

# 動的たわみ解析による道路舗装の オーバーレイ設計法

横田 漢\*・出口近士\*・樗木 武\*\*  
・藤本 廣\*\*\*

道路舗装の補修に際して、欧米、最近ではわが国においても舗装面上の動的載荷による動的たわみ量により、オーバーレイ厚等が決定されている。しかし、解析手法は静的理論がベースになっているといつてよい。本論文は、「地盤上スラブ動的理論」による動的解析手法を提案し、適用例として欧米で実用化されているロードレイターを取りあげ、ケンタッキー州の解析手法等との比較検討を行ったものである。

**Keywords** : overlay design, flexible pavement, dynamic deflection analyses, Road Rater

## 1. はじめに

過去9次にわたる道路整備5か年計画の実施により、わが国の道路の整備水準は向上してきたものの、耐用年数に達した舗装も増大してきており、最近の道路に対するアメニティの要請とあいまって舗装の維持管理は重要な問題となってきた。そのため、舗装マネジメントシステム(PMS)の確立が望まれている<sup>1)</sup>。これは、路面の調査・舗装の評価・供用性の予測・補修優先順位の設定・ライフサイクルコストによる工法の選定・設計・工事などを体系的に取り扱うもので、舗装データベースがそのシステムの要となっている。同データベースには路面の破損データのほかに路面たわみ量もインプットされ、舗装構造の評価やオーバーレイ厚決定のためのデータとして用いられている。

従来から、たわみ量の測定にはベンケルマンビームが用いられ、それによるオーバーレイ厚設計法が開発されてきた。しかしながら、欧米諸国ではオーバーレイ厚の決定に際してロードレイター<sup>2)</sup>、ダイナフレクト<sup>3)</sup>やフォーリングウェイトデフレクトメータ<sup>4)</sup>などの動的載荷手法が実用に供されてきている。その理由は、同手法の作業が簡単で測定も迅速・正確であるためである。わが国でも試験的に用いられているが<sup>5)-7)</sup>、今後その実用化が図られてゆきPMSの一環を形成するものと考えられる。

しかしながら、これらの動的載荷手法によりオーバーレイ厚を求める場合、経験に基づく簡易動的解析を除いては、便法として多層弾性体の静的な理論解が用いられているのが実状である。したがって、今後における動的

載荷手法の役割を考えると、動的な理論解析を踏まえた、より合理的な簡易解法を確立することが強く望まれる。

この動的解析の基礎的理論として、著者らはすでに「地盤上スラブ動的理論」を提案した<sup>8)</sup>。本論文はロードレイターを対象として同理論の具体化を行い、オーバーレイ厚設計の2手法の提案とそれらの適用結果を示すものである。すなわち、ロードレイターが実用化されているケンタッキー州の測定データ<sup>9)</sup>を用いて解析を行い、同州の設計値などと比較検討するなかで本提案手法の適用性を論じたものである。

## 2. 「地盤上スラブ動的理論」の適用方法

「地盤上スラブ動的理論」は、図-1に示すような半無限弾性体上のスラブに、半径 $r_0$ の円形等分布荷重 $q_0$  ( $P_0 = \pi r_0^2 q_0$ ) が周期的に作用する場合のスラブたわみ $w(r, t) = w(r) e^{i p t}$  を理論的に求めたものである<sup>8)</sup>。ただし、 $r$ は $q_0$ の中心からの距離、 $p$ は周期荷重の円振動数を表している。オーバーレイ問題への適用の際の道路構造およびロードレイターのモデル化は以下のとおりである。

### (1) 道路構造のモデル化

本論文では、道路構造を図-2に示すように2層構造(第1層:舗装部分を表し、層状弾性体とする。第2層:路床以下を表し、半無限弾性体とする。)でモデル化する。一方、アスファルト舗装の現行舗装厚設計法においては、周知のように、路床土の設計CBRに対して舗装厚 $T_A$ が定められている。 $T_A$ は、舗装構成材料をすべて表層・基層用の加熱アスファルト混合物で等値に換算した厚さであり、各種舗装材料の等値換算係数はAASHO道路試験の結果のほか、種々の試験・観測データに基づいて決定されている。したがって、現行設計法は、いわば路床土の上に厚さ $T_A$ の加熱アスファルト混

\* 正会員 工博 宮崎大学助教授  
(〒889-21 宮崎市学園木花台西1-1)

\*\* 正会員 工博 九州大学教授

\*\*\* 正会員 工博 宮崎大学教授

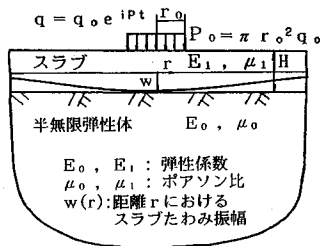


図-1 半無限弾性体上のスラブ

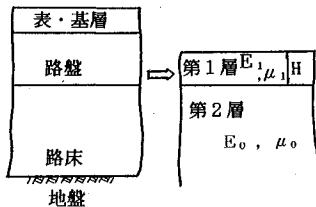


図-2 道路構造の2層構造へのモデル化

混合物を直接置くものといふことができ、道路構造を図-2に示すような2層構造でモデル化しているといえる。このとき、図-2の第1層の厚さ  $H$  は等値換算舗装厚  $T_A$  を、弾性係数  $E_1$  は表層・基層用の加熱アスファルト混合物の弾性係数を表すこととなる。本論文では、この  $T_A$  概念を拡張して、 $E_1$  はオーバーレイ用の加熱アスファルト混合物の弾性係数とし、 $H$  はオーバーレイ以前の現舗装部分を同アスファルト混合物で等値に換算したときの換算値（以下、 $T_0$  と表現する）を表すものとする。

オーバーレイ厚を求める手法の一つとして現行道路維持修繕要綱では、周知のように、舗装材料の劣化程度に対応した  $T_A$  換算係数より、オーバーレイ対象道路の現舗装部分の  $T_A$  換算厚を求め、道路新設時の  $T_A$  値と同換算厚の差をもってオーバーレイ厚としている。提案する手法も同様に、等値換算厚  $T_0$  を後述の方法で算定し、その許容値に対する不足分をオーバーレイ厚とするものである。

