

# HFWDによる舗装弾性係数の推定可能範囲に関する研究

上浦正樹<sup>1</sup>・神田一成<sup>2</sup>・久保宏<sup>3</sup>・武市靖<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 北海学園大学 (〒064-0926 札幌市中央区南26条西11丁目1-1)

<sup>2</sup>正会員 東亜道路工業(株) 北海道支社 (〒065 札幌市東区東雁来5条1丁目1-75)

<sup>3</sup>正会員 工博 北海学園大学 (〒064-0926 札幌市中央区南26条西11丁目1-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 北海学園大学 (〒064-0926 札幌市中央区南26条西11丁目1-1)

FWDのハンディなタイプとして開発されたHFWDは改良型で載荷荷重が従来のFWDの1/5と小さいが運搬が容易であることなど機動性に富んでいる。本研究では舗装構造の異なるアスファルト舗装において同一地点でFWDとHFWDのたわみ測定を行い、逆解析により弾性係数を求めた。この弾性係数の比較によりHFWDの使用可能範囲を定めることとした。その結果、表基層の弾性係数(E1)では十分に相関が認められたが、路盤の弾性係数(E2)では、相関が認められる程度であり、路床の弾性係数(E3)ではほとんど認められないことが明らかとなった。

**Key Words :** FWD, HFWD, elastic modulus, backcalculation, multi-layered elastic theory, standard deviation

## 1. はじめに

すでに敷設されているアスファルト舗装の各層の弾性係数を非破壊で推定する場合の有効な手法として、Falling Weight Deflectometer (FWD と略す) を用いて多層弾性理論に基づく逆解析により推定する方法がある。FWD は、車載タイプで通常状態で衝撃荷重 5 tf でアスファルト舗装の表面のたわみを測定する装置である。この原理に基づきハンディタイプで最大載荷荷重が 500kgf で簡易型の FWD である HFWD が開発された<sup>1)</sup>。

阿部らは FWD とともにこの HFWD を用いて路盤・路床の支持力の評価を行っている<sup>2)</sup>。また上浦らは HFWD を用いて鉄道路盤の強度推定方法の開発<sup>3)</sup>や路床強度の推定法<sup>4)</sup>を提案している。

FWD は測定が困難な狭い箇所や歩道などの段差があって乗り入れが困難なところでは使用できない。また、試験区間などで頻繁に構造評価を要するところで FWD の回送ロスが問題になる場合は、實際上、FWD のたわみ測定が不可能な場合が多い。一方 HFWD は手で持ち運びができるなど機

動性に優れているが、FWD と比較して載荷荷重が 500kgf で 1/10 と小さく、たわみの形状が測定できないため多層弾性理論による逆解析がごく薄い舗装構造を除きほとんど無理なケースが多くみられた。

本研究では、このような問題点に対する方策の一つとして、載荷荷重の重錘を追加して 1 tf の衝撃荷重を発生できるように改造した HFWD を用いることとし、これにより推定する舗装構成層の各弾性係数の妥当性を FWD から逆解析で推定する結果と比較することとした。

そこで一般道路の A 交通から C 交通と D 交通と同等の構造である鉄道コンテナヤード舗装および、簡易舗装に相当する駐車場について、同一地点で FWD と HFWD の舗装表面のたわみ量を測定し、たわみ量と多層弾性理論による逆解析によって推定される各層の弾性係数から、表基層や路盤、路床のうち、どの範囲まで HFWD と FWD が対応しているか、また HFWD の導入が可能な範囲を検討することとした。

