

3次元FEM解析による FWD試験位置が表面たわみに及ぼす影響

山本和也¹・松井邦人²・Qinxing DONG³

¹学生会員 東京電機大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

²フェロー会員 Ph.D. 東京電機大学 理工学部建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

³正会員 東京電機大学 理工学部建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

現在用いられている舗装の逆解析ソフトでは、舗装を軸対称でモデル化している。しかし、FWD試験は、このような解析条件が適用できないような所でも行うことが要求される。本論文では、FWD試験位置と舗装縁部との距離が表面たわみに及ぼす影響を3次元FEM解析により検討している。また、舗装縁部からの距離により起こる表面たわみの違いが、逆解析弾性係数にどのように影響するか検討している。さらに、表面波の伝播速度とFWD載荷位置の関係についても検討している。これらの検討の結果、FWD載荷位置が舗装縁部に近くなるに従い 1)表面たわみが急激に増加すること、2)路盤の逆解析弾性係数に大きな影響を与えること、3)表面波の伝播速度にはほとんど影響を及ぼさないこと、などの結果が得られた。

Key Words : 3D FEM, FWD test, loading location, surface deflections, layer modulus

1. はじめに

舗装の構造評価に対する非破壊試験法としてFWD試験が注目されている。FWD試験機の構成は、衝撃荷重を舗装表面に伝達する載荷板とたわみを記録するセンサーから成っている。舗装表面の規定された位置に据付けられたセンサーが、衝撃荷重による動的たわみを記録する。構造評価は、測定された表面たわみから直接的に、あるいは逆解析を行い弾性係数を推定することにより行われている^{例えば1)}。

現在用いられている舗装の逆解析ソフトでは、舗装を軸対称でモデル化している。しかし、FWD試験は、このような解析条件が適用できないような所でも行うことが要求される。そこで、本論文ではFWD載荷板の位置と舗装縁部との距離が表面たわみに及ぼす影響を3次元FEM解析により検討することにした。また、舗装縁部からの距離により起こる表面たわみの違いが、逆解析弾性係数にどのように影響するか検討した。これらの検討は静的解析および動的解析について行っている。さらに、動的に解析した表面たわみがピーク値に到達する時刻から、表面波の伝播速度とFWD載荷位置の関係についても検討している。

2. 3次元FEMを用いた舗装構造の解析

FEMはどんな複雑な構造物でもその形状、物性値、荷重条件等が明確であれば、その挙動を正確に予測することができる強力なシミュレーションツールである。また、これ等の条件は容易に変更することができ、何度でもシミュレーションできるため、数値実験ともいわれる²⁾。近年のコンピュータの発展に伴い、舗装の分野においても3次元FEM解析が注目されてきている。3次元FEMのメリットは、複雑な条件を考慮したモデルが解析できることである。S.N.Shoukry等は、コンクリート舗装におけるダウエルバーのゆるみの影響³⁾や走行トラックの重量による影響⁴⁾などを3次元FEMを用いて解析している。また、W.Uddinは、FWD載荷板と舗装表面の接触シミュレーションを行っている⁵⁾。文献5)では、載荷板だけでなくFWD装置のモデル化も行っている。

本論文では、FWD試験位置が表面たわみに及ぼす影響について検討しているが、軸対称モデルでは不可能な解析である。そのため、計算時間はかかるものの比較的容易にモデルを作成できることから、3次元FEMを用いている。本論文では、汎用FEMソフトとして評価の高いMARCを使用して解析を行っている。

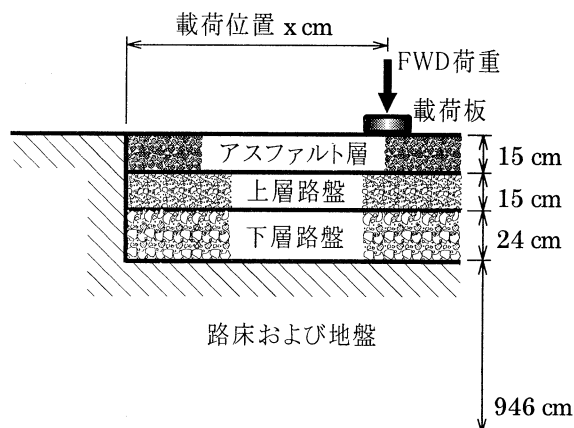


図-1 舗装構造(D 交通)

表-1 舗装各層の物性値

舗装構成層	弾性係数 [MPa]	質量密度 [kg・m ⁻³]	ポアソン比
アスファルト層	5880.0	2300.0	0.35
上層路盤	588.0	1900.0	0.35
下層路盤	196.0	1800.0	0.35
路床および路盤	98.0	1800.0	0.35

