

## FWD データのピーク値だけを用いた動的逆解析の検討

東京電機大学 学生会員 祁 相輝

センチュリテクノ(株) 小澤良明

東京電機大学 フェロー会員 松井邦人

## 1. はじめに

舗装を構築するとき用いる材料の弾性係数あるいはレジリエント係数は基本的な材料の特性であり、理論的経験的方法で既設舗装の補修設計戦略を立てる上で必要である。たわみ測定値を逆解析することにより舗装構造の層弾性係数や路床のレジリエント係数を決定している。

FWD 試験は動的試験であるので、多層弾性理論を用いる静的解析は FWD 試験時の舗装の挙動とは基本的に異なる。そこで、順解析に多層構造の動的解析を組み込んだ Dyna BALM や Wave BALM が開発されている。本研究で小澤らが開発した減衰を考慮した波動伝播解析(Wave PALS)を用いて、衝撃荷重による舗装表面のたわみ波形を算出し、そのピーク値が測定値と一致するように層弾性係数を推定する方法を開発し、その検証を行う。

## 2. 逆解析の理論

基本的な考え方は以下の通り。

1) 逆解析の部分は静的逆解析プログラム BALM を利用する。

2) 動的解析には波動伝播解析プログラム Wave-PALS を用いる。

計算手順は以下のように行う。

**ステップ 1:** 標準化した荷重  $P_{\max}$  を入力し、荷重波形を以下のように作成。

$$P(t) = P_{\max} \sin^2 \frac{\pi}{t_0} t \quad (0 \leq t \leq t_0) \quad (1)$$

$t_0$ (s) は通常 30ms~60ms,  $P_{\max} = 49\text{kN}$  である。

例えば,  $t_0 = 40\text{ms} = 0.04\text{s}$  を選択する

**ステップ 2:** 測定たわみを入力

**ステップ 3:** 層厚, ポアソン比, 層弾性係数の初期値を入力, アスコンの減衰係数はアスコンの弾

性係数の 0.01 倍, 路盤と路床はそれぞれの弾性係数の 0.005 倍とする。

**ステップ 4:** 波動伝播解析を行い各着目点のピーク値を求める。

**ステップ 5:**  $u_i$  は着目点  $i$  の測定最大たわみ,  $z_i$  は着目点  $i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) の解析たわみのピーク値。

$X = (X_1, X_2, \dots, X_M)^T$  は層の弾性係数。着目点で解析たわみと測定たわみが一致しなければならないので,

$$z_i(X) = u_i \quad (i = 1, \dots, N) \quad (1)$$

式(1)は非線形連立方程式であるので、テイラー展開を用いて次のように書き換える。

$$\sum_{j=1}^M \frac{\partial z_i}{\partial X_j} dX_j = u_i - z_i(X) \quad (2)$$

**ステップ 6:**  $|dX_j/X_j|$  を計算する。この値がすべ

ての  $j$  で 0.001 より小さいとき計算を打切る。

ただし、式(2)左辺の係数マトリックスは  $N \times M$  の長方形であるので、特異値分解を用いて解く。

## 3. 数値シミュレーション

**表-1** のように 3 層構造の舗装を考えよう。それぞれの層は線形弾性で等質性, 等方性と仮定し, 軸対称解析を行う。動的解析では構造減衰を考慮するため, 応力とひずみの関係にフォークトモデルを用いている。各層の減衰係数は, 表・基層では弾性係数の 1%, 路盤と路床ではそれぞれの弾性係数の 0.5% としている。舗装表面に 49kN のハーバーサイン波 ( $49\sin^2 \pi/0.04$ ) が 40ms 作用しているとき着目点のたわみ波形を **図-1** に記す。この図からピーク値を選び **図-2** に記す。GAMES を用いて計算した静的な表面たわみも同図に記す。この図から明らかなように動的なたわみ波形

