

FEM 弾性多層解析における解析領域の検討

渡辺規明¹, 松井邦人², 菊田征勇³, 西澤辰男⁴

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 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

²正会員 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)

³正会員 国土館大学工学部土木工学科 (〒154 東京都世田谷区世田谷 4-28-1)

⁴正会員 石川工業高等専門学校 (〒929-03 石川県河北郡津幡町字北中条)

舗装の構造解析を行うときFEMが用いられる。半無限体を有限な解析領域で解析しているので、舗装構造の解析領域の違いが解析結果に影響を与える可能性がある。本研究では、衝撃的な荷重が作用する動的解析を行い、路床の弾性係数、荷重の作用時間を考慮して、解析領域と舗装表面の応答との関係を調べている。

静的逆解析では、動的な荷重の最大値を静的な荷重に置き換えて、表面たわみの最大値を用いて材料の特性を求めることが行われている。本研究では、動的荷重の作用時間あるいは荷重パターンが最大たわみに与える影響も考察している。

Key Words: FEM, domain of analysis, dynamic analysis, loading time, loading pattern, impulse-type loading

1. はじめに

舗装の構造解析を行うとき、しばしば、表層・基層および路盤の厚さが有限で水平に無限に広がる平行な層とし、路床を半無限体としてモデル化している。舗装表面に静的な荷重が作用し、各層が線形弾性の場合、BISAR やCHEVRON のようなコードを用いて解析することができる。しかし、舗装の端部に載荷されるとき、各層を構成する材料に非線形性があるとき、あるいは動的な荷重が作用するとき、等ではそのようなコードでは構造解析ができないが、FEM を用いるとこのような問題も容易に解析することができる。

舗装構造は半無限領域であるのに対し、FEM の解析領域は有限であるので、舗装構造の解析領域の違いが解析結果に影響を与える可能性がある。このため、FEM の解析領域と応答との関係を十分に検討しておくことが重要である。本研究では、衝撃的な荷重が作用する場合に、舗装表面の応答と解析領域との関係を調べている。

静的 FEM 解析では、表面たわみに影響を及ぼさないためには、路床の弾性係数が小さいほど深さ方向の解析領域を大きくする必要があるが、動的解析でも同じことがいえるのか検討に値する。本研究では特に、舗装構造の4層モデルに着目し、路床の弾性係数、荷重の作用時間を考慮して、解析領域と舗装表面の応答との関係から適正な解析領域を調べている。

また、構造物の維持管理をより合理的に行う上で、非破壊試験による構造評価が重要である。現在 FWD 試験機を用いた構造評価手法を確立する努力がなされている^{1), 2)}。計算効率上 FWD 試験機による表面たわみは、静的データとして逆解析が行われている。本研究は適正な解析領域において、衝撃荷重の作用時間あるいは荷重波形と舗装の表面たわみとの関係も調べている。

2. 解析領域に関する検討

(1) 深さ方向の解析領域の選択

解析対象とする舗装構造は、等方・等質体であり、図-1に示すように地表面に平行な4層からなっていて、層と層との間は十分に粗で、滑動しないものとしている。作用荷重が軸対称であるとする、FEM の軸対称要素を用いて解析することができる。地表面より第3層までは、層厚は一定である。第4層は、地表面から最下端まで2.00, 3.00, 4.00, 5.00, 10.00 および 20.00 m と6種類の層厚を考へて、解析領域の深さがたわみに及ぼす影響を検討している。また、弾性係数 E_i 、ポアソン比 ν_i 、密度 ρ_i ($i=1, \dots, 4$) は図-1に示すとおりであるが、第4層の弾性係数は、路床の弾性係数の範囲を考慮して、 $E_4=49.0, 98.1, \text{および } 197.1 \text{ Mpa}$ の3種類を考へている。減衰係数 C_4 は、弾性係数と関連しており、 $C_4=\alpha E_4$ として与えられる。ここに、 $\alpha=30 \mu\text{m} \cdot \text{s}$ である。解析領域が深さ

