利用が有効と思われる。

④ 舗装下面の引張ひずみ ϵ_t はいずれの指数とも相関があまりない。

以上の考察をまとめると、ダイナフレクトと多層弾性

論の解析においては、たわみを基準とするならば DMD 垂直応力ならば S を中心に進めるのが効果的であると推定できる。

6. ベンケルマンビームたわみ量と DMD

従来、舗装のたわみ測定はベンケルマンビームによって行われてきておりデータの蓄積も多い。この方法によるたわみ量 d_B とダイナフレクトの DMD との関係が得られれば、これまでのベンケルマンビームのデータを利用できるため、その効果は計り知れないものがある。そこで、図-3 の試験舗装にあたってはダイナフレクトと同じ位置でベンケルマンビームによるたわみ測定も行った。また測定値は阿部の補正曲線¹⁰⁾を用いて前後脚以下の影響した。

図-11 は、以上のようにして求めた d_B と DMD の関係をプロットしたものである。両者の相関は高く ($r=0.91$) 次のような関係式が得られた。

$$d_B \approx 15 \text{ DMD} \dots\dots\dots (8)$$

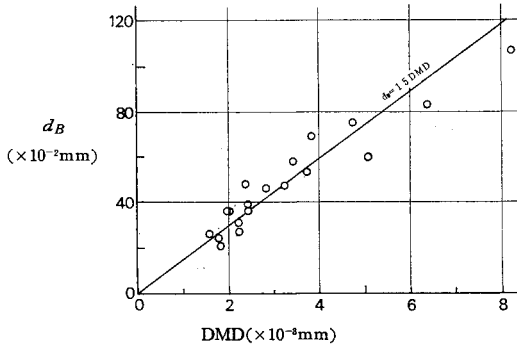


図-11 DMD (ダイナフレクト) と d_B (ベンケルマン) の関係

ベンケルマンビームの測定に用いた輪荷重は 5000 kgf, 接地圧は 6.5 kgf/cm² である。これまでも d_B と DMD の関係式はいくつか発表されているが^{11, 6)}、それらをまとめると d_B は DMD の 20~40 倍の範囲にあり、著者らの求めた 15 倍というのはかなり小さな値となっている。輪荷重, 接地圧, 舗装構造などによって変化すると考えられる関係式であるが、重要な問題なので今後さらに詳しく検討していく予定である。

7. 結 論

本研究で得られた成果は以下のとおりである。

(1) ダイナフレクトの長方形剛性載荷は、円形たわみ性載荷と考えても理論的たわみ量にはほとんど差がない。

(2) 舗装各層のヤング率 E (kgf/cm²) と SCIMP の剛性係数 S の間には次の関係式がほぼ成立する。

$$\log E = 2.3 S + 1.9$$

(3) Swift の図解法で求めたヤング率は弾性波試験より得られたヤング率とほぼ近い値であったと推定できる。

(4) DMD は, SCI, BCI, A, R などと相関が高く、当面はこれらの指数の代表値として DMD を採用することができる。

(5) S は, 路床上面の垂直応力と相関が高く、今後の構造解析に応用できる可能性がある。

(6) ベンケルマンビームによるたわみ量 d_B とダイナフレクトの DMD の間に次の関係式が得られた。

$$d_B \approx 15 \text{ DMD}$$

以上の研究を通じて、重交通街路舗装においてはダイナフレクトの測定値と多層弾性論による計算値の整合性がほぼ明らかとなった。これが最も重要な結論といえよう。

8. あとがき

本研究はこれまで多層弾性論を中心とした基礎的な部分の検討に終始してきたが、ダイナフレクトは本来維持修繕への応用を目的として開発されたものである。今後は舗装温度による測定値の変化, 舗装の供用性調査, オーバーレイの設計など現実の課題に向けて研究を進めていく予定である。

本研究に着手してからすでに5年の歳月が過ぎた。この間、実測と測定値の解析にご協力下さった東京都の関係各位、および日本大学理工学部道路研究室の諸君に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 佐藤・福手: ダイナフレクトによる 空港アスファルト舗装強度評価とかさ上げ厚設計, 土木学会論文報告集, No. 303, 1980年11月.
- 2) 南雲ほか4名: 動的たわみ測定による 舗装構造の評価, 道路事業費調査報告, 建設省土木研究所, 1977年.
- 3) Michalak, C.H. et al.: Determining Stiffness Coefficient and Elastic Moduli of Pavement Material from Dynamic Deflections, Texas Transportation Inst. College Station, 1976.
- 4) Swift, G.: A Graphical Technique for Determining the Elastic Moduli of a Two-layered Structure from Measured Surface Deflections, Texas Transportation Institute, 1972.
- 5) Peterson, G.L.W.: Deflection Analysis of flexible Pavement, Final Report, Utah State Highway Department, 1972.
- 6) Vaswani, N.K.: Determining Moduli of Materials from Deflections, Proc. of ASCE, No. TEI 1977.
- 7) 達下・阿部 (忠): 表面たわみによる舗装構造の解析, 都土木技術年報, 1979年.

- 8) 達下・鈴木・小林・松岡：舗装構造と道路交通振動の低減効果に関する基礎的実験，都土木技術年報，1977年。
- 9) 阿部（頼）：アスファルト舗装構造の合理的設計法に関する研究，土木学会論文報告集，No. 247，1976年。
- 10) 阿部（頼）：ベンケルマンビームによるたわみ測定値の補正に関する理論的研究，土木学会論文報告集，No. 287，1978年。

(1983.6.21・受付)
