

小型 FWD を用いた舗装の弾性係数推定について

舗装の弾性係数 小型 FWD 試験 アスファルト舗装

早稲田大学 学生会員 ○ 小林 尚登
早稲田大学 国際会員 赤木 寛一
早稲田大学 学生会員 池内 達宣

1.目的

舗装の上部を構成するアスファルト舗装の劣化状況は、アスファルト層の弾性係数を測ることで判断することができる¹⁾。これによってアスファルト層の異常を定量的に確認することが可能となるのである。一方、国道などの大規模道路は車載型の FWD 試験機によって点検されるが、市町村道などの小規模な舗装に FWD 試験機を利用することは難しい。小さな道路では FWD 試験機が通行の妨げとなったり、経済的に非効率であるためである。ここでは人力で持ち運びが可能な小型 FWD 試験機を利用して、アスファルト層弾性係数の推定を行って、別に実施した車載型 FWD 試験で得られた弾性係数との比較を行った。

2.測定手順

(1)車載型 FWD による弾性係数推定²⁾

- 1)対象の路面上に測定点をあらかじめ設定し、車載型の FWD 試験機により重錘を落下させて 49kN 荷重を発生させる。
- 2)荷重点直下のたわみ量と、そこから 20cm、30cm、45cm、60cm、90cm、120cm、150cm、200cm 離れた点でのたわみ量を測定する。
- 3)たわみ曲線図を描く(図 1 参照)。
- 4)以下の式(1)で弾性係数を計算する。ここで E は弾性係数(MPa)、D₀ は荷重点のたわみ量(μ m)、D₂₀ は荷重点から 20cm 離れた点でのたわみ量(μ m)、h(cm) はアスファルト層の厚さである。

$$E = \frac{2352 \times \left(\frac{D_0 - D_{20}}{1000} \right)^{-1.25}}{h} \quad (1)$$

(2)小型 FWD によるたわみ曲線図の作成

- 1) 車載型 FWD 試験と同じ測点を設定し荷重を行う。異なる 3 つの落下高さ 50、40、30cm から重錘を落下させて 3 つの荷重値で試験を実施する。
- 2) 荷重点直下のたわみ量と、そこから 20cm、30cm、45cm、60cm 離れた点でのたわみ量を測定する。
- 3)たわみ曲線図を描く(図 2 参照)。
- 4) 小型 FWD によるたわみ曲線と車載型 FWD によるたわみ曲線を比較し、弾性係数を推定する式についての考察を行った。

3.測定結果と考察

小型 FWD によるたわみ曲線と車載型 FWD によるたわみ曲線とは荷重値が異なるので比較が難しいので、小型 FWD による各点のたわみ量を 49kN 荷重に換算することを考える。D(車載型換算たわみ)(μ m)、D(小型実測たわみ)(mm)、P(小型荷重)(N)、P(車載型標準荷重)=49kN として、以下の式によりたわみ量の換算を行った。

$$D(\text{車載型換算値}) = \{ P(\text{車載型標準荷重}) / P(\text{小型荷重}) \} \cdot D(\text{小型実測たわみ})$$

このようにして 8 か所の測点にて両 FWD のたわみ曲線を比較した。紙面の都合によりその内の 4 点について整理した結果を図 3 に示す。

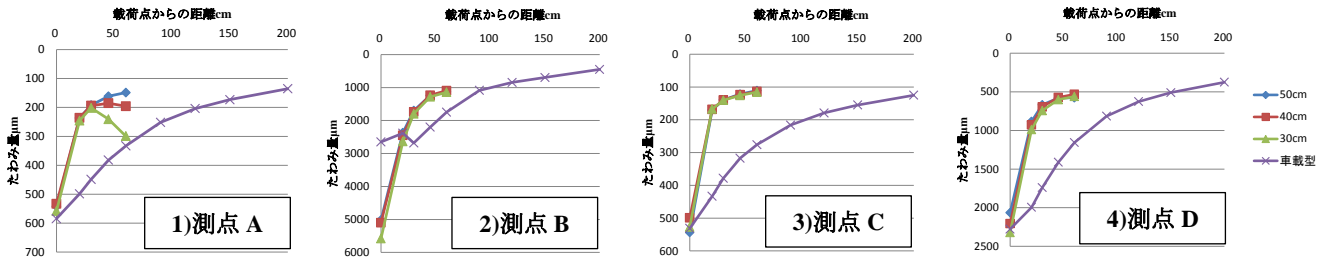


図 3 FWD によるたわみ曲線図の比較

舗装表面に荷重が作用すると、その作用点から鉛直下向きに向かって円錐状に荷重は分散して伝播すると考えられる(図 4 参照)。直径 30cm の荷重板を持つ車載型 FWD では荷重点から 20cm 離れた地点で、荷重の分散線がアスファルト層の下端と交差すると考えられている。そのため、荷重点直下のたわみ D₀ はアスファルト層と路盤、路床での応力の影響で生じている一方で、荷重点から 20cm 離れた点でのたわみ D₂₀ は路盤と路床の応力を受けていると考えられる。その差(D₀-D₂₀)をアスファルトのたわみとして、式(1)は作られている。それに対して小型 FWD の荷重板は直径 10cm であるので、小型での荷重の分散線を考慮しなくてはならない。小型 FWD における荷重分散線を求めるために、荷重点により