ロードレイターなどの動的荷重手法では、この2層弾性体モデルを動的に解析する必要がある。しかしながら、その解析は2層弾性体の波動理論解析となるので一般的には困難である。そこで、本論文では同モデルをさらに簡単化して、第1層の層状弾性体をスラブに置き換えた「地盤上スラブ理論」を用いる。層状弾性体の波動伝播特性に関して Achenbach<sup>10)</sup> は、i) 三次元弾性体の波動方程式による厳密解と ii) せん断変形と回転慣性を考慮したスラブの波動伝播理論解とを比較・検討のうえ、ii) のスラブ理論は i) の近似解として十分用いられることを明らかにした。「地盤上スラブ動的理論」においてもスラブのせん断変形と回転慣性が考慮されている

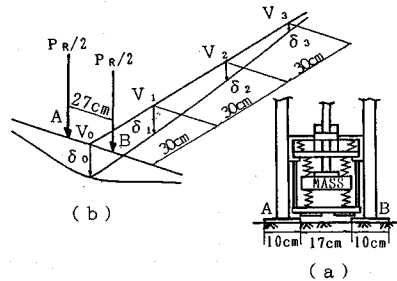


図-3 ロードレイターの概念図

ため、同理論は本題の合理的な近似解析となるものである。

### (2) ロードレイター載荷状態のモデル化

ロードレイター<sup>11)</sup>は、図-3(a)のような振動載荷装置を乗用車のバンパーや小型トレーラーの中に取り付けて、電気・油圧サーボ方式で舗装面に周期荷重（最大1tf）を作用させるものである。起振力（周期荷重） $P_R$  は2つの鋼鉄製のパッド A, B ( $10 \times 18 \text{ cm}^2$ ) を通じて、半分ずつ舗装面に載荷される。舗装面の動的たわみ量は、(b)の概念図に示すように、道路延長方向に30cm間隔で設置された4個の速度計 ( $V_0 \sim V_3$ ) で測定される。これらの操作および測定はすべて運転席からのワンマン操作によって行われ、1測定の測定時間も1分以内と短く、またたわみの測定範囲も0.0025~25mmと精度の高いものとなっている。

本論文では、上図の  $V_0$  と  $V_1$  位置のたわみ振幅  $\delta_0$  と  $\delta_1$  の2つを解析に用いる。ロードレイターの4つのたわみを用いればたわみ形状が得られるため、舗装や路床の弾性係数の値などに関して精度の高い情報が得られることとなる。その意味で、本研究手法はロードレイターの部分的な利用にとどまっているといえ、この点については今後の研究課題とするところである。さらに、「地盤上スラブ動的理論」をロードレイター載荷状態に適用するにあたって、厳密にはロードレイターの2つの鋼鉄製パッド荷重の重ね合わせ状態を考える必要がある。しかしここでは簡単に、図-1に示す荷重  $P_0$  は2つの鋼鉄製パッド荷重の合力  $P_R$  を表し、また図-1における荷重中心 ( $r=0$ ) のたわみ振幅  $w_0 (=w(0))$  は  $\delta_0$  (図-3) に等しいと仮定している。

### (3) 「地盤上スラブ動的理論」の諸定数

ロードレイターの載荷振動数  $f$  は、動的荷重に対する舗装たわみの周波数応答特性が最も安定しているという理由により、欧米諸国では  $f=25 \text{ Hz}$  が用いられているため、ここでも同値を使うことにする。また、荷重半径  $r_0$  は、その載荷面積がロードレイターのパッド面積に一致するように、 $r_0=7.6 \text{ cm}$  としている。

$E_1$  の値は、温度や変形速度など種々の要因に支配さ

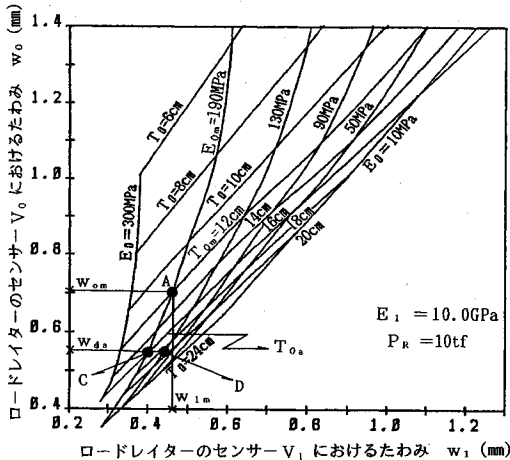


図-4 現舗装の  $T_0$  と  $E_0$  の推定ノモグラフ

れるために各機関においてその値や設定方式が異なっており、おおむね1~10 GPaの間で設定されているが<sup>12)</sup>、ここではシェルのノモグラフ<sup>13)</sup>を用いることとする。同ノモグラフによれば、 $E_1$ は温度や変形速度(載荷振動数)のほかにアスファルト材料の針入度やアスファルト混合物の配合割合などの要因で決定される。 $E_1$ と温度との関係は重要であり、これについての研究<sup>14)</sup>は多くみられるが、本論文では舗装たわみの動的解析に焦点をおき、温度に関するこの分野の研究結果と本研究手法との適用関係については今後の課題とする。ここでは、道路維持修繕要綱<sup>15)</sup>を援用して、午前8~10時頃の路面温度をアスファルトコンクリート層中の平均温度とみなすことにする。

また、 $E_1$ に与える変形速度の影響については大きいものがあるが、本論文は解析手法に重点を置いているので、ここでは変形速度の影響についてはシェルのノモグラフの手法に従って考えるものとする。したがって、 $E_1$ の算定に必要な残りの要因はアスファルト混合物の配合割合などの材料特性値のみとなる。これらの材料特性値は設計段階で与件と考えてよいので、 $E_1$ の値はシェルのノモグラフから直ちに求められることとなる。

現舗装の等値換算厚  $T_0$  と路床の弾性係数の値  $E_0$  は、三浦<sup>16)</sup>や今泉ら<sup>17)</sup>と同様に図-4に示すようなノモグラフから決定する。同図は「地盤上スラブ動的理論」を用いて作成したもので、現舗装を  $E_1=10.0$  GPaのアスファルト混合物で等値に換算した場合の  $T_0$  および  $E_0$  の値を与えるものである。図-4のノモグラフの利用方法は以下のとおりである。

いま、ロードレイトー載荷試験(起振力  $P_R=10$  tf)の結果、 $w_{0m}(=\delta_0)=0.71$  mm、および  $w_{1m}(=\delta_1)=0.47$  mmが測定されたとする(添字  $m$  は測定値ならびに測定値から算定された値を意味する)。このとき、これら

