

時系列データを用いた動的FEMによる 逆解析に関する研究

金井利浩¹, 東 滋夫², 岡部俊幸³, 松井邦人⁴, 渡辺規明⁵

1,2,3 正会員 鹿島道路(株)技術研究所(〒182 東京都調布市飛田給2-19-1)

4 正会員 Ph.D. 東京電機大学理工学部建設工学科(〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

5 学生会員 東京電機大学理工学部建設工学科(〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

FWD (Falling Weight Deflectometer) によって測定された時系列たわみデータから、動的FEMにより各層の弾性係数を推定する方法について検討した。まず、解析上の基本的な項目である、1) 時系列たわみデータの時間軸原点の設定、2) 使用するセンサーの選定および3) 解析に用いる時間範囲の抽出について標準的な方法を設定した。次に、本解析手法である動的FEMと従来の多層弾性理論の2つの手法により、舗装構成が既知である現場の測定データを逆解析して、1) 載荷荷重の違いが解析結果に及ぼす影響と2) 同一地点での時刻経過に伴う弾性係数の変化について比較・検討した。その結果、時間の関数として荷重およびたわみを取り扱う本動的手法の有効性が確認された。

Key Words : pavement structure, backcalculation, elastic multilayer system, Gauss-Newton method, FEM

1. はじめに

舗装の構造評価を行うにあたっては、路面に衝撃荷重を与え、表面たわみを測定するフォーリング・ウェイト・デフレクトメータ(以下、FWDと称す)を活用し、測定された表面たわみから多層弾性理論を用いて静的に各層の弾性係数を推定するのが一般的である^{1), 2)}。

しかし、多層弾性理論では、本来動的な応答として得られるたわみ量を、その最大値のみをピックアップした静的なデータとして解析を行うため、解析結果が材料物性から考えて妥当とは思われないケースも見られる。

このような現状を踏まえ、FWDにより測定される時系列データを用いて舗装構造の動的な解析を行う手法の開発が世界レベルで始められている³⁾。さらに、動的な逆解析⁴⁾も試みられているが、その手法の詳細は明らかではない。

本研究は、FWD試験より得られた動的な時系列の実測たわみデータを用いて動的FEMにより舗装各層の弾性係数を推定する方法について、多層弾性理論との比較を交えて検討するものである。

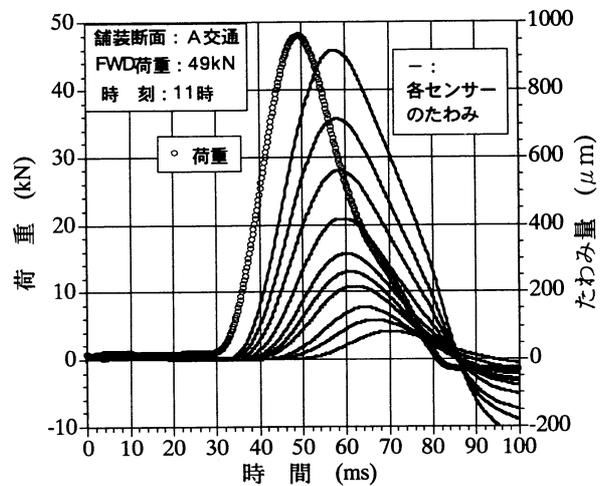


図-1 時系列データ

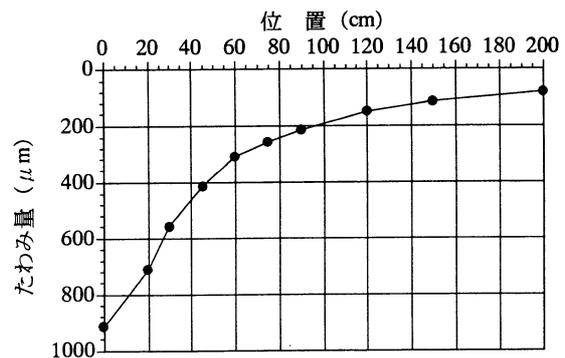


図-2 たわみ曲線

表-1 測定に用いたFWDの仕様

諸元	仕様
载荷方式	複重錘システム
载荷荷重	24.5kN, 49kN, 78.5kN, 98kN
载荷板	直径 300mm (4分割)
たわみセンサ位置	0, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 120, 150, 200cm (計10個)
付属計器	気温測定センサ, 路面温度測定センサ, 移動距離測定用距離センサ
データ収録	・荷重、各センサのたわみ、気温、距離および測定時刻データを一括してコンピュータに収録 ・時系列データの取り込み間隔: 0.2ms

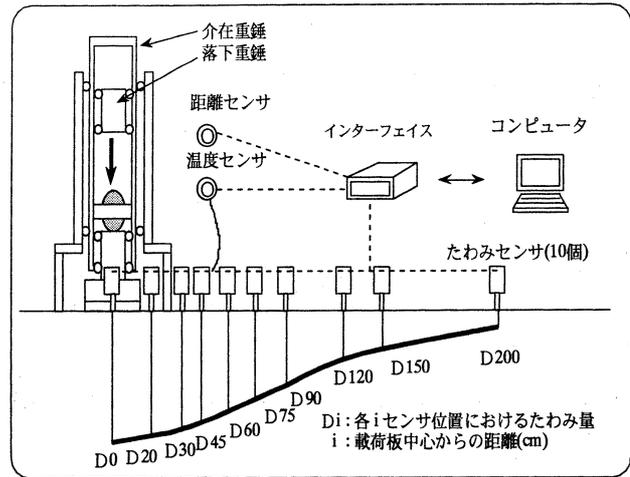


図-3 FWDの機構

2. 研究の目的

FWDにより、载荷板中心位置から所定の距離離れた複数の点で同時に測定されるたわみ量は、図-1に示すように衝撃荷重が作用する過程の中で時間の経過に伴って変化する時系列データである。