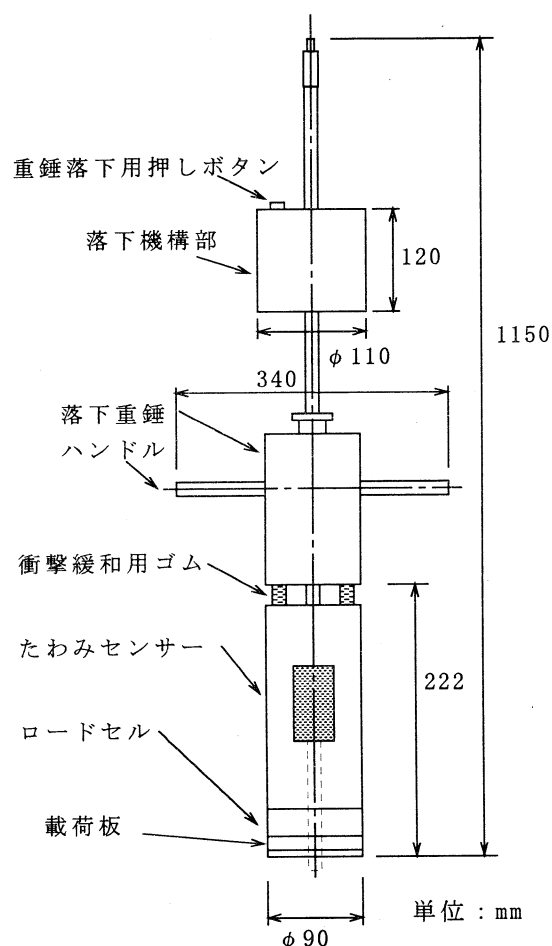


図-1 HFWD の概要

## 2. たわみ量の測定と各層の弾性係数の推定

本研究に使用した FWD はフェニクス社製であり、HFWD はフリージア・マクロス社製である（図-1）。たわみを測定するセンサーは両方ともジオフォンを用いており、その精度はほぼ同等である。この諸元を表-1 に示す。FWD では、たわみ測定用センサーが載荷点直下 20,30,45,60,75,90,150,200 各 cm に設置され、載荷時に 9 点を同時に測定が可能である。一方 HFWD では載荷直下と移動可能なセンサーが一個設けられており、この測定点を載荷点直下 20,30,40,50,60,70,80,90,100 各 cm の 10 点として移動用センサーを移して各点のたわみを測定することとした。なお HFWD のたわみ測定位置の決定にあたり、本研究の測定区間の FWD のたわみ曲線を検討すると、60cm から 75cm 付近が変曲点で、その 3 倍程度まで測定していた。よって HFWD のたわみ曲線の変曲点が 30cm から 40cm であることから最大で 100cm まで測定することとした。

表-1 FWD と HFWD の諸元

|       | FWD                     | HFWD                     |
|-------|-------------------------|--------------------------|
| 移動方式  | 車載型                     | 手で運搬が可能                  |
| 載荷重量  | 1~15tf<br>(今回は 5tonf)   | 1 tf                     |
| 載荷板直径 | 30 cm                   | 9 cm                     |
| 接地圧   | 7.07kgf/cm <sup>2</sup> | 15.72kgf/cm <sup>2</sup> |
| 最大たわみ | 2 mm                    | 2 mm                     |
| 最小たわみ | 0.001mm                 | 0.001mm                  |

表-2 測定区間の舗装のタイプ

|                         | 貨物ヤード           | 市道    | 市道    | 市道 | 駐車           |
|-------------------------|-----------------|-------|-------|----|--------------|
| 舗装構成                    |                 | A     | C     | B  |              |
| AS 層                    | 10              | 5     | 10    | 5  | 3            |
| AS 処理層                  | 10              | 6     | 5     | 6  | 5            |
| 切込碎石                    | 55              | 32    | 65    | 65 | 12           |
| 換算舗装厚 (T <sub>A</sub> ) | 31              | 17    | 30    | 26 | 10           |
| 推定設計 CBR                | 6               | 6     | 8     | 4  | 3            |
| 設計交通区分                  | D 相当            | A     | C     | B  |              |
| 測定番号                    | 1,2,3,4,<br>5,6 | 7,8,9 | 10,11 | 12 | 13,<br>14,15 |
| 路面温度 (°C)               | 25              | 37    | 31    | 31 | 35           |