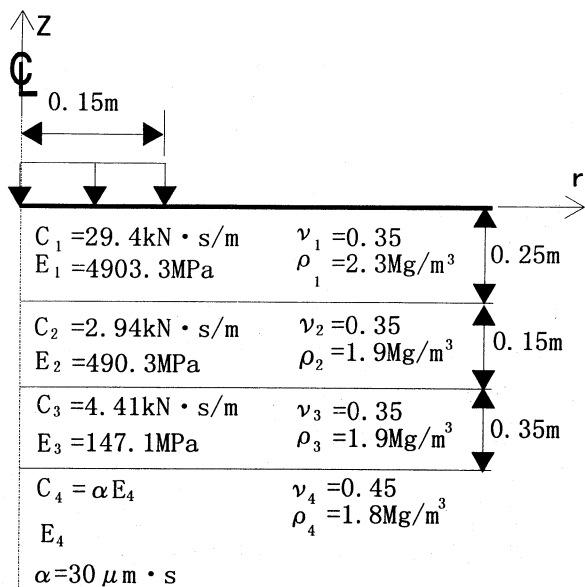


図-1 舗装構造

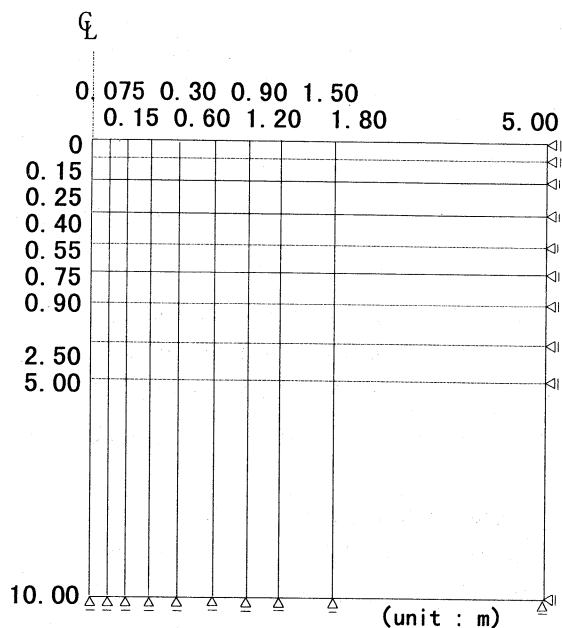


図-2 FEMモデル

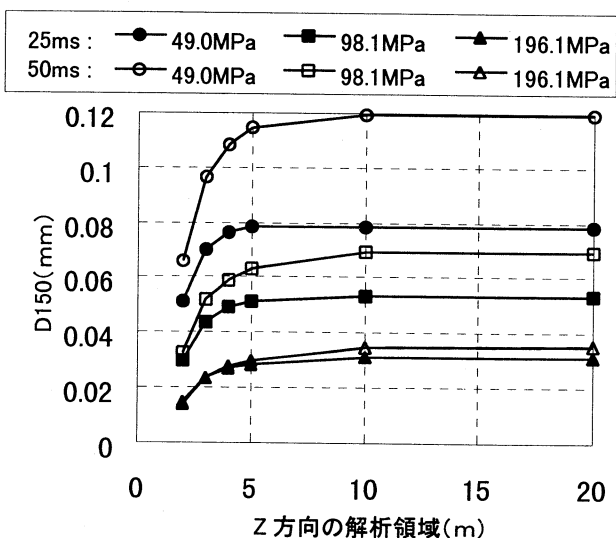
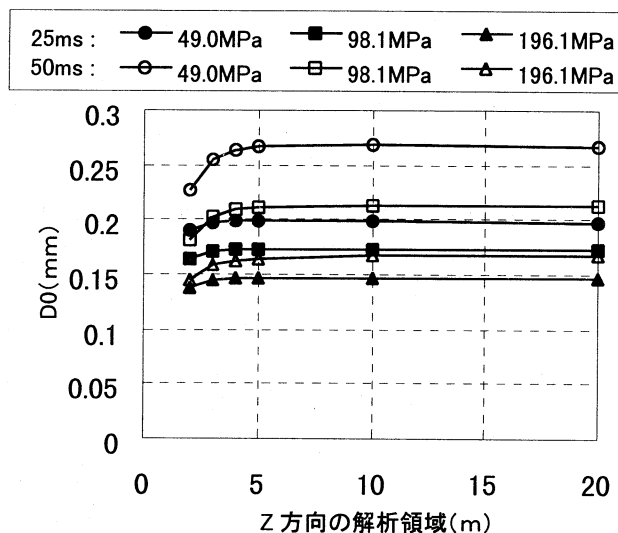