(1) 舗装構造の有限要素モデル

図-1に示すアスファルト舗装(D 交通)を、3次元FEMを用いて図-2のようにモデル化する。舗装各層の物性値は表-1に示す通りである。

解析領域は、深さ10.0 m、幅10.0 m、奥行き10.0 mの立方体としている。但し、対称性を利用して1/2のモデルとしているため、解析モデルの奥行き方向は5.0 mとしている。境界条件は、解析モデルの側面および底面において、面に垂直な方向をそれぞれ固定とした。伝播する波の反射の影響は、着目している表面たわみ位置には現れないことを確認している。舗装部(アスファルト層および路盤)と周囲の地盤との境界において滑りは考慮していない。解析モデルは、1要素あたり60自由度の6面体20節点ソリッド要素(2次要素)でメッシュ分割を行っている。2次要素を使用することにより、精度の高い解析が可能である。要素の大きさは荷重載荷点に近いほど、また上層にいくほど細かくしている。これは、センサー位置での表面たわみに着目しているためである。センサー位置は、モデルの奥行き方向に0.0, 20.0, 30.0, 45.0, 60.0, 90.0, 120.0, 150.0 cmの8点とした。

(2) 荷重伝達と載荷位置

FWD試験を想定し、載荷荷重は49 kN、載荷板は一边26.6 cmの正方形とした。載荷荷重は等分布であるとしている。動的解析では、衝撃荷重は $49\sin^2(25\pi t)$ kN、($t=0.0\sim0.04$ sec)とした⁹⁾。

本論文では、FWD試験位置が異なるときの表面たわみを解析するので、荷重載荷位置を変える必要がある。

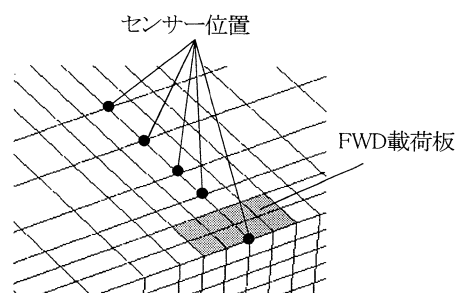
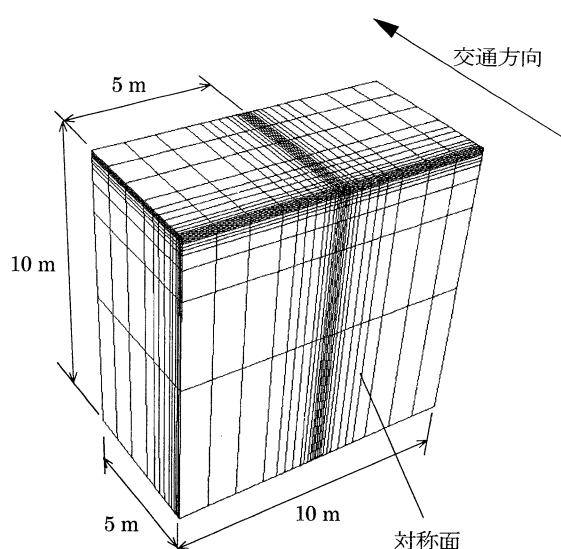


図-2 舗装構造の有限要素モデル

舗装縁部から載荷板中心までの距離(載荷位置)を x と定義し、 x が400.0, 300.0, 200.0, 150.0, 120.0, 90.0, 60.0, 45.0, 30.0 cmの場合について表面たわみを解析した。図-3に、載荷位置400.0 cmおよび30.0 cmの有限要素モデルを示す。図中の黒色部分は舗装部である。

(3) 動的解析手法

本論文では、静的解析および動的解析を行っており、動的解析ではNewmark β 法を用いている。 β の値は1/4としている。平均加速度法($\beta=1/4$)は無条件に安定である。Newmark β 法は、時刻歴応答解析のうち直接積分法に分類され、FEMによる解析において最も良く使用される手法の一つである⁷⁾。動的解析の時間ステップ幅は0.0002 sec、解析時間は0.06 secとしている。

減衰は剛性比例減衰により入力しており、要素剛性マトリックスに係数0.005を乗じたマトリックスを要素減衰マトリックスとしている。

(4) 解析時間

本解析ではCPU 500 MHz、メモリ 384 MBのDELL Precision Workstation 410を用いている。図-2に示すような要素数3718、節点数17274を有する3次元FEモデルを解析するとき、計算時間は静的解析：約10000 sec、動的解析：約220000 secである。