たわみの測定では、HFWD で測定する箇所の載荷点を路面上にマーキングし、センサー位置の印付けを行ってから HFWD の測定を行う。次にマーキングした点に FWD の載荷板をセットし、印付けをした線上にセンサーを設置するようにした。その結果ほぼ同一箇所のたわみ測定が可能となった。測定期日は平成 10 年 7 月から 8 月の晴れまたは曇りの日に行った。

アスファルト舗装における各層の弾性係数を推定では、拡張ベイズ法による舗装弾性係数の逆解析プログラム<sup>9)</sup>を採用した。また、各弾性係数の初期値は、アスファルト層では 50000kgf/cm<sup>2</sup>、粒調碎石層で 2000kgf/cm<sup>2</sup>、路床は 600kgf/cm<sup>2</sup> とした。

## 3. 測定個所の舗装構成

測定箇所としては、施工実績より舗装構成が明確である札幌市内にある市道と JR 貨物の札幌貨物ターミナルおよび札幌近郊の駐車場を選定した。これらの舗装のタイプは 5 タイプであり、測定点は全部で 15 点である（表-2）。この表で設計 CBR は FWD のたわみに基づく逆解析によって得られた路床の弾性係数の 1/100 から求めた。また設計交通区分は舗装構造から求まる換算舗装厚と設計 CBR から推定した。また貨物ヤード舗装では、道

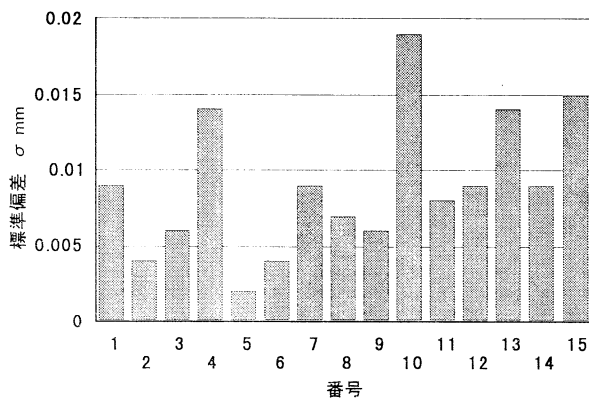


図-2 載荷点直下のたわみ (D0)の標準偏差

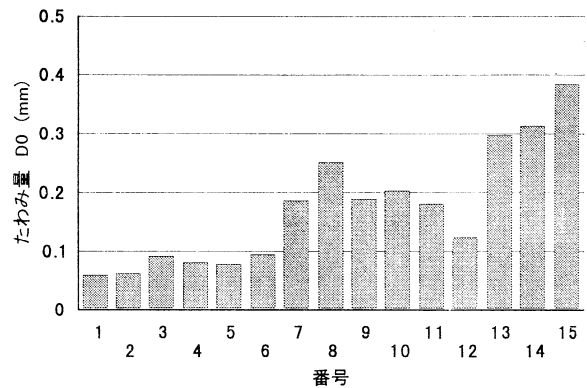


図-5 各測点のたわみ (D0)