図-3 解析たわみ

表-1 解析たわみ (Z方向の解析領域)

センサー位置	Tp (ms)	E4 (MPa)	Z方向の解析領域 (m)					
			2	3	4	5	10	20
D0	25	49	0.1895	0.1969	0.19807	0.19818	0.19813	0.19777
		98.1	0.16377	0.17111	0.17283	0.17319	0.17315	0.17282
		196.1	0.13849	0.1447	0.1464	0.14694	0.14716	0.14692
	50	49	0.22691	0.25468	0.26356	0.26656	0.26782	0.26746
		98.1	0.18187	0.20207	0.20855	0.21126	0.21361	0.21331
		196.1	0.14531	0.15802	0.1623	0.16415	0.1669	0.16684
D150	25	49	0.051003	0.070108	0.076464	0.078256	0.078698	0.078504
		98.1	0.030021	0.043815	0.049175	0.051636	0.053502	0.053425
		196.1	0.01478	0.023477	0.026869	0.028623	0.031014	0.031059
	50	49	0.065573	0.096116	0.10826	0.11436	0.11959	0.11954
		98.1	0.03237	0.051748	0.05906	0.063093	0.069335	0.06954
		196.1	0.013681	0.023722	0.027809	0.029919	0.03491	0.035684

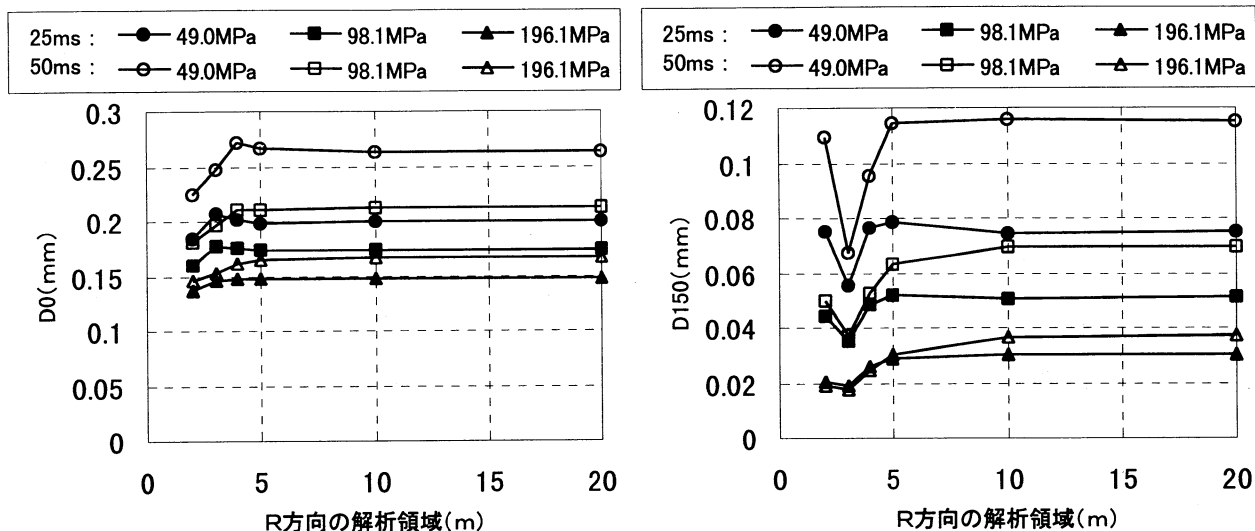


図-4 解析たわみ

表-2 解析たわみ (R方向の解析領域)

