

東京電機大学 理工学部○学生員 三瓶辰之

東京電機大学 理工学部 正会員 松井邦人

日本舗道(株)

正会員 井上武美

1. まえがき

舗装構造は、路床が半無限に広がる弾性多層構造が考慮され解析が為される。しかし、地盤は深くなると必ず剛性が高くなるものである。舗装の載荷試験のように表面変位より各層の剛性を推定するとき、路床を半無限と考えると路床の剛性を正しく評価できないだけでなく、表層、路盤の剛性の推定値にも影響する¹⁾。

本研究は、表面変位より路床の見かけ厚とその剛性及び上層の各層の剛性を推定し、例題を用いてその妥当性を検討した。

2. 逆解析の定義と定式化

舗装構造物に荷重が作用して生じた表面変位の測定値を d_i ($i=1 \sim M$, M :測定点数)、各層の弾性係数の推定値を E_j ($j=1 \sim N$, N :層数)、また各層弾性係数の推定値より求めた計算変位を Z_i とする。さらに、 N 層目の厚さを h_N とし、 $N+1$ 層目には高剛性の弾性係数を与え以下のような最適化問題となる。

$$\text{Find } E_j ; \text{ such that } \min \sum_{i=1}^M (Z_i - d_i)^2 \quad (1)$$

式(1)より Z_i と d_i との差がなくなるように順次 E_j を改善する必要がある。

$Z_i(E_j + \delta E_j, h_N + \delta h_N)$ をテイラー展開すると、

$$Z_i(E_j + \delta E_j, h_N + \delta h_N) \doteq Z_i(E_j, h_N) + \sum_{j=1}^N \frac{\partial Z_i}{\partial E_j} \delta E_j + \frac{\partial Z_i}{\partial h_N} \delta h_N \quad (2)$$

δE_j , δh_N は $Z_i(E_j + \delta E_j, h_N + \delta h_N)$ となるように定める。

ここで、測定値には誤差が含まれていると考えられるから

$$Z_i(E_j, h_N) + \sum_{j=1}^N \frac{\partial Z_i}{\partial E_j} \delta E_j + \frac{\partial Z_i}{\partial h_N} \delta h_N = d_i + \varepsilon_i \quad (3)$$

となり、 δE_j , δh_N は

$$\min \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M W_i \varepsilon_i^2 \quad (4)$$

となるように決定する。即ち、

$$\min \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M W_i \{ Z_i(E_j, h_N) + \sum_{j=1}^N \frac{\partial Z_i}{\partial E_j} \delta E_j + \frac{\partial Z_i}{\partial h_N} \delta h_N - d_i \}^2 \quad (5)$$

となる。 W_i は重み係数である。ここで $W_i=1$ とおく。式(5)の必要条件は、

$$\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \frac{\partial Z_i}{\partial E_j} \frac{\partial Z_i}{\partial E_k} \delta E_j + \sum_{i=1}^M \frac{\partial Z_i}{\partial h_N} \frac{\partial Z_i}{\partial E_k} \delta h_N = - \sum_{i=1}^M \{ Z_i(E_j, h_N) - d_i \} \frac{\partial Z_i}{\partial E_k} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \frac{\partial Z_i}{\partial E_j} \frac{\partial Z_i}{\partial h_N} \delta E_j + \sum_{i=1}^M \frac{\partial Z_i}{\partial h_N} \frac{\partial Z_i}{\partial h_N} \delta h_N = - \sum_{i=1}^M \{ Z_i(E_j, h_N) - d_i \} \frac{\partial Z_i}{\partial h_N} \quad (k=1 \sim N)$$