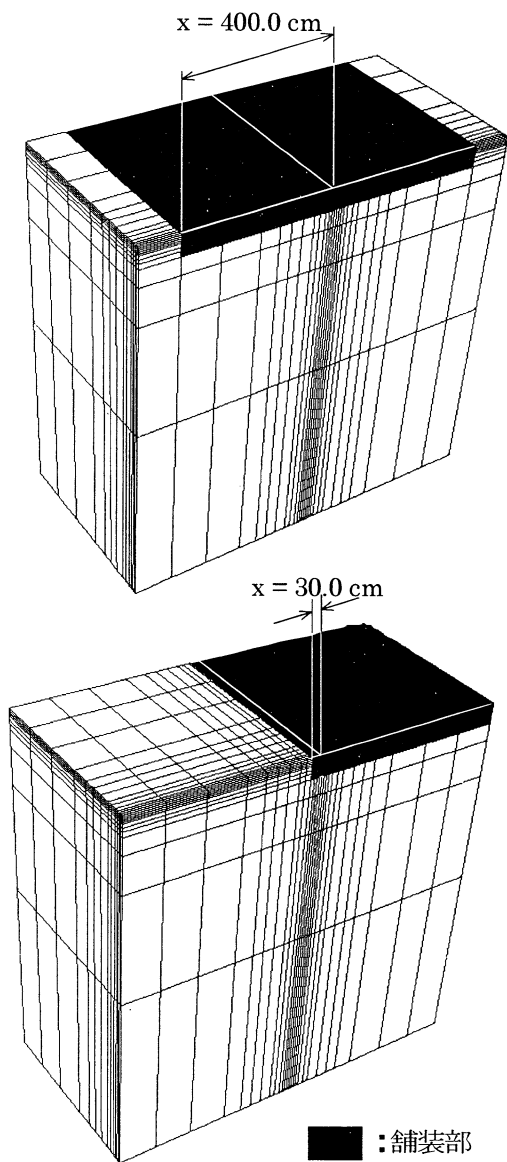


図-3 荷重位置 400.0 cm および 30.0 cm の有限要素モデル

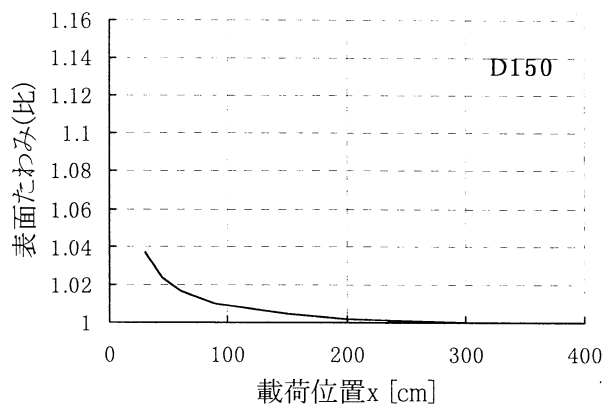
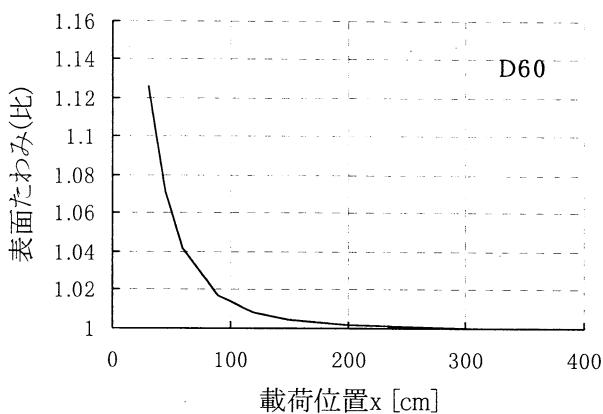
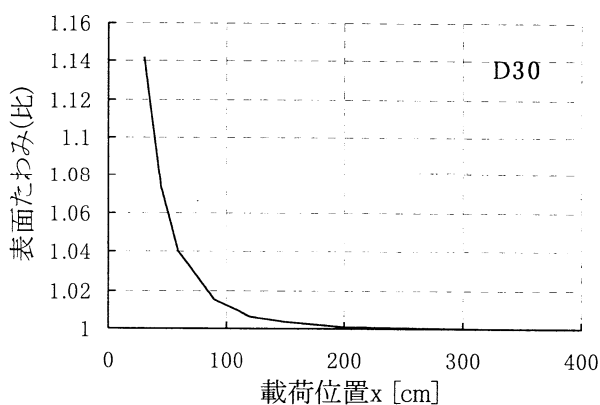
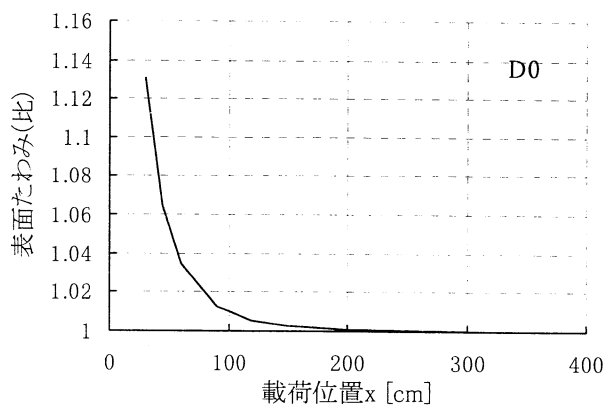


図-4 FWD 試験位置と静的たわみの関係

3. FWD 試験位置と表面たわみの関係

(1) 静的解析

FWD 試験位置と静的たわみの関係を図-4に示す。縦軸は、荷重位置 400.0 cm のときのたわみを 1 とした比によって表現している。ここでは、D0、D30、D60、D150 について示している。Di(i cm: センサー位置)は、各センサー位置における表面たわみを意味している。x が小さくなるに従い、すなわち荷重位置が舗装縁部に近くなるに従い、表面たわみが急激に増加することが確認できる。また、D150 たわみに及ぼす影響は比較的小さいことが分かる。