の値の交点 A に対して  $T_0$  および  $E_0$  の値を求めれば、それぞれ  $T_{0m}=12$  cm および  $E_{0m}=190$  MPa が得られる。種々の  $E_1$  の値に対するノモグラフを付録の付図1~5に示す。これらの図を用いれば、使用するオーバーレイ材の弾性係数に対して、 $T_0$  と  $E_0$  の値が決定できることとなる。なお、ロードレイトー起振力を  $P_R=10$  tf としているため、同図の利用にあたっては実際の起振力に対して測定された  $w_{0m}$  と  $w_{1m}$  の値を、 $P_R=10$  tf 載荷に対して線形的に換算することとする。

その他、スラブの密度は  $\rho_1=2.3$  g/cm<sup>3</sup>、ポアソン比は  $\mu_1=0.5$  とし、半無限弾性体については、 $\rho=1.8$  g/cm<sup>3</sup>、 $\mu=0.25$  としている。

### 3. 動的許容たわみ法によるオーバーレイ厚設計法

オーバーレイ対象道路のある測点について、図-4に示すように等値換算舗装厚が  $T_0(=T_{0m})=12$  cm、路床弾性係数が  $E_0(=E_{0m})=190$  MPa と得られているものとする。このとき、同測点に対して必要なオーバーレイ厚を次の方法で求めるものとする。なおここでは、オーバーレイ用のアスファルト混合物の弾性係数の値は10.0 GPaとする。

いま、舗装の許容たわみ  $w_{da}$  が図-4に示すように設定されているものとする。そのとき、センサー  $V_0$  点のたわみ測定量  $w_{0m}$  が許容たわみ量  $w_{da}$  に一致するまで  $T_0$  を増加させ、その増加量をオーバーレイ厚とする。しかしながら、 $w_{0m}$  が  $w_{da}$  に一致する  $T_0$  は図-4のように C 点や D 点など多数存在する。ここでは C 点を選び、路床の弾性係数  $E_0$  の値は現状のままとし、たわみ量の減少をもつばら  $T_0$  の増加で負担させると考える。

図のように C 点を通る  $T_0$  の値を  $T_{0a}$  と表し、これを許容等値換算舗装厚と称することにする。このとき、オーバーレイ厚  $\Delta H$  は次式で与えられることになる。

$$\Delta H = T_{0a} - T_{0m} \dots\dots\dots (1)$$

以上のような考え方でオーバーレイ厚を決定するものであるが、オーバーレイの一区間には複数の測点があるのでその数だけ  $\Delta H$  の値が算定されることとなる。これらの  $\Delta H$  値を用いてオーバーレイ厚を設計するにあたって、ここでは設計 CBR の算出の際と同様な平均値を採用するものとする。

一方、許容たわみ量  $w_{da}$  をいかに設定するかという問題がある。すなわち、A. I. (アメリカアスファルト協会)などで用いられている許容たわみの概念は、AASHO 道路試験において走行荷重の大きさ・回数とサービス指数の低下との関係を、走行試験開始前の舗装たわみに対して種々検討する中で生まれたものである。しかし同試験では、元来、舗装厚の決定に重点が置かれており、たわみに関するデータが少ない。また、たわみはアスファルトコンクリート層中の温度や路床土の含水量などに大き

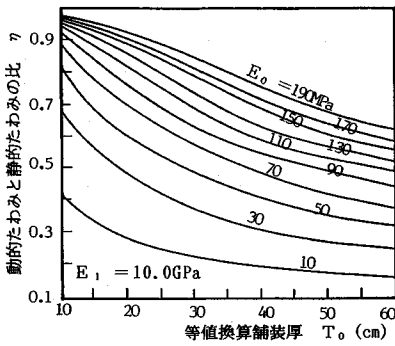


図-5 静的たわみに対する動的たわみの減少率

く影響を受ける。これらの問題もあって、わが国では道路舗装設計において許容たわみ量は設定されていない。ここでは、これらのことは将来の検討・解決すべき課題と考えて、アメリカで用いられている A.I. の許容たわみ量をわが国の要綱用に換算した北村<sup>18)</sup>の許容たわみ量を援用することにする。

以下、同許容たわみ量  $w_{sa}$  と「地盤上スラブ動的理論」を組み合わせて、ロードレイター載荷に対する許容たわみ量  $w_{da}$  を次のように設定し、この  $w_{da}$  を動的許容たわみ量と称することにする。

(1) 静的許容たわみ量  $w_{sa}$  の設定

A.I. では、オーバーレイ対象道路の設計交通量を 1 日・1 方向当たりの 4.1 tf 輪荷重換算台数 ( $N_{4.1}$  と略称する) で表し、 $N_{4.1}$  に対応した許容たわみ量を 4.1 tf 輪荷重載荷時のたわみ量 (輪荷重直下点) で設定している<sup>19)</sup>。一方、わが国の維持修繕要綱においては、周知のように、オーバーレイ厚決定に際して 5 tf 輪荷重に対するベンケルマンビームたわみ量が用いられており、また設計交通量を、供用予定期間 (10 年) における 5 tf 輪荷重換算台数 (交通区分 A~D) で表現している<sup>20)</sup>。

北村は、舗装破壊と輪荷重の大きさとの関係についての AASHO の実験結果などを用いて、A.I. 基準の許容たわみ量をわが国の要綱用のものに換算し、静的許容たわみ量  $w_{sa}$  を求めている。ここでは同許容たわみ量に基づき、A~D 交通量に対して、静的許容たわみ量  $w_{sa}$  をそれぞれ 1.0, 0.8, 0.6, 0.4 mm と設定し、各値に対してオーバーレイ厚を決定するための許容等値換算舗装厚の算定曲線を作成することとする。

なお、アスファルト舗装のたわみは季節によって異なるが、A.I. の許容たわみ量は年間を通じた最大値をもとにして設定されている。そのため、たわみ量の測定は原則としてそれが最も大きく現れる春季に行うようになっている。したがって、ここでも最大たわみ量を与える時期を選んでたわみを測定するか、または最大たわみ量を適当な方法で推定する必要がある。

