

たわみ曲線によるアスファルト舗装のオーバレイ厚さ 設計法に関する一提案

A PROPOSITION OF OVERLAY DESIGN PROCEDURES BASED
ON THE RADIUS OF CURVATURE

三 浦 裕 二*
By Yuji Miura

1. まえがき

舗装の破壊がある程度進行すると修繕工事として、あるいはまた、交通量予測の変更に伴う構造強化を目的として、一般に加熱混合物によるオーバレイが行なわれる。オーバレイ厚さの設計法としては、建設省技術研究会¹⁾や、米国アスファルト協会²⁾の一方法のように、在来舗装の破損状況に応じて等値換算係数を定め、その評価を T_A で行ない不足する厚さを求める方法と、カナダあるいは米国アスファルト協会の第 2 の方法^{3), 4)}のように、在来舗装のたわみ量から決定する方法がある。しかし前者の方法では、在来舗装の評価にあたって主観が入りやすいため多くの経験を要することのほか、ひびわれや流動の形態もしくは原因による評価がなされないことや、舗装内部までの評価が困難であるなどの問題点がある。一方後者にあっては、たわみ量からアプローチする点で、舗装全体の評価を行ないうるが、たわみの一因である路床の支持力条件によって舗装評価に差の生ずることや、単にたわみ量だけでは舗装の応力状態が把握できない点に問題を残している。最近ではダイナフレクトなどの利用により在来舗装の構造評価を行ない、多層理論解析から合理的に設計を行なう試みもあるが、いまだ一般的とはいはず、簡単なオーバレイ厚さの設計法の確立は重要な意味を持っている。

そこで、在来舗装のたわみ量および曲率半径から弾性理論に基づき路床条件を考慮したうえで、舗装構造の力学的評価を行ない、それをアスファルトコンクリート等値厚 (T_A) で示し、将来の交通量を考慮したうえで、不足する厚さをオーバレイ厚さとする方法について検討した。さらにオーバレイ層下縁に生ずる引張りひずみに注目した場合の層厚決定についての一方法をも示した。

2. 在来舗装の評価について

舗装の供用性が低下すると、その程度に応じて維持修繕が行なわれる。周知のように AASHO 道路試験では、この供用性を客観的かつ総合的に評価し、サービス指数という形で定量化し、オーバレイのような大規模な修繕を必要とする限界値を示した。

このような時点での舗装の強度特性を明らかにし、また同時に供用性低下原因を明確にしておくことは、適切な維持修繕の設計を行なうために重要なことである。

舗装の供用性低下におよぼす要因は、交通条件および自然環境などの外部要因によって生ずる舗装各層構成材料の性状変化、それに伴う舗装構造の強度変化および路床の支持条件の変化などがその主たるものである。

舗装体の支持力や変形に対する抵抗性を知るために用いられる現場試験には、現在一般に次のようなものがある。

- (1) 平板載荷試験
- (2) ベンケルマンビーム試験
- (3) 振動試験

これらの方法のうち、ベンケルマンビームによるたわみ測定は、簡単で多数の測定が可能であることから、もっとも広く用いられている手段である。ただアスファルト舗装にあっては、路面たわみ量が温度や路床状態によって大きく変動するので、測定時期については十分な配慮が必要となる。さらに同一たわみ量であっても路床条件次第では図-8 に示すように舗装の力学的評価に差の生じることや、図-1⁴⁾ に示したように、アスファルトの老化が進行しているものほど表面のひびわれ程度が大きいという調査結果や、あるいはまた、図-2⁴⁾ に示すように、粒状材料の品質低下にも著しいものがあるという事実が示すように、舗装構成材料および路床の特性調査も欠かすこととはできない。

* 正会員 日本大学助教授 理工学部交通工学科

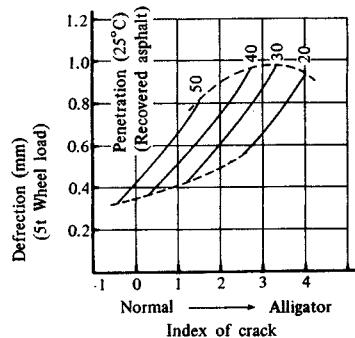


Fig. 1 Relationship of Deflection and Surface Condition, for Different Penetration of Recovered Asphalt

