

舗装の動的構造評価と初期値の影響

マイナ・ジェイムス¹・東 滋夫²・菊田征勇³・松井邦人⁴・董 勤喜⁵

¹正会員 Ph.D. 東京電機大学建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

²正会員 鹿島道路(株)技術研究所第三研究室 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

³フェロー会員 博(工) 国土館大学都市システム工学科 (〒154-8515 東京都世田谷区世田谷 4-28-1)

⁴フェロー会員 Ph.D. 東京電機大学建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

⁵正会員 Ph.D. 中央大学土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

FWD 試験データから舗装構造モデルの弾性係数を推定する方法は逆解析と呼ばれており、逆解析は一般に不安定であることが知られている。したがって種々の誤差が逆解析結果に影響を与える。誤差の原因には順解析精度、測定誤差、逆解析の不安定性等が考えられる。アルゴリズムの不安定性のため初期値の選択次第で逆解析結果は大きく影響される。アスファルト混合物層が薄いとこの傾向は顕著になると言われている。本研究では、動的順解析の精度を確認した後、動的逆解析の必要性を例示し、モンテカルロ法を用いて初期値の影響を評価するとともに最確値を求めている。

Key Word : FWD, time series data, static and dynamic backcalculation, seed values, Monte Carlo simulation

1. はじめに

FWD 試験は、舗装の構造評価のための非破壊試験として広く普及し、標準試験とみなされている。今や多くの国々で、この試験結果に基づき維持管理計画を策定する方向にある。FWD 試験データから推定した弾性係数に誤りがあると舗装の破壊回数に影響し大きな出費につながる。Al-Khoury¹⁾らによれば、弾性係数の推定値に5%の誤差があると、残存寿命の誤差は25%になると述べている。それゆえ FWD 試験結果の評価には細心の注意が必要である。

現在普及している FWD 試験データの分析法²⁾は、1)たわみ特性から経験的に直接各層の弾性係数を推定する方法と、2)荷重のピーク値とたわみのピーク値を選択し、それらを準静的なたわみとみなし、静的逆解析法を用いる方法がある。これらの方法では、FWD 試験が衝撃荷重試験であるという試験法の特徴を反映していない。

FWD 試験では重錘が舗装表面と衝突することにより衝撃波が発生し放射状に拡散する。この衝撃波を舗装表面上で重錘落下点と半径の異なる同心円上の数点で鉛直方向の波動(たわみ波形)を測定している。図-1 は実測した FWD のたわみ波形である。測定点におけるたわみのピークに着目すると、荷重載

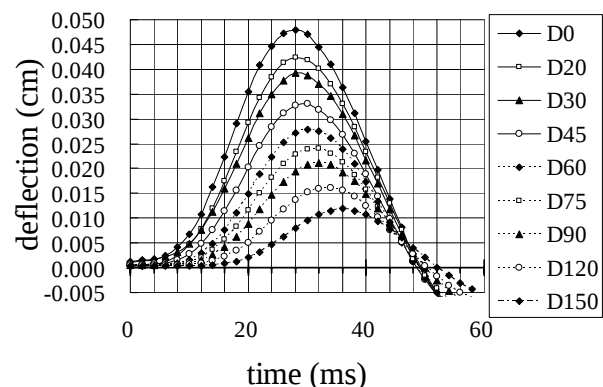


図-1 実測たわみ

荷点から離れるほどピークの出現時刻が遅くなっていることが分かる。この時間的ずれがたわみ波形の位相差と呼ばれ、衝撃波の伝播速度と考えられている。厳密に述べるとこの舗装のような弾性係数の異なる層状構造物において伝播速度は衝撃波の周波数により異なることが知られている。このように時刻歴データには多くの情報が含まれており、その情報を活用することが精度良い診断につながる。

著者らは FWD 試験の時系列データを用いた逆解析法を提案してきた^{3),4)}。静的逆解析と比べると明らかに計算時間が掛かるが、試験法の実態に適合する

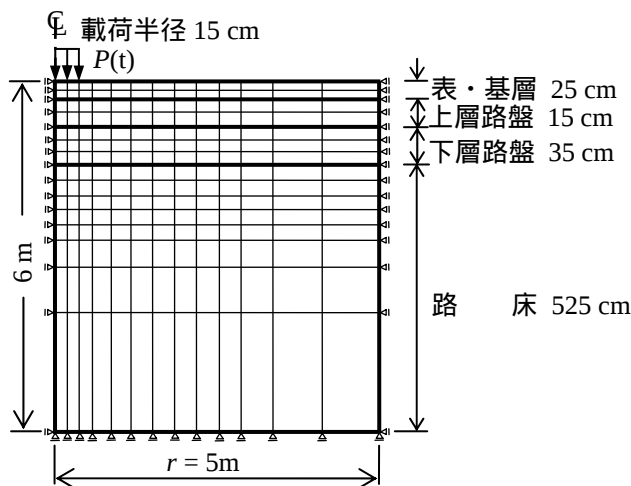


図-2 要素分割図 (自由度 1195)