キーワード FWD, 逆解析, 波動伝播解析, ピーク荷重, ピークたわみ

連絡先 埼玉県比企郡鳩山町 東京電機大学理工学部建築・都市環境学系 049-296-5703

のピーク値は静的なたわみより小さい。  
 荷重と波形のピーク値を用いて、これらを準静的なたわみと見なして静的逆解析を行う。また、順解析に Wave PALS を用いて動的解析を行い、そのピーク値を用いて逆解析する、それらの結果を表-2 に記す。ピーク値だけから層弾性係数と層減衰係数を推定するのは容易ではないので、ここでは減衰係数の値を表・基層ではその弾性係数の1%、路盤、路床では0.5%に固定している。表-2より、静的たわみを用いた静的逆解析結果は表-1の層弾性係数と良く一致している。波動伝播解析で求めたピーク値を静的逆解析した結果は表-1の値と大きく異なる。しかし、波動伝播解析のピーク値を用いた動的逆解析は表-1の結果とかなり近い。

表-1 舗装断面と力学定数

	表・基層	路盤	路床
層厚(m)	0.1	0.20	∞
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2300	2100	1900
弾性係数(MPa)	7500	300	60
減衰係数(MPa·s)	75	1.5	0.3
ポアソン比	0.35	0.35	0.4

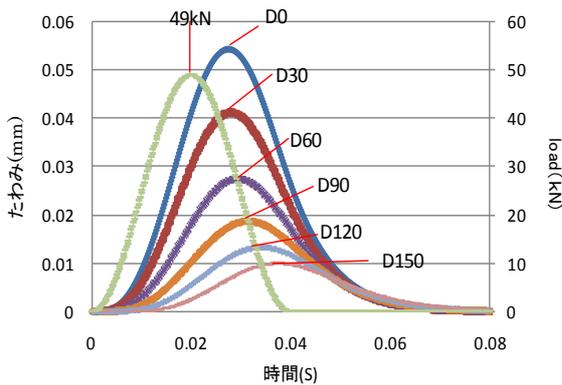


図-1 荷重とたわみの波形

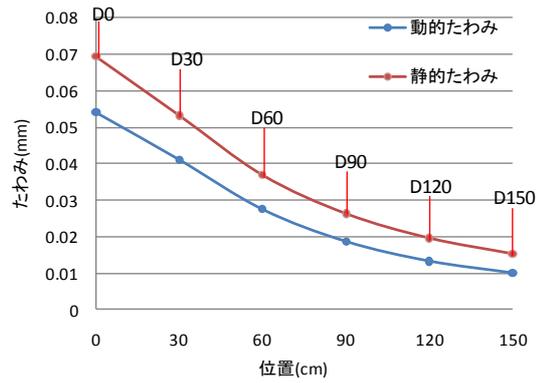


図-2 ピーク値比較

表-2 弾性係数推定(MPa)

	静的たわみの逆解析	ピーク値の静的逆解析	ピーク値の動的逆解析
表・基層	7485	22139	7612
路盤	302	25	302
路床	60	261	60

4. まとめ

FWD 試験は衝撃載荷試験であるので動的逆解析が必要と思われる。しかし、現在静的逆解析が普及している。数値シミュレーションから以下のことが明らかになった。

- 1) 順解析に静的解析を用いるのと動的解析を用いるのでは、逆解析結果に大きな違いがある。
- 2) 順解析に波動伝播解析を用いた動的逆解析が最も優れている。
- 3) ピーク値だけを測定しているとき、順解析に波動伝播解析、逆解析に静的逆解析を用いるのが良さそうである。

参考文献

- 1) 小澤良明他：フォークトモデルで構成された舗装構造の波動伝播解析，土木学会論文集 E編，Vol.64, No.2, 314-322, 2008.
- 2) 小澤良明他：波動理論を用いた逆解析による粘弾性多層体の構造評価，土木学会論文報告集 E編，Vol.64, No.4, pp.533-540, 2008.10.
- 3) 菊田征勇他：複数の時系列データを用いた舗装構造の動的逆解析，土木学会論文集 No.760/V-63, pp.223-230, 2004.5.