

〃 〃 〃 熊谷 茂樹
 〃 〃 〃 上田 正昭

Pavement Management Systems (以下PMSと略す)の導入や合理的なオーバーレイ厚の設計法確立にあたり、舗装の支持力評価が重要な項目となる。現在、種々のためみ測定試験による舗装の支持力評価が実施または研究されているが、舗装のパフォーマンス予測のためには、力学理論に乗った評価法が不可欠である。この要請に答えるためみ測定装置の一つとして、載荷荷重の大きさ、載荷面積、載荷時間等の弾性理論解析に必要な条件が明確なFalling Weight Deflectometer (以下FWDと略す)がある。

美々試験道路は道路の凍上対策工法の体系的な確立をめざして、北海道開発局土木試験所によって計画され、昭和35年度から現地調査が継続して実施されている。今回の調査を行った昭和55年度築造断面は、リフレクションクラックの発生メカニズム、弾性理論設計法の確立、FWDによる舗装の支持力評価法確立、遮水工法の有効性、路床土の違いによる凍結害への影響、歩道舗装の凍上対策工法に関する試験研究を目的としている。

	I	II	III	IV	V	VI	VII	牛歳
75m	125m	100m	100m	100m	100m	100m		
表層 (細粒ヤリツブスコン)	t=4cm		基層 (粗粒アスコン) t=5cm×2					
セメントコンクリート版 t=20cm	上層路盤 t=30cm (切込み砂利 最大粒径 40mm)		アスファルト安定処理 t=6cm×2					
上層路盤 (切込み砂利 最大粒径 40mm) t=30cm	セメントコンクリート 路盤 t=20cm		下層路盤 (切込み砂利 最大粒径 40mm) t=55cm					
t=25cm	t=20cm							
下層路盤 (切込み砂利 最大粒径 80mm)								
凍上性路床土 (弱性土)	赤泥		凍上性 路床土		赤泥		凍上性路床土 (最大粒径 80mm)	
					t=25cm ビニールシート (t=0.4mm)			
					凍上性路床土 (弱性土)			

— 628 —

3. フォーリング ウェイト デフレクトメーター

FWDは、舗装の支持力評価を行うために、落下荷重によって生じる舗装の動的たわみを電気的に計測するたわみ測定機であり、昭和59年北海道工業大学が購入した装置を今回の調査で使用した。

試験機の特徴は次のとおりである。①おもりの落下高を調節することによって最大5tonまで任意の荷重を得ることができ、その載荷面積(直径30cmまたは45cmの円)、載荷時間が明確である。②落下荷重による路面のたわみは、3個の速度計(載荷点直下及び隔れた任意の2点)によって検出され、測定データは、マイクロコンピュータにデジタル量として記憶される。③移動はジープによって牽引し、測定は車内からリモートコントロールできるため操作が簡単で測定時間も短い。

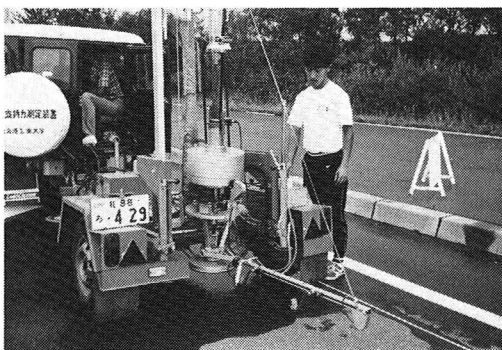


写真-1 FWDによる舗装のたわみ測定試験

4. 試験の標準化

4-1 測定位置

路肩の影響と車輪通過位置の分布によって、交通荷重による舗装の損傷は外側わだち部で生じやすいことが一般に経験されている。そこで、アスファルト舗装の支持力評価は外側わだちで行うのが適当であるかを検討するために、試験道路の第Ⅱ断面において横断方向に50cm間隔でたわみ測定を行った結果が図-2である。支持力は路肩で最も小さく、道路中央に進むに従って増大しているが、縦継目付近のクラックによって道路内側端部でも支持力低下がみられる。これらの部分を交通荷重が通過する確率はきわめて小さいことから、支持力評価から除外すると、残りの部分の支持力の変化は小さいため、舗装の破壊は、通過輪数分布に大きく左右されると考えられる。したがって、わだち部のうち、たわみ量の大きい外側わだち部で支持力評価を行うこととする。