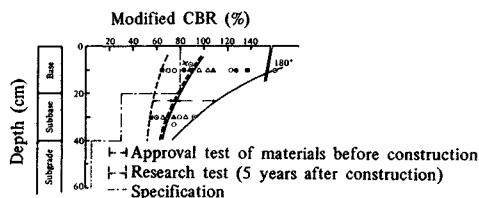


Fig. 2 Degradation of Base Materials (Meishin Highway)

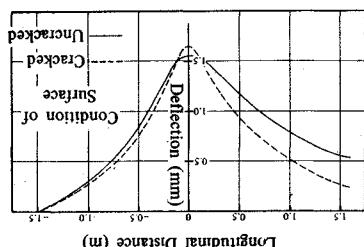


Fig. 3 Profile of Deflection Curve by Benkelman Beam

以上のような調査結果を総合的に評価するためには、単にたわみ量だけでは不十分であって、そのたわみについて検討する必要が生まれる。図-3は、同一舗装にあってひびわれの生じている個所と、生じていない個所のベンケルマンビームによるたわみのプロフィルである。明りょうにその差を知ることができよう。この差に注目した研究はすでに多くあり、そのおもなものは、Dunlap と Stark⁵⁾, Ford と Bisselt⁶⁾, Dehlen⁷⁾ および Kung⁸⁾ らの研究である。これらはすべて図-4に示すように最大たわみ量 (ω) とその影響範囲の半径 (L) の比に注目したり、あるいはまた最大たわみ量と半径方向に、ある距離だけ離れた点でのたわみ量の差 (d) と、その距離 (r) の比、すなわちたわみ角をもって表現しようとする。

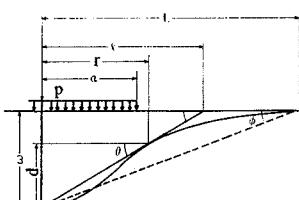


Fig. 4 Profile of Deflection

るものである。その後 Dehlen は⁹⁾、たわみの曲率半径に注目し、簡単な曲率計を開発すると同時に、舗装のひびわれと曲率半径がよい相関関係にあることを示した¹⁰⁾。

曲率半径による評価の利点は、路床を含め舗装の状態を端的に反映すること、タイヤ圧の高低が反映されることのほか、在来舗装以下を一様体と仮定することによって、オーバレイ設計に際して 2 層問題としての取扱いを可能とし、簡単な計算式と図表で応力、ひずみの状況を推測することができるにある。

3. たわみ量と曲率半径による在来舗装の評価

(1) たわみ量による在来舗装の評価

在来舗装の力学的評価を行なうにあたって、在来舗装を路床と舗装の 2 層問題と考え、第 1 層すなわち舗装体の弾性係数 (E_p) をもって、評価を行なうことが考えられる。たわみ量に注目した場合は、すでに Burmister によって示されたとおり、たわみ量と第 2 層すなわち路床の弾性係数 (E_s) が与えられれば、沈下係数を知ることで容易に舗装体の弾性係数を求めることができる。すなわち

$$\omega = \frac{2(1-\mu^2) \cdot P \cdot a}{E_s} \cdot F_w \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、
 ω : 舗装表面、載荷中心軸上での沈下量 (cm)
 P : 接地圧 (kg/cm^2)
 a : 接地半径 (cm)
 μ : 路床のポアソン比
 F_w : 沈下係数

なお、一般に知られている Burmister の沈下係数図は、ポアソン比 0.5 の場合である。実際の舗装材料ではポアソン比 0~0.5 の間にあると考えられるが、計算値と実測値が比較的よく一致すると思われる¹⁵⁾ 0.25 の場合に