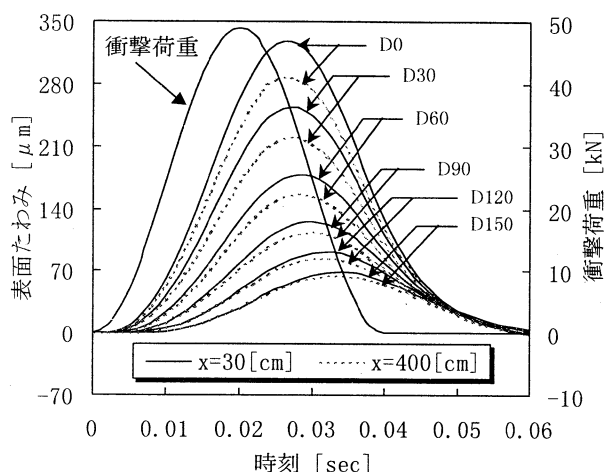


図-5 応答解析結果

(2) 動的解析

応答解析結果を図-5に示す。ここでは、荷重位置 x が 400.0 cm および 30.0 cm について示している。荷重位置 x が 30.0 cm のときの表面たわみは、荷重位置 x が 400.0 cm のときより大きくなっていることが分かる。すなわち、荷重位置が舗装縁部に近くなると表面たわみが大きくなることが分かる。また表面たわみは、荷重点に近いほど大きくなることが確認できる。

FWD 試験位置と動的たわみ(ピーク値)の関係を図-6に示す。縦軸は、荷重位置 400.0cm のときのたわみを1とした比によって表現している。ここでは、D0, D30, D60, D150 について示している。静的の場合と同様、荷重板が舗装縁部に近くなるに従い、表面たわみが急激に増加していることが確認できる。また、D150 たわみに及ぼす影響は比較的小さいことが分かる。図-6に関する以上の結果は静的解析と同様の傾向である。

(3) 静的たわみと動的たわみ(ピーク値)の比較

静的と動的(ピーク値)のたわみ曲線を併せて図-7に示す。ここでは、荷重位置が 400.0 cm および 30.0 cm について示している。静的と動的(ピーク値)の値は異なるが、たわみ曲線はほぼ同様の形状を示していることが確認できる。ここで、任意の荷重位置に対するたわみと基準たわみ(荷重位置 400.0cm のたわみ)の差を相対たわみと定義する。相対たわみと荷重位置の関係を D0 と D150 について図-8に示す。静的と動的(ピーク値)の相対たわみはほぼ一致していることが確認できる。したがって、静的たわみと動的たわみ(ピーク値)の値は異なるが、両者に及ぼす試験位置の影響は同程度であると考えられる。

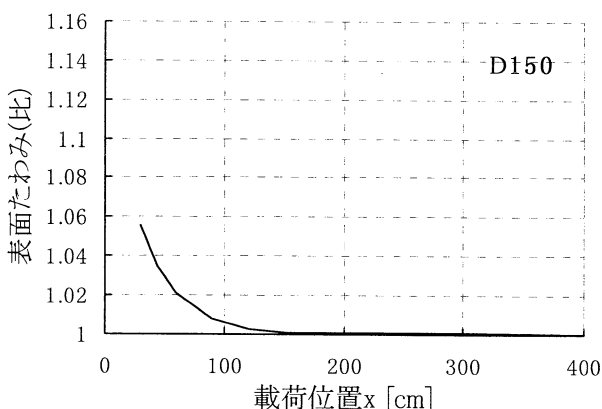
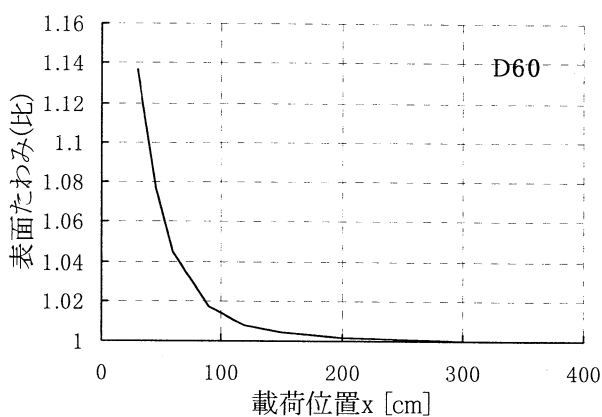
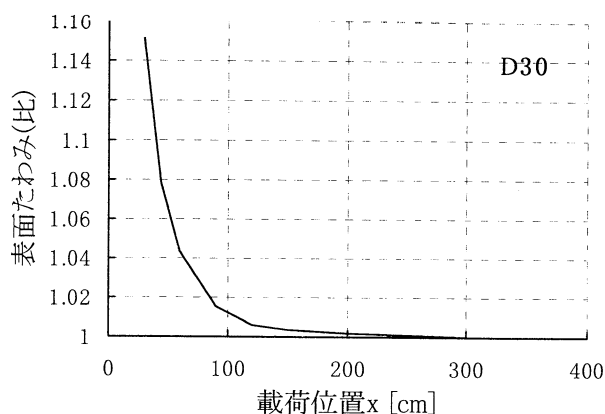
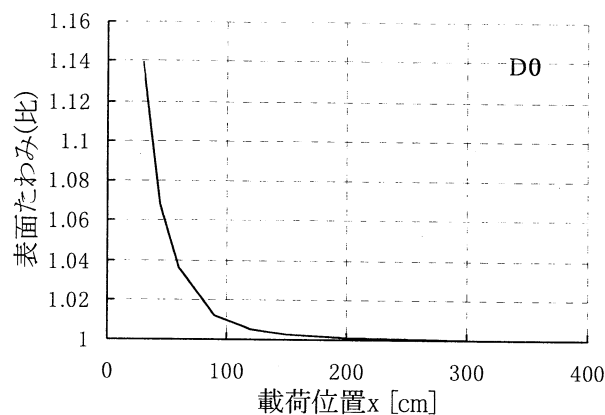


