

静的逆解析によるアスファルト舗装の構造評価診断システムの開発

ニチレキ(株) 正会員 黒林 功
日本舗道技術研究所 正会員 井上武美

東京電機大学 フェロー 松井邦人
東京電機大学 正会員 董 勤喜

1. はじめに

近年における道路整備の進展と共に、それに伴う適切な維持・修繕の必要性が大きくなってきている。現在、舗装の維持・修繕はひびわれ、わだち掘れ等の路面性状の評価結果のみから修繕の必要性の判断と修繕工法が決められている。これらは既設舗装の構造面からみた維持・修繕の判断基準が明確になされていないため、必ずしも合理的でない面もある。非破壊試験機 FWD (図 1 参照) より測定されるたわみは、舗装の残存寿命の推定、オーバーレイ設計などに利用され、今後は理論設計の確立、舗装パフォーマンス予測モデルの構築などの利用に期待されている。そのために、舗装構成層の弾性係数の逆解析が、近年の研究の大きなテーマとなっている。本論文では静的逆解析プログラム“BALM'99”(Back Analysis for Layer Moduli'99)の説明と、アスファルト舗装の評価診断システムへの組み込み方について言及したものである。

2. 構造評価診断システム

FWDより測定されたたわみを用いて舗装の構造評価を行う時、たわみからの評価法と弾性係数からの評価法がある。前者は、運用マニュアルの形で公表されているが、後者は開発途上であり、FWD研究会の内部資料に留まっている。本システムは、後者に基づく方法であり、順解析と逆解析に加えて、逆解析結果の信頼性解析、等値換算係数、残存 T_A 算出が可能ないように構築されている。このシステムの流れ図を図 2 に示す。各構成要素について以下に簡単に述べる。

3. BALM'99

BALM'99 は順解析部分に軸対称多層線形解析ソフト AAMES (Analysis of Axisymmetric Multi-layered Elastic System) を用いており、Gauss・Newton 法、または一般化逆行列法の理論より、未知パラメータを無次元化し、弾性係数を推定する。また、逆解析に潜在的に潜む不適切性を緩和させるため、連立方程式を解くのに適切化手法を導入している。逆解析結果の例を表 1 に示す。

1) AAMES²⁾

AAMES は軸対称問題に限定し多層弾性構造として、ハンケル変換を利用し解析的に解を誘導している。即ち、図 2 に示している入力データより、表面

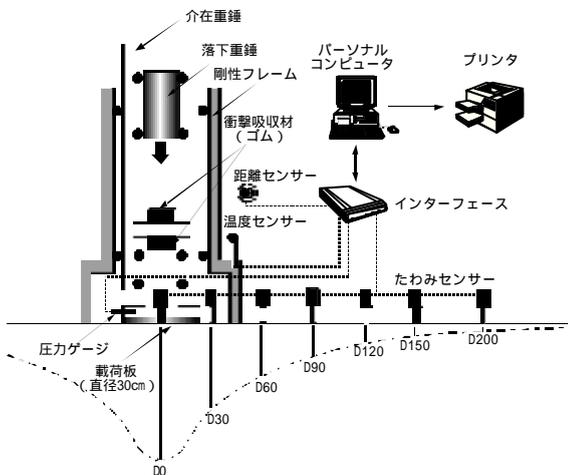


図 1 FWD 測定システムの構成 (単位: cm)

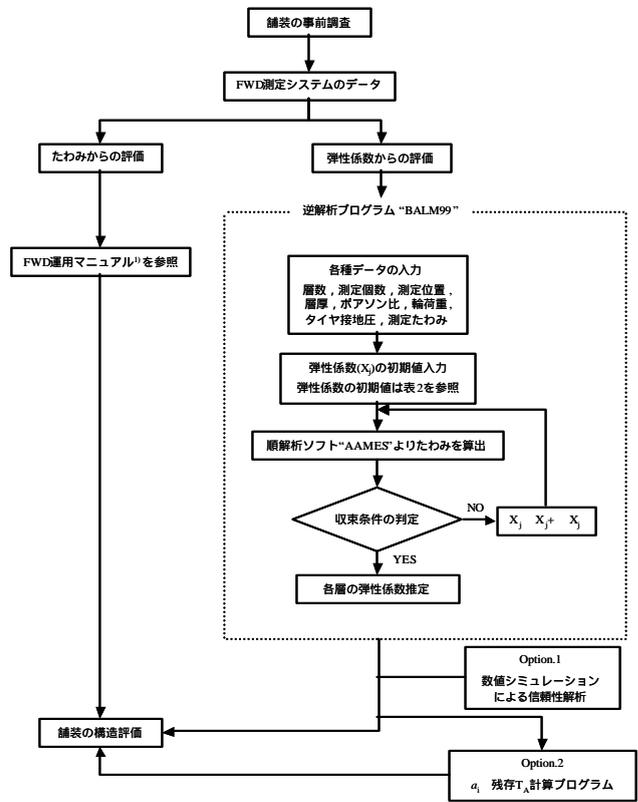


図 2 本システムのフロー

キーワード: FWD, 逆解析, 軸対称, 多層弾性解析, T_A 法

連絡先: 〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂 TEL 0492-96-5731 (内線 2734)