(unit: mm)

センサー位置	Tp (ms)	E4 (MPa)	R方向の解析領域 (m)					
			2	3	4	5	10	20
D0	25	49	0.18335	0.20728	0.20261	0.19818	0.19923	0.19917
		98.1	0.16032	0.17649	0.17557	0.17319	0.17388	0.17385
		196.1	0.13698	0.14612	0.14759	0.14694	0.14746	0.14745
	50	49	0.22459	0.24822	0.27233	0.26656	0.26347	0.26396
		98.1	0.18127	0.19608	0.21072	0.21126	0.21163	0.21177
		196.1	0.14527	0.15317	0.16111	0.16415	0.16677	0.16686
D150	25	49	0.075411	0.055242	0.076688	0.078256	0.074526	0.074929
		98.1	0.04436	0.035328	0.048679	0.051636	0.050806	0.050952
		196.1	0.020594	0.018821	0.025865	0.028623	0.030394	0.030457
	50	49	0.10959	0.06751	0.095782	0.11436	0.11567	0.11479
		98.1	0.049545	0.037228	0.052342	0.063093	0.069276	0.06916
		196.1	0.018874	0.017547	0.024412	0.029919	0.036614	0.036903

10.00m の場合の要素分割を図-2に示す。半径方向の解析範囲は5.00mで、FWDのセンサー位置を考慮した9要素に分割し、境界条件を底面ではZ方向を固定、側面ではR方向固定としている。作用荷重は、半径0.15mの範囲に等分布して作用し、その大きさは $f(t)=49.0\sin^2(\pi t/T_p)$ kNである。ここに T_p は荷重作用時間で、FWD試験機の作用時間の上限と下限を取り、 $T_p=25.0$ および 50.0ms として、2種類の荷重作用時間を考慮している。

図-3、表-1に表面たわみ D_0 および D_{150} の解析結果を示す。これらから、表面たわみは第4層の弾性係数が大きくなると小さくなり、荷重作用時間が長くなると大きくなることが分かる。深さ方向 (Z方向) の解析領域について言えば、2m, 3m, 4mと深くなるにつれてたわみが増えていくが、 D_0 において $T_p=25\text{ms}$ では4m位から、それ以外では5m位からはほぼ一定のたわみとなっている。また、 D_0 は解析領域によるたわみの差は少ないことから、解析領域の影響が小さいことがわかる。しかし、 D_{150} では、

たわみの変動量が大きく、解析領域の影響を受けやすい。

解析領域はなるべく浅くて、表面たわみに影響が現れない程度の深さが望ましい。荷重作用時間が短ければ解析領域は浅くても良く、弾性係数が大きくなれば解析領域は深く取る必要があり、 D_0 は D_{150} に比べて解析領域は浅くても良いことが分かる。従って、FWD試験におけるたわみ測定の精度が $1\mu\text{m}$ 程度であることを考慮すると、深さ方向の解析領域として5.00mを取れば、条件の如何に係わらず十分である。

(2) 半径方向の解析領域の選択

次に、深さ方向の解析領域は5.00mとして、半径方向の解析領域について調べてみた。対象とした半径方向の解析領域は、対称軸から半径2.00, 3.00, 4.00, 5.00 10.00 および20.00mの6種類である。また、弾性係数、ポアソン比および密度は深さ方向の解析領域選択の場合と同じである。計算結果を図-4、表-2に示す。