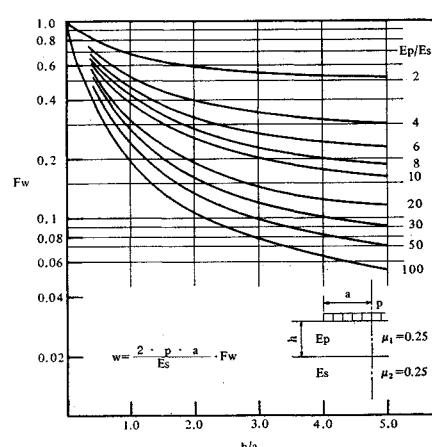


Fig. 5 Settlement Factor ($\mu=0.25$)

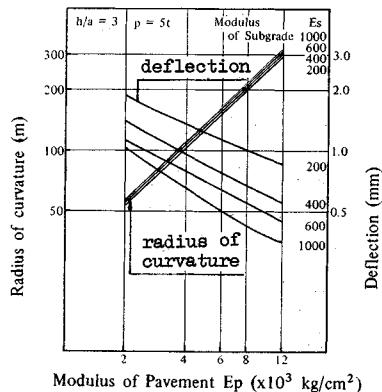


Fig. 8 Relationship of the Radius of Curvature and Deflection and Modulus of Two Layers

体以下を一様体とみなした場合の等値弾性係数 (E_m) を求めることができる。もちろんたわみ量に注目した場合でも (E_m) は求められるが、この場合路床の弾性係数によってその評価に大きな差が生ずる。たとえば図-8において、表面たわみ量 1 mm の場合の等値弾性係数は、

$$E_m = \frac{2(1-\mu^2) \cdot p \cdot a}{w} = 1760 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

と路床の弾性係数に関係なく一定であるが、曲率半径に注目すると、同じ 1.0 mm のたわみ量であっても、路床の弾性係数に応じて曲率半径は 58~200 m と変動し、等値弾性係数は 1760 ~6 075 kg/cm² と変化し、その舗装の力学的挙動を状況に応じて反映する。図-9 は、国道 246 号線におけるたわみ量と曲率半径の関係である。これから同一沈下量であっても、その曲率半径には大きな差のあることが知られよう。

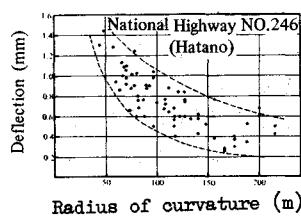


Fig. 9 Relationship of Curvature by Dehnen Curvature Meter and Deflection by Benkelman Beam

4. オーバレイの厚さの設計について

(1) アスファルトコンクリート等値厚 (T_A) に注目した場合

在来舗装の評価を T_A で行ない、将来の交通量および設計 CBR から新たに要求される T_A との差をオーバレイ厚さとする方法は、すでに建設省技術研究会の方法として採用されている。ただ T_A を求めるための等値換算係数決定に際し、多くの経験を必要とする点と、内部の評価が困難な点が問題点といえよう。

そこで在来舗装の品質低下が舗装材料の力学的性質は変化せずに、いいかえれば弾性係数は変化せずに、舗装の厚さが低減したものと考えれば、在来舗装を T_A で評価することができよう。つまり舗装に用いられるアスファルト混合物の弾性係数と路床の弾性係数を仮定できれば、式 (10) より曲率係数 (F_R) が求められ、さらに図-7 を用いて舗装厚 ($h=T_A$) を推定することができる。またわが国における舗装設計法の基礎の 1 つである

$$T_A = \frac{12.5 \times P^{0.64}}{\text{CBR}^{0.3}} \quad \dots \dots \dots (11)$$

より求められる T_A と図-7 から曲率係数が求められ、さらに式 (10) により曲率半径を推定することもできる。

ここで問題となるのはアスファルト混合物と路床の弾性係数の仮定であるが、前者は実験室でのクリープ試験、繰返し載荷試験などにより直接求めるか、あるいはまた Heukelom, Klomp らシエルグループによって提案された方法¹²⁾によることが考えられる。後者の場合もまた実験室での繰返し 3 軸試験などにより直接求めるか、あるいは Jones, Heukelom, Klomp らによって示された¹⁴⁾ $E=100 \cdot \text{CBR}$ を利用する方法も簡便であろう。図-10 は、Klomp, Niseman によって示されたアスファルト舗装の弾性係数と温度および車両走行速度の関係である¹³⁾。一般に常温で通常の走行速度であれば 20 000~50 000 kg/cm² 程度であるが、たわみあるいは曲率半径測定時のように低速走行時であれば当然より小さい値をとり、図-10 の拡張から推測すると、速度 2~4 km/h、常温域であれば 7 000~15 000 kg/cm² 程度であろう。