測定された時系列データの中からたわみ量の最大値をピックアップして線で結ぶと、図-2に示すようなたわみ曲線が得られる。現在広く利用されている多層弾性理論による静的逆解析では、このたわみ曲線が、ある大きさの荷重が静的に作用したときに舗装表面に生じるたわみ形状を表わしていると仮定して解析を行っている。

しかし、図-1を詳細にみると、荷重および各センサ位置におけるたわみ量が最大となる時間は同時ではなく、厳密に言えば図-2に示すたわみ形状は存在しないことになる。多層弾性理論による逆解析において、材料特性から考えて妥当とは思われない結果が得られる場合があるのは、このような事情によることも大きいと考えられる。

そこで、著者らは静的逆解析に代わる方法として図-1に示すような時系列データを利用して動的逆解析法の適用^{5), 6)}について検討を行ってきた。解析には構造物の力学特性のみならず、振動特性(減衰特性)も考慮した動的FEMモデルを用い、数値シミュレーションではあるが、良好な弾性係数値が比較的短時間で得られる段階にまで計算アルゴリズムの開発は完了している。

本研究は、舗装構造が既知の試験ヤードにおいてFWDで実測した時系列データについて動的逆解析を実施し、本手法が測定誤差を含んでいると考えられる実測データにも適用可能かどうかを検証することを目的としている。

3. 弾性多層構造の動的解析法

本研究では、一般的な線形多層弾性理論と同様の仮定のもとで軸対称要素を用いた動的FEMによる多層構造体の逆解析を行う。解析にあたっては要素としてアイソパラメトリック8節点要素を用い、解析領域で(1)式の運動方程式を構築している。計算においては、リッツベクトル⁷⁾を用いてマトリックスを縮小し、計算時間の短縮化を図っている。

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

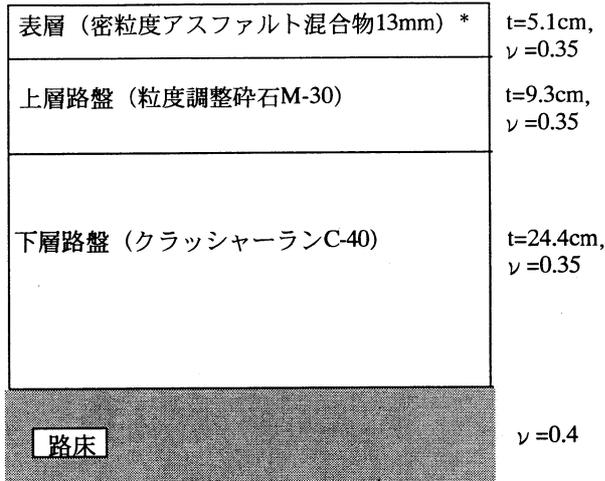
ここに、 M 、 C 、 K は $N \times N$ の質量、減衰、剛性マトリックスである。また、 $\ddot{z}(t)$ 、 $\dot{z}(t)$ 、 $z(t)$ 、 $f(t)$ は、それぞれ応答加速度、応答速度、応答変位、外力を表す $N \times 1$ のベクトルである。

なお、多層構造体の運動方程式を構成する質量、減衰ならびに剛性マトリックスのうち、減衰モデルについては弾性係数と同様に各層で減衰係数が異なると考えた層別剛性比例モデルを用いた。

逆解析においては、各層の層厚とポアソン比を固定して各層の弾性係数と減衰係数を未知のパラメータとし、測定たわみと解析たわみの差を評価する評価関数が最小となるようガウス・ニュートン法により未知パラメータを決定している。

4. 逆解析に用いる時系列データの測定

逆解析には鹿島道路(株)機械センター構内に構築したテストピット(A交通対応断面のアスファルト舗装)においてFWDで測定したたわみデータを用いる。なお、同箇所では1時間毎に気温と舗装体温度を熱電対により計測しており、測定たわみと舗装体



*アスファルト混合物層には、深さ5mm, 2mm, 45mmに熱電対が埋設してある。

図-4 測定箇所の舗装断面

表-2 測定時刻と荷重条件

時刻	11時	13時	15時	17時	19時	21時	23時
荷重 (kN)	24.5	○	—	—	—	—	—
	49	○	○	○	○	○	○

温度とを関連付けられるようになっている。測定の概要は以下のとおりである。

(1) FWDの概要

今回、時系列データの測定に用いたFWDの概要は、表-1および図-3に示すとおりである。

(2) 測定箇所および舗装断面

- ・測定場所：鹿島道路 (株) 機械センター構内・テストピット (埼玉県北葛飾郡栗橋町大字高柳2600)
- ・舗装断面：A交通断面のアスファルト舗装 (図-4参照)

なお、当該舗装においては、アスファルト混合物層の温度を測定するために、深さ5mm, 25mm, 45mmに熱電対を埋設し、データロガーに1時間毎の温度データを記録している。

(3) 測定日時および荷重などの測定条件

- ・測定日時：平成7年9月25日 (月) 11:00~23:00 (2時間毎に測定)
- ・天候：快晴
- ・測定時刻と荷重条件：表-2参照。○印が測定を実施したことを示す。なお、いずれの測定においても測定回数は1回である。

