V－41　瀝青安定処理材を用いた舗装の構造評価

(株)ピー・エス　正会員　渡辺　規明
東京電機大学　フェロー会員　松井　邦人
鹿島道路(株)　正会員　東　滋夫

1.　はじめに

1995 年 9 月 25, 鹿島道路(株)機械センター構内のテストピットにおいて FWD 試験が行われた。本研究では、当日 D 交通断面において計測された時系列データを用いて、動的逆解析の仕方について検討を行い、その結果を報告する。

対象断面は図-1 に示すような路盤に瀝青安定処理を含むものである。安定処理路盤を含む断面における逆解析では、しばしば工学的に判断して望ましい結果が得られていない。本研究では、同断面を４層構造と５層構造の２種類でモデル化し、逆解析結果の比較検討を行っている。

2.　解析方法

式(1)に示す運動方程式を作成し、応答を求める。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{z}}+\mathbf{C}\dot{\mathbf{z}}+\mathbf{K}\mathbf{z}=\mathbf{f}(t) \qquad (1)$$

ここで、$\mathbf{M},\mathbf{C},\mathbf{K}$ は質量、減衰、剛性マトリックスであり、$\ddot{\mathbf{z}},\dot{\mathbf{z}},\mathbf{z},\mathbf{f}(t)$ は加速度、速度、変位、外力のベクトルである。式(2)を評価関数と定義し、この評価関数を最小とする未知パラメータ $\mathbf{X}$ を推定する。

$$J_0=\int_0^T\sum_{i=1}^{m}w_i\left\{u_i-z_i(\mathbf{X})\right\}^2dt \qquad (2)$$

$w_i(i=1,\cdots,n)$：重み

$\mathbf{X}=\{X_j\}(j=1,\cdots,n)$：未知パラメータ

$u_i(i=1,\cdots,m)$：測定たわみ

$z_i(i=1,\cdots,m)$：解析たわみ

本研究では, Gauss-Newton 法を用いて、この式を解いている。J_0を $\hat{\mathbf{x}}$ （$\mathbf{X}$の推定値）の近傍でテーラー展開し、J_0を改めて Jとおくと、式(3)を得る。

$$J=\int_0^T\sum_{i=1}^{m}w_i\left\{u_i-z_i(\hat{\mathbf{X}})-\frac{\partial z_i}{\partial X_j}\delta X_j\right\}^2dt \quad (j=1,\cdots,m) \qquad (3)$$

必要条件より、式(4)を得る。

$$\sum_{j=1}^{n}\left\{\int_0^T\sum_{i=1}^{m}w_i\frac{\partial z_i}{\partial X_j}\frac{\partial z_i}{\partial X_l}dt\right\}\delta X_j=\int_0^T\sum_{i=1}^{m}w_i\left\{u_i-z_i(\hat{\mathbf{X}})\right\}\frac{\partial z_i}{\partial X_l}dt$$

$$(l=1,\cdots,n) \qquad (4)$$

ここで、式(4)は n 個の式からなる連立方程式である。係数マトリックスは特異マトリックスに近くなるため、スケーリングを行い、特異値分解を用いて解いている。$\hat{\mathbf{x}}$ に $\delta\mathbf{X}$ を加えることにより、Jを最小にする $\mathbf{X}$ が得られる。しかし、この $\mathbf{X}$ は J_0を最小にする $\mathbf{X}$ ではない。そこで、この $\mathbf{X}$ を改めて $\hat{\mathbf{x}}$ とし、繰り返し計算を行い、J_0を最小にする $\mathbf{X}$ を推定する。

3.　閾値の設定

正規方程式を解く場合、係数マトリックスの条件数は計算の安定を表す尺度であり、丸め誤差が解の誤差として拡大される程度を表している。

条件数とは、最大特異値／最小特異値で与えられる。条件数が大きいことは、係数マトリックスが特異に近いことを意味している。測定値に含まれる誤差が解に与える影響を軽減するために、小さな特異値を切り捨てる必要がある。この時の閾値を最大特異値$\times10^{-\alpha}$で求める。

4.　解析に用いた測定データ

測定場所：鹿島道路(株)機械センター構内・テストピット（D 交通断面アスファルト舗装）

測定日時：1995 年 9 月 25 日 (月) 11：00

載荷荷重：5000 [kgf]

センサー数：7 [個] ($D_0,D_{30},D_{45},D_{60},D_{90},D_{120},D_{150}$)

測定時間：0.024 [s]　(0.002 [s]毎)