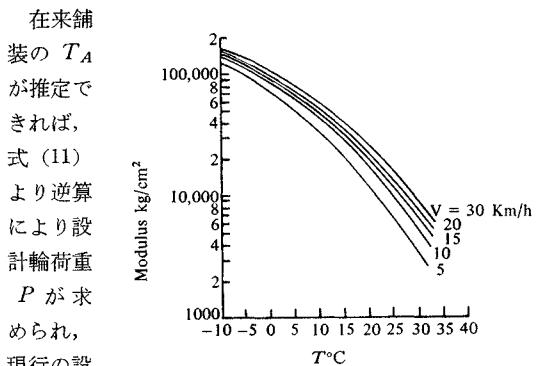


Fig. 10 Modulus in Relation to Temperature and Vehicle Speed, to be Introduced into Calculations as E Modulus

を次のように変形して寿命を推定することもできる。

$$N_L = 10 \cdot \left(\frac{P_0}{P} \right)^4 \quad \dots \dots \dots (12)$$

ここに、 N_L ：在来舗装の残余寿命（年）

P_0 ：在来舗装の T_A に相当する設計輪荷重 (t)

P ：将来の設計輪荷重 (t)

(2) オーバレイ下縁に生じる引張りひずみに注目した場合

前に述べたように、在来舗装以下を一様体として評価できれば、オーバレイ厚さの設計は、とりあえず2層問題としての取扱いが可能となり、複雑な計算は避けられる簡単な計算と図表で2層界面の応力あるいはひずみの状況が把握できる。そこでオーバレイ層下縁に生ずるひずみの大きさ、すなわち疲労抵抗性に注目して厚さ設計を試みた。荷重の繰返し回数と許容引張りひずみの関係は、多くの研究者によって求められているが、一般に 10^6 回の繰返し応力に対し $100\sim250\times10^{-6}$ 程度とされている。図-11は、2層弾性体の鉛直荷重による第1層下縁に生ずるひずみを、境界面は粗、ポアソン比0.25の場合について求めたものである。2層の弾性係数比によって多少異なるものの、ひずみは載荷半径の40~60%の厚さ付近で最大値をとることがわかる。また、2層弾性係数比が小さいほど、第1層の厚さ増加の効果はあまりないことも知られる。

図-12は、限界引張りひずみを 200×10^{-6} とした場合の接地圧と第1層（オーバレイ層）の厚さとの関係を、第1層の弾性係数および2層の弾性係数比別に示したものである。なお図には接地半径（ a cm）と輪荷重（ P_t ）の間に、 $a=12\times P_t$ なる関係が成り立つと仮定した場合のスケールも付した。したがって在来舗装の等価弾性係数を曲率半径から求め、さらにオーバレイ層の弾性係数を与えることによって図-11から将来の交通量を予測したうえ、オーバレイ厚さの決定が行なえる。