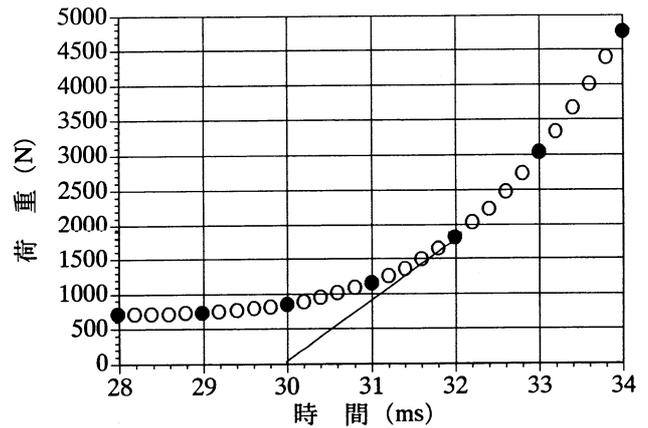


図-5 時間軸原点付近での時系列荷重データ

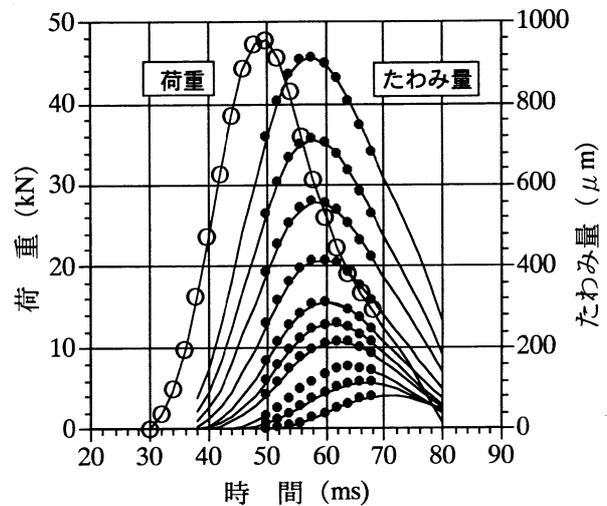


図-6 逆解析計算に用いた時系列データの例 (時間軸原点:30msの場合)

5. FWDによる実測時系列データの事前処理方法の検討

FWDは衝撃荷重を用いて試験を行う装置であり、時系列データを計測する機能は有しているが、荷重の最大値とたわみの最大値を正確に測定することに重点を置いているため、载荷の初期におけるデータの精度については多少問題があるようである。したがって、計測された時系列データをそのまま、動的逆解析のデータとして利用することはできない。また、その他にも多層弾性理論の場合と同様、どのセンサーを用いて解析を行うかといった問題もある。

- そこで、まず、1995年9月25日11時に測定した49kN载荷による時系列データ (図-1) を用いて、
- ・载荷が始まる時点、すなわち解析上の時間軸原点の決定
 - ・逆解析に用いる最適なセンサーの選定
 - ・時系列たわみデータの解析対象範囲の設定
- の3つの基本的事項について検討した。

表-3 時間軸原点の設定と逆解析結果

原点の時間 (ms)	計算回数*	弾性係数 (MPa)				評価関数 J
		E1	E2	E3	E4	
24	21(19)	5011	347	79	50	1.20×10^{-5}
26	21(19)	5017	346	79	50	1.20×10^{-5}
28	21(19)	5023	346	79	50	1.19×10^{-5}
30	21(19)	5031	346	79	50	1.18×10^{-5}
32	21(19)	5046	344	79	50	1.17×10^{-5}
34	21(19)	5114	343	78	51	1.12×10^{-5}
36	22(20)	5263	344	76	52	1.05×10^{-5}
38	23(20)	5458	341	73	53	1.05×10^{-5}

* () 内は、評価関数が最小になったときの計算回数。

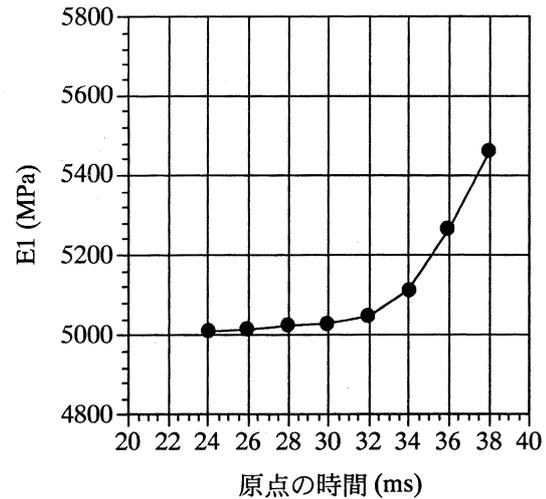


図-7 時間軸原点と弾性係数 E1 の関係

(1) 载荷が始まる時点、すなわち解析上の時間軸原点の決定

a) 解析上の時間軸原点とその決定法

動的解析においては、初期条件として落下した重錘により载荷が始まる時点(以下、時間軸原点)においてすべてのたわみ量はゼロであると、時系列たわみデータと時間の関係はその時間軸原点を基準に定められることになる。

図-5に载荷が始まる前後の時系列荷重データを示す。この図を見ると、载荷以前にも既に700N程度の荷重が記録されているが、この値は記録計のオフセット値(修正値)であり、作用荷重ではない。また、衝撃荷重は载荷板上に取り付けられた複数のゴム製のバッファを通じて伝達されるため、荷重は非常にスムーズに増加しており、時間軸原点を客観的に特定することは難しい。

そこで、便宜上、原点となる時間(例えば、28ms)を仮に定めて荷重を読みとり、その値とその点から1ms後(すなわち、29ms)の荷重の大きさを比較する。仮の原点を移動させながら、順次この作業を繰り返し、荷重の増加量が最大荷重の1%を初めて超えたとき、仮に定めた原点を時間軸原点とすることにした。また、そのようにして決定した時間軸原点での荷重は、オフセット値を無視してゼロであるとした。

本データの場合、このようにして求められた時間軸原点は30msであった。解析に用いるデータの取り込み間隔を2ms、また、時間軸原点での荷重をゼロとすると、時間軸原点と次データ(32ms)は図-5の実線のように結ばれる。

b) 時間軸原点の決定方法の妥当性

このような時間軸原点の決定方法が妥当であるかを検証するために、時間軸原点を30msを中心に24msか

ら38msの範囲で2msずつ変化させて逆解析を行った。なお、たわみデータに関しては、図-6(時間軸原点:30msの場合)に示すように全センサーのデータ(D0~D200)を用い、50~68msを解析対象範囲として計算を行った。

逆解析の結果を表-3に示す。この結果をみると、収束までの計算回数ならびに評価関数の値に大差はなく、いずれの時間軸原点においても、良好な収束が得られている。しかし、図-7に示すとおり時間軸原点となる時間とアスファルト混合物層の弾性係数E1との関係でみると、E1は32ms以下ではほとんど変化は見られないが、32msを過ぎたあたりから急激に変化している。この傾向は、路盤・路床の弾性係数(E2, E3およびE4)についても同様であり、32ms以下ではいずれの弾性係数についてもほとんど変化は見られなかった。