表1 逆解析結果の例

(MPa)	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄
AVE	3584	131	62	64
STD	174	5	3	1
COV(%)	4.8	4.1	4.3	1.3
残存T _A	a ₁	a ₂	a ₃	T _A
	1.00	0.36	0.24	19.36

たわみ，応力，ひずみを求めることができる．

2) 逆解析

a) 理論³⁾ (Gauss・Newton 法，一般化逆行列法)

逆解析は，測定たわみと解析たわみの差の二乗和を最小とする非線形最小二乗問題である．

$$f = \sum_{i=1}^n \{u_i - z_i(\mathbf{X})\}^2 \quad (1)$$

式(1)の評価関数の最小化を行って繰り返し計算し，未知パラメータ \mathbf{X} を推定する．ここに u は測定たわみ， z は解析たわみである．

b) 適切化手法

BALM'99 は打ち切り特異値分解と Tikhonov の適切化のどちらかの方法を選択し，計算を行うことができる．

）打ち切り特異値分解： 最大特異値 \times (3 層モデル： = 0.001，4 層モデル： = 0.03) より小さい特異値を切り捨てることにより数値解析を安定させる．そのため，計算の収束性は速いものの，ときには情報を切り過ぎてしまうことが起こりえる．

）Tikhonov の適切化： 全ての特異値に最大特異値 \times (0.4) の重みを加えることにより数値解析を安定させる．計算の収束性は遅くなるが，常に一定の安定化が行われる．

3) 弾性係数初期値の選定

適切化手法を導入し逆解析すると，結果は弾性係数初期値の影響を多少受けることがわかっている．表 2 に本システムと AASHTO の推奨する弾性係数初期値を示す．

4. 評価支援システム

BALM'99 はオプションとして，以下の評価支援システムがある．

1) 数値シミュレーションによる信頼性解析： FWD 試験を同一個所で 5 回繰り返して行い，得られた測定たわみより，平均値，標準偏差，たわみ間の相関を計算し，これと同じ情報を持つたわみデータを 1000 セット発生させる．順次 5 セットのデータを取りだし，平均たわみを 200 組作成する．このデータを逆解析することにより，200 組の逆解析弾性係数が得られ，これらから，平均値と標準偏差を算出し，さらに 95% 信頼区間を求めている．

2) 残存 T_A 計算プログラム⁴⁾： 推定した弾性係数と次式の等値換算係数 a_i との関係より残存 T_A を計算する．

$$\text{アスファルト混合物} : a_1 = 0.99 \times \log E - 2.36 \quad (a_1 \leq 1.2) \quad (2)$$

$$\text{路盤材} : a_2 = 0.35 \times \log E - 0.384 \quad (3)$$

5. おわりに

道路整備における舗装の維持・修繕の設計を支援できる本システムは，現行の設計法に十分対応し，実務レベルにおいても有効に活用できると考えている．今後，このシステムは，調査対象区間から測定間隔の選定，各々の区間での測定回数の選定を行い，プロジェクトレベルで補修の良否を判断し，残存寿命を推定するシステム構築を目指している．

参考文献

- 1) 土井内ほか：FWD 運用マニュアル，舗装，pp.4-6，1997.
- 2) 山峯ほか：軸対称多層弾性構造の解析ソフト AMES の開発，土木学会第 54 回年次学術講演会，V-5，pp.404-405，1999.9.
- 3) 松井ほか：舗装各層の弾性係数を表面たわみから推定する一手法，土木学会論文集，第 420 号 / V-13，pp.107-114，1990.8.
- 4) 井上武美：アスファルト舗装の支持力性能の評価と修繕設計に関する研究，博士論文，1994.3.

表2 弾性係数初期値の推奨値

(MPa)	本システム	AASHTO	アスファルト舗装要綱 (材料物性の範囲)
アスファルト混合物	5,880	3,500	6,000 ~ 100,000
セメントコンクリート	19,600	35,000	10,000 ~ 150,000
セメント安定処理路盤	3,920	4,100	
碎石路盤	392	200	1,000 ~ 6,000
碎石下層路盤	196	100	
粘性土 (路床土)	59	50	設計 CBR \times (40 ~ 100)
セメント安定処理土	350	350	-
石灰安定処理土	140	140	-