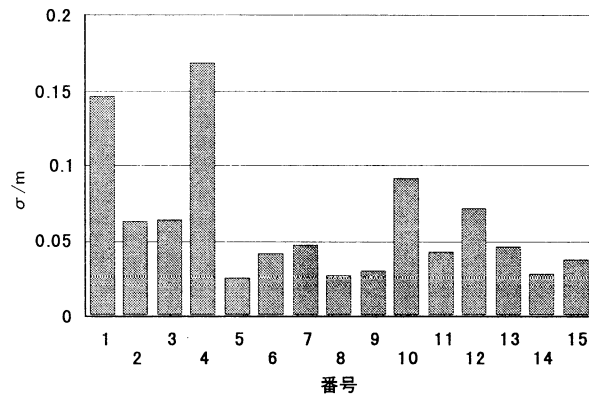


図-3 D0 の標準偏差と平均値の比

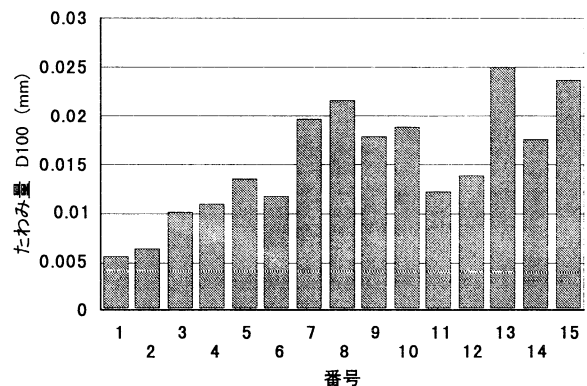


図-6 各測点のたわみ (D100)

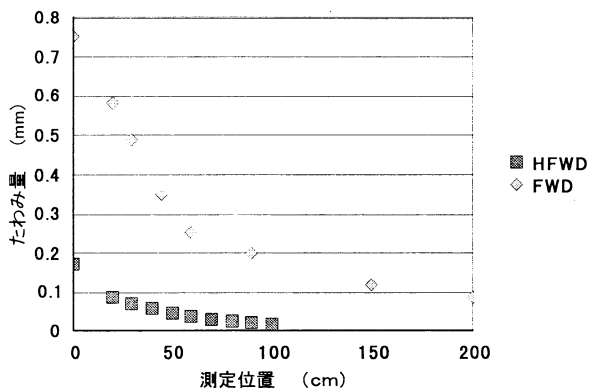


図-4 たわみの測定結果交通量

路のの関係を明らかにするため道路交通に相当する区分を用いた。そして駐車場は、簡易舗装要綱により施工されているため交通量区分を省略した。

#### 4. 測定結果と考察

##### (1)たわみ量

FWD と HFWD のたわみの測定は同一地点で 3

回行い、その平均をとることとした。HFWD でのたわみ測定は、移動用センサー 1 個により移動するごとにその位置を測定する方法であり、20cm から 100cm まで 9 地点で 3 回ずつで合計 27 回重錘を落下させて測定する。そこで一箇所につき、載荷点直下でのたわみは 27 回測定することになる。その標準偏差  $\sigma$  として変動係数を求めた (図-2)。また、平均値 (m) に対するこの標準偏差の影響を検討するため、各個所ごとに標準偏差 ( $\sigma$ ) と平均値 (m) の比 ( $\sigma/m$ ) を求めた (図-3)。この結果から、本研究においてこの比 ( $\sigma/m$ ) は最大で 16% 程度であり、5% 以下が全体で 2/3 占めることから HFWD のたわみセンサーに精度の実際上の問題はないと判断した。

今回の測定で最もたわみ量の小さい鉄道貨物ヤード舗装における (D 交通に相当) HFWD と FWD たわみデータを図-4 に示す。また全測点における代表的な値として載荷点直下 (D0)、と最大測定位置である 100cm (D100) のたわみ量を図-5~6 に示す。この結果から本研究の対象箇所では、HFWD の各センサーの所定の精度内である最小たわみ