したがって、今回設定したすべての時間軸原点(24~38ms)において、良好な収束は見られたものの、解析の結果得られた各層の弾性係数の傾向から、時間軸原点は32ms以下に設定することが望ましいと考えられる。今回、便宜的に考案した方法で得られた30msという値はその望ましい範囲に入っていることから、本法が時間軸原点の設定方法として妥当なものであると判断し、以下の解析では、このように補正したデータを用いている。

(2) 逆解析に用いるセンサーの選定

载荷板直下のD0センサーのみ(センサ1個)から、D0とD20(センサー2個)というようにセンサー数を順次増やして逆解析を実施し、使用するセンサーの個数が解析結果に及ぼす影響について検討した。解析結果を表-4に示す。

表-4 センサー数を変えたときの逆解析結果

センサー数 MP	計算回数*	弾性係数 (MPa)				評価関数 J	修正評価関数 J/MP
		E1	E2	E3	E4		
1	15(15)	3233	261	103	53	9.14×10^{-8}	9.13×10^{-8}
2	18(17)	4625	426	90	45	2.93×10^{-7}	1.47×10^{-7}
3	44(43)	7899	444	23	91	2.28×10^{-6}	7.59×10^{-7}
4	32(30)	6098	448	46	59	4.24×10^{-6}	1.06×10^{-6}
5	27(27)	6161	400	56	54	5.23×10^{-6}	1.05×10^{-6}
6	24(23)	5820	372	66	52	7.60×10^{-6}	1.27×10^{-6}
7	23(21)	5470	364	72	51	9.57×10^{-6}	1.37×10^{-6}
8	22(20)	5221	355	76	50	1.07×10^{-5}	1.33×10^{-6}
9	21(19)	5057	347	79	50	1.15×10^{-5}	1.28×10^{-6}
10	21(19)	5031	346	79	50	1.19×10^{-5}	1.18×10^{-6}
7(0-150)	18(15)	4251	307	98	48	6.38×10^{-6}	9.12×10^{-7}

* () 内は、評価関数が最小になったときの計算回数。

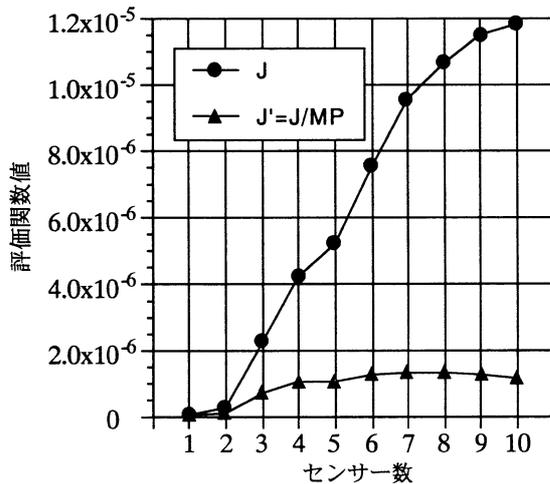


図-8 センサー数と評価関数値の関係

a) 評価関数値

図-8は、センサー数と評価関数Jの関係を示している。センサー数が増加するにともない、評価関数Jの値は順次大きくなっていく。これは使用センサー数が多くなれば、測定たわみと解析たわみの組み合わせ数が多くなり、残差平方和が大きくなるという当然の結果を示している。したがって、センサー数の異なる解析結果の精度を比較するためには、センサー数に応じて評価関数を修正する必要がある。ここでは、評価関数Jをセンサー数で除したものを修正評価関数J'と定義して図-8に併記した。この図より、修正評価関数J'はセンサー数7個でピークを持つゆるやかな凸型の曲線となっており、センサー数が少ない場合を除けば、大差のない結果となっている。

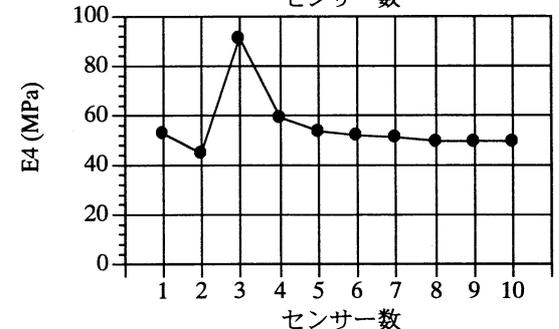
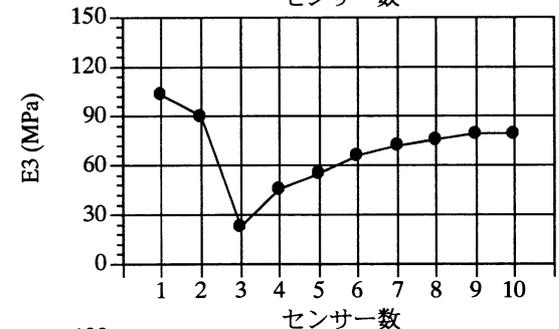
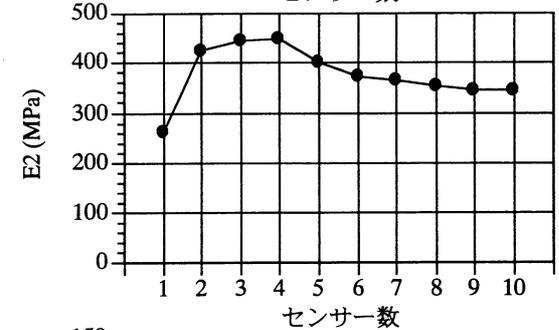
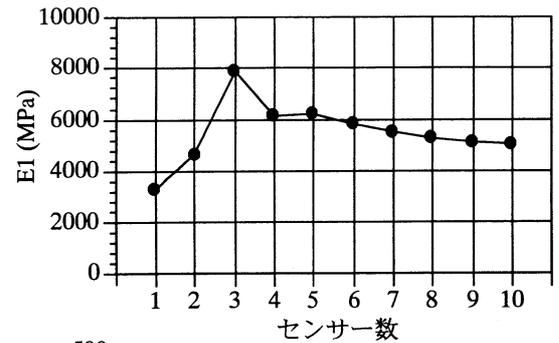