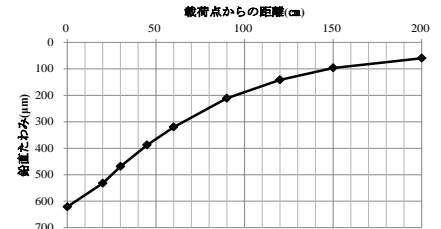


図 1 たわみ曲線(車載型)

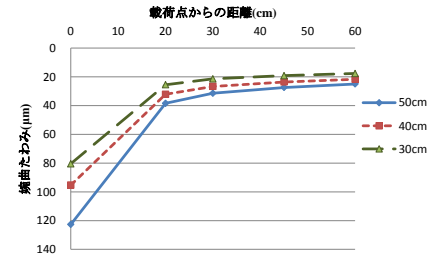


図 2 たわみ曲線(小型)

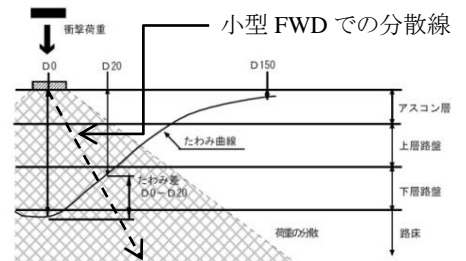


図 4 荷重の分散線

発生する舗装内部の水平方向の垂直応力の正負を用いて考える。ブーシネスクの式を用いたたとえば深さ 5cm(アスファルト層下端の深さ)での水平方向の応力を図示すると、図 5 のようになる。これによると水平方向垂直応力の符号が変化する地点は載荷点から 0.014m (=1.4cm)付近であることが分かる。ここで 1.4cm でのたわみ量を計算する。 $D_0(\text{mm})$ と $D_{20}(\text{mm})$ の間を比例配分することによって $D_{1.4}(\text{mm})$ を推定する。

$$D_{1.4}=D_0 - 1.4/20 \cdot (D_0-D_{20}) \quad (2)$$

D_0 と $D_{1.4}$ との差をアスファルトのたわみ $\Delta A(\text{mm})$ と仮定し、

$$\Delta A=D_0-D_{1.4}=1.4/20 \cdot (D_0-D_{20}) \quad (3)$$

一次元における鉛直方向のひずみと応力の関係式は、弾性係数 E とポアソン比 ν 、鉛直ひずみ ε_z および鉛直応力 σ_z を用いて式(4)のように表される³⁾。

$$E\varepsilon_z = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)} \sigma_z \quad (4)$$

ここで載荷中心点から鉛直下向きに地表面からの深さ $z(\text{m})$ を表す Z 座標を導入する。深さ $z(\text{m})$ 、厚さ $dz(\text{m})$ の微小区間に発生する鉛直ひずみ ε_z について、深さ $z(\text{cm})$ での微小区間たわみ量 $\Delta_z(\text{m})$ を用いて表すと以下の式(5)が得られる。

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta_z}{dz} \quad (5)$$

また、深さ $z(\text{m})$ に対応する応力をブーシネスクの式によって求める³⁾。深さ $z(\text{m})$ での垂直応力 $\sigma_z(\text{MPa})$ を式(6)に示す。ただし載荷荷重 $P(\text{kN})$ 、載荷板面積 $A(\text{m}^2)$ 、載荷板半径 $r=0.05(\text{m})$ とする。

$$\sigma_z = \frac{P}{A} \left(1 - \left\{ \frac{1}{1+(\frac{r}{z})^2} \right\}^{\frac{3}{2}} \right) \times 10^{-3} \quad (6)$$

式(5)、式(6)を式(4)に代入し、整理すると式(7)が得られる。

$$E\Delta_z = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)} \times \frac{P}{A} \times 10^{-3} \left(1 - \left\{ \frac{1}{1+(\frac{r}{z})^2} \right\}^{\frac{3}{2}} \right) dz \quad (7)$$

式(7)の両辺を地表面($z=0$)からアスファルト層下端の深さ($z=0.05\text{m}$)まで積分すると、

$$E \int_0^{0.05} \Delta_z = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)} \times \frac{P}{A} \times 10^{-3} \int_0^{0.05} \left(1 - \left\{ \frac{1}{1+(\frac{r}{z})^2} \right\}^{\frac{3}{2}} \right) dz \quad (8)$$