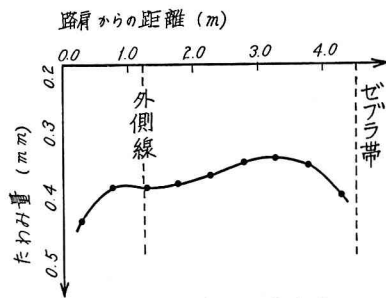


図-2 たわみ量の横断方向分布

4-2 載荷荷重の大きさとたわみ量

FWDは、おもりの落下高を調節することによって載荷荷重の大きさを変えることができるので、測定たわみ量は、載荷荷重の大きさ L の関数 $d(L)$ で表わされる。荷重の大きさと測定たわみ量の関係を考える場合、路床を線形弾性体とみなせるか非線形体と考えるかが問題となる。たわみ量 $d(L)$ を載荷荷重5ton当りのたわみ量 $d(5t)$ に換算して表わしておく、一般的な値として他のたわみ量と比較可能となるばかりでなく、輪荷重5tonや5ton換算輪数を用いて設計や予測を行うときに便利である。

路床を線形弾性体とみなした場合、5ton当りのたわみ量は次式で表わされる。

$$d(5t) = d(L) \cdot \frac{5}{L} \quad \text{-----(1)}$$

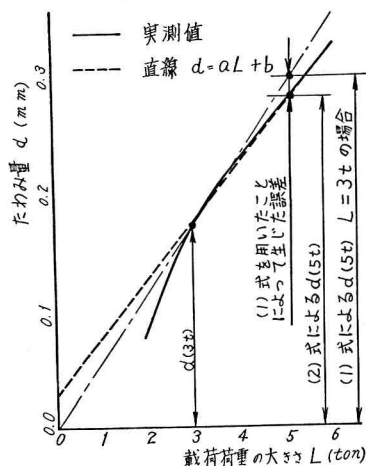


図-3 載荷荷重の大きさとたわみ量

実際に、試験道路の各断面において、載荷荷重の大きさ L と測定たわみ量 $d(L)$ の関係を調べた一例を図-3に示す。実験によると、非線形性を示しているが、各断面とも図-3と同様に荷重が3~5 tonの範囲で、ほぼ直線性を示し、

$$d(L) = aL + b \quad \text{----- (2)}$$

ここで、 a, b は各断面によって異なる定数

で近似することができる。 $d(5t)$ は、

$$d(5t) = 5a + b \quad \text{----- (3)}$$

で表わされ、(1)式を用いることによって生じた誤差による誤差率 $\varepsilon(\%)$ は、

$$\varepsilon = \left\{ \frac{5d(L)}{L(5a+b)} - 1 \right\} \times 100 \quad \text{----- (4)}$$

となる。

試験道路の各断面について、 ε を計算したのが表-1である。 $\varepsilon = 5\%$ まで許すとする、載荷荷重の大きさ L が4~5 tonの範囲では(1)式を用いて $d(5t)$ を算出することができる。 L が3~4 tonの場合は、荷重とたわみ量の関係を調べて、 $d(5t)$ を算出する必要がある。しかし、一般にはほぼ4~5 tonの荷重で測定できるので、支障はない。