図-6 FWD 試験位置と動的たわみ(ピーク値)の関係

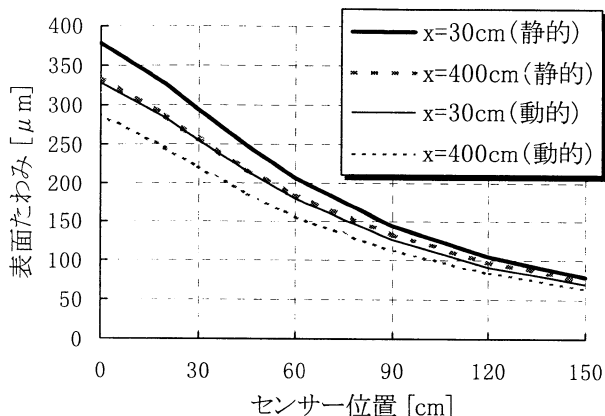


図-7 たわみ曲線の比較

4. 荷重載荷位置の違いが逆解析弾性係数に及ぼす影響

通常行われる逆解析では軸対称モデルを用いており、舗装縁部の影響を考慮していない。しかし FWD 試験は、舗装縁部から十分な距離でないところでも行なうことが要求される。そこで、縁部の影響を調べるため、MARC を用いて舗装縁部を含むモデルの 3 次元有限要素解析を行い表面たわみを算出し、そのたわみから軸対称モデルで逆解析し、層弾性係数を求めることにする。逆解析には、D0、D20、D30、D45、D60、D90、D120、D150 たわみ 8 点を使用している。

(1) 静的たわみを用いた静的逆解析

静的逆解析の結果(真値に対する比)を表-2 に示す。舗装縁部からの距離が十分であっても逆解析結果は真値と一致していない。この理由は、測定データとして用いた表面たわみは MARC(有限要素法)で算出したものであるが、逆解析の順解析部分には BISAR(多層弾性理論)を用いているためだと考えられる。しかし、真値との逆解析弾性係数の差は約 3 % であり顕著な差ではない。

表-2 から、荷重位置が舗装縁部から 120.0 cm 以上であれば、逆解析弾性係数に顕著な差は現れていないことが分かる。したがって、軸対称モデルで逆解析を行う場合、荷重位置は舗装縁部から 120.0 cm 以上であることが望ましい。荷重載荷位置が舗装縁部に近くなるに従い、1 層目の逆解析弾性係数は若干増加、2、3 層目は大きく減少、4 層目は若干減少していることが分かる。路盤の弾性係数が大きく減少した理由は、荷重点が縁部に近づくほど荷重分散範囲が狭くなり、特に路盤の鉛直ひずみが増加することが考えられる。そのため、縁部に近い所に荷重した表面たわみを軸対称モデルで逆解析すると、路盤の弾性係数を小さく評価することになる。

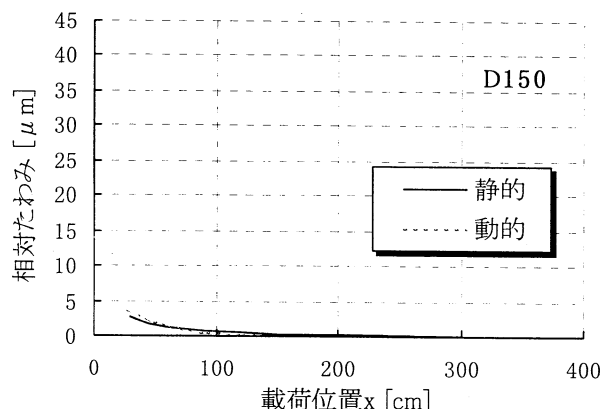
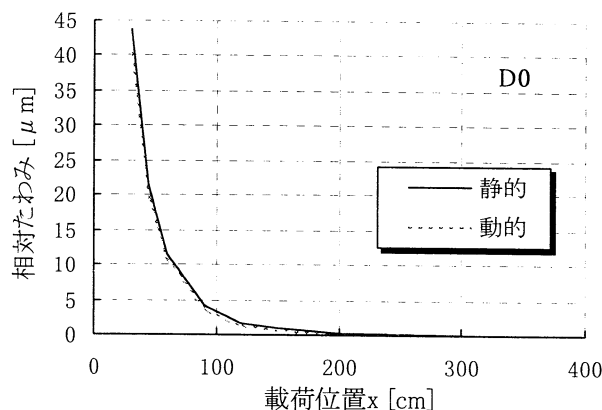