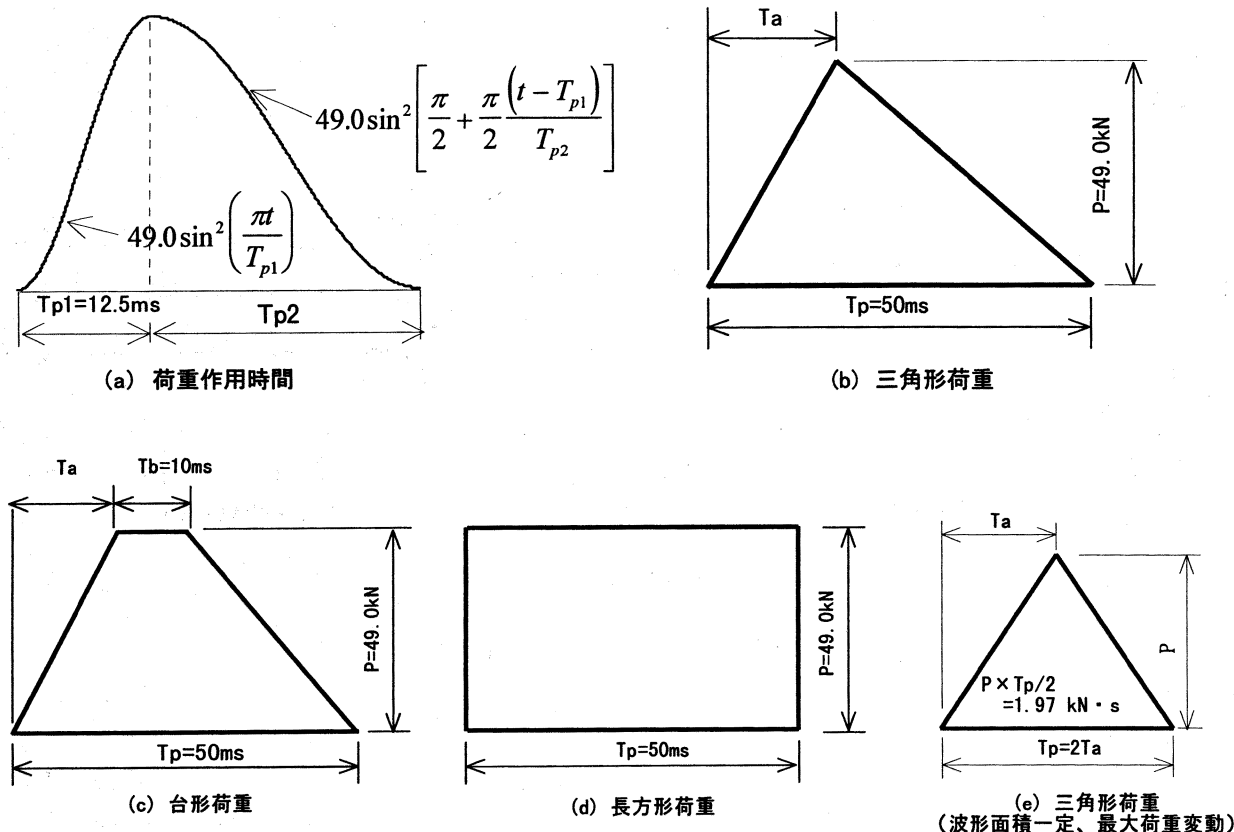


図-5 荷重波形

弾性係数が大きくなるにしたがって、たわみは小さくなる。また、半径 2.00m で弾性係数が $E_4=49.0\text{MPa}$ の場合を除けば、荷重作用時間が長くなるにしたがってたわみは増えている。

半径方向の解析領域について言えば、載荷時間および弾性係数に関わらず、 D_0 は解析領域が大きくなるにつれて大きくなる。 D_{150} では解析半径 3m でたわみは減少するが、その後大きくなる。解析半径 10m と 20m ではほぼ同じ値となっている。また、 D_0 は解析領域の影響をあまり受けないが、 D_{150} は解析領域の影響を受けやすく、たわみは変動しやすい。2.(1)と同様のことを考慮すると、半径方向の解析領域は 5m で十分である。