診断方法であり，従来の方法と比べ解析結果に対する信頼性は高いことを確信している．本研究では，
1) 動的順解析ソフトの精度の確認 2) 数値シミュレーションによる静的および動的逆解析結果の比較，
3) 初期値が逆解析結果に及ぼす影響，について検討した．

2．動的順解析の精度

逆解析を行うために精度良い順解析ソフトを準備する必要がある．静的解析としては線形多層弾性解析ソフト GAMES の軸対称部分の解析を利用している．このソフトの精度は BISAR とも比較し確認済みである．一方，動的順解析には著者らがすでに開発している動的逆解析ソフト D-BALM の中で使用している効率的な DynaPave3 を用いている⁴⁾．このプログラムは計算効率を上げるためリッツベクトルを用いたマトリックス縮小法を取り入れている．しかし，動的順解析の部分については十分にその精度確認を行っているとは言いがたい．数多くの論文で利用されかつ多くの大学で FEM の教育ソフトとしても利用されている ANSYS (汎用 FEM)⁵⁾ との比較を行う．離散化した舗装断面(図-2)を用いて応答解析を行った．両ソフトで計算したたわみの一例を図-3 に比較した．図中 D** は DynaPave3 によるたわみであり A** は ANSYS によるたわみを意味している．また，D(あるいは A)に続く数字は重錘落下点から着目点までの距離(cm)を表している．図からも明らかなように，両者の応答は非常に良く一致している．

念のため，ANSYS による計算たわみに対して，順解析部に DynaPave3 を組み込んだ D-BALM で動的逆解析を行い，DynaPave3 と ANSYS との僅かの応答の

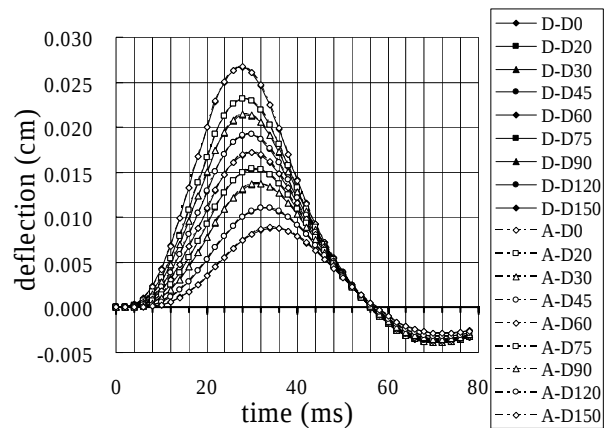


図-3 DynaPave3 と ANSYS とのたわみの比較
(荷重作用時間 $T=40$ ms)

表-1 弾性係数の真値と動的逆解析結果
(荷重作用時間 $T=40$ ms，単位 MPa)

ケース	E1	E2	E3	E4
真値	4000	400	200	60
逆解析結果	4010	399	198	60

差が逆解析結果に及ぼす影響を調べた．その結果を表-1 に示す．弾性係数の真値と逆解析結果との差はほとんどないと言うことができ，DynaPave3 の順解析の精度が十分確認できた．

3．静的および動的逆解析結果の比較

FWD 試験では荷重とたわみのピーク値を静的な荷重とそれに対応する表面たわみとみなし，静的逆解析を行っている．そこで，FWD 試験データを模擬するように，図-2 の舗装断面に図-4 のような荷重波形(case 1 ,case 2)が作用すると仮定し DynaPave3 で動的順解析を行った．各層の弾性係数の真値は， $E1=4000$ MPa , $E2=400$ MPa , $E3=200$ MPa , $E4=60$ MPa である．なお減衰は剛性比例減衰を用い，比例係数は $\beta=0.0005$ である．case 1 はピーク値は同じであるが作用時間 ($T=20, 40, 60$ ms) が異なる 3 種類の荷重波形である．case 2 は荷重が三角波形であり，荷重作用時間($T=40$ ms)とピーク値($P_{max}=49$ kN)は同じであるが，ピーク値が現れる時刻が異なる 3 種類の荷重波形である．これらの荷重波形によるたわみの例を図-5 に示す．図-5(a)を見ると，荷重作用時間が長いほど表面たわみが大きくなっている．図-5(b)を見ると，荷重のピーク時刻が遅れるほどたわみのピーク値が若干大きくなり，ピークが現れる時刻も遅くなっている．

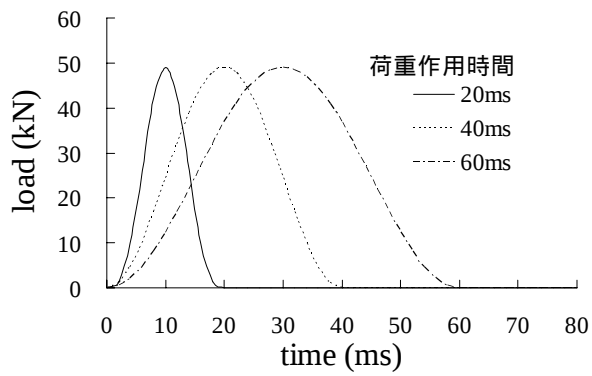


図-4(a) 荷重波形 (case 1)