表-1 比例計算による5t当りのたわみ量 $d(5t)$ の誤差率 $\varepsilon(\%)$

断面 荷重	I	II	III	IV	V	VI	VII
2 ton	21.9	3.5	21.2	18.2	11.1	0.6	9.8
3 ton	9.7	1.7	9.4	8.2	4.8	0.3	4.5
4 ton	3.4	0.8	3.5	3.2	1.8	0.2	1.6

4-3 代表たわみ量と測定回数

たわみ測定による舗装の支持力評価を行う場合、まず、評価を行う単位となる区間を設定し、この区間の代表たわみ量を求めなければならない。たわみ測定区間の設定は、単に距離によって行うべきでなく、舗装構成や路床土の種類によって決定されるべきであろう。舗装構成や路床土の種類が同一であっても、各舗装構成材料は、一般に均質でなく、特に路床土の不均一性に起因して測定たわみ量はあるバラツキを示す。

図-4は、試験道路の第VI断面において、1m間隔で100地点のたわみ量を測定したときの実測度数の分布図である。正規分布の理論曲線を書き込んだところ、実測たわみ量は、正規分布をなすように思われる。そこで、統計学の適合度検定 (χ^2 -検定) によって検討したところ、有意水準0.05で、VI断面における測定たわみ量の母集団は、正規分布をなすことがわかった。

今、図-5に示す正規分布モデルによって、たわみ測定区間の代表たわみ量を考えてみる。設計寿命に達したとき、舗装が、ちょうど破壊するような支持力を持つ地点のたわみ量をこの区間の代表たわみ量とする。外側わだち部でたわみ測定を行ったとき、代表たわみ量

$$Da = \bar{D} + k\sigma \quad \text{----- (5)}$$

によって設計を行うと、たわみ量 Da の支持力を持つ地点と比べ支持力不足の地点が、外側わだち部に $P\%$ 存在することになる。ここで、 P と k の関係は正規分布表より求め、表-2に示す。また、 $\bar{D}, \sigma$ は、たわみ量の母平均、母標準偏

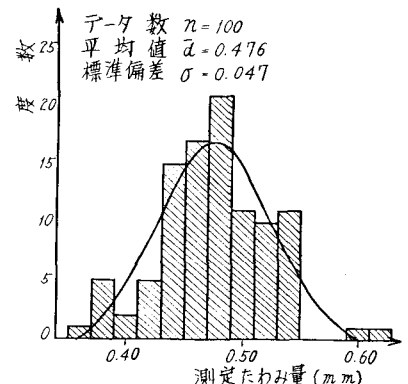


図-4 VI断面における測定たわみ量の度数分布

差である。

次に、平均たわみ量 $\bar{D}$ を決定するために必要な測定地点の数を検討した。必要なサンプリング数 n は、次式で表わされる。

$$n \geq \frac{Z_{\alpha}^2 C_d^2}{\epsilon^2} \quad \text{---- (6)}$$

ここで、 $C_d = \sigma / \bar{D}$: 変動係数

$$\epsilon = |\bar{d} - \bar{D}| / \bar{D} : \text{誤差率}$$

Z_{α} : 信頼度係数(正規分布表より求める)

$\bar{D}, \sigma$: たわみ測定区間におけるたわみ量の母平均, 母標準偏差(標本調査より推定する)

$\bar{d}$: n 個の地点の実測たわみ量 d の平均値

危険率 $\alpha = 0.05$ とし、誤差率を $\epsilon = 0.05$ まで許すとして、式(6)によつて検討したところ、Ⅵ断面における平均たわみ量を推定するには、16地点以上のたわみ量を測定する必要があることがわかったので、他の調査でも20地点の測定を行っている。こうしたデータが蓄積されれば、 n, σ, P の目安を得ることができると考えられる。