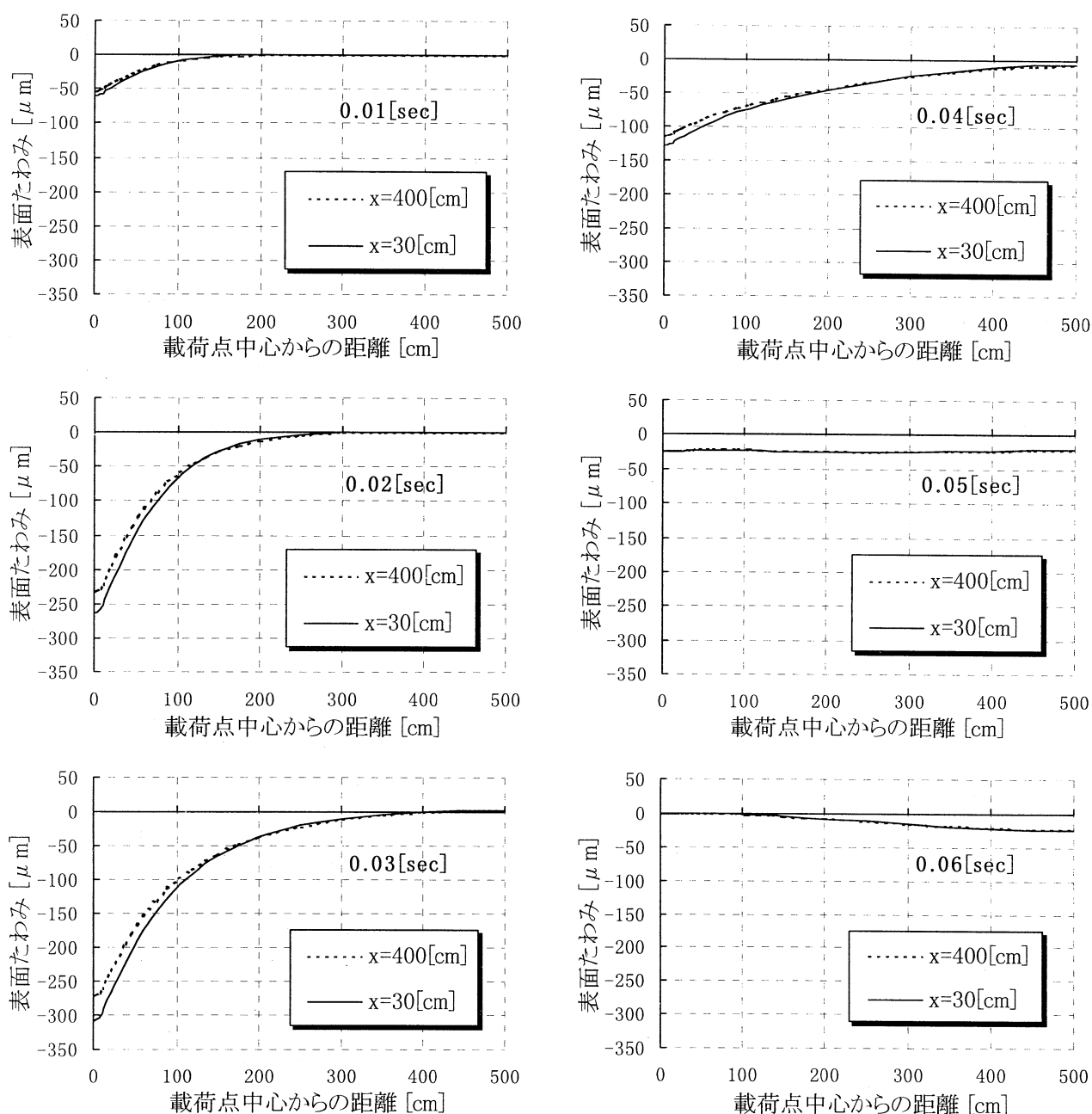
図-8 相対たわみと載荷位置の関係

表-2 静的たわみを用いた静的逆解析結果
(真値に対する比)