図-9 センサー数と弾性係数の関係

b) 弾性係数

図-9にセンサー数と逆解析の結果得られた弾性係数の関係を示す。この図より、弾性係数はすべての層において、センサー数3個のところで増加あるいは減少の傾向が逆転しており、その後センサー数が多くなるに従い、値が収束していくように見える。また、表-4より、センサー数が3および4個の場合には、弾性係数E3とE4で大きさが逆転しており、材料特性から考えて妥当とは言えない結果となっている。

これらのことから、逆解析には載荷板中心に近い位置のたわみデータだけでなく、遠く離れた位置(D90, D120, D150ないしD200)のデータも含めることが望ましいものと推察される。

表-5 解析範囲の始まりの時間を変化させたときの解析結果

解析時間 (ms)	計算回数*	弾性係数 (MPa)				評価関数 J
		E1	E2	E3	E4	
44-68	21(17)	4833	304	89	49	1.35×10^{-5}
46-68	20(17)	4807	307	89	49	1.12×10^{-5}
48-68	19(16)	4762	302	93	49	8.66×10^{-6}
50-68	18(15)	4251	307	98	48	6.38×10^{-6}
52-68	18(15)	4426	293	96	49	4.34×10^{-6}
54-68	18(16)	4741	275	95	51	2.85×10^{-6}
56-68	21(20)	5031	263	92	52	1.75×10^{-6}
58-68	25(24)	5179	263	88	53	1.05×10^{-6}

* () 内は、評価関数が最小になったときの計算回数。

c) 逆解析に用いるセンサーの選定

以上の検討結果より、逆解析には載荷板中心付近およびそこから遠く離れた位置でのたわみデータを用いることを念頭に置きながら、計算時間の短縮化も勘案して、D0, D30, D45, D60, D90 および D150 の7個のセンサーを使用することとした。ここで、D75とD200を除いたのは、これらのデータが解析結果にあまり影響しないと予想されたためであり、また、D200についてはセンサー位置が載荷板端部に近く、載荷板の接地の仕方によってたわみの値が大きく変動するものと考えられることから、今回の検討では除外することとした。

上記7個のたわみデータを用いて解析した結果を表-4の最下段に示す。弾性係数に逆転現象はなく、工学的見地からもほぼ妥当な結果であると考えられる。

(3) 時系列たわみデータの解析範囲の設定

時系列たわみデータに関して、解析に用いる時間の範囲(データ数)を変化させて逆解析を行い、解析結果がどのように変化するかを調べた。たわみデータの解析範囲の設定にあたっては、逆解析の観点からは解析範囲を長く設定するほど、情報量が多くなり精度が向上すると考えられるが、1サイクル当たりの計算時間が長くなることおよびセンサー精度の関係上、たわみ量のピーク値付近の値が最も精度が良いということを考慮する必要がある。

なお、前述の(1)、(2)の検討結果に基づき、時間軸原点は30msとし、使用するセンサーは、D0, D30, D45, D60, D90, D120 および D150 の7個とした。

a) 解析範囲の終わりの時間を固定し、始まりの時間を変化させた場合

解析範囲の終わりの時間を68msに固定し、始まり

表-6 解析範囲の終わりの時間を変化させたときの解析結果

解析時間 (ms)	計算回数*	弾性係数 (MPa)				評価関数 J
		E1	E2	E3	E4	
50-58	26(23)	4693	466	88	31	1.18×10^{-6}
50-60	24(22)	4499	409	95	36	1.94×10^{-6}
50-62	22(18)	4268	372	100	39	2.82×10^{-6}
50-64	19(17)	4170	346	101	43	3.86×10^{-6}
50-66	20(15)	4119	324	101	45	5.01×10^{-6}
50-68	18(15)	4251	307	98	48	6.38×10^{-6}
50-70	20(16)	4473	290	94	51	8.10×10^{-6}
50-72	20(17)	4835	274	89	53	1.04×10^{-5}
50-74	20(18)	4825	289	81	55	1.36×10^{-5}
50-76	25(20)	4881	298	76	58	1.73×10^{-5}
50-78	26(22)	4731	326	69	60	2.23×10^{-5}
50-80	28(23)	5118	324	66	61	2.88×10^{-5}

* () 内は、評価関数が最小になったときの計算回数。

の時間を44msから58msまで2msずつ変化させて逆解析した結果を表-5に示す。

収束までの計算回数は50~54msを始まりの時間とした場合に最も少なく、その前後の時間では計算回数が増える傾向にあるが、すべての計算において収束している。各層の弾性係数の解析結果を見ると、E1: 4251~5179MPa, E2: 263~307MPa, E3: 88~98MPa, E4: 48~53MPaの範囲にあり、解析範囲の始まりの時間を変化させても、いずれの層の弾性係数についてもあまり大きな変動はない。

b) 解析範囲の始まりの時間を固定し、終わりの時間を変化させた場合

解析範囲の始まりの時間を50msに固定し、終わりの時間を58msから80msまで2msずつ変化させて逆解析した結果を表-6に示す。

収束までの計算回数は64~68ms付近を終わりの時間とした場合に最も少なく、その前後の時間とすると計算回数が増える傾向にあるが、こちらもすべての計算において収束している。各層の弾性係数の解析結果を見ると、E1: 4119~5118MPa, E2: 274~466MPa, E3: 66~101MPa, E4: 31~61MPaの範囲にあり、解析範囲の始まりの時間を変化させた場合よりも若干変動が大きくなっている程度である。

c) 解析範囲の設定

a), b) の検討結果から、今回の設定範囲においては始まりおよび終わりの時間を変化させても、解析結果にはあまり影響しないことがわかった。そこで、解析範囲については、収束までの計算回数が最も少なかった、52msを始まりの時間に、66msを終わりの時