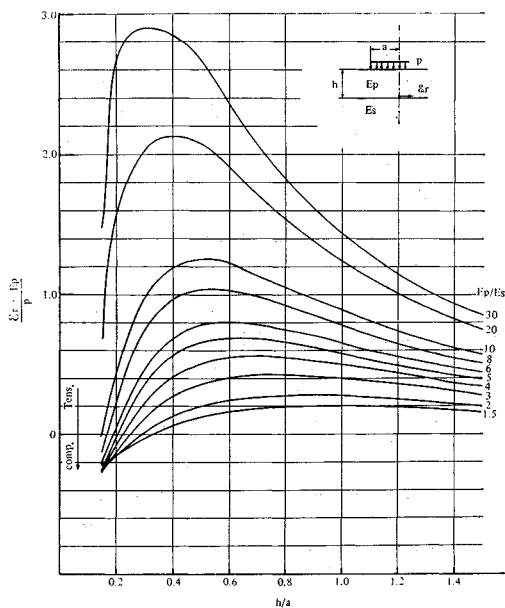


Fig. 11 Radial Strain in Relation to Layer Thickness

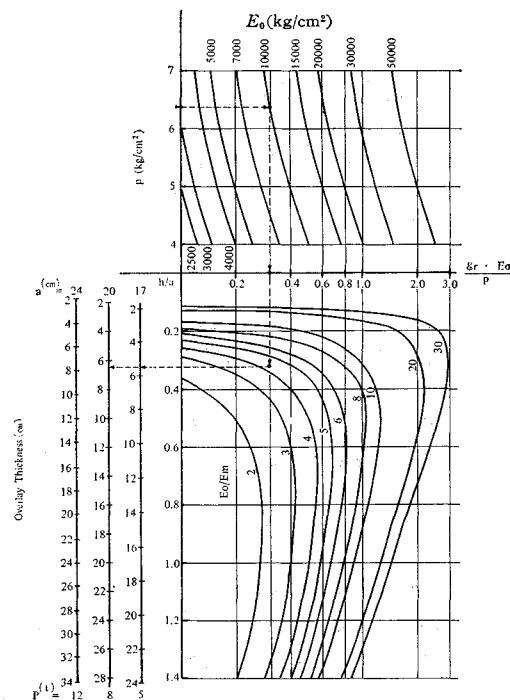


Fig. 12 Relationship of Contact Pressure and Overlay Thickness, for Different Modulus of Two Layers

(3) 簡単な計算例

表-1に示すような条件が与えられた場合について、先に示した評価および設計手順について計算を試みた。

a) 在来舗装の評価について

在来舗装の評価にあたって、たわみ量による場合は、式(2)および図-5から、また曲率半径による場合は、式(10)および図-7からそれぞれ在来舗装の弾性係数を推定した。さらに在来舗装以下を一様体と考えた場合についても、

$$w = \frac{2(1-\mu^2)p \cdot a}{E_m} \quad \dots \dots \dots (13)$$

$$R^{(m)} = \frac{a \cdot E_m}{100(1-\mu^2)p} \quad \dots \dots \dots (14)$$

より求め、それぞれ表-2に示した。また T_A による評価もアスファルト混合物の弾性係数を 10000 kg/cm^2 と仮定し、実測曲率半径と等しくなる舗装厚を図-7から

表-1 計算例の仮定条件

		備考
ベンケルマンビームによるたわみ量 $w(\text{mm})$	1.05	輪荷重 5 t, 20°C
曲率半径 $R(\text{m})$	80	輪荷重 5 t, 20°C
路床の CBR 値 (%)	5	設計 CBR
舗装の厚さ $h(\text{cm})$	50	
路床の弾性係数 $E_s(\text{kg/cm}^2)$	500	$E_s = 100 \times \text{CBR}$
オーバレイ層の弾性係数 $E_o(\text{kg/cm}^2)$	10000	
設計 輪荷重 $P(t)$	8	

表-2 在来舗装の評価 (5t 輪荷重による)

評価法	評価		備考
	在来舗装 (E_p)	一様体 (E_m)	
たわみ量	2800 kg/cm ²	1670 kg/cm ²	$F_w=0.28, E_p/E_s=5.6$
曲率半径	2750 kg/cm ²	2430 kg/cm ²	$F_r=0.046, E_p/E_s=5.5$
T_A	15.6 cm	—	$E_p/E_s=10000/500, h/a=0.92$