3. 荷重作用時間および荷重波形が応答に及ぼす影響

FEM 解析に必要な領域が深さ 5.0m、半径 5.0m と定まったので、この領域で、荷重作用時間や載荷荷重の波形が表面たわみに与える影響を調べた。

(1) 荷重作用時間が応答に及ぼす影響

荷重が作用している時間内でたわみに影響を及ぼすものとして、最大荷重に至る時間が重視されている。ここでは、最大荷重到達後、荷重が無くなるまでの荷重作用

時間 T_{p2} がたわみに与える影響を調べた。

図-5 (a) に荷重の作用時間を示す。最大荷重到達後の荷重の作用時間 T_{p2} としては、 T_{p1} 、 $2T_{p1}$ 、 $4T_{p1}$ を考慮している。計算結果を図-6 に示す。このとき $T_{p1}=12.5\text{ms}$ である。各センサー位置での最大たわみは、 T_{p2} が長くなるにしたがって大きくなっている。

(2) 作用荷重の波形がたわみに及ぼす影響

次に、図-5 (b), (c) および (d) に示すように、荷重作用時間、最大荷重は同じであるが、形状および最大荷重となる時間が異なる三角形荷重、台形荷重および長方形荷重がたわみに及ぼす影響を調べた。三角形荷重において、 T_a は最大荷重位置までの時間で、 $T_a=0, 10, 20, 30, 40$ および 50ms である。台形荷重において、 T_a は最大荷重位置までの時間で、 $T_a=0, 10, 20, 30$ および 40ms である。また、 T_b は台形荷重の大きさ一定部分の時間である。

三角形荷重の波形に対する各センサー位置での応答を図-7 に示す。図中の○印は、各センサー位置での最大たわみである。 D_0 および D_{30} など荷重点に近い点では $T_a=50\text{ms}$ で最大になっているが、センサー位置が中心から離れるに従って、たわみが最大となる T_a は短くなっている。

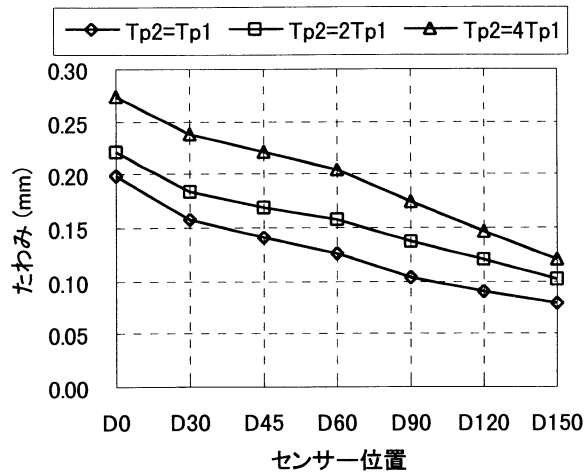


図-6 最大荷重到達後の作用荷重時間とたわみ

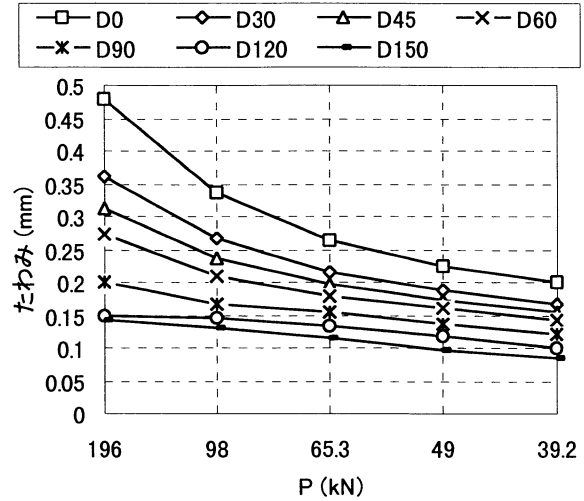


図-9 最大荷重たわみ
(三角形荷重、荷重波形面積一定)