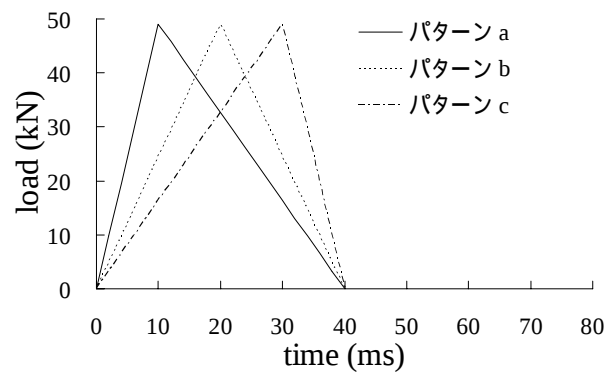
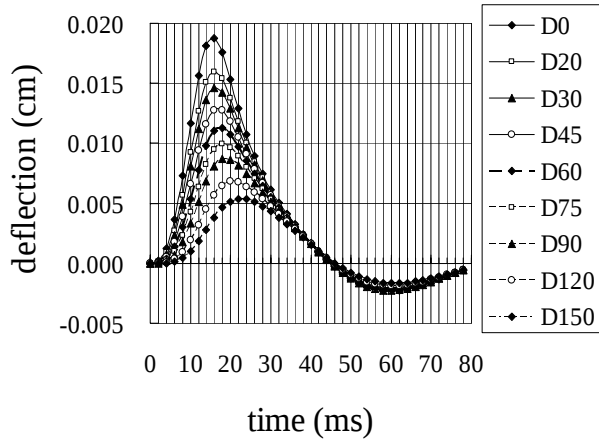
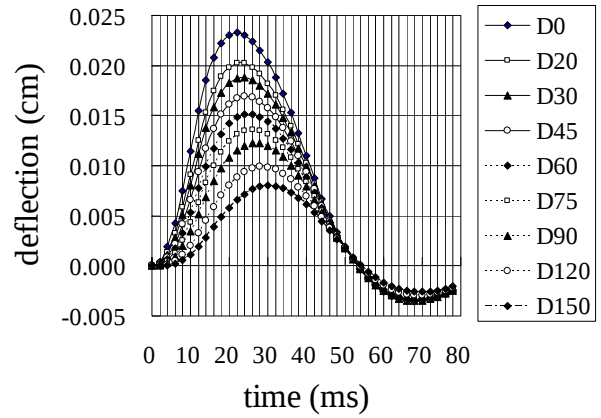


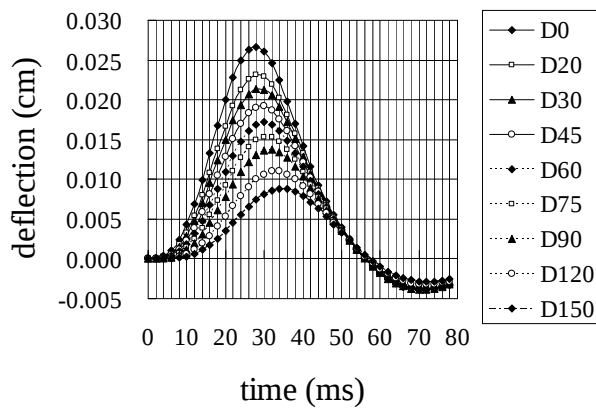
図-4(b) 荷重波形 (case 2)