載荷位置 x [cm]	逆解析弾性係数(比)			
	E1	E2	E3	E4
400.0	1.024	0.985	0.974	1.025
300.0	1.024	0.985	0.974	1.025
200.0	1.024	0.985	0.975	1.023
150.0	1.018	0.986	0.976	1.021
120.0	1.029	0.978	0.963	1.017
90.0	1.041	0.961	0.934	1.011
60.0	1.082	0.881	0.855	1.001
45.0	1.117	0.790	0.765	0.993
30.0	1.119	0.651	0.621	0.980

表-3 動的たわみを用いた動的逆解析結果
(真値に対する比)

載荷位置 x [cm]	逆解析弾性係数(比)			
	E1	E2	E3	E4
400.0	1.074	1.005	0.969	0.977
300.0	1.074	1.004	0.968	0.978
200.0	1.076	1.001	0.965	0.977
150.0	1.078	0.997	0.961	0.975
120.0	1.082	0.991	0.955	0.971
90.0	1.093	0.966	0.936	0.964
60.0	1.123	0.891	0.864	0.952
45.0	1.148	0.802	0.777	0.944
30.0	1.154	0.653	0.626	0.937



図－9 衝撃荷重による表面波の伝播状態

(2) 動的たわみを用いた動的逆解析

動的逆解析の結果(真値に対する比)を表－3に示す。舗装縁部から荷重位置までの距離が十分であっても逆解析結果は真値と一致していない。研究に先立ち行った検討で、MARCの軸対称モデルを用いて算出した表面たわみと、動的逆解析部分で使用している軸対称有限要素解析から得られたたわみが一致することを確認している。MARCで3次元解析したたわみを軸対称モデルで逆解析した結果が真値と一致しない理由は、3次元モデルと軸対称モデルで計算されたたわみが若干異なるためであると考えられる。しかし、逆解析弾性係数の差は最大で

約8%であり工学的に許容できる範囲である。

表－3から、静的逆解析の結果と同様、荷重位置が舗装縁部から120.0 cm以上であれば、逆解析弾性係数に顕著な差は現れていないことが分かる。したがって、軸対称モデルで逆解析を行う場合、荷重位置は舗装縁部から120.0 cm以上であることが望ましい。

荷重板が舗装縁部に近くなるに従い、1層目の逆解析弾性係数は若干増加、2、3層目は大きく減少、4層目は若干減少している。これらの結果は静的逆解析と同様の傾向である。

表－４ 動的たわみ(ピーク値)を用いた静的逆解析結果
(真値に対する比)

载荷位置 x [cm]	逆解析弾性係数(比)			
	E1	E2	E3	E4
400.0	1.140	1.165	1.195	1.185
300.0	1.139	1.165	1.196	1.185
200.0	1.142	1.164	1.192	1.183
150.0	1.146	1.160	1.183	1.182
120.0	1.151	1.154	1.170	1.179
90.0	1.164	1.138	1.135	1.172
60.0	1.193	1.087	1.026	1.156
45.0	1.223	0.987	0.923	1.140
30.0	1.225	0.799	0.767	1.116

(3) 動的たわみ(ピーク値)を用いた静的逆解析

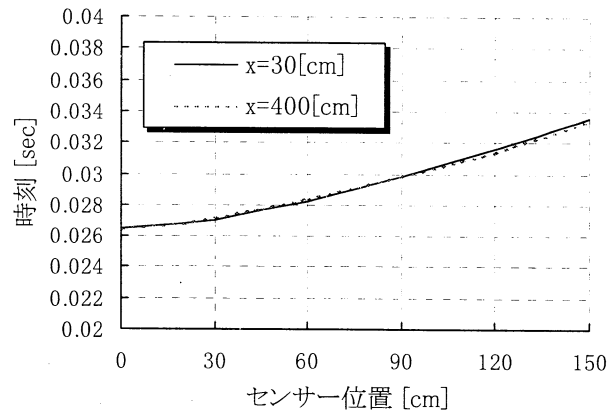
FWD は動的試験である。しかし、一般に荷重とたわみのピーク値のみを用いて準静的に逆解析を行なっている。このような操作を行なうために、動的たわみのピーク値を用いて静的逆解析を行った。その結果を表－４に示す。舗装縁部からの距離が十分であっても逆解析結果は真値と一致していない。逆解析弾性係数の差は最大で約 20 % である。全ての層の逆解析弾性係数が、表－２と比べ大きな値となっているが、動的たわみ(ピーク値)が静的たわみより小さいため、弾性係数を大きく評価していると考えられる。

表－４は、表－２および表－３と同様の傾向を示しており、载荷位置が舗装縁部に近い場合、路盤の逆解析弾性係数に大きな影響を与えられとされる。

5. 動的荷重による表面波の伝播速度と FWD 载荷位置との関係

図－９は、衝撃荷重が舗装表面に作用することにより表面波が伝播している状態を示している。たわみは载荷点からはじまり、時間が経過するにつれ舗装表面のたわみ範囲が拡大している。この拡大は、D0 たわみが減少開始後も続き、表面たわみの先端は解析領域の境界に到達し、D0 たわみが先にゼロに戻っている。動的逆解析を行うとき、表面波が境界に到達するところまでを考慮すれば特に境界の影響を受けることはない。