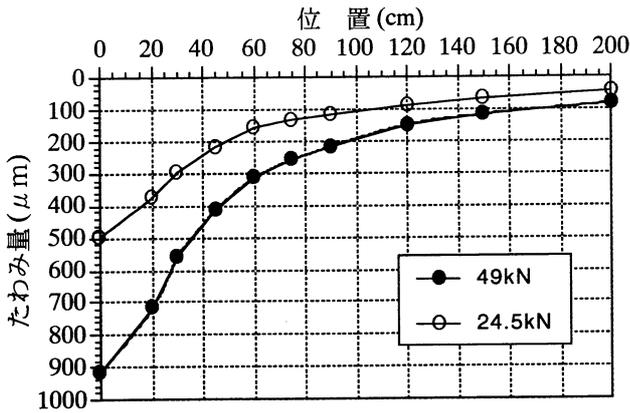


図-10 たわみ曲線 (24.5kN 載荷と 49kN 載荷)

間に設定しても特に問題はないと思われる。この解析範囲で逆解析した結果は、表-7 の下段に示すとおりである。

解析範囲の決定にあたっては、決定的な方法はないが、今回定めた始点と終点は、たわみ量 D0 のピーク値に対して 80% 以上の大きさの D0 値が解析対象となるように解析範囲を設定した場合の始点 (52ms) と終点 (66ms) に一致していることから、以下の検討ではこの方法で解析範囲を設定することとした。

6. 実測時系列データを用いた動的逆解析の適用例

以上の検討により、動的逆解析を行うにあたっての時系列データの事前処理方法が決定されたので、その適用例として次の 2 事例について逆解析を実施した。

(1) 同一地点における載荷荷重が異なるたわみデータの逆解析

テストピットの同一地点で 1995 年 9 月 25 日 11 時に測定された載荷荷重 24.5kN と 49kN での実測データを用いて、動的および静的逆解析を行った。

なお、24.5kN 載荷の時系列データについて 5 章で述べた方法により時間軸原点および解析に用いる時間の範囲設定を行ったところ、49kN 載荷時と同じとなったため、いずれの載荷荷重の時系列データに関しても、時間軸原点：30ms、センサー：7 個 (D0, D30, D45, D60, D90, D120 および D150)、解析範囲：52ms～66ms (2ms 毎) として解析を行った。

a) 動的逆解析結果

24.5kN 載荷と 49kN 載荷の時系列データについて動的逆解析を行った結果を表-7 に示す。

これを見ると、各層とも 24.5kN 載荷データで得られた弾性係数の方が 49kN 載荷のものよりも若干大き

表-7 載荷荷重が異なる時系列データの動的逆解析結果

荷重 (kN)	計算回数*	弾性係数 (MPa)				評価関数 J
		E1	E2	E3	E4	
24.5	19(16)	6273	515	173	68	2.57×10^{-6}
49	17(15)	4246	313	99	47	3.40×10^{-6}

* () 内は、評価関数が最小になったときの計算回数。

表-8 載荷荷重が異なるたわみデータの静的逆解析結果

荷重 (kN)	弾性係数 (MPa)			
	E1	E2	E3	E4
24.5	15353	27	941	64
49	7035	507	92	72

くなっているが、上下層路盤での弾性係数の逆転現象もなく、どちらの載荷荷重に関しても工学的な見地からはほぼ妥当な結果が得られていると考えられる。

b) 多層弾性理論による静的逆解析結果

24.5kN 載荷と 49kN 載荷の時系列データから、荷重およびたわみの最大値をピックアップして、多層弾性理論による静的逆解析を行った。両者のたわみ曲線を図-10 に示す。また、表-8 に動的解析と同様の 7 個のセンサーを用いた静的逆解析結果を示す。

表-8 より、49kN 載荷データについては、上層よりも下層の弾性係数が大きくなる、いわゆる逆転現象は見られないが、24.5kN 載荷データに関しては E2 と E3 (上層路盤と下層路盤) の間で逆転現象が生じている。また、アスファルト混合物層の弾性係数が 10000MPa を超えており、測定時の温度データ (気温：28.3℃、路面温度：45.5℃、舗装体平均温度：40.4℃) から判断すると適切な値とは考え難い。

c) 動的逆解析結果と静的逆解析結果の比較

静的逆解析に比べ、動的逆解析では 24.5kN 載荷データについても良好な弾性係数が得られた。この理由として、各センサー位置での最大たわみだけではなく、解析時間範囲内において時系列に連なる複数のたわみデータを入力値として用いていることが挙げられる。すなわち、静的逆解析では、各センサー位置での最大たわみの大小関係のみが問題になるが、動的逆解析ではその他に 1 つのセンサー位置における時間的なたわみ量の変化も重要なファクターとして取り込んでいるため、最大たわみの値に多少の誤差が含まれていても、その影響が静的逆解析の場合ほど顕著に現れないものと考えられる。