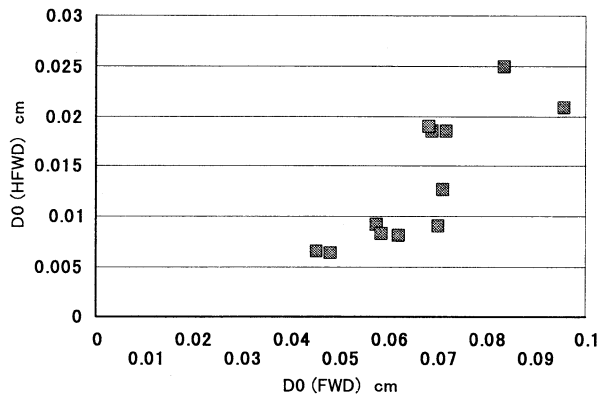


図-7 D0 の比較

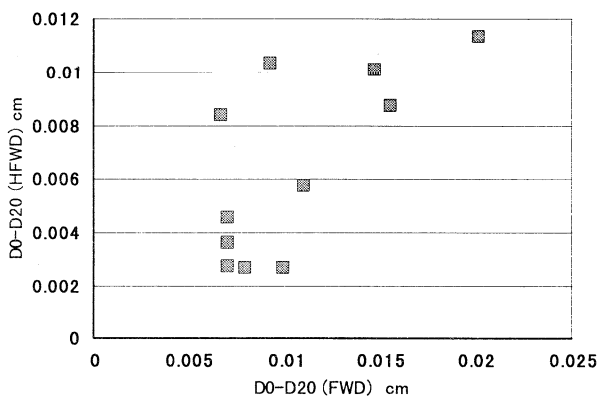


図-8 D0- D20 の比較

0.001mm 以上のたわみ量を測定していることが分かる。

たわみ量は舗装構造を評価する上で重要な指標である。丸山らは以下の4つのたわみ評価指標を用いて舗装構造を評価することを提案している<sup>6)</sup>。これは、載荷点直下のたわみ量 (D0) が、路床の支持力を含む強度を表し、(D0-D20) がアスファルトの強度を、(D0-D150) が舗装の強度を表すものとして、また (D150) が路床の支持力を表しているとしている。また D0 に着目して、笠原らは、FWD (5tf) と HFWD (500kg) は舗装構造の異なる6種類の舗装について載荷点直下のたわみを同地点で測定し、2次の相関関係式を求め、その相関係数が0.948 とかなりよい相関があることを報告している<sup>1)</sup>。

本研究では HFWD が D100 を越えるとたわみが小さくなるので、FWD (5tf) と HFWD (1tf) について D0 と D0-D20 の相関関係を検討する。

図-7 は FWD (5tf) と HFWD (1tf) の D0 の比較を表したものである。式(1)はこの相関関係2次式で

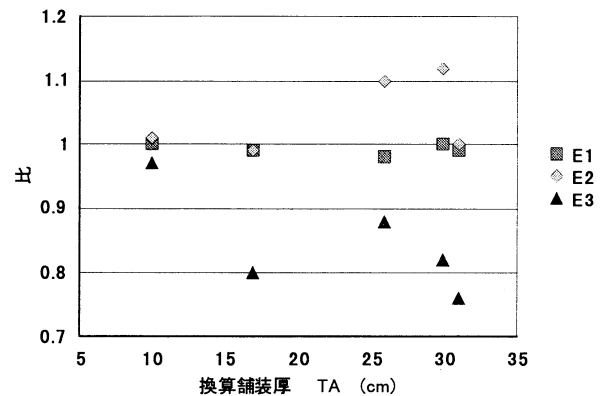


図-9 換算舗装厚による比較

求めたものである。

$$Y0 = 2.12 \times X0^2 + 0.066 \times X0 - 0.0006 \quad (1)$$

Y0 : HFWD の D0

X0 : FWD の D0

この相関係数は 0.882 であり、比較的高い相関関係を示している。

図-8 は D0-D20 の相関関係を同様に求めたもので、式(2)はこの相関を2次式で近似したものである。

$$Y1 = 0.564 \times X1^2 + 0.539 \times X1 + 0.0005 \quad (2)$$

Y1 : HFWD の D0 - D20

X1 : FWD の D0 - D20

この相関係数は 0.788 であり、D0 と比べて相関係数は低いが、やや相関関係が認められる。

以上により FWD で用いられた D0 と D0-D20 は HFWD でのそれぞれの D0 と D0-D20 についても相関関係が認められた。

## (2) 弾性係数

FWD と HFWD のたわみ測定の結果から拡張ベイズ法による舗装弾性係数の逆解析プログラムにより舗装各層の弾性係数を推定する。ここでアスファルト安定処理層の弾性係数は表基層と同じとして表基層 + アスファルト安定処理層の弾性係数を E1、路盤 (切込砕石など) の弾性係数を E2、路床の弾性係数を E3 とする。