式(8)左辺の $\int_0^{0.05} \Delta_z$ はアスファルト層全体のたわみ量(m)となるため、 ΔA の単位が(mm)であることに注意して式(4)を用いると、

$$\int_0^{0.05} \Delta_z = \Delta A \times 10^{-3} = \frac{1.4}{20} (D_0 - D_{20}) \times 10^{-3} \quad (9)$$

式(8)右辺の積分値を Legendre-Gauss の公式によって求めると、

$$\int_0^{0.05} \left(1 - \left\{ \frac{1}{1+(\frac{r}{z})^2} \right\}^{\frac{3}{2}} \right) dz = 0.04393 \quad (10)$$

式(8)に式(9)、式(10)を代入することで弾性係数 $E(\text{MPa})$ を求めると、

$$E = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)} \times \frac{P}{A} \times \frac{20}{1.4(D_0-D_{20})} \times 0.04393 \quad (11)$$

ポアソン比 $\nu=0.3$ として、載荷板面積 $A(=0.007854\text{m}^2)$ などの定数部分をまとめた結果が以下の式(12)である。

$$E = \frac{59.36P}{D_0-D_{20}} \quad (12)$$

図 7 では車載型 FWD で測定した値と、式(12)で求めた小型 FWD による弾性係数計算値を比較した。車載型 FWD による弾性係数 $E(\text{MPa})$ に対する直線回帰式について、決定係数は $R^2=0.9513$ と高い値を示すことが分かった。また、車載型 FWD による弾性係数計算式との比較を表 1 にまとめた。

4.参考文献

- (1)土木学会、舗装工学ライブラリー7 舗装工学の基礎、2012 年
- (2)道路保全技術センター、活用しよう!FWD、2005 年
- (3)土木学会、土質力学、1968 年

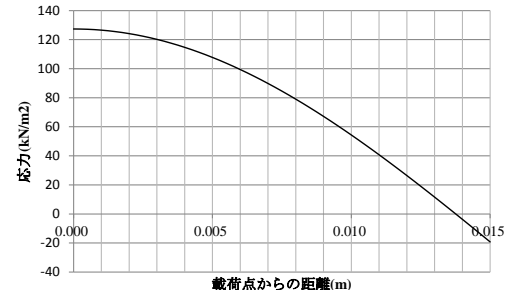


図 5 深さ 5cm の水平方向の垂直応力分布

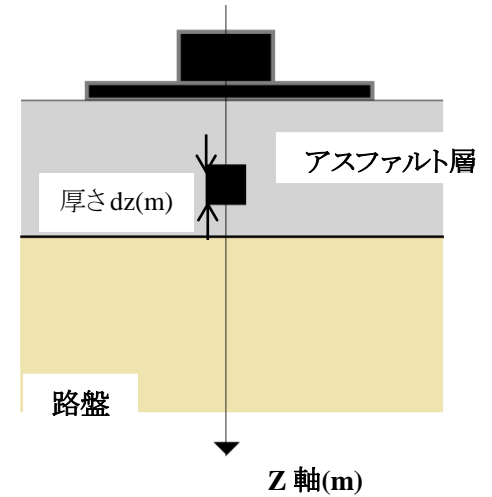


図 6 座標軸の設定

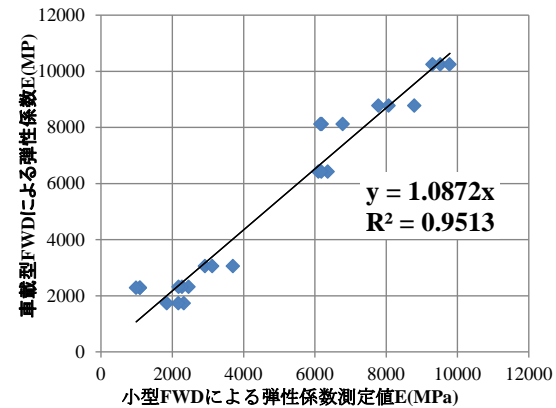


図 7 小型 FWD による弾性係数計算結果

表 1 弾性係数計算式の比較

車載型 FWD ²⁾	小型 FWD (層厚 5cm)
$E = \frac{2352 \times \left(\frac{D_0 - D_{20}}{1000} \right)^{-1.25}}{h}$	$E = \frac{59.36 P}{D_0 - D_{20}}$
E(MPa)、層厚 h(cm) $D_0(\mu\text{m})$ 、 $D_{20}(\mu\text{m})$	E(MPa)、P(kN) $D_0(\text{mm})$ 、 $D_{20}(\text{mm})$