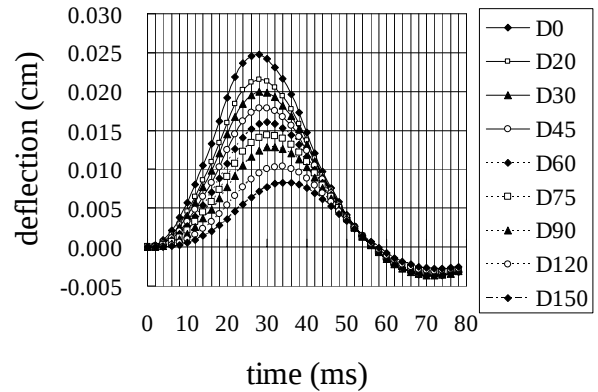
(a) T=20ms



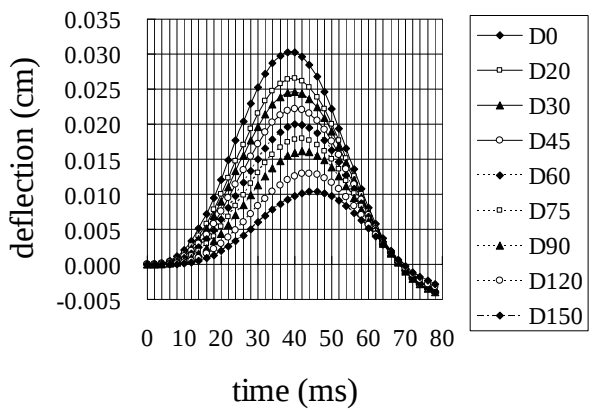
(a) パターン a



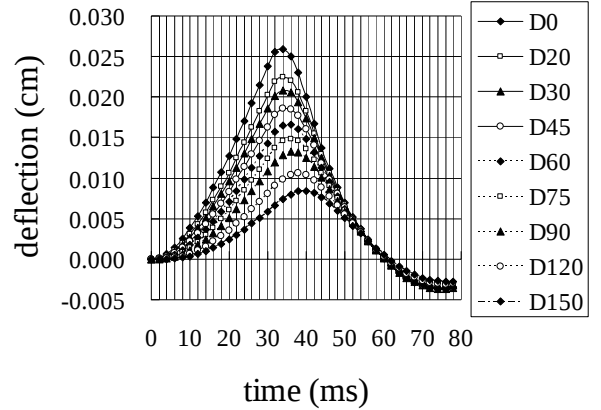
(b) T=40ms



(b) パターン b



(c) T=60ms



(c) パターン c

図-5(a) 応答たわみ (case 1)

図-5(b) 応答たわみ (case 2)

表-2 逆解析結果 (単位: MPa)

case	荷重作用時間 またはパターン	静的逆解析				動的逆解析			
		E1	E2	E3	E4	E1	E2	E3	E4
1	T=20 ms	6049	405	244	173	3998	397	196	61
	T=40 ms	4952	381	191	104	4010	399	198	60
	T=60 ms	4686	343	156	89	4007	400	199	60
2	パターン a	6451	497	251	122	4001	401	201	60
	パターン b	5711	459	239	115	4011	401	200	60
	パターン c	5401	409	210	111	4023	399	198	60
	パターン d	5298	366	170	111	4023	400	199	60

動的逆解析では、図-2のように深さ方向の解析領域は表面から6 mとしている。静的逆解析においても表面から6 mの深さに固い層($E_5=3500$ MPa)を挿入し、その値を固定して逆解析を行った。また時系列データを用いてD-BALMで動的逆解析を行った。その結果を表-2に示す。静的逆解析結果は真値と大きく異なり、特に表・基層および路床の弾性係数と真値との差は顕著である。一方、当然のことではあるが動的逆解析結果は弾性係数の真値に収束している。本来FWD試験は衝撃载荷試験であるので、逆解析も実態に合う形で行う必要があると思われる。

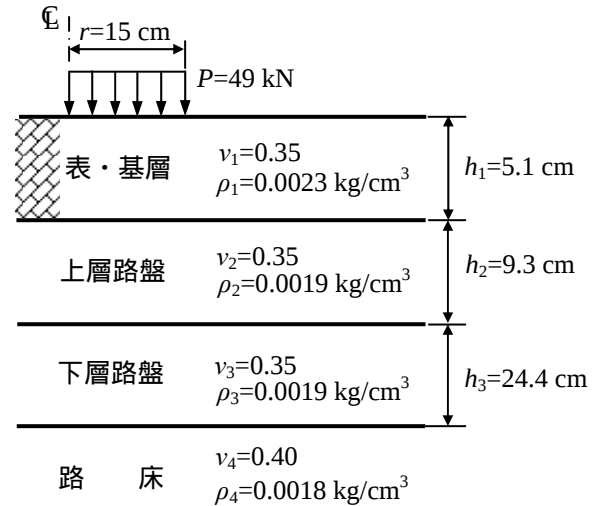


図-6(a) 舗装 A

4. 初期値選択の影響

図-6のような2種類の断面でFWD試験を行った。2種類の舗装は隣り合わせに構築されており、路盤、路床はそれぞれ同じ材料からなっている。舗装 A, B の広さはともに、幅 5m, 長さ 12m であり、アスファルト混合物の厚さは、舗装 A が 5.1 cm, 舗装 B は 24.6 cm である。「同じデータを用いても初期値が異なれば逆解析結果が異なる」ことがしばしば言われており、表・基層厚が 7.5 cm 以下ではこの傾向が顕著であるとも言われている。そのため逆解析には、初期値設定に関して経験が要求されてきた。本研究では、乱数を発生させて弾性係数の初期値を設定し、それらの初期値が逆解析結果にどれだけ影響するかを調べることにした。各層の初期値の設定範囲は表-3のとおりである。

逆解析するに当たり、表-3の範囲で各層の弾性係数の初期値として1000組の乱数を次の2通りの方法で発生させた。

case 1: 4000 個の一樣乱数を発生させ、個々の乱数を用いて表-3の範囲の弾性係数に変換し、1000 組の初期値を準備する。

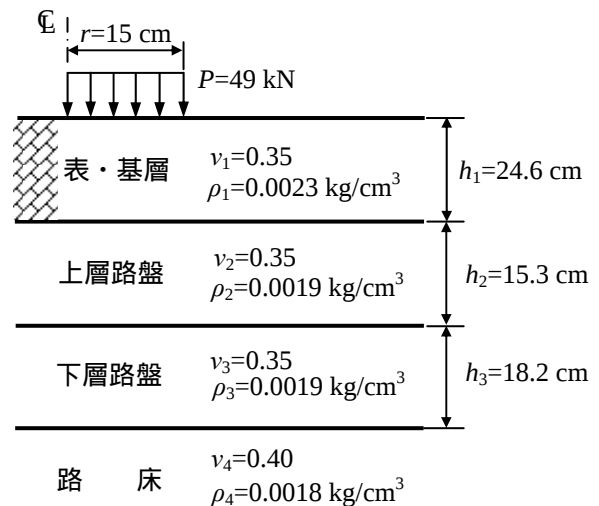


図-6(b) 舗装 B

表-3 弾性係数の初期値

材料	弾性係数の範囲 (MPa)
アスファルト混合物層	$1,000 < E_1 < 10,000$
上層路盤	$100 < E_2 < 500$
下層路盤	$80 < E_3 < 300$
路床	$50 < E_4 < 150$