### ア) 舗装厚との相関

本研究で対象とした舗装構成がそれぞれ異なるので、等値換算係数による換算舗装厚 ( $T_A$ ) を各舗装タイプの舗装厚の共通指標とする。図-9 は、FWD によるたわみから推定される弾性係数を log 座標で求めた値と同様に HFWD から求めた値との比を求め、換算舗装厚 ( $T_A$ ) について示したものである。

この結果から、駐車場のような簡易な舗装 ( $T_A=10$  cm) では E1, E2, E3 のすべてにわたって、HFWD から推定される弾性係数と FWD による弾性係数がほぼ

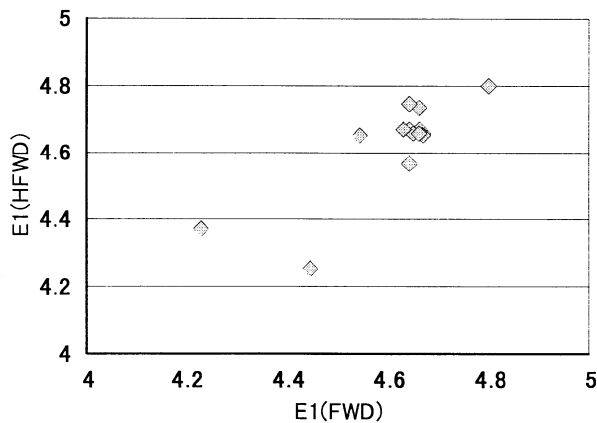


図-10 E1 の比較 (log 表示)

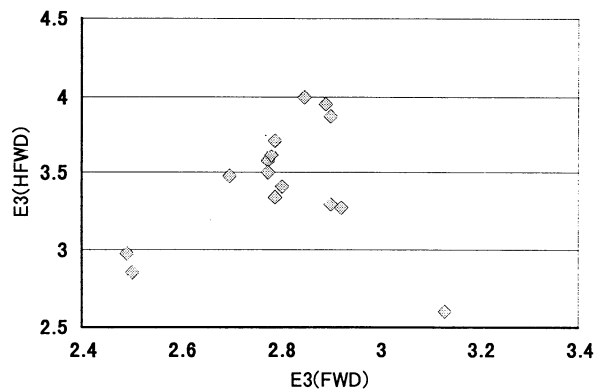


図-12 E3 の比較 (log 表示)

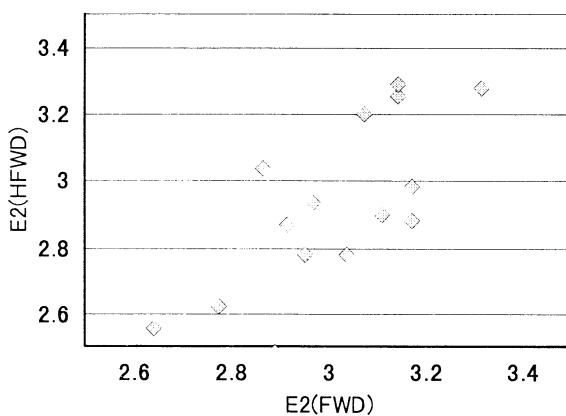


図-11 E2 の比較 (log 表示)