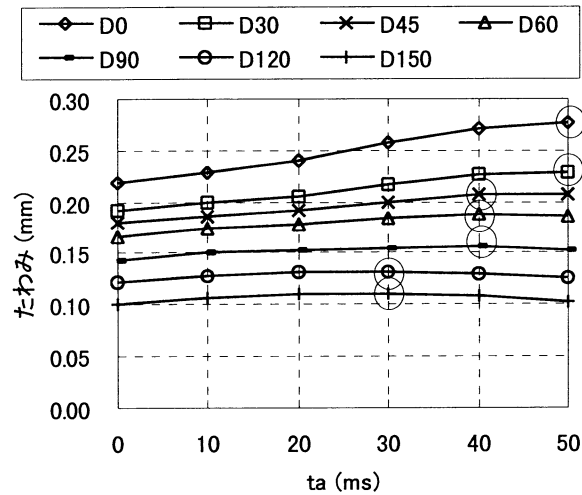


図-7 最大荷重到達時間とたわみ
(三角形、最大荷重・荷重波形面積一定)

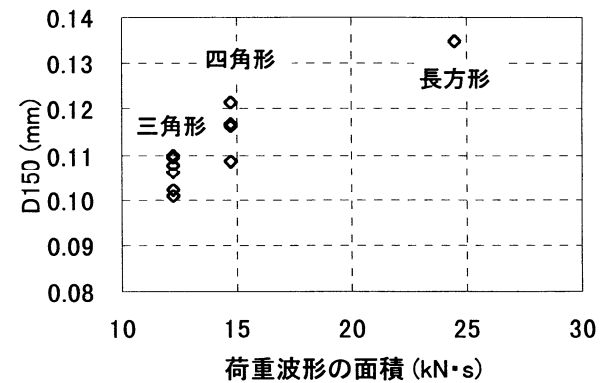
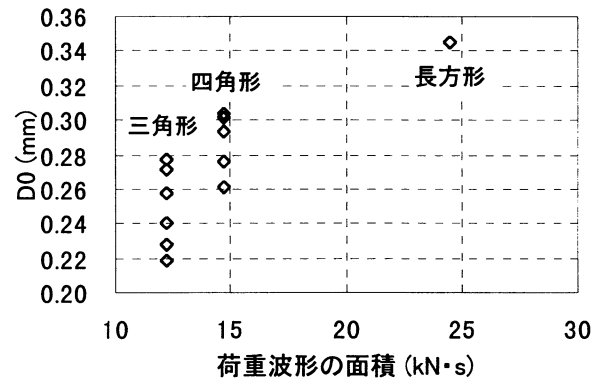


図-10 荷重波形面積とたわみ

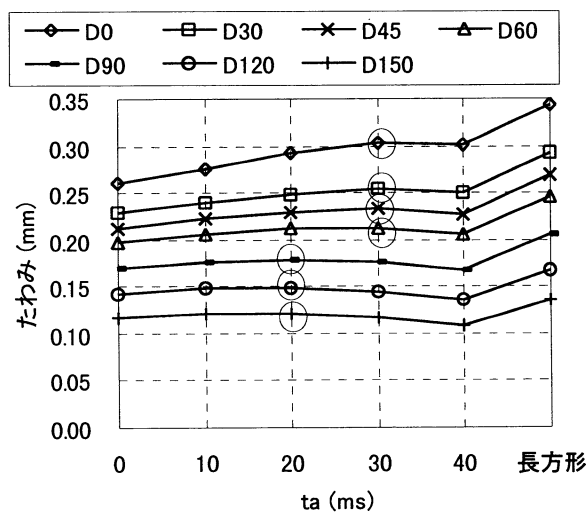


図-8 最大荷重到達時間とたわみ
(台形、最大荷重・荷重波形面積一定)

次に、台形荷重に対する各センサー位置での応答を図-8に示す。図中○印は各センサー位置での最大たわみである。中心に近いセンサーでは $T_a=30\text{ms}$ の台形荷重でたわみは最大になり、中心から離れたセンサーでは $T_a=20\text{ms}$ でたわみは最大になっていて、最大変位を与える荷重波形が二分されている。この図には長方形荷重によるたわみもプロットされているが、どの台形荷重より