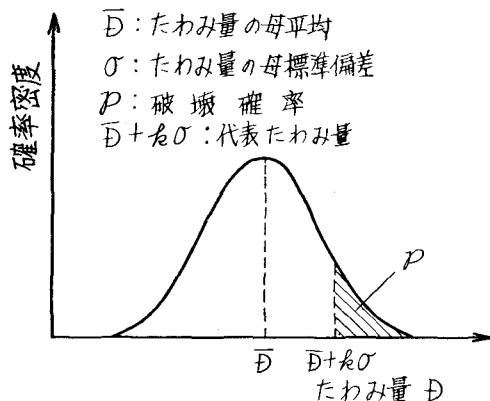


図-5 たわみ測定区間におけるたわみ量の確率分布モデル

表-2 P と k の関係

破壊確率 P (%)	k
5	1.64
10	1.28
15	1.04
16	1.00
20	0.84

5. 層の変形係数による支持力評価

既設舗装の理論解析を行うにあつて、アスファルト混合物の変形係数だけでなく、路盤、路床の各構成材料の変形係数を非破壊試験によつて推定できれば便利である。ここでは、FWDによるたわみ測定データを基に、舗装を構成する各層の変形係数を算出する方法について述べる。

図-1に示した試験道路の各断面において、融解期(5月)にたわみ測定を行い、融解期の各断面の支持力を調べた。このうち、Ⅵ断面を例にして、路盤、路床の変形係数

表-3 混合物の stiffness 決定に必要なデータ

	表層	中間層・基層	アス処理層
アスファルト量 (%)	6.5	4.5	4.0
空けき率 (%)	3.3	4.8	9.1
針入度 (1/10 mm)	90	90	90
軟化点 (°C)	46	46	46
温度 (°C)	11.8	12.4	12.7
載荷時間 (Sec)	0.03	0.03	0.03

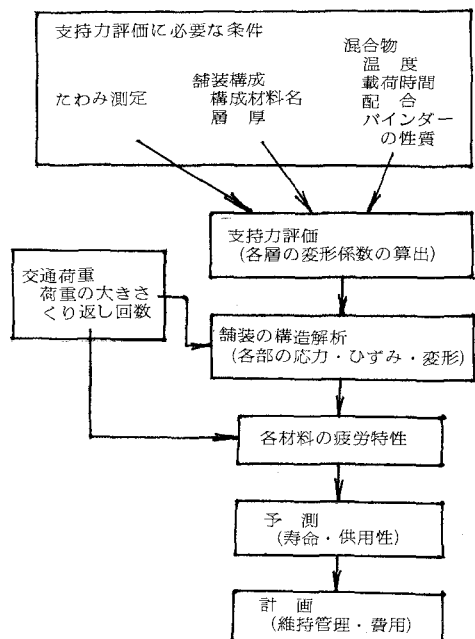


図-6 FWDによる舗装の支持力評価と舗装維持管理計画への利用

の算出方法を説明する。表-3は、Ⅵ断面のアスファルト混合物のスチフネスの決定に必要なデータである。表より、骨材体積率 C_v 、バインダーのスチフネス S_b を求め、PER ULLIDTZIによる混合物のスチフネスの計算式¹⁾

$$E_1 = S_b \left(1 + \frac{2.5}{n} \frac{C_v}{1 - C_v} \right)^n$$

----- (7)

ここで

$$n = 0.83 \times \log_{10} \left(\frac{4 \times 10^4}{S_b} \right)$$

より、表層のスチフネス $E_{1a} = 4265 \text{ MPa}$
中間層・基層のスチフネス $E_{1b} = 6980 \text{ MPa}$, $E_{1c} = 4353 \text{ MPa}$ を算出した。ただし、 $1 \text{ MPa} = 0.2 \text{ Kg/cm}^2$ である。