なお、動的逆解析結果においては、すべての層の弾性係数が 49kN 載荷時よりも 24.5kN 載荷時において大きくなっている。これは、与えた応力とその応答ひ

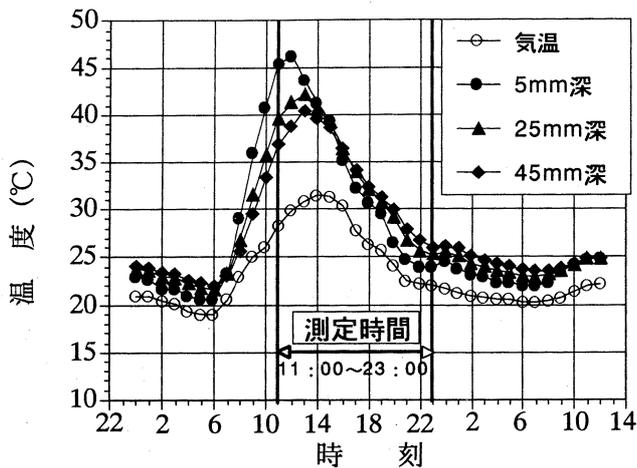


図-11 測定時の温度データ

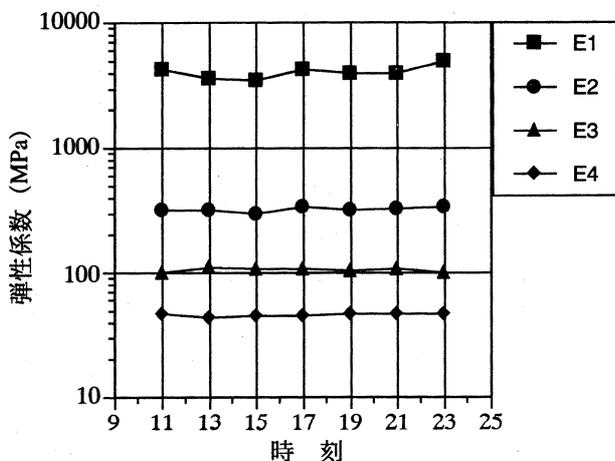


図-12 動的逆解析による弾性係数の推移

表-9 各測定時刻における動的逆解析結果

測定時刻	計算回数*	弾性係数 (MPa)				評価関数 J
		E1	E2	E3	E4	
11時	17(15)	4246	313	99	47	3.40×10^{-6}
13時	20(17)	3622	318	111	43	2.48×10^{-6}
15時	18(16)	3466	294	108	45	2.05×10^{-6}
17時	19(16)	4185	342	105	45	2.24×10^{-6}
19時	18(16)	3959	316	102	47	2.69×10^{-6}
21時	19(16)	3925	328	108	46	2.63×10^{-6}
23時	18(16)	4928	338	101	47	3.06×10^{-6}

* () 内は、評価関数が最小になったときの計算回数。

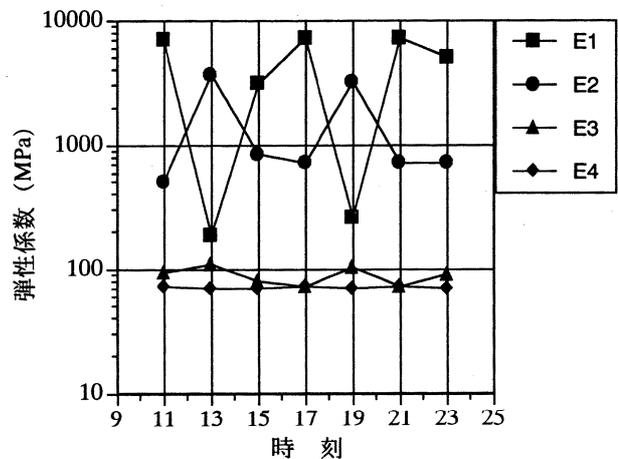


図-13 静的逆解析による弾性係数の推移

ずみから求められる弾性係数(応力/ひずみ)は、応力が小さいほど大きくなるという舗装材料の非線形性を考慮すると妥当な結果であろう。

(2) 同一地点での時刻経過に伴う弾性係数の変化

テストピットの同一地点において9月25日の11:00から23:00まで2時間毎に測定した時系列たわみデータを動的に逆解析し、時刻経過に伴う各層の弾性係数の変化を調べ、実測した舗装体平均温度の変化と対比した。また、同一データについて多層弾性理論による静的逆解析を行い、動的逆解析と比較した。

a) 測定時の温度データ

測定時ならびにその前後の時刻における気温と舗装体温度の推移を図-11に示す。なお、舗装体の温度は表面から5mm、25mmおよび45mmの深さで測定しており、それらを平均した温度を舗装体平均温度としている。

b) 測定データの逆解析結果

11:00から23:00までの2時間毎の測定データを動的逆解析した結果を表-9および図-12に示す。各層の

弾性係数をみると、アスファルト混合物層E1を除いて、時刻経過にともなう変動はあまり大きくない。

次に、動的逆解析と同じ7個のセンサー位置での最大たわみ(D0、D30、D45、D60、D90、D120およびD150)を用いて静的逆解析を行った結果を図-13に示す。図-12および図-13より、動的逆解析の結果得られたすべての層の弾性係数において変動が小さいのに対し、静的逆解析結果では各層の弾性係数は時刻により大きくばらついている。特に13時と19時においてアスファルト混合物層と上層路盤層で弾性係数の逆転現象が生じている。

このように静的逆解析において適当な弾性係数が得られない場合があるのは、たわみデータの測定誤差の他に、解析に用いる情報が少ないために逆にそれに合致する舗装構造の候補が多く存在するということが一つの理由として考えられる。

c) 動的逆解析結果と舗装体平均温度の関係

動的逆解析の結果得られた時刻毎のアスファルト混合物層の弾性係数E1と測定時の舗装体平均温度との関係を図-14に示す。

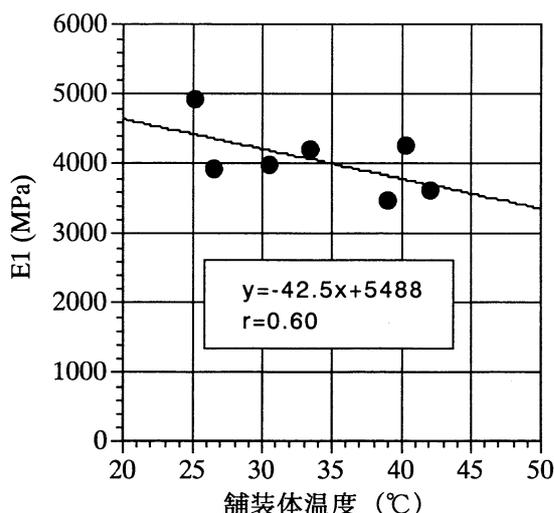


図-14 舗装体平均温度とE1の関係

舗装体平均温度が高くなるにしたがって、E1は減少する傾向にある。この関係は、舗装体温度が上昇すれば、アスファルト単体のスティフネスが低下するため、アスファルト混合物の弾性係数も小さくなるという周知の事実と一致しており、妥当な結果であると考えられる。