も大きなたわみが生じている。

したがってこれらの荷重波形では、最大変位は必ずしも最大荷重の大きさによらないことがわかる。

(3) 作用荷重の最大荷重がたわみに及ぼす影響

図-5(e)に示す荷重は、波形面積(=荷重×作用時間)は一定であり、最大荷重位置、荷重作用時間は異なっている。この荷重によるたわみを図-9に示す。この図から波形面積が同じ場合、最大荷重が大きい方がたわみが大きいことがわかる。

(4) 作用荷重の波形面積がたわみに及ぼす影響

図-5に示す作用荷重を波形面積で分類してたわみをプロットしてみると、図-10に示すようになる。波形面積の一番大きい長方形荷重によるたわみが最大である。台形荷重と三角形荷重については、波形面積の大きな台形荷重によるたわみの方が、三角形荷重によるたわみよりもおおむね大きい。それぞれの荷重が最大となるまでの時間により、その関係が成立しないことが分かる。

4. 結論

FEM 解析で大きな影響を与える舗装構造の解析領域について検討している。深さ方向の解析領域として6種類、第4層の弾性係数は3種類、荷重載荷時間は2種類を組み合わせ、適切な解析領域について検討した。半径方向についても同様に検討した。また、最大荷重到達後の荷重作用時間によるたわみへの影響、形状および最大荷重到達時間が異なる三角形荷重、台形荷重および長方形荷重がたわみに及ぼす影響を調べた。さらに、波形面積は一定であるが、最大荷重位置および荷重作用時間も異なっている三角形荷重、あるいは波形の形状が異なる荷重の波形面積が、たわみに与える影響も調べている。この結果として次のようなことが明らかに

なった。

- 1) 軸対称要素を用いて解析するとき、FWD 試験における測定たわみの精度を考慮すると、荷重作用時間が25から50msの範囲では、深さ方向および半径方向とも5.00mとすれば十分である。
- 2) たわみには最大荷重到達後の荷重作用時間も影響を及ぼし、荷重作用時間が長くなるとたわみは大きくなる。
- 3) 荷重波形面積および最大荷重が一定の三角形荷重の場合、最大荷重到達時間が遅いほど荷重点近くのたわみは大きくなる。
- 4) 荷重波形面積および最大荷重が一定の台形荷重の場合、中心に近い点と遠い点ではたわみの大きくなる荷重波形は異なる。
- 5) 荷重波形面積が一定で最大荷重および荷重作用時間が変動する三角形荷重の場合、最大荷重が大きいほどたわみは大きくなる。
- 6) 荷重作用時間および最大荷重が一定の三角形荷重、台形荷重および長方形荷重の場合、荷重波形面積が大きい方がたわみが大きいことが多いが、最大荷重到達時間によっては異なることがある。

最後に、FWD 試験機で測定した最大荷重と応答の最大値を用いて静的に逆解析をするのは、計算効率を考慮すると大変望ましい。しかし、FWD 試験機の荷重波形が一定していないと、それに従って応答も違ってくる。したがって、静的逆解析からパラメータを推定するのは難しいと思われる。そのため、FWD 試験機の荷重波形を統一することが望ましい。

参考文献

- 1) FWD 研究会：FWDに関する研究，FWD 研究会発行，1993. 8.
- 2) FWD 研究会：FWDに関する研究（その2），FWD 研究会発行，1995. 12.

DOMAIN OF ANALYSIS OF ELASTIC MULTILAYER SYSTEM MODELED BY FEM

Noriaki WATANABE, Kunihiro MATSUI, Yukio KIKUTA,
and Tatsuo NISHIZAWA

Analysis of pavement structure is modeled by FEM. Results of analysis may be affected by the size of domain of analysis because FEM analysis is conducted in a limited domain instead of half-space domain. This paper investigates the proper size of analysis of FEM analysis. Backcalculating pavement layer moduli from FWD tests is based on a static analysis of impulse-type pavement response. This paper also investigates how factors such as loading time and loading pattern affect surface deflections.