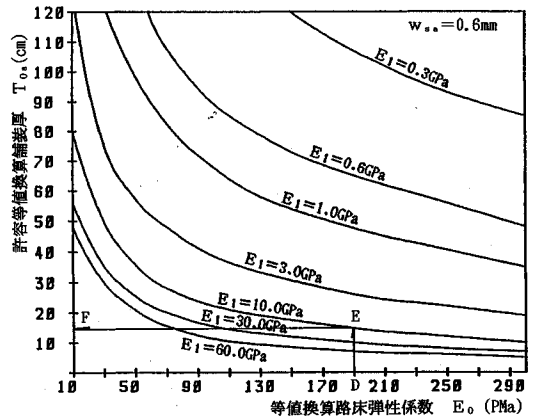


図-6 許容等値換算舗装厚  $T_{0a}$  の算定曲線 ( $w_{sa}=0.6 \text{ mm}$ )

(2) 動的許容たわみ量  $w_{da}$  の設定

ここでは、輪荷重 5 tf 載荷時の静的許容たわみ量  $w_{sa}$  をもとにして、ロードレイター載荷時の動的許容たわみ量  $w_{da}$  を設定する。

まず、図-5 に示すような動的たわみと静的たわみの比を考える。同図は「地盤上スラブ動的理論」を用いて、載荷中心点における動的たわみ量  $w_d$  (動荷重の振動数  $f = 25 \text{ Hz}$ ) と静的たわみ量  $w_s$  ( $f = 0 \text{ Hz}$ ) との比  $\eta = w_d/w_s$  を、 $E_1=10.0 \text{ GPa}$ 、 $P_0=10 \text{ tf}$  および種々の  $E_0$  と  $T_0$  に関して求めたものである。このような  $\eta$  曲線を  $E_1$  と  $E_0$  の各値に対して求めておき、これを使って  $w_{da}$  を次式のように設定することとする。

$$w_{da} = \eta \cdot w_{sa} \dots \dots \dots (2)$$

なおロードレイターのたわみ量は、その測点が 2 つの鋼製パッドの中心点であるため、ベンケルマンビーム (測点: 5 tf 輪荷重載荷点の直下点) に比べて大きく現れるが、ここでは安全側で考えてその違いを無視している。

(3) オーバーレイ厚の決定

以上の考えをもとにして、オーバーレイ厚決定のための許容等値換算舗装厚の算定曲線を求めれば、たとえば C 交通 ( $w_{sa}=0.6 \text{ mm}$ ) に対して図-6 に示す曲線群を得る。なお、他の交通区分に対する曲線を付図-6, 7, 8 に示す。

図-6 の利用方法を図-4 のノモグラフと組み合わせる説明すれば次のとおりである。いま前出の図-4 に示すように、ロードレイターたわみ量から  $T_0 (=T_{0m})=12 \text{ cm}$ 、 $E_0 (=E_{0m})=190 \text{ MPa}$  が得られているものとする。C 交通道路を対象とする場合、図-6 の点 D ( $E_0=190 \text{ MPa}$ ) から、点 E、ついで点 F の順序で許容等値換算舗装厚を求めれば  $T_{0a}=15 \text{ cm}$  が得られる。したがって、オーバーレイ厚は  $\Delta H = T_{0a} - T_{0m} = 3 \text{ cm}$  と求まることとなる。以下、本手法を動的許容たわみ法と称する。

表一 設計 CBR と等値換算舗装厚  $T_A$  (cm)

設計 CBR	交通区分		
	B	C	D
2	29	39	51
3	26	35	45
4	24	32	41
6	21	28	37
8	19	26	34
12	17	23	30
20以上	—	20	26

#### 4. 動的 $T_A$ -法によるオーバーレイ厚設計法

現行舗装厚設計法（以下、 $T_A$ -設計法と称す）によれば、新設時の舗装厚は交通量と路床の設計 CBR が与えられれば、表一<sup>2)</sup>から等値換算舗装厚  $T_A$  が決定される。この新設時の  $T_A$ -設計法をオーバーレイ厚の決定に応用する。これを動的  $T_A$ -法と称し、その内容は以下のとおりである。

ある 1 測点について、図一4 に示すように  $T_{0m}$  と  $E_{0m}$  の値 (A 点) が得られているものとする。このとき、シェルグループの式 (3) を用いて  $E_{0m}$  より、現路床の各測点の CBR を求める。

$$E = 100 \text{ CBR (kgf/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (3)$$

この値に対する  $T_A$  値を表一から求め、オーバーレイ時の許容舗装厚とする。これは動的許容たわみ法の許容等値換算舗装厚  $T_{0a}$  と同様の概念であるが、算出根拠が異なるのでここでは  $T_{0a}$  と表す。このとき本手法では、オーバーレイ厚  $\Delta H$  を

$$\Delta H = T_{0a} - T_{0m} \dots\dots\dots (4)$$

と求めるものである。

いま、図一4 の A 点に関して  $\Delta H$  を求める。  $E_{0m} = 190 \text{ MPa}$  であるので、式 (3) より  $\text{CBR} = 19$  となり、表一より、たとえば C 交通に対して  $T_{0a} = 23 \text{ cm}$  が得られる。したがってオーバーレイ厚は、式 (4) より、 $\Delta H = 23 - 12 = 11 \text{ cm}$  となる。このように、オーバーレイ区間の各測点に関して得られる  $\Delta H$  を、動的許容たわみ法と同様に平均化し、これを同区間の  $\Delta H$  の設計値とする。

この  $\Delta H = 11 \text{ cm}$  の値は前出の動的許容たわみ法の値 ( $\Delta H = 3 \text{ cm}$ ) に比べてかなり大きい。これは、動的  $T_A$ -法では  $T_{0a}$  の値がアスファルト混合物の弾性係数  $E_1$  の値と無関係に算出されるのに対して、動的許容たわみ法では、図一6 に示すように  $T_{0a}$  の値が  $E_1$  の値に依存していることに起因する。

前述のように、 $E_1$  の値は通常 1~10 GPa の間で設定されている。 $E_1$  がこの間で変動するとき、図一6 をみれば、 $T_{0a}$  は 47~15 cm の間にあり、オーバーレイ厚もそれに応じて  $\Delta H = 35 \sim 3 \text{ cm}$  の間で分布する。動的  $T_A$ -法は  $T_A$  設計法の概念から考えて、平均的な  $E_1$  に対す