層構造解析に用いた弾性理論プログラム BISAR (Shell Oil Co.) は、円形等分布荷重をうける多層弾性体の任意の位置の応力、ひずみ、変形を計算することができる。Ⅵ断面の調査におけるBISARへの入力データは、FWDの載荷条件、たわみセンサーの位置、Ⅵ断面の舗装構成、及び算出したアスファルト混合物による各舗装構成層のスチフネスにより、表-4のようになる。ここで、粒状材路盤、路床土の変形係数 E_2 、 E_3 は未知数であるため、 E_2 を500~3000 Kg/cm^2 、 E_3 を300~1000 Kg/cm^2 の範囲で変化させて、載荷面中心及び載荷面中心から75cm離れた箇所の理論たわみ量 D_0 、 D_2 をそれぞれ求め、図-7に示すノモグラムを作成した。表-5は、Ⅵ断面のたわみ測定試験結果をとりまとめたものである。測定たわみ量の平均値は、 $\bar{D}_0 = 0.302 \text{ mm}$ 、 $\bar{D}_2 = 0.196 \text{ mm}$ である。作成したノモグラムより、逆に $E_2 = 2800 \text{ Kg/cm}^2$ 、 $E_3 = 700 \text{ Kg/cm}^2$ であることがわかった。

表-4 BISARへの入力データ

輪荷重の大きさ	半径	$P = 5000 \text{ kgf}$	$r = 15 \text{ cm}$
輪荷重の位置	$X = 0.0 \text{ cm}$	$Y = 0.0 \text{ cm}$	
層の数	$n = 5$		
各層間の摩擦	完全粘着		
各層の弾性係数, ポアソン比, 厚さ			
第1層	$E_{1a} = 43500 \text{ kg/cm}^2$	$\nu_{1a} = 0.35$	$T_{1a} = 4 \text{ cm}$
第2層	$E_{1b} = 71200 \text{ kg/cm}^2$	$\nu_{1b} = 0.35$	$T_{1b} = 10 \text{ cm}$
第3層	$E_{1c} = 44400 \text{ kg/cm}^2$	$\nu_{1c} = 0.35$	$T_{1c} = 12 \text{ cm}$
第4層	$E_2 = \text{未知数}$	$\nu_{12} = 0.40$	$T_2 = 55 \text{ cm}$
第5層	$E_3 = \text{未知数}$	$\nu_{13} = 0.50$	$T_3 = \infty$
計算の対称とする点の位置			
$X_1 = 0.0 \text{ cm}$	$Y_1 = 0.0 \text{ cm}$	$Z_1 = 0.0 \text{ cm}$	
$X_2 = 30.0 \text{ cm}$	$Y_2 = 0.0 \text{ cm}$	$Z_2 = 0.0 \text{ cm}$	
$X_3 = 75.0 \text{ cm}$	$Y_3 = 0.0 \text{ cm}$	$Z_3 = 0.0 \text{ cm}$	

表-5 たわみ測定データ

Date of measurement	S59. 5/9
Data No.	20
D_0 ヘイキン	$= 0.302$
D_1 ヘイキン	$= 0.259$
D_2 ヘイキン	$= 0.196$
D_0 ヘンサ	$= 0.017$
D_1 ヘンサ	$= 0.015$
D_2 ヘンサ	$= 0.012$

