

I-759

衝撃荷重を受ける多層弾性構造物の逆解析

清水建設(株) 正会員 ○塩谷俊之
 東京電機大学 正会員 松井邦人
 国士舘大学 正会員 菊田征勇

1. はじめに

本研究は、FWD試験より測定された時刻列データを用いて逆解析を行い、舗装構造の減衰係数、弾性係数の推定を行う。なお、応答解析には、有限要素法、固有値解析を用い、逆解析アルゴリズムには、Gauss-Newton法を用いた。

2. 動的解析と逆解析手法

多層弾性構造物を図-1のようにモデル化し、有限要素法を用いて、運動方程式に表すと、式(1)のようになる。

$$M\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = f(t) \quad (1)$$

ここで、 M 、 C 、 K は、質量、減衰、剛性のマトリックス、 $\ddot{z}$ 、 $\dot{z}$ 、 z 、 f は、それぞれ、応答加速度、応答速度、応答変位、外力のベクトルである。

動的解析において、マトリックスが小さければ小さいほど運動方程式は容易に解ける。そこで、Wilson等¹⁾が提案しているリッツベクトルを用いてマトリックスを縮小し応答解析、動的感度解析を行う。加速度、速度、変位を、

$$\ddot{z} = X\ddot{y}, \quad \dot{z} = X\dot{y}, \quad z = Xy \quad (2)$$

と置く。 X はリッツベクトルである。行数は M 、 C 、 K と同じであるが、行数ははるかに小さいものである。式(2)を式(3)に代入し、 X^T をかけると、

$$M^*\ddot{y} + C^*\dot{y} + K^*y = f^* \quad (3)$$

となる。ただし、

$$M^* = X^T M X, \quad C^* = X^T C X, \quad K^* = X^T K X, \quad f^* = X^T f$$

式(3)は、一般に式(1)と比べはるかに次元の小さいものとなる。式(3)を解き $\ddot{y}$ 、 $\dot{y}$ 、 y を求める。次にその結果を式(2)に代入し $\ddot{z}$ 、 $\dot{z}$ 、 z を求める。

本研究では、FWD試験により得られる測定点 i における測定たわみを u_i ($i = 1 \cdots N$)とし、これらの測定量に対応する解析値を z_i 、観測誤差を ε_i とすると、

$$u_i = z_i + \varepsilon_i \quad i \in A \quad (4)$$

の関係が成立する。 A は観測点の集合である。そこで、舗装構造の特性を表す未知パラメータ（本研究では、各層の減衰係数、弾性係数）を $x = \{x_j\}$ ($j = 1 \cdots M$)とすると、 z_i は x の関数である。次に、最小二乗法概念を用い評価関数 J を式(5)のように定義する。

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i \in A} w_i \{u_i - z_i(x)\}^2 dt \quad (5)$$

$t_0 \sim t_1$ は、逆解析に用いる時間区間、 w_i は重み関数である。

ここで、式(5)の評価関数 J の値を最小にするように、未知パラメータ x を決定する。

3. 実測データを用いた逆解析

表-1に示した様な舗装構造について、FWD試験によって測定されたデータを用いて逆解析を行った。しかし、現在のFWD試験機では、入力荷重を測定する際にトリガーが付いているため500kgf以下を測定することができない。そこで、本研究では、自己相関の考え方を用いて、入力荷重の初期値を追跡し、そのデータを入力荷重として用いた。また、入力する未知パラメータの初期値によっては、解が収束するまでに計算回数が多かったり、場合によっては、解が発散してしまうこともある。そこで、現在、広く行われている静的データを用いた逆解析を行い、そこで得た結果を弾性係数の初期値とした。減衰係数については、弾