るオーバーレイ厚を与えるものであり、動的  $T_A$ -法による  $\Delta H (= 11 \text{ cm})$  はこのことを裏付けている。したがって、両手法による  $\Delta H$  の算出結果の差異はそれほど不合理なものではないと考えられる。

#### 5. 提案手法の適用例

ここでは、ロードレイトーが実用化されているケンタッキー州における測定データおよび解析結果<sup>9)</sup>を、本提案手法の妥当性を検討するための材料とする。さらに同データを「高速道路調査会」の手法<sup>3)</sup>にも適用し、これらの手法の比較・検討を行うことにする。

##### (1) ケンタッキー州の手法

同手法は、舗装劣化を舗装厚の減少で等価（等価舗装厚  $D_{eq}$ ）に評価するもので、考え方のみを示せば以下のとおりである。

① ロードレイトーによる 3 センサー位置のたわみ測定量と多層弾性体理論を用いて、現道路に関して、舗装劣化に基づくたわみ増加量  $\Delta W_1$  と、路床の弾性係数を推定する。なお、舗装厚  $D_1$  はコア採取等によりあらかじめ与えておくものとする。

② 次に、①で得た弾性係数値から路床の CBR を推定する。ついで、道路新設時の設計曲線を用いて同 CBR に対応する舗装厚  $D_0$  を求める。

③ 一方これとは別に、舗装厚の減少割合  $\xi$  と、減少によるたわみ増加量  $\Delta W$  との関係を多層弾性体理論より求めておき、①の  $\Delta W_1$  に対応する  $\xi_1$  を求める。

④ 舗装劣化を舗装厚の減少で等価に評価し、その等価舗装厚  $D_{eq}$  を①および②より  $D_{eq} = \xi_1 \cdot D_1$  と求め、オーバーレイ厚を  $\Delta H = D_0 - D_{eq} = D_0 - \xi_1 \cdot D_1$  と算定する。

ケンタッキー州におけるロードレイトーたわみの測定データの一例を、表一2 の  $w_{0m}$  と  $w_{1m}$  の欄に示す。これらの測定値はオーバーレイ対象道路の一区間における 6 測点のものであり、春季における測定値を基準状態（温度 21°C、表・基層の弾性係数  $E_1 = 8.27 \text{ GPa}$ ）のたわみ量に換算している。これらのデータに対するオーバーレイ厚は、6 測点に関する最大値として  $\Delta H = 7.6 \text{ cm}$  が報告されている<sup>9)</sup>。

設計交通量は、4.1 tf 輪荷重換算日交通量  $N_{4.1}$  が 1080 台である。したがって、前述の北村手法によれば許容たわみ量は  $w_{sa} = 0.7 \text{ mm}$  となり、わが国の B~C 交通量の間中に相当する。なお、ロードレイトー起振力およびたわみ量は全振幅で表現されている。

##### (2) 動的許容たわみ法

表一2 の備考欄に示す起振力を片振幅用に変換し、ついで起振力  $P_R = 10 \text{ tf}$  の場合のたわみ量に換算すれば、表一3 の  $w_{0m}$  と  $w_{1m}$  の欄に示す結果を得る。次に、同たわみ量を図一4 などのノモグラフに適用して、等値換算舗装厚  $T_{0m}$  と同路床弾性係数  $E_{0m}$  を求めた。これらの

表一2 ロードレイトーによるたわみの測定例

測点	たわみ		備 考
	(10 <sup>-8</sup> inch)		
	W <sub>0m</sub>	W <sub>1m</sub>	
1	64.9	40.7	アスファルト混合物の弾性係数 E <sub>1</sub> =8.27GPa (温度21℃, 載荷速度25Hz) ロードレイトー起振力P <sub>R</sub> =2.67KN ケンタッキー州の手法による オーバーレイ厚ΔH=7.6cm
2	75.9	45.1	
3	96.8	59.4	
4	64.9	40.7	
5	80.3	47.3	
6	88.0	51.1	

表一3 たわみ w<sub>m</sub>, 等値舗装厚 T<sub>0m</sub> および弾性係数値 E<sub>0m</sub> の推定値

測点	たわみ		アスファルト混合物の弾性係数 E <sub>1</sub>					
	W <sub>0m</sub> (mm)	W <sub>1m</sub> (mm)	E <sub>1</sub> =6.0 GPa		E <sub>1</sub> =8.27 GPa		E <sub>1</sub> =10.0 GPa	
			T <sub>0m</sub> (cm)	E <sub>0m</sub> (MPa)	T <sub>0m</sub> (cm)	E <sub>0m</sub> (MPa)	T <sub>0m</sub> (cm)	E <sub>0m</sub> (MPa)
1	0.61	0.38	16	250	14	250	13	250
2	0.71	0.42	14	230	13	220	11	210
3	0.90	0.55	13	180	11	175	10	170
4	0.61	0.38	16	250	14	250	13	250
5	0.75	0.44	13	220	12	230	11	240
6	0.82	0.48	12	210	11	210	10	210

値を表一3の右欄に示す。なお、E<sub>1</sub>=8.27 GPa に対する値は E<sub>1</sub>=10.0 GPa と E<sub>1</sub>=6.0 GPa のノモグラフ (それぞれ図一4 と付図一4) から1次補間的に求めている。

次に、表一3の E<sub>1</sub>=8.27 GPa 欄の各 E<sub>0m</sub> 値に対して、許容等値換算舗装厚 T<sub>0a</sub> を図一6 および付図一6, 7 から求めた。これらの値を表一4 の T<sub>0a</sub> 欄に示す。これらの T<sub>0a</sub> の値から表一3 の T<sub>0m</sub> 値を差し引けば、各測点に対するオーバーレイ厚 ΔH が求まる。これらの値を ΔH 欄に示す。なお、---印は T<sub>0m</sub> > T<sub>0a</sub> のケースでオーバーレイが不要であることを示している。

これらの6測点の ΔH に対して、前述の設計 CBR 的平均値を求めてオーバーレイ厚の設計値とすれば、B 交通に対して 1.8 cm, C 交通に対して ΔH=7.5 cm が得られる。なお、実際の設計にあたっては、ΔH の最小値は 3 cm とし、それ未満の値が算出された場合にはオーバーレイは不要と考えることなど種々の検討課題がある。ここでは提案手法の適用性を検討するため、ケンタッキー州の手法と同様に、6 測点に関する最大値としてオーバーレイ厚 ΔH の設計値を求めれば、B 交通では ΔH=3 cm, C 交通では ΔH=9 cm が得られることとなる。