表-4 乱数による 1000 個の弾性係数を初期値とした静的・動的逆解析結果（平均値の単位：MPa）

逆解析 種別	舗装 種別	乱数 種別	E1		E2		E3		E4	
			平均値	変動係数	平均値	変動係数	平均値	変動係数	平均値	変動係数
静的	舗装A	case 1	7846.828	0.353	323.693	0.432	193.060	0.311	82.916	0.013
		case 2	7841.964	0.097	318.016	0.129	174.675	0.031	83.040	0.003
	舗装B	case 1	5559.814	0.153	312.977	0.527	220.599	0.635	100.549	0.040
		case 2	5762.050	0.025	258.758	0.039	177.251	0.125	100.958	0.008
動的	舗装A	case 1	4875.415	0.303	202.847	0.467	180.686	0.244	60.718	0.067
		case 2	4887.533	0.069	196.268	0.169	167.374	0.077	61.253	0.017
	舗装B	case 1	4625.458	0.172	285.440	0.605	211.482	0.715	57.149	0.109
		case 2	4804.080	0.093	236.348	0.216	160.454	0.315	58.606	0.023

case 2：1000 個の一樣乱数を発生させ，1 つの乱数から 4 つの層の弾性係数に変換し，1000 組の初期値を準備する．

ここでは，上で述べた 2 通りの方法で定めた初期値を用いて静的および動的に逆解析を行い，その結果を表-4 に記す．この表より，case 2 の変動係数は case 1 の変動係数と比べかなり小さくなっていることが分かる．また静的逆解析結果と動的逆解析を比較すると，E1，E2，E4 で後者の平均的な値はかなり小さい．

1000 セットの初期値と逆解析結果の関係を詳しく見るため，図-7(a)，7(b)に case 1 と case 2 の 2 つの方法で発生した初期値を用いた舗装 A の静的逆解析結果を示す．縦軸は弾性係数，横軸は n (1 から 1000) 番目の初期値のセットを意味している．E4 の弾性係数は case 1 と case 2 の結果はほぼ同じでばらつきが非常に小さいが，case 1 の E1，E2 は case 2 と比べばらつきがかなり大きい．Case 2 の E1，E2 もばらつきが，E1 の値は 8000 MPa 辺りに，また E2 の値は 300 MPa 辺りに集中している．図-7(c)は case 2 の初期値で逆解析した舗装 B の結果であるが，どの層の弾性係数のばらつきも非常に小さい．

図-8(a)，8(b)は case 2 の初期値を用いた舗装 A と舗装 B の動的逆解析結果である．どちらもばらつきの幅も小さいが，さらに狭い範囲に集中していることが分かる．この狭い範囲に集中している値の平均値が逆解析結果の最確値と判断するのが妥当であろう．図-8(a)，8(b)より，E1 の値は 5000 MPa 弱，E2 は約 200 MPa，E3 は約 150 MPa，E4 は 60 MPa ほどである．舗装 A，B は互いに隣接し同じ材料で構築されている舗装であることを考えると納得できる結果である．

1000 組の乱数を発生させて動的逆解析すると計算時間は膨大になり，実用的ではない．しかし，静的逆解析は短時間で計算できることを考えると，case 2 の方法で数十組ほど初期値を発生させ，逆解析で求めたそれぞれの層の弾性係数の平均値を初期値として動的逆解析を行うことも 1 つの提案である．