動的荷重による表面波の伝播速度と FWD 载荷位置との関係を、表面たわみがピークとなる時刻から検討する。荷重の载荷開始時刻を 0.0 sec とする。各センサー位置における、動的たわみがピーク値に到達する時刻を図－１０に示す。ここでは、载荷位置が 400.0 cm および 30.0 cm の場合について示している。図－１０から、両者の曲線は、ほぼ一致していることが分かる。したがって、载荷位置が舗装縁部に近くても、表面波の伝播速度には表面たわみほど顕著な影響は見られない。またこの結果



図－１０ 動的たわみがピーク値に到達する時刻

は、波の伝播速度から逆解析ができるとすると、舗装縁部のような境界条件があっても、軸対称モデルで逆解析できる可能性があることを示唆している。

6. 結論

本論文では、FWD 载荷位置と舗装縁部との距離が表面たわみに及ぼす影響を 3 次元 FEM 解析により検討した。また、3 次元 FEM 解析により求めた表面たわみを用いて逆解析するとき、縁部からの距離により起こる表面たわみの違いが、逆解析弾性係数にどのように影響するか検討した。さらに、表面波の伝播速度と FWD 载荷位置の関係についても検討を行った。上記検討の結果得られた結論を以下にまとめる。

(1) 表面たわみと载荷位置との関係について

- 载荷位置が舗装縁部に近くなるに従い、表面たわみは急激に増加する。
- D150 たわみに及ぼす影響は比較的小さい。
- 静的たわみと動的たわみ(ピーク値)の値は異なるが、両者に及ぼす試験位置の影響は同程度であると考えられる。

(2) 舗装縁部からの距離が逆解析弾性係数に及ぼす影響について

- 载荷位置が舗装縁部から 120.0 cm 以上であれば、逆解析弾性係数に顕著な差は見られない。したがって、軸対称モデルで逆解析を行う場合、载荷位置は舗装縁部から 120.0 cm 以上であることが望ましい。
- 荷重载荷位置が舗装縁部に近くなるに従い、1 層目の逆解析弾性係数は若干増加、2, 3 層目は大きく減少、4 層目は若干減少した。したがって、载荷位置が舗装縁部に近い場合、路盤の逆解析弾性係数に大きな影響を与えられとされる。

(3) 動的荷重による表面波の伝播速度と FWD 載荷位置との関係について

- a) 載荷位置にかかわらず表面たわみがピーク値に到達する時刻はほぼ同じであり、表面たわみのような顕著な差は現れない。

本論文の検討に用いた舗装断面は D 交通対応モデルのみである。したがって、A, B, C 交通対応モデルについて解析を行い検討する必要がある。また、本論文で得られた結果は数値シミュレーションによるものであるため、今後実験を行い結果の妥当性を検討することが望ましい。

参考文献

- 1) 松井邦人, 井上武実, 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.
- 2) 東町高雄: 有限要素法のノウハウ, 1993.
- 3) S.N.Shoukry, G.William: 3D FEM ANALYSIS OF LOAD TRANSFER EFFICIENCY, First National Symposium on

3D Finite Element Modeling for Pavement Analysis and Design, pp.40-50, 1998.

- 4) S.N.Shoukry, M.Fahmy: 3D FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE EFFECT OF MOVING TRUCK LOADING ON THE DYNAMIC STRESSES INDUCED IN JPCC PAVEMENTS, First National Symposium on 3D Finite Element Modeling for Pavement Analysis and Design, pp.26-39, 1998.
- 5) W.Uddin: APPLICATION OF 3D-FINITE ELEMENT DYNAMIC ANALYSIS FOR PAVEMENT EVALUATION, First National Symposium on 3D Finite Element Modeling for Pavement Analysis and Design, pp.95-109, 1998.
- 6) 土木学会: 舗装工学, 1995.
- 7) MARC Analysis Research Corporation: MARCA 編 Theory and User Information Version K7, 1997.
- 8) 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の逆解析, 土木学会論文集, No.557/V-34, pp.77-85, 1997.

(1999. 11. 1 受付)

EFFECT OF FWD TEST LOCATION ON SURFACE DEFLECTIONS BASED ON 3-DIMENSIONAL FINITE ELEMENT METHOD

Kazuya YAMAMOTO, Kunihito MATSUI and Qinxin DONG

An axisymmetric model to represent pavement is employed in the most backcalculation software currently available. However FWD test is sometimes required at a location where the axial symmetry is not applicable. It is investigated in this paper how the distance between FWD test location and pavement edge affect surface deflections using 3-dimensional finite element analysis and what backcalculated layer moduli will be if a current software is used on them. Furthermore the relation between a speed of surface wave propagation and FWD location is also examined. It is found that when as the test location gets closer to pavement edge; 1) surface deflections abruptly increase, 2) the estimated base modulus is greatly affected, and 3) the velocity of surface wave propagation is little affected.