(3) 動的 T<sub>A</sub>-法

前述の動的許容たわみ法において、表一3の E<sub>1</sub>=8.27 GPa 欄の各 E<sub>0m</sub> 値に対応する CBR を式(3) から算定すれば、表一5の CBR 欄の値となる。ついで、これらの CBR に対する T<sub>0a</sub> の値を表一1 より求め、各交通量に対するオーバーレイ厚 ΔH を算定すれば、表一5の ΔH 欄に示す値が得られる。なお、T<sub>0a</sub> 欄の ---印は

表一4 動的許容たわみ法によるオーバーレイ厚 ΔH

測点	B交通		C交通		D交通	
	W <sub>0a</sub> =0.8mm		W <sub>0a</sub> =0.6mm		W <sub>0a</sub> =0.4mm	
	T <sub>0a</sub> (cm)	ΔH (cm)	T <sub>0a</sub> (cm)	ΔH (cm)	T <sub>0a</sub> (cm)	ΔH (cm)
1	10	---	16	2	24	10
2	11	---	17	4	26	13
3	14	3	20	9	32	21
4	10	---	16	2	24	10
5	11	---	17	5	25	13
6	12	1	18	7	26	15

表一5 動的 T<sub>A</sub>-法によるオーバーレイ厚 ΔH

測点	CBR	T <sub>0a</sub> (cm)			ΔH (cm)		
		交通区分			交通区分		
		B	C	D	B	C	D
1	25	---	20	26	---	6	12
2	22	---	20	26	---	7	13
3	18	17	23	30	6	12	19
4	25	---	20	26	---	6	12
5	23	---	20	26	---	8	14
6	21	---	20	26	---	9	15

表一1の同印と同様の意味であり、現行 T<sub>A</sub> 設計法の設計対象外であることを示す。この区間における ΔH の設計値として、これら6測点に関する設計 CBR 的平均値を求めれば、B 交通で ΔH=3.3 cm, C 交通で ΔH=10.3 cm が得られる。

さらに、ケンタッキー州の手法と比較するために、6 測点に関する最大値としてオーバーレイ厚 ΔH の設計値を求めれば、B 交通では ΔH=6 cm, C 交通では ΔH=12 cm となる。

(4) 「高速道路調査会」の手法

一般に、ロードレイトーたわみ量はベンケルマンビームたわみ量に比べて小さく現れる。もし、あらかじめ両たわみ量の比がわかっていたら、過去に十分蓄積されているベンケルマンビームたわみ量に関する諸基準を、ロードレイトーたわみ量に結びつけて解析することができる。「高速道路調査会」はロードレイトーとベンケルマンビームによる現場試験を行って、両者のスティッフネス (載荷重/たわみ量) の比 S<sub>RR</sub>/S<sub>BB</sub> が 1.0~3.0 の間にあることを認めている。ここに、S<sub>RR</sub> はロードレイトーのスティッフネスで、S<sub>BB</sub> はベンケルマンビームのそれである。さらに、同比を許容たわみ量やオーバーレイ厚設計曲線に関する T. R. R. L. (イギリス道路研究所) の基準と結合させて、ロードレイトーによるオーバーレイ厚決定手法を提案している。

一般に S<sub>RR</sub>/S<sub>BB</sub> の値は各道路現場で異なるため、同比を汎用的な値で設定することは困難であるが、いま、S<sub>RR</sub>/S<sub>BB</sub>=2.0 と 3.0 の2ケースについて、表一2のデータを同手法に適用すれば、それぞれ ΔH=5 cm と 9 cm

表-6 オーバーレイ厚  $\Delta H$  の設計値の比較

手 法	交通 区分	オーバーレイ厚 $\Delta H$ (cm)	
		設計値	比較値
(1) ケンタッキー州	B~C	7.6	7.6
(2) 動的許容たわみ法	B	3	6
	C	9	
(3) 動的 $T_A$ -法	B	6	9
	C	12	
(4) 高速道路調査会	B~C	5 ( $S_{RR}/S_{BB}=2.0$ )	9 ( $S_{RR}/S_{BB}=3.0$ )
		9 ( $S_{RR}/S_{BB}=3.0$ )	

が得られる<sup>22)</sup>。

以上の4手法を比較・対照すれば、表-6の設計値欄に示すとおりである。

### (5) 結果と考察

(1)のケンタッキー州の手法において、設計交通量は前述のようにB~C交通量の中間に相当している。したがって、(2)の動的許容たわみ法および(3)の動的  $T_A$ -法において、B交通量に対するオーバーレイ厚の設計値と、C交通量のその中間値をもって、ケンタッキー州の設計値と比較・考察する。このとき、オーバーレイ厚は、表-6の比較値欄に示すように、(2)の手法では  $\Delta H=6$  cm、(3)の手法では  $\Delta H=9$  cm となり、(1)の手法の  $\Delta H=7.6$  cm に比較的一致しているといえる。またこれらの値は、(4)の「高速道路調査会」の手法で、ロードレイターとベンケルマンビームのステイフネスの比を  $S_{RR}/S_{BB}=2.0\sim 3.0$  に設定した場合のオーバーレイ厚  $\Delta H=5\sim 9$  cm の範囲にも入っており、信頼性があるといえる。

(1)の手法では、現舗装の表・基層と路盤の層厚をコア採取などの方法で調査する必要があるが、(2)と(3)の手法は、これらをロードレイターたわみ量から非破壊で間接的に推定できるため、きわめて簡略であるといえる。特に、(3)の手法は現在実施されている  $T_A$  設計法に整合しており、また、現舗装およびオーバーレイ用のアスファルト混合物の種類に無関係にオーバーレイ厚を決定することができ、実用性に優れているといえる。一方、(2)の手法は、解析がすべて動的手法で一貫しているため、(1)の静的解析手法と(3)の半動的解析手法と比べて理論的には合理的ではあるが、表-6の結果からはそれが客観的に認められるとはいえない。この点に関しては今後データを集積するなかで検討してゆきたい。