上式(6)は δE_j , δh_N に関する線形連立方程式となる。図-3に計算手順を示す。

3. 測定位置の逆解析に及ぼす影響

測定値の測定位置における影響を3層構造について感度解析をした。

その結果を図-4に示す。

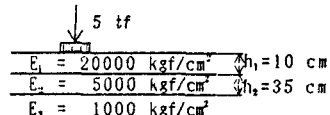


図-1 3層弾性構造物モデル

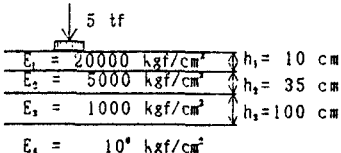


図-2 4層弾性構造物モデル

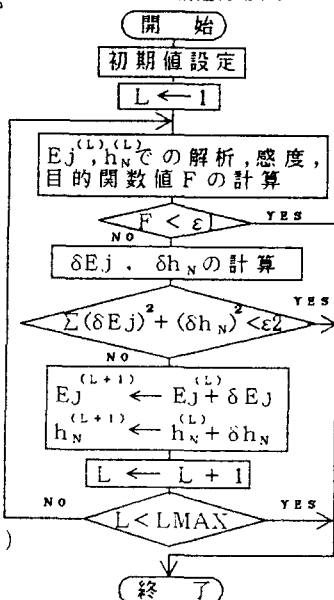


図-3 逆解析の流れ図

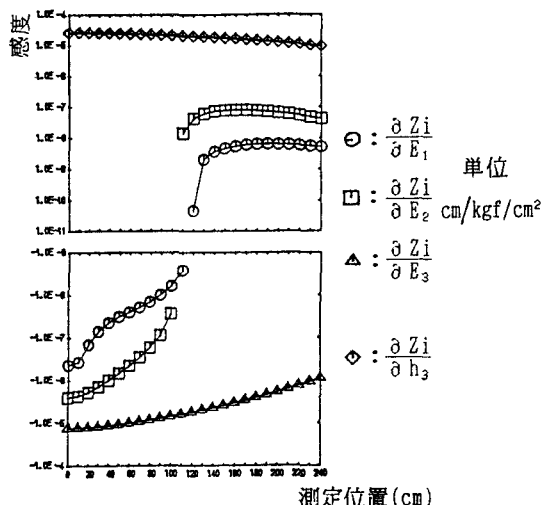


図-4 感度曲線

路床厚及び路床の剛性の変化が表面変位に及ぼす影響は大きく、全域にわたりほぼ一定である。表層、路盤の剛性の変化は載荷地点の近傍で比較的大きいが、遠くなると急速に小さくなり、ある程度離れると変位に与える影響は逆転する。

4. 解析例

4-1 理論値を用いた場合

図-1のような3層構造物を考える。3層目の層厚を h_3 と考えると、図-2に示す4層の弾性構造物モデルに置き換える必要がある。ここで、実際に逆解析計算を行うのは、図-2の E_1 、 E_2 、 E_3 と h_3 の4つについてである。与える変位の理論値の精度は1/1000mmで丸めた値を用いた。計算結果を表-1に示す。

表-1 逆解析計算結果

	測定位置(cm): 0 20 45 90 150				
	入力変位(cm): 0.0301 0.0209 0.0122 0.0051 0.0012				
	E_1	E_2	E_3	h_3	ρ
1	3.000E+04	7.000E+03	3.000E+03	3.000E+02	2.173E-04
2	2.700E+04	6.300E+03	2.700E+03	2.700E+02	1.530E-04
3	2.430E+04	5.670E+03	2.430E+03	2.430E+02	9.602E-05
4	2.187E+04	5.103E+03	2.187E+03	2.187E+02	4.954E-05
5	1.973E+04	4.931E+03	1.968E+03	1.968E+02	2.504E-05
6	2.030E+04	4.915E+03	1.771E+03	1.771E+02	1.736E-05
7	2.028E+04	4.915E+03	1.594E+03	1.594E+02	1.042E-05
8	2.029E+04	4.915E+03	1.435E+03	1.435E+02	5.527E-06
9	2.026E+04	4.924E+03	1.291E+03	1.291E+02	2.395E-06
10	2.025E+04	4.932E+03	1.162E+03	1.162E+02	6.767E-07
11	2.023E+04	4.940E+03	1.046E+03	1.046E+02	3.075E-08
12	2.023E+04	4.943E+03	1.007E+03	1.003E+02	7.529E-11

4-1 実測値を用いた場合

新東京国際空港の第2期工事に伴う試験舗装におけるFWDのたわみ測定データを用いて解析をした。入力データを表-2及び3に示す。次に、従来の逆解析手法による場合と路床厚を考慮した場合との計算結果を表-4に示す。また、路床厚を考慮した逆解析を行う場合には表-2における路床厚を2m、4層目の弾性係数を $E_4=10^6$ (kgf/cm²)とした。

表-2 入力条件(1)

	層厚 (cm)	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
セメント安定処理	35	40000	0.35
クラッシャーラン	35	3000	0.35
路 床	∞	1000	0.35
荷 重	20 tf		
載荷半径	25.5 cm		

表-3 入力条件(2)

位置 (cm)	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
変位 (mm)	0	30	60	60	90	150	250
	1.497	1.069	0.926	0.791	0.612	0.357	0.195

表-4 逆解析計算結果(kgf/cm²)

	E_1	E_2	E_3
従来の逆解析結果	9934	1634	1054
路床厚を考慮した 逆解析結果	9142	2393	859

上表より、この3層構造は $E_1=9000\sim 10000$ 、 $E_2=1600\sim 2400$ 、 $E_3=800\sim 1100$ (kgf/cm²)程度であると推定することができる。

5. まとめ

路床より下部に高剛性の地盤が存在すると仮定して、路床厚を考慮する逆解析を検討したが、実際には路床厚ではなくあくまで弾性係数の推定が目的であることを明記しておく。また、この手法は従来の逆解析法とあわせて、舗装構造の内部剛性を推定するものとして期待されるであろう。

- 参考文献 -

- 1) 松井邦人、井上武美；『多層弾性舗装構造の逆解析の考察』、土木学会第43回年次学術講演会講演集（昭和63年10月）、V-41