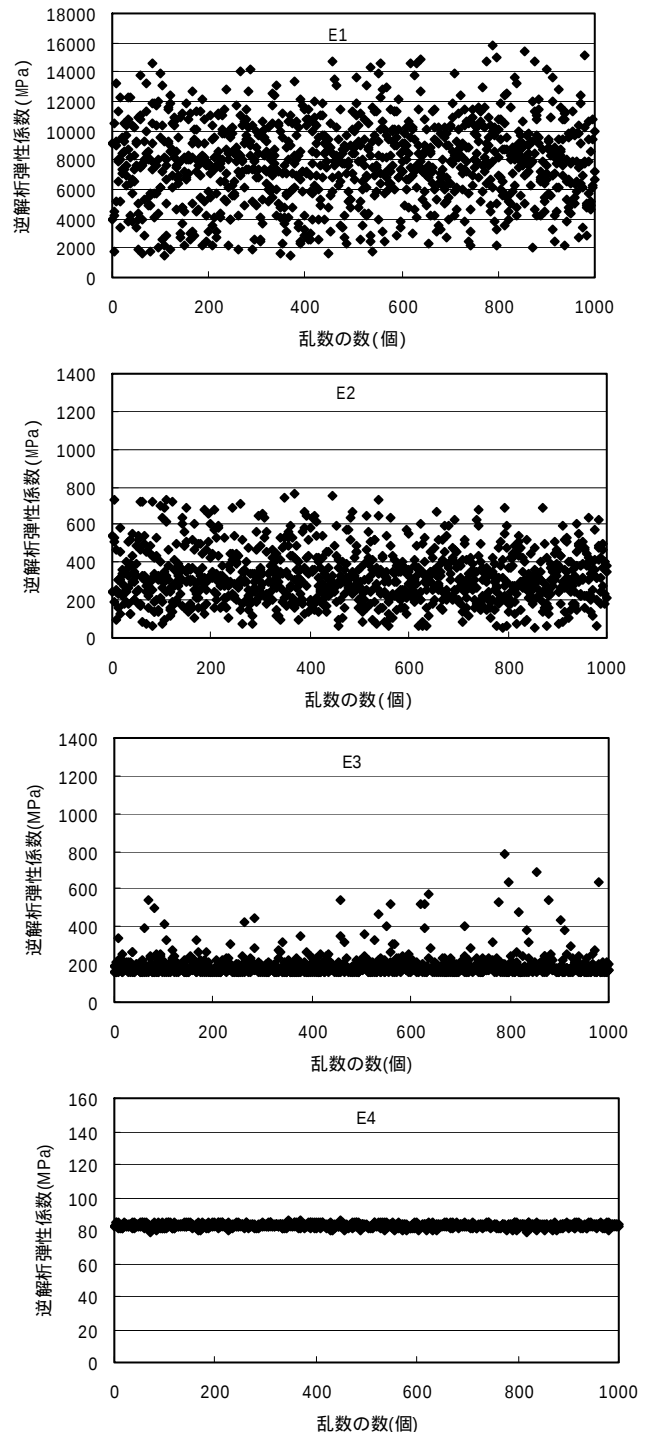


図-7(a) 舗装 A の静的逆解析結果（case 1）

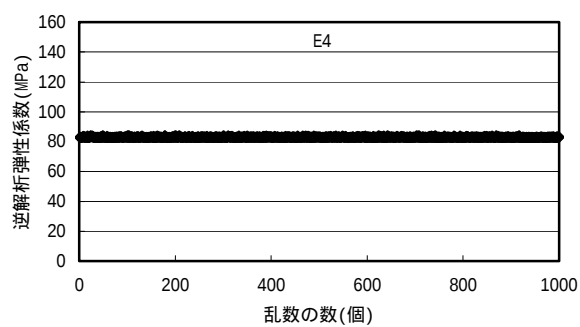
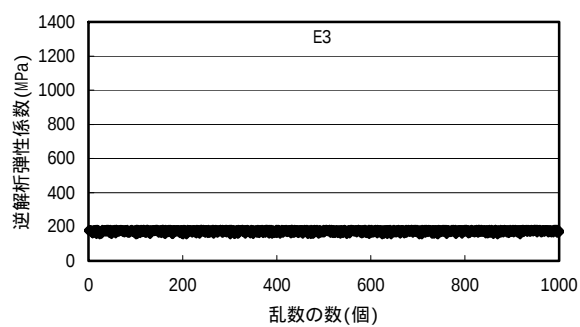
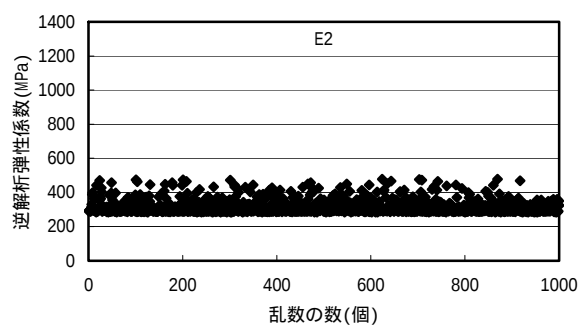
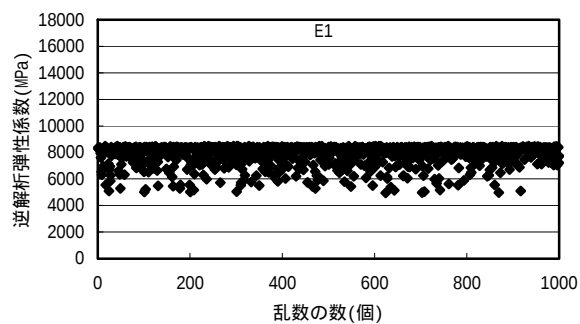


図-7(b) 舗装 A の静的逆解析結果 (case 2)