## 6. 結 論

舗装維持管理システム(PMS)における解析理論の一手法として有効と考えられる「地盤上スラブ動的理論」をロードレイターに応用し、オーバーレイ厚決定問題へ

の適用性を検討した。これらの結果を要約すれば以下のとおりである。

(1) オーバーレイ厚決定手法として、動的許容たわみ法と動的  $T_A$ -法の2手法を提案したが、両手法とも、実用化されているケンタッキー州の手法と比較してより簡便であり、またオーバーレイ算定厚も同州の設計厚とほぼ一致し、その妥当性が認められた。

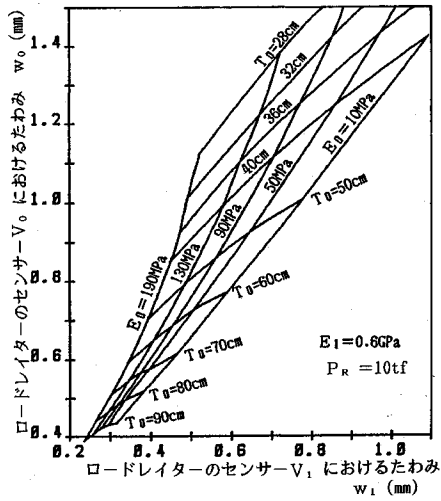
(2) 動的  $T_A$ -法は現舗装設計法に整合しており、特に実用性にすぐれているといえる。

(3) 動的許容たわみ法は解析がすべて動的手法で一貫しているため、理論的には動的  $T_A$ -法に比べて合理的である。

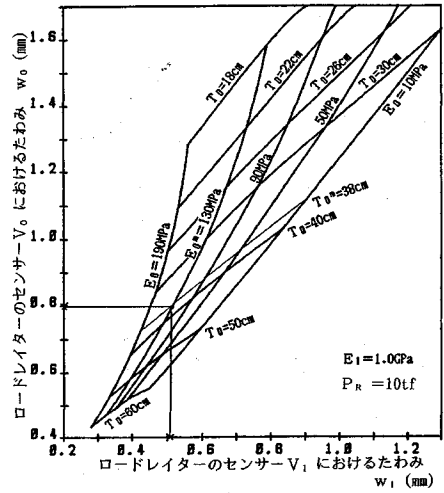
このように、本提案手法の適用性は十分に認められるといえる。しかしながら、適用データが少なく、さらに解析に用いたノモグラフは粗すぎる。今後実用化にあたっては、多くのデータのもとで検証を重ね、またノモグラフを含めてすべてコンピュータ処理によりシステム化して精緻化する必要がある。さらに舗装の寿命予測やパフォーマンスなど、舗装維持管理システムに対する本手法の利用については、今後これらの改善を行う中で検討してゆきたい。また、大きな動的たわみを得られるフォーリングウェイトデフレクトメータ(FWD)が最近急速に普及しつつある。「地盤上スラブ動的理論」は、フーリエスペクトル解析と併用すればFWDの動的理論解析の基本解となり得るので、そのたわみ観測データを収集する中で今後、同理論の適用を検討してゆきたいと考えている。

謝 辞：本研究の遂行にあたり、貴重なご助言を頂いた建設省土木技術研究所の安崎 裕氏、運輸省港湾技術研究所の佐藤勝久氏、ならびに日本道路(株)技術研究所の山下弘美氏に深甚な謝意を表します。

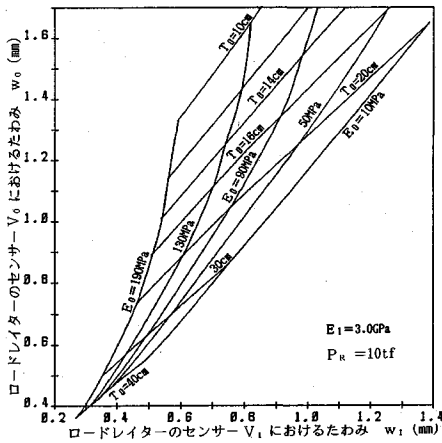
付 録



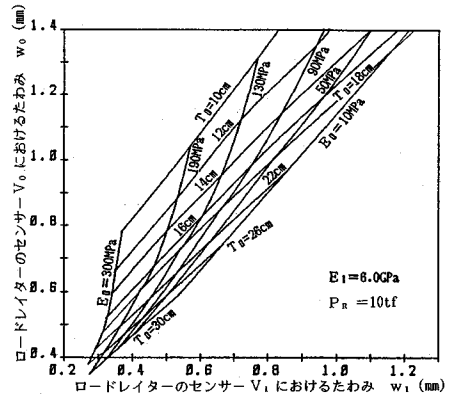
付図-1 現舗装の  $T_0$  と  $E_0$  の推定ノモグラフ ( $E_1=0.6 \text{ GPa}$ )



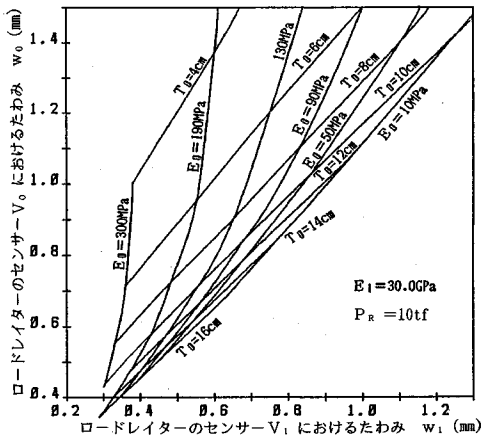
付図-2 現舗装の  $T_0$  と  $E_0$  の推定ノモグラフ ( $E_1=1.0 \text{ GPa}$ )



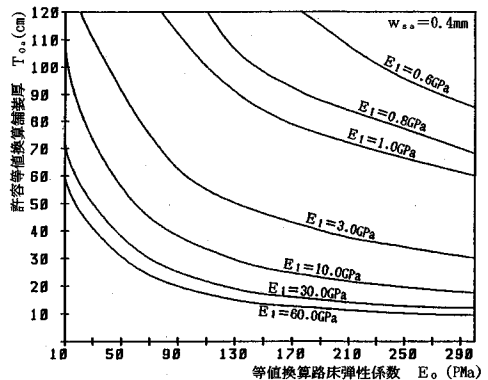
付図-3 現舗装の  $T_0$  と  $E_0$  の推定ノモグラフ ( $E_1=3.0 \text{ GPa}$ )



付図-4 現舗装の  $T_0$  と  $E_0$  の推定ノモグラフ ( $E_1=6.0 \text{ GPa}$ )