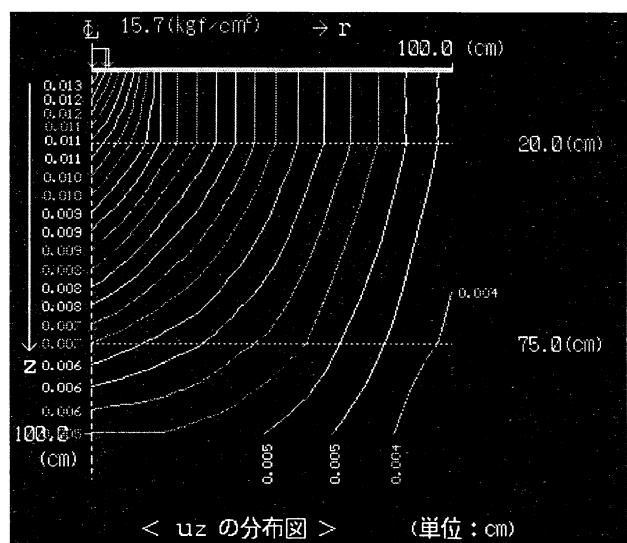


図-13 たわみのコンター (FWD)

同じに見なされることが分かる。(最大のばらつきは路床で3%である)。次にA交通に相当する舗装厚 ( $T_A=17\text{cm}$ )では表基層と路盤でのそれぞれの比がほぼ1.0でFWDとHFWDを用いた弾性係数の推定結果が一致がみられたが、路床における比ではかなりの違いが見られる(約20%)。さらに舗装厚が厚い場合(B交通、C交通、D交通に相当)では表基層での比がほぼ1.0であったが、路盤と路床の場合ではHFWDとFWDとでは大きな差がある(12~24%)。

イ) 全体の相関

FWDとHFWDによってそれぞれ推定される弾性係数を表基層(E1)、路盤(E2)と路床(E3)の各層について各舗装構成の全体で相関を求め、HFWDに使用範囲の検討を行った(図-10,11,12)。

各関係式と相関係数を式(3)~(5)に示す。

$$LY1 = 1.003 \times LX1 \quad (3) \quad \text{相関係数 } 0.820$$

LY1: HFWDでのE1をlog座標で示す。

LX1: FWDでのE1をlog座標で示す。

$$LY2 = 0.970 \times LX2 \quad (4) \quad \text{相関係数 } 0.734$$

LY2: HFWDでのE2をlog座標で示す。

LX2: FWDでのE2をlog座標で示す。

$$LY3 = 1.22 \times LX3 \quad (5) \quad \text{相関係数 } 0.333$$

LY3: HFWDでのE3をlog座標で示す。

LX3: FWDでのE3をlog座標で示す。

以上から表基層の弾性係数(E1)では相関係数が0.820で相関関係が認められた。また式(3)で傾きがほぼ1と見なせることからHFWDから推定される弾性係数をFWDの弾性係数とすることが可能であると考えられる。

路盤の弾性係数(E2)ではFWDとHFWDの相関係数が0.734と相関関係がやや認められる程度である。よって止もうえずHFWDによる弾性係数を用いる時は $1.03 (=1/0.970)$ 乗によりFWDによる弾性係数の推定は可能である。

また路床の弾性係数(E3)では相関関係があまり認められないことがわかる。

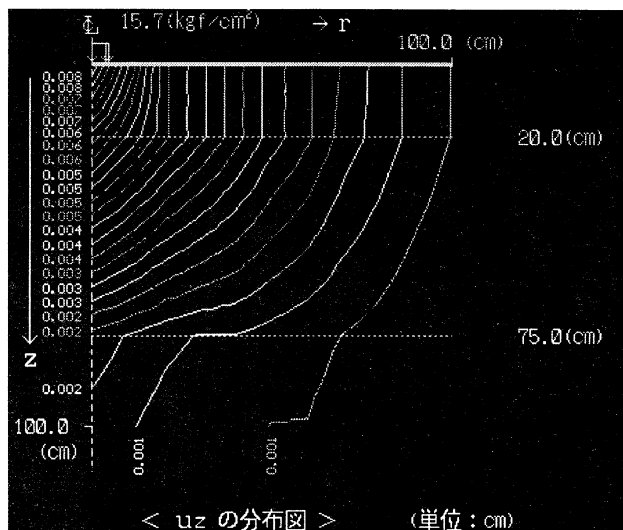


図-14 たわみのコンター (HFWD)

