# FWD 試験で舗装の密度を推定できるだろうか?

NIPPO コーポレーション	正会員	西山	大三
東京電機大学	フェロー会員	松井	邦人
国士舘大学	フェロー会員	菊田	征勇
鹿島道路株式会社	正会員	東	滋夫

## 1.はじめに

FWD 試験データから, 逆解析で舗装を構成する各 層の弾性係数を推定することが行われている.FWD 試験は動的試験であるが, 荷重とたわみのピーク値 を用いて静的逆解析を行っている.しかし著者らは 時系列データを用いる動的逆解析法を過去に提案し てきた.その理論では, 各層の弾性係数だけでなく 減衰係数も推定できることを示した.本研究は,そ こで用いた理論をさらに発展させ, 同時に各層の密 度も推定できるような理論を開発した.アルゴリズ ムの検証を行うため, 数値シミュレーションと実測 データを用いて逆解析を行った.その結果を報告す る.

#### 2.動的解析と逆解析

舗装を構成する各層の材料特性はその層内で一様 であると仮定して,各層毎の質量・減衰・剛性マト リックスを作成し、更にそれらを合成して構造全体 の運動方程式を求めている. *j*番目の層の運動方程 式は、

 $\rho_{j}\overline{\mathbf{M}}_{j}\dot{\mathbf{z}}(t) + c_{j}\overline{\mathbf{Q}}_{j}\dot{\mathbf{z}}(t) + E_{j}\overline{\mathbf{K}}_{j}\mathbf{z}(t) = \mathbf{f}_{j}(t)$ (1)  $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{z}(t) = \mathbf{f}\mathbf{g}(t)$ (2)

ここに, $\overline{\mathbf{M}}_{j}$ , $\overline{\mathbf{Q}}_{j}$ , $\overline{\mathbf{K}}_{j}$ , $(j=1,\dots,M)$ は,それぞれ $\rho_{j}$ ,  $c_{j}$ ,  $E_{j}$ を1としたときのj層の質量,減衰,剛性マ トリックスであり,  $\mathbf{f}_{j}(t)$ は荷重ベクトルである.ま た、 $\mathbf{M} = \left[\rho_{j}\overline{\mathbf{M}}_{j}\right]$ ,  $\mathbf{C} = \left[c_{j}\overline{\mathbf{Q}}_{j}\right]$ ,  $\mathbf{K} = \left[E_{j}\overline{\mathbf{K}}_{j}\right]$ はそれぞれ, 全体質量マトリックス、全体減衰マトリックス,全 体剛性マトリックスであり,fは荷重配分ベクトル, g(t)は衝撃荷重の時系列データである.感度解析は 式(1)を参考にして,式(2)を未知パラメータで偏微分 して求めることができる.

舗装を構成する各層の層厚とポアソン比の値を仮 定して,測定たわみと解析たわみが着目している範 囲で一致するように各層の密度,減衰,弾性係数を 決定したい.そのためには,時間の離散点でポイン トマッチングの考え方に基づき式(3)の評価関数の値 が最小になるように未知パラメータの値を決定すれ ば良い.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{p=p0}^{pl} \sum_{n=1}^{N} \left\{ u_n(t_p) - z_n(\mathbf{X}, t_p) \right\}^2$$
(3)

ここに,  $X_i$ ,  $(i = 1, \dots, 3M)$  は各層の $\rho_j$ ,  $c_j$ ,  $E_j$ ,  $(j = 1, \dots, M)$ を無次元化した未知パラメータである. すなわち,

$$X_i = \frac{\rho_j}{\rho_j^{(0)}}, \quad or, \quad \frac{c_j}{c_j^{(0)}}, \quad or, \quad \frac{E_j}{E_j^{(0)}}$$
(4)

 $<math>
 \rho_j^{(0)}$ ,  $c_j^{(0)}$ ,  $E_j^{(0)}$  はあらかじめ定めた基準値であり,  $X_i
 は逆解析のための未知パラメータである.なお N$  $はセンサの総数であり, <math>
 t_{p0}$ ,  $t_{p1}$  は着目している時間 領域の始点と終点である.全層数はM なので未知パ ラメータの数は3M となる.式(3)の最小値を見つけ ることは非線形最小化問題であり,ここではガウス ニュートン法を用いている.