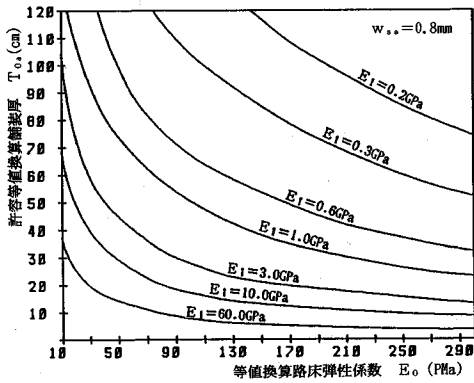


付図-5 現舗装の  $T_0$  と  $E_0$  の推定ノモグラフ ( $E_1=30 \text{ GPa}$ )

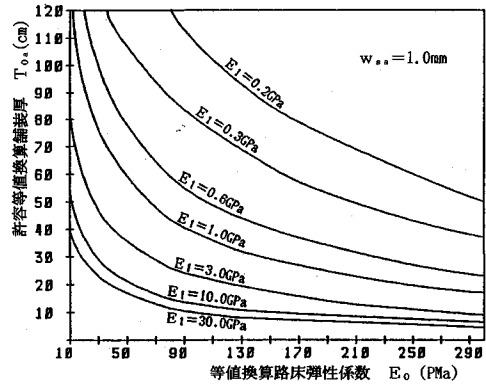


付図-6 許容等価換算舗装厚  $T_{0c}$  の算定曲線 ( $w_{sa}=0.4 \text{ mm}$ )





付図一 許容等値換算舗装厚  $T_{0a}$  の算定曲線 ( $w_{sa}=0.8\text{ mm}$ )



付図二 許容等値換算舗装厚  $T_{0a}$  の算定曲線 ( $w_{sa}=1.0\text{ mm}$ )

参考文献

- 1) 安崎 裕・池田拓哉：舗装のライフサイクルに関する一考察，第18回日本道路会議，特定課題論文集，pp.157～159，1989.
- 2) たとえば，Sharpe, G.W., Southgate, H.F. and Deen, R.C. : Dynamic Pavement Deflections, Proc. ASCE, Vol.107, No. TE 2, pp.167～181, 1981.
- 3) たとえば，Bandyopadhyay, S.S. : Flexible Pavement Evaluation and Overlay Design, Proc. ASCE, Vol.108, No. TE 6, pp.523～539, 1982.
- 4) たとえば，Beecken, G. : Ermittlung der Tragfähigkeit vorhandener Fahrbahnbefestigungen und deren Verstärkung, Strassen Tiefbau, 34 [ 8 ], pp.13～19, 1980.
- 5) たとえば，高速道路調査会：路面たわみ測定器（ロードレイター）による実測結果，舗装，Vol.9, No.8, pp.20～24, 1974.
- 6) たとえば，佐藤勝久・福手 勤：ダイナフレクトによる空港アスファルト舗装強度評価とかさ上げ厚設計，土木学会論文報告集，第303号，pp.109～118, 1980.
- 7) たとえば，五十嵐光徳・笠原 篤：FWDを用いたアスファルト舗装の支持力評価，第18回日本道路会議，一般論文集，pp.334～335, 1989.
- 8) 横田 漠・藤本 廣：弾性上スラブの動的解析とそのオーバーレイ問題への適用，構造工学論文集，Vol.31 A, pp.473～484, 1985.
- 9) Southgate, H.F., Sharpe, G.W. and Deen, R.C. : A Rational System for Design of Thickness of Asphalt Concrete Overlays, Transp. Res. Rec.700, pp.46～59, 1979.
- 10) Achenbach, J.D. and Keshava, S.P. : Free Waves in a Plate Supported by a Semi-Infinite Continuum, Jour. of Appl. Mech., Vol.34, No.2, pp.397～404, 1967.
- 11) 三井 晃：舗装の無破壊調査方法の一例，舗装，Vol.9, No.7, pp.24～29, 1974.
- 12) 福手 勤・井上武美・栃木 博：アスファルトコンクリート舗装上のオーバーレイ，ASPHALT, Vol.25, No.132, pp.42～52, 1982.
- 13) Bonnaure, F., Grauois, A. and Udron, J. : A New Method for Predicting the Fatigue Life of Bituminous Mixes, Proc. AAPT, Vol.49, pp.499～529, 1980.
- 14) たとえば，Southgate, H.F. and Deen, R.C. : Temperature Distribution within Asphalt Pavements and its Relationship to Pavement Deflection, Highway Res. Rec. 291, pp.116～131, 1969.
- 15) 日本道路協会：道路維持修繕要綱，pp.79～81, 1978.
- 16) 三浦裕二：たわみ曲線によるアスファルト舗装のオーバーレイ厚さ設計法に関する一提案，土木学会論文報告集，第213号，pp.65～70, 1973.
- 17) 今泉繁良・植下 協：等価二層モデルによるアスファルト舗装の解析，土木学会論文報告集，第256号，pp.69～77, 1976.
- 18) 北村幸治：舗装構造のたわみによる設計法試案，舗装，Vol.7, No.9, pp.12～21, 1982.
- 19) Kingham, R.I. : Development of the Asphalt Institutes Deflection Method for Designing Asphalt Concrete Overlays for Asphalt Pavements, A.I. Res. Rep.69-3, p.17, 1969.
- 20) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，pp.186～187, 1984.
- 21) 前出20) : p.12.
- 22) 横田 漠：道路舗装におけるオーバーレイ厚決定手法に関する研究，学位論文，1987.

(1990.7.25 受付)

## OVERLAY DESIGN METHODS BASED ON DYNAMIC DEFLECTION ANALYSES

Hiroshi YOKOTA, Chikashi DEGUCHI,  
Takeshi CHISHAKI and Hiroshi FUJIMOTO

This paper describes two methods to determine the overlay thickness of flexible pavement using dynamic pavement deflections. The methods are based on the dynamic analyses of an infinite plate on an elastic half-space being a model for the road structure. Non-destructively, we can estimate the pavement thicknesses and the subgrade moduli of the existing road, and determine the overlay thickness of the pavement. We apply our methods to the deflections of a pavement measured by the Road Rater in Kentucky, calculate the overlay thicknesses and compare them with one derived from the Kentucky Method. The comparisons reveal that the proposed methods give us rational overlay thicknesses.

---