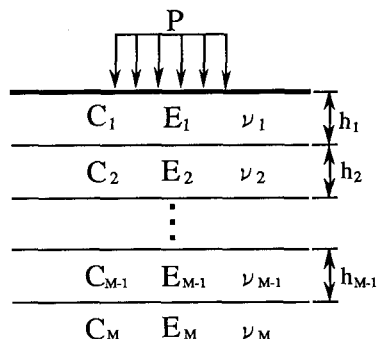


図-1 多層弾性構造モデル

性係数に0.0005を乗じた値を初期値とした。今回、減衰に、① 剛性比例型減衰 $\alpha \cdot K$ 、② 非比例減衰 C を用いた2ケースについて逆解析をおこなった。また、測定されたデータは、ピーク値付近まで使用して逆解析を行った。ピーク値以降を使用して逆解析を試みたが、解が発散してしまい安定した収束結果が得られなかった。今回の解析で使用した測定データの着目点は、0.0cm、30.0cm、60.0cm、90.0cm、120.0cmの5点とした。有限要素法の解析領域については、深さ10.0m、幅5.0mの軸対称モデルとし、マトリックスの自由度は580を30に縮小している。また、本手法については、数値シミュレーションにより安定した解を得ることを確認している。

表一2に示した静的な逆解析の収束値と比較して見ると、静的な逆解析と比べて低く表現せれる傾向がある。特に、下層については著しく現れている。これは、動的なデータを用いているためと思われる。また、対象とした舗装構造を半無限多層弾性構造物と考えているため、上層に比べ最下層の解析領域が大きくなること、舗装構造は、広い接地面積をもつので、振動エネルギーが地下へ逸散して失われる割合が大きいことなどが、影響していると思われる。

図一2は、収束結果を用いて計算した応答値と測定値を比較した図である。この図より、剛性比例型減衰、非比例減衰ともに、ピーク値は若干ずれているものの、ピーク発生時刻は、一致している。また、剛性比例型減衰よりも非比例減衰を用いて解析した方が一緻度が良い。しかし、どちらも載荷位置より離れるに連れ、一緻度は悪くなる。

表一 1 舗装構成

	A構造	
	舗装構成	層厚 (cm)
1層	アスファルト	10
2層	M - 30	20
3層	C - 40	28
4層	-	∞

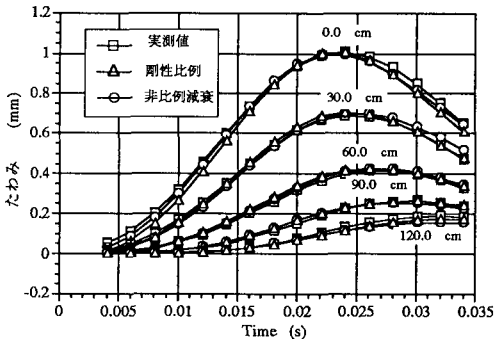
4. おわりに

弾性係数は静的な逆解析の結果と比べて低くする傾向が見られた。これは、動的データで解析を行っているため減衰係数の影響が出たと思われる。

本研究において減衰係数が負になってしまう現象が起こった。しかし、地盤の減衰係数については、現在のところ明確にされていない。今後、静的な逆解析と動的な逆解析との相違を明確にするためにもより多くのデータを解析し解明する必要がある。また、計算精度の向上をはかるためにも本手法を改良していく予定である。

参考文献

1) E.L.Wilson, M.W.Yuan and J.M.Dickens : Dynamic analysis by direct superposition of Ritz vectors , *Earthquake eng.struct.dyn.*10, 813-823 (1982)
2) 松井邦人・栗田哲史：応答加速度を用いた構造特性の同定、*構造工学論文集*.Vol.35A , pp.689-698 ,1989年



図一 2 収束結果を用いて計算した応答値と観測値の比較

表一 2 静的な逆解析の収束結果

データ名	弾性係数 (kgf/cm ²)			
	E1 (表・基層)	E2 (上層路盤)	E3 (下層路盤)	E4 (路床)
A構造	35962.7	2519.1	407.7	596.8

表一 3 剛性比例型減衰の収束結果

データ名	減衰	弾性係数 (kgf/cm ²)			
		E1 (表・基層)	E2 (上層路盤)	E3 (下層路盤)	E4 (路床)
A構造	0.0004274	35961.4	2497.3	249.6	418.8

表一 4 非比例減衰の収束結果

データ名	減衰係数 (kgf・s/cm)				弾性係数 (kgf/cm ²)			
	C1	C2	C3	C4	E1	E2	E3	E4
A構造	11.300	-0.9759	0.29933	0.05621	35958.1	2448.2	127.0	593.3