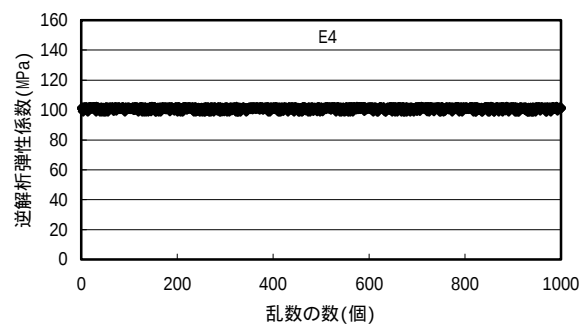
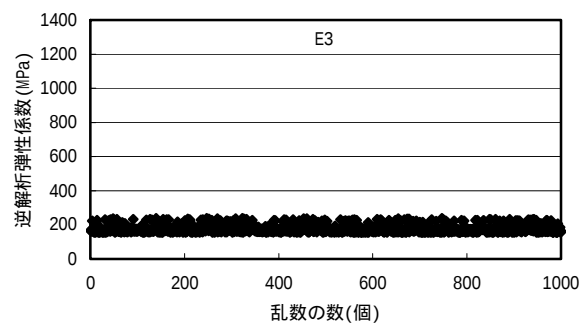
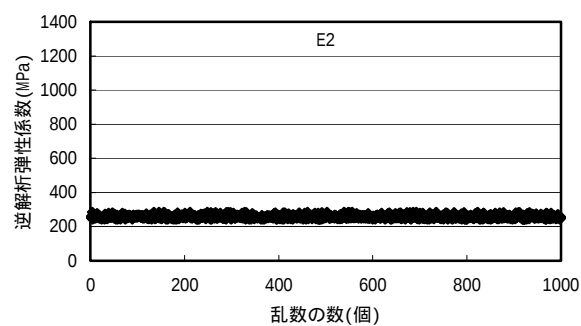
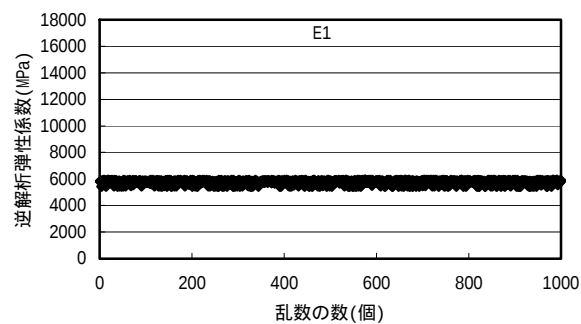


図-7(c) 舗装 B の静的逆解析結果 (case 2)

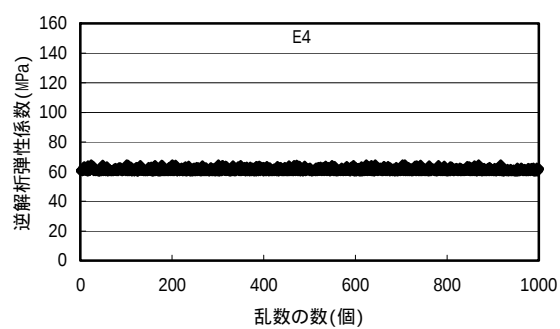
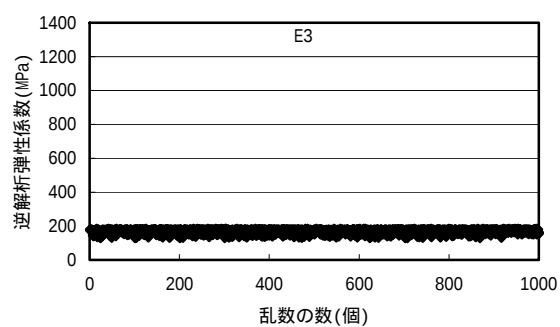
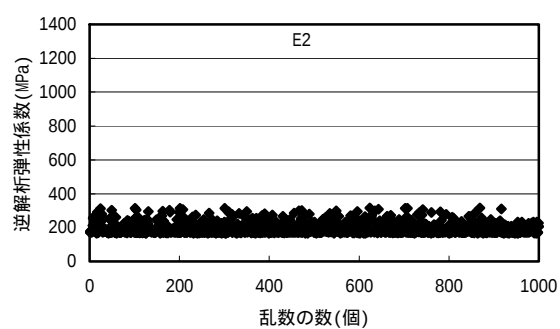
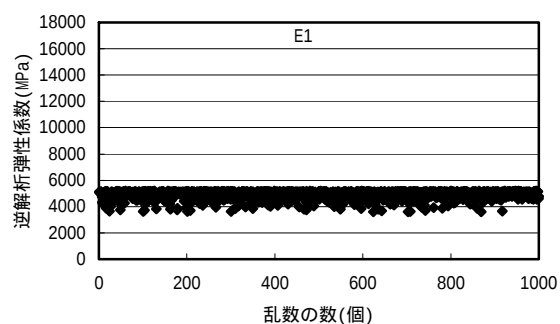


図-8(a) 舗装 A の動的逆解析結果 (case 2)