7. まとめ

FWDにより測定された実測データを用いて、動のおよび静的逆解析を実施した結果、以下に示す知見が得られた。

(1) 時系列データの事前処理方法の設定

動的逆解析を行うにあたり、つぎの3つの基本項目について標準的な方法などを設定することにより、時系列データを客観的に処理して逆解析に適用できるようになった。

a) 荷荷が始まる時点、すなわち解析上の時間軸原点の決定

FWDの機構上、時間軸原点を客観的に特定することは難しい。そこで、便宜上、原点となる時間を仮に定めて荷重を読みとり、その値とその点から1ms後の荷重の大きさとを比較する。この作業を順次繰り返して行って、荷重の増加量が最大荷重の1%を初めて超えたとき、仮に定めた原点を時間軸原点とすることにした。なお、そのようにして決定した時間軸原点での荷重は、オフセット値を無視してゼロであるとした。

b) 逆解析に用いるセンサーの選定

センサーの個数を変えて検討した結果、逆解析には荷荷板中心付近およびそこから遠く離れた位置で

のたわみデータを万遍なく用いると良いことが判明し、計算時間の短縮化も勘案して、D0、D30、D45、D60、D90、D120およびD150の7個のセンサーを使用することとした。このセンサーの組み合わせで逆解析を実施した結果、弾性係数には逆転現象は見られず、工学的見地からもほぼ妥当な結果が得られた。

c) 時系列たわみデータの解析対象範囲の設定

解析範囲については始まりおよび終わりの時間を変化させても、解析結果にあまり影響しないことがわかった。解析範囲の設定にあたっては、決定的な方法は見い出せなかったが、たわみ量D0のピーク値に対して80%以上の大きさのD0値が解析対象となるように解析範囲を設定すれば、概ね良好な結果が得られるものと思われる。

(2) 荷荷荷重が異なるたわみデータの逆解析結果

同一地点の同一時刻において異なる荷重(24.5kN、49kN)で測定したたわみデータについて静的および動的逆解析を行った結果、静的逆解析では荷荷荷重の小さい場合(24.5kN)には弾性係数の逆転現象(上層<下層)が見られるのに対し、動的逆解析では両荷荷荷重において良好な結果が得られた。また、両荷荷荷重の動的逆解析結果を比較すると、49kN荷荷荷重に比べて24.5kN荷荷荷重の方が、いずれの層の弾性係数も大きくなっており、舗装材料の非線形性から考えて頷ける結果となっている。

(3) 時刻経過に伴う弾性係数の変化

同一地点で2時間毎に測定したたわみデータについて静的および動的逆解析を行った結果、静的逆解析では突発的に(2)と同様に弾性係数の逆転現象が生じており、不安定な解析結果となった。これに対し、動的逆解析では、いずれの時刻のデータに対しても安定した弾性係数が得られており、舗装体温度と対比しても、温度が高くなるに伴い、アスファルト混合物層の弾性係数が低下するという周知の傾向が確認できた。

8. おわりに

今回実施した動的FEMによる逆解析では、いずれの計算も良好な収束を示すとともに、上層路盤と下層路盤での弾性係数の逆転現象も見られなかった。また、アスファルト混合物の弾性係数と舗装体温度との間に良好な相関関係が見られたことなどから、ほぼ妥当な結果が得られたものと考えている。このことは、時系列たわみデータを用いた本逆解析方法が舗装の構造解析に適用可能であることを示すもの

と考える。

しかしながら、今回の検討に用いた舗装構成は、A交通対応断面のアスファルト舗装のみであり、今後はB、C、D交通対応断面のアスファルト舗装やコンクリート舗装、コンポジット舗装などでも、FWDによる時系列データを収集して、本動的逆解析法の適用性についてさらに検討を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 松井邦人,井上武美,三瓶辰之: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, No.420/V-13,pp.107-114,1990年8月.
- 2) Himeno K.,Maruyama T.,Abe N. and Hayashi M : The use of FWD deflection data in mechanistic analysis of flexible pavements,Third International Conference on Bearing Capacity
- of Roads and Airfields,pp.401-410,July,1990.
- 3) Zaghoul,S.,White,T.,Drnevich,V.,P. and Coree,B. : Dynamic analysis of FWD loading and pavement response using a three dimensional dynamic finite-element program, ASTM, STP 1198, pp.125-138 ,1994.
- 4) Uzan,J. : Dynamic linear back calculation of pavement material parameters,Proceedings of ASCE, Journal of Transportation Engineering ,Vol.120,No.1, pp.109-126, Jan./Feb.,1994.
- 5) 松井邦人,西沢辰男,塩谷俊之:時系列データを用いた舗装構造の評価,第6回北陸道路舗装会議技術報文集,pp.379-382,1994.
- 6) 菊田勇征,松井邦人,塩谷俊之,安部芳久:マトリクス縮小化を用いた時間領域における舗装構造の逆解析,現在土木学会論文集に投稿中.
- 7) Wison,E.L.,Yuan,M.W. and Dickens,J.M. : Dynamic analysis by direct superposition of Ritz vector, Earthquake engineering and structural dynamics,10,pp.813-821,1982.

(1996.12.13 受付)

STUDY FOR TIME DOMAIN BACKCALCULATION OF PAVEMENT STRUCTURE BY FEM

Toshihiro KANAI, Shigeo HIGASHI, Toshiyuki OKABE,
Kunihito MATSUI and Noriaki WATANABE

This paper develops a method to backcalculate layer moduli from a time dependent data measured by FWD in site. The following three basic items are examined : 1) Set an origin in time domain load data. 2) Select sensor locations of which deflection data are used for backcalculation. 3) Determine an interval of the deflection data used for backcalculation. By using both dynamic and static backcalculation methods, layer moduli are estimated from sets of data measured every two hours at pavement whose profile is known and the results are compared in this paper. Validity of the backcalculation based on the dynamic analysis is confirmed.