これらの結果を確認するために、貨物ヤード舗装の断面を用い、今回推定した各弾性係数の平均値を使用して多層弾性理論解析プログラム(ELSA)によりFWDとHFWDを載荷した時の舗装内のたわみを求めた(図-13,図-14)。これらの図から、表基層ではほぼ同じような、たわみの挙動を示しているが、路盤の特に下層のたわみに差がみられることがわかる。また路床ではFWDとHFWDでは異なった挙動を表し、路床の弾性係数の推定で相関があまりみられない結果になったと推測される。

## 5. 結論

HFWDによる弾性係数の推定可能範囲を求めるため、同一地点におけるFWDとHFWDのたわみ測定によって比較したところ以下の結論が得られた。

(1) 載荷点直下のたわみ量(D0)では、2次式の近似

において相関係数が0.882と比較的高い相関関係が得られた。

(2) 駐車場のような簡易舗装では表基層から路床まで各弾性係数の推定は可能であると考えられる。

(3) 一般舗装(A交通からD交通)では、表基層+アスファルト安定処理層の弾性係数(E1)がHFWDによりほぼ弾性係数の推定可能であると考えられる。

路盤層の弾性係数(E2)では、やや相関が認められる程度であった。路床の弾性係数(E3)では相関関係が認められず、HFWDによる推定はほとんど不可能であった。

今後、さらにデータを蓄積して一般舗装での路盤の弾性係数推定の範囲を求める計画である。

## 参考文献

- 1) 笠原篤, 伊藤保彦, 古川真男: ハンディなフォーリング・ウエイト・デフレクトメータの開発, 道路建設 5/5 pp. 6670, 1992.
- 2) 阿部長門, 関根悦夫, 上浦正樹, 三枝長生, 丸山暉彦: FWDによる路盤・路床の支持力評価方法, 第2回舗装第学講演会講演論文集 pp. 135~144 1997
- 3) 上浦正樹, 丸山暉彦, 関根悦夫, 安藤勝敏, 阿部長門, 三浦康夫, 三枝長生: 繰返し列車荷重を受ける土路盤強度の評価方法とその変化, 第2回舗装第学講演会講演論文集 p. 129~134 1997
- 4) 上浦正樹, 阿部長門, 三浦康夫, 金内正宏, 藤田博久: 路床強度を確保する手法に関する検討, 第1回舗装第学講演会講演論文集 pp. 273~278 1996.
- 5) 屠偉新, 丸山暉彦, 高橋修: 拡張ベイズ法による舗装弾性係数の逆解析に関する基礎的研究, 第1回舗装第学講演会講演論文集 pp. 15~22 1996.
- 6) 丸山暉彦, 阿部長門, 雑賀義夫, 姫野賢治: FWDによる舗装構造評価および補修設計システムの開発, 土木学会論文集 No. 484/V-22, pp. 61~68 1994
- 7) 姫野賢治: パソコンによる舗装の多層弾性構造解析 ASPHALT Vol. 32 No. 161 pp. 65~72 1989

## RESEARCH OF THE LIMITS OF ESTIMATION ON THE PAVEMENT ELASTIC MODULI BY USING HANDY FWD DEVICE

Masaki KAMIURA, Kazunari KANDA, Hiroshi KUBO, Kiyoshi TAKEICHI

This paper concerns the limits of the estimation on the pavement elastic moduli using by handy FWD device (HFWD). The method of this study is three steps. The first step is that the surface deflections are measured by FWD (the dynamic weight 5 tf) and by HFWD (the dynamic weight 1 tf) at the same position on the same pavement. The next step is that the pavement layer moduli are estimated by the back calculation system "EBM" from the surface deflections by FWD and HFWD. The last step is that the limits of the estimation by using HFWD are investigated by the comparison of the pavement layer moduli by FWD and HFWD. It can be concluded the elastic modulus of surface asphalt layer (E1) is almost estimated by HFWD and that modulus of the subgrade (E3) is not possible. If the error can be accepted, the modulus of the subbase (E2) is estimated.