### 3.数値シミュレーション

表-1 に舗装断面のモデルを示す.4 層モデルであ るので,未知パラメータの数は表中の値より40%大 きい値を初期値と仮定して逆解析を行った.収束過 程を図-1 に示す.横軸は繰り返し計算回数である. 真値を用いて無次元化しているのですべてのパラメ ータは安定して1 に収束していることから,アルゴ リズムは意図した機能があることが確認できた. 逆解析では層厚とポアソン比の値を既知としている. その値が正しくなければ逆解析結果に反映される.1 層目の層厚に誤差があると仮定して逆解析を行った.

表-1 数値シミュレーションに用いた舗装断面のデータ

項目	1層	2層	3層	4層
層厚 (cm)	18	20	20	
ポアソン比	0.35	0.35	0.35	0.35
弾性係数 (MPa)	6000	400	150	60
減衰係数 (kN・s/m)	30	2.0	1.5	0.3
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2300	1900	1800	1600

**キーワード**動的逆解析、層弾性係数、層減衰係数、層密度、FWD 試験 連絡先 〒104-8380 東京都中央区京橋 1-19-11 NIPPO コーポレーション TEL 03-3563-6742 -183-



1 層目の層厚誤差が,その密度,減衰係数,弾性係数に及ぼす影響を図-2 に記す.本図より層厚誤差は逆解析結果に無視できない影響があることが明らかである.



#### 4.実測データを用いた逆解析

(a) 鹿島道路(株)栗橋試験センター

次に、鹿島道路(株)栗橋試験センターに構築された 舗装(アスファルト舗装A交通対応)で測定したデー タを用いて逆解析を行った.これらの舗装は構築後 にコアを採取し層厚を測定しているので,その値は 信頼できる.

項目	1層	2層	3層	4層
層厚 (cm)	5.1	9.3	24.4	
ポアソン比	0.35	0.35	0.35	0.35
弾性係数 (MPa)	6000	400	300	60
減衰係数 (kN・s/m)	30	2.0	1.5	0.3
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2300	1900	1800	1600

表-2(a) 鹿島道路 A 交通断面と初期値

#### 表-2(b) 鹿島道路 A 交通断面の逆解析結果

項目	1層	2層	3層	4層
弾性係数 (MPa)	4030	252	122	59.2
減衰係数 (kN・s/m)	31.7	2.13	1.04	0.331
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2333	1922	1794	1591

同舗装の断面と逆解析に用いた初期値を表-2(a)に, 逆解析結果を表-2(b)に示す.また,逆解析結果を用 いた解析たわみと測定たわみを図-3に比較する.両 者のたわみは非常に良く一致している.



図-3 測定たわみと解析たわみの比較(鹿島道路A交通断面)

(b)第2回共通試験データ

層厚の信頼度が低い第2回共通試験データ(704 工区)を用いて逆解析を行った.対象とした舗装の断面と初期値を表-3(a)に、逆解析結果を表-3(b)に示す.

表-3(a) 704 工区舗装断面と初期値

項目	1層	2層	3層	4層
層厚 (cm)	10	20	28	
ポアソン比	0.35	0.35	0.35	0.35
弾性係数 (MPa)	6000	400	300	60
減衰係数 (kN・s/m)	30	2.0	1.5	0.3
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2300	1900	1800	1600

表-3(b) 704 工区逆解析結果 項目 1層 4層 2層 3層 弾性係数 (MPa) 9290 479 58.6 33.2 減衰係数 (kN・s/m) 88.7 3.63 0.434 0.184 密度 (kg/m<sup>3</sup>) 2296 1906 1769 3133

## 5.結論

開発したアルゴリズムを用いて密度の推定が可能で あることは確認できた.しかし,層厚誤差の影響も またかなり顕著である.

### 参考文献

・菊田征勇, James Maina, 松井邦人,董 勤喜: 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.