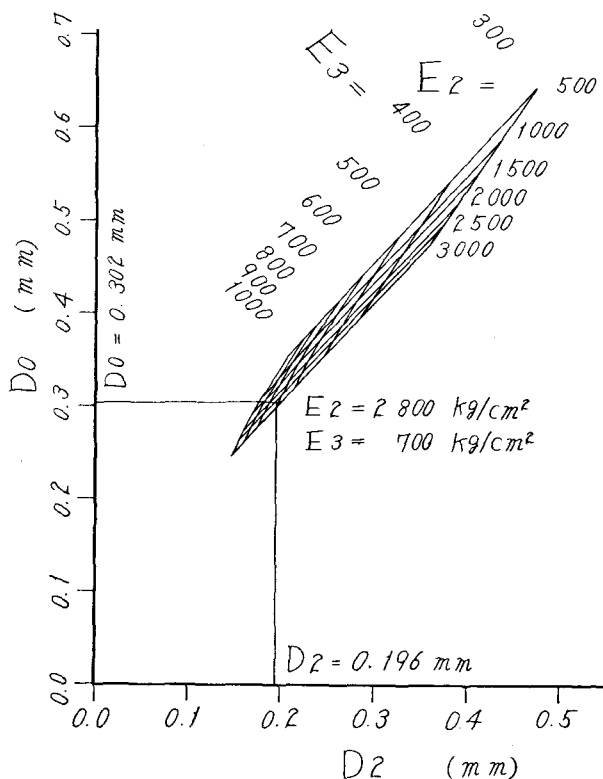


図-7 Ⅵ断面のたわみ測定における
 E_2, E_3 の決定ノモグラム

図-7は、V断面において今回行った調査についてのみ使用できるノモグラムであるため、舗装構成やアスファルト混合物のスチフネスが異なる場合、新たにノモグラムを作成しなければならない。そこでこれらの手続きを行うコンピュータプログラムを作成し、粒状材路盤、路床土の変形係数 E_2 、 E_3 の算出を容易にした。すなわち、表-3のような入力データを用いるアスファルト混合物のスチフネス算出ノモグラム、及び表-4のような入力データを用いる E_2 、 E_3 の決定モノグラムの作図プログラムを作成した。

試験道路の各断面において、融解期(5月)にFWDによるたわみ測定試験を行い、これらのプログラムを用いて、融解期の粒状材路盤、路床土の変形係数 E_2 、 E_3 を算出した。これらの結果から、融解期における粒状材路盤、路床土の変形係数の平均的な値を求め、表-6に示す。同試験道路の各断面で行った埋設載荷板による平板載荷試験²⁾から求めた変形係数と比較して、2~7倍と大きな値となっている。これは、動的載荷荷重を採用しているFWDと静的載荷による平板載荷試験の違いであると考えられる。次に、施工時(11月)のCBR値との関係を調べたところ、FWDによるたわみ測定試験から求めた変形係数 E_d と施工時のCBR値の比が3.6~6.6であった。融解期の変形係数との比較であるためやや小さい比になっていると思われる。

表-6 FWDによるたわみ測定試験より求めた各舗装構成材料の変形係数

材 料 名	E_d (Kg/cm ²) FWDによる たわみ測定試験	E_s (Kg/cm ²) 埋設載荷板によ る平板載荷試験	E_d/E_s	CBR値 施工時の CBR試験	$E_d/$ CBR値
40mm級切込砂利	2 900	840	3.4	70	4.1
凍上性火山灰	730	180	4.0	17	4.3
赤 泥	980	130	7.3	15	6.6
80mm級切込砂利路床土	980	480	2.1	27	3.6

6. 結 論

今回、美々試験道路においてFWDによるたわみ測定試験を実施し、試験方法の標準化と舗装の支持力評価法確立のための基礎的調査を行い、次のような結論を得た。

- (1) たわみ測定試験における適切な測定位置、載荷荷重の大きさ、測定回数などを調査し、PMSやオーバーレイ厚の設計に必要な代表たわみ量の考え方を整理した。
- (2) アスファルト混合物のスチフネス算出プログラムと路盤・路床の変形係数決定ノモグラムの作図プログラムを開発し、これらのプログラムを用いたたわみ測定データに基づく支持力評価を行い、美々試験道路の各舗装構成材料の変形係数を推定することができた。

最後に、本研究に多大な御協力をいただいた北海道工業大学の笠原教授と学生諸氏に深謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) PER ULLIDTZ; A FUNDAMENTAL METHOD FOR PREDICTION OF ROUGHNESS, RUTTING AND CRACKING OF PAVEMENT; AAPT, Vol.48, 1979
- 2) 久保 宏, 菅原照雄; アスファルト舗装における凍上対策工法の力学的評価に関する研究; 土木学会論文報告集, 第297号, 1980年5月