求め表-2に示した。一様体とみなした場合、たわみ量による評価と曲率半径による評価には差の生じることがわかる。この場合の曲率半径は測定車の輪荷重 5t によるものであるから、設計輪荷重の 8t の場合を推定するために、 $E_p/E_s=2750/500=5.5, h/a=50/20=2.5$ について図-7より F_R を求め、さらに式(10)により曲率半径 R_s は

$$R_s = \frac{1.067 \times 20 \times 500}{6.37} \times 0.046 = 77(\text{m})$$

となる。この場合の等値弾性率 (E_m) は、式(14)により 2300 kg/cm² となる。さらに T_A については、17.8 cm と推定できる。5t の場合より大きく評価されるのは、輪荷重の増大に伴う接地半径の増加によるものである。この T_A を用いて、式(11)および(12)から残余寿命を求めると 0.45 年、約 5 カ月となる。

b) オーバレイ厚さの設計について

設計輪荷重 8t, CBR 5% の場合必要とされる舗装厚は $T_A=29.5$ cm である。しかるに在来舗装の T_A による評価は 17.8 cm であるから、その不足分 11.7 cm がオーバレイ厚さとなる。一方オーバレイ下縁に生じるひずみに注目した場合、図-12 より、6.5 cm がオーバレイ厚さとなる。ただし、この場合オーバレイにのみ注目しているため、在来舗装の補強が考えられていない。すなわち、オーバレイによって在来舗装の品質低下が今後とも生じないものとすれば 6.5 cm のオーバレイ厚さでよいことになる。しかし実際には在来舗装の品質低下は将来とも起こり得るであろうから、その寿命は短かく、残余寿命を求めてみると、

$$T_A = 17.8 + 6.5 = 24.3(\text{cm})$$

したがって、式(11)より $P=P_0=6(\text{t})$ となり、式(12)より約 3.1 年と推定される。

5. あとがき

以上路面でのたわみ量および曲率半径を知ることによって在来舗装の評価を行ない、さらに仮定を設けたうえで、簡単なオーバレイ厚さの設計法について二つの方法を示した。合理的な設計法としては、より詳細な検討、

解析を必要とすることはもちろんであるが、小規模な事あるいは今後とも増加するであろう地方道等の構造強化にあたっては、とりあえず簡便な設計法が必要である。現場実験については、建設省相武国道工事事務所および東京舗装(株)のご協力を得て一部開始されている。ここにご指導、ご協力頂いた多田宏行氏および埴原文弥氏に厚く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 藤原：「道路舗装の維持修繕」、道路建設講座 No. 7, 山海堂, 1970
- "Asphalt Overlays and Pavement Rehabilitation—1st. Ed.", The Asphalt Institute Manual 17, 1969
- Kingham, R.I. : "A Pavement Deflection Study to Develop an Asphalt Overlay Design Method", Proc. of A.A.P.T. Vol. 39, 1970
- 別所・山之口・達下：「道路舗装システム」、日刊工業新聞社, 1970
- Dunlap, W.A. and Stark, L.E. : "Deflection Test on Texas Highways", H.R.B. Bull 269, 1960
- Ford, M.C. and Bisselt, J.B. : "Flexible Pavement Performance Studies in Arkansas", H.R.B. Bull 321, 1962
- Dehlen, C.L. : "Flexure of a Road Surfacing its Relation to Fatigue Cracking, and Factors Determining its Severity", H.R.B. Bull 321, 1962
- Kung, K.Y. : "A New Method in Correlation Study of Pavement Deflection and Cracking", Proc. of 2nd Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements, Michigan, 1967
- Dehlen, G.L. : "A Simple Instrument for Measuring the Curvature Induced in a Road Surfacing by a Wheel Load", The Civil Engineer in South Africa, Vol. 4, No. 9, 1962
- Dehlen, G.L. : "An Investigation of Flexure Cracking on a Major Highway", Proc. of 1st. Conf. on the Structure Design of Asphalt Pavement, Michigan, 1962
- Odemark, N. : "Investigations as to the Elastic Properties of Soils and Design of Pavement According to the Theory of Elasticity", Statens Väginstitut, Medd 77, 1949
- Heukelom, W. and Klomp, A.J.G. : "Road Design and Dynamic Loading", Proc. of A.A.P.T., Vol. 33, 1964
- Klomp, A.J.G. and Niseman, J.W. : "Observed and Calculated Strains at Various Depth in Asphalt Pavement", Proc. of 2nd. Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements, Michigan, 1967
- Heukelom, W. and Klomp, A.J.G. : "Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction", Proc. of 1st Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements, Michigan, 1962
- Miura, Y. : "A Study of Stress and Stress in the Asphalt Pavement of Tomei Highway", Proc