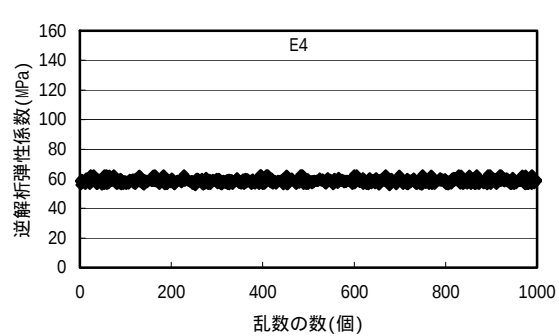
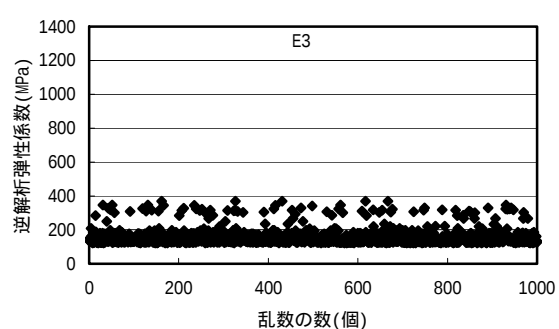
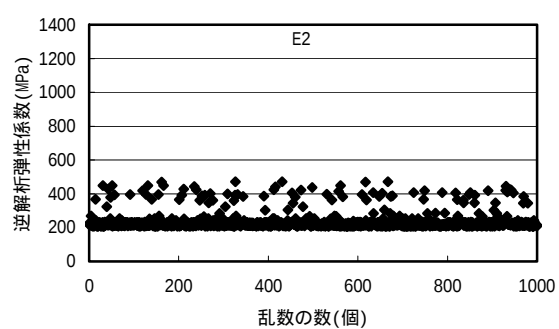
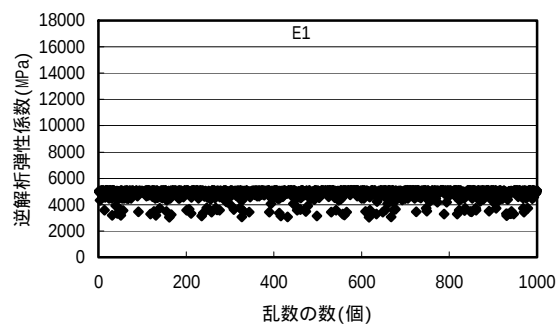


図-8(b) 舗装 B の動的逆解析結果 (case 2)

5 . 結論

FWD 試験データの逆解析では、FWD が動的試験であるにもかかわらず静的に逆解析されることが多い。しかし、「FWD 試験は本来動的試験であるので、動的に評価すべきであろう」という観点から、本研究を行った。今回の検討結果より次のような結論を得た。

- 1) 動的逆解析で使用している効率的な動的順解析ソフトの精度が確認できた。
- 2) 数値シミュレーションによる逆解析結果から、動的逆解析の方が静的逆解析よりも信頼できる結果が得られることが確認できた。
- 3) 逆解析は、初期値に大きく影響を受けることが確認できた。特に、上位にある層の弾性係数は初期値に大きく影響される。
- 4) ランダムに初期値を選ぶ場合でもその選択方法を工夫することで、逆解析結果に対する初期値の影響を大きく低減できることが明らかになった。

謝辞：本研究は、運輸施設整備事業団「運輸分野における基礎的研究推進制度」のプロジェクト(2003-03)と東京電機大学総合研究所の支援を受けて行った。関係者に謝意を表します。

参考文献

- 1) Al-Khoury R. Scarpas , A. Kasbergen , C. and Blaauwendraad: Dynamic Interpretation of Falling Weight Deflectometer Test Results, *TRR* 1716, pp. 49-54, 2000.
- 2) 舗装工学委員会：FWD および小型 FWD 運用の手引き ,土木学会 ,舗装工学ライブラリー2 ,2002.12.
- 3) 菊田征勇, 松井邦人, 塩谷俊之, 安部芳久：マトリックス縮小化を用いた時間領域における舗装構造物の逆解析 ,土木学会論文集 , No.557/V-34 , pp. 77-85, 1997.2.
- 4) 菊田征勇, James Maina , 松井邦人, 董 勤喜：複数の時系列データを用いた舗装構造の動的逆解析 ,土木学会論文集 No.760/V-63 , pp. 223-230 , 2004.5.
- 5) Saeed Moaveni: *Finite Element Analysis – Theory and Application with ANSYS*, Prentice-Hall, New Jersey, U.S.A, 1999.
- 6) Federal Highway Administration: *Design Pamphlet for the Backcalculation of Pavement Layer Moduli in Support of the 1993 AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures* (FHWA-RD-97-076), USA, 1997.

DYNAMIC STRUCTURAL EVALUATION OF PAVEMENT AND INFLUENCE OF SEED VALUES

James MAINA, Shigeo HIGASHI, Yukio KIKUTA, Kunihiro MATSUI
and Qinxin DONG

Generally, backcalculation analysis based on FWD test data is an unstable procedure greatly influenced by several types of errors. These errors may be categorized by accuracy of forward analysis, measurement error, instability of backcalculation analysis, etc. Due to instability of the backcalculation algorithm, seed values of layer moduli highly influence backcalculation results, especially in case of thin asphalt concrete layer. In this paper, following verification of the accuracy of forward analysis, importance of dynamic backcalculation analysis will be explained and the use of Monte Carlo simulation for seed values of layer moduli to accurately backcalculate layer moduli will be presented.