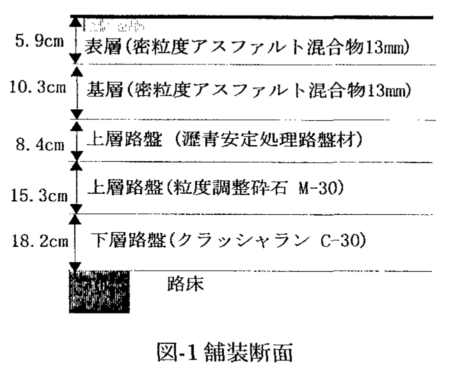

図-1 舗装断面

Key Words　逆解析、条件数、閾値　〒350-02 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂 TEL 0492-96-5731 (内線 2734)

5. 逆解析結果

図-1 に示す舗装断面を、表層＋基層＋上層路盤（瀝青安定処理路盤材）を１層目とした４層構造と表層＋基層を１層目とした５層構造の２種類でモデル化し、11:00 に測定されたデータについて逆解析を行った。

最適な閾値を求めるために、α を変化させて逆解析を行い、α と評価関数の関係を図-2,3 に示す。図-2,3 から判る評価関数が小さくなっている α(5,4,3) に着目し、α と推定された弾性係数の関係を表-1,2 にしめす。α が５のとき最大計算回数に達してしまっており、収束条件を満たしていない。α が４のとき、４層モデルでは収束しているが、３層と４層で弾性係数の逆転現象が起きている。５層モデルでは最大計算回数に達している。α が３のときは、どちらのモデルでも弾性係数の逆転現象を起こさず収束していることが判る。また、それぞれのモデルで推定された弾性係数を比較すると、１層目の弾性係数が他の層に比べると大きく違うことが判る。

α が３のときに、推定された弾性係数を用いて解析たわみを求め、測定たわみとの比較を図-4,5 に示す。どちらの解析モデルも解析たわみは、測定たわみと良く一致していることが判る。

6. おわりに

逆解析では、測定誤差やモデル誤差の影響が結果に大きく影響することが知られている。誤差の影響を軽減する事が重要である。本研究では閾値 α の値を適切に設定することにより安定して逆解析でき、工学的に妥当と思われる結果が得られることが明らかになってきた。できる限り多くのデータを用いて逆解析を行い、アルゴリズムのロバスト性についても検証する必要がある。

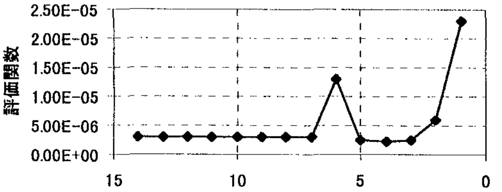

図-2 4層モデルでの α と評価関数の関係

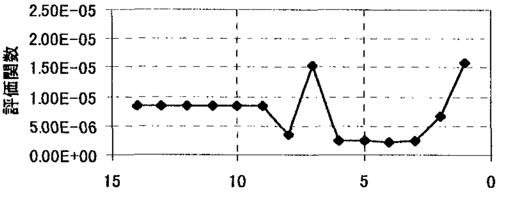

図-3 5層モデルでの α と評価関数の関係

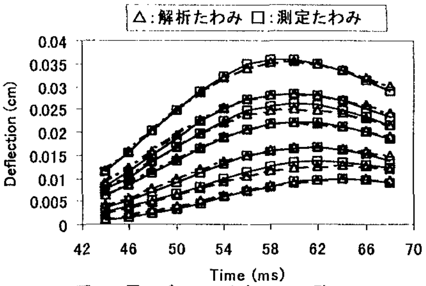

図-4 4層モデルでのたわみの一致

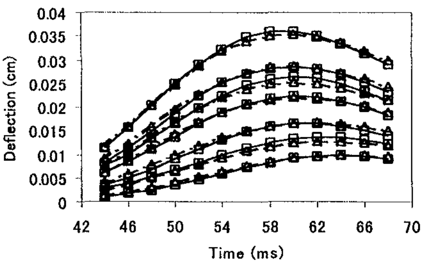

図-5 5層モデルでのたわみの一致

表-1 4層モデルでの α と弾性係数の関係　(単位：E[kgf/cm²],C[kgf・s/cm])

α	Itr	C1	C2	C3	C4	E1	E2	E3	E4	J
5	100(51)	27.03	5.89	0.45	0.04	26087	2697	230	856	2.39E-06
4	54(51)	30.10	3.84	0.61	0.03	26574	2126	273	838	2.36E-06
3	27(26)	44.15	1.92	0.48	0.12	24129	1525	894	713	2.59E-06

表-2 5層モデルでの α と弾性係数の関係　(単位：E[kgf/cm²],C[kgf・s/cm])

α	Itr	C1	C2	C3	C4	C5	E1	E2	E3	E4	E5	J
5	100(96)	30.48	24.37	4.51	0.52	0.04	26247	24374	2749	220	850	2.40E-06
4	100(47)	22.64	25.32	5.71	0.66	0.03	34000	11752	2601	366	816	2.29E-06
3	27(27)	49.95	18.32	3.42	0.99	0.07	35709	7759	1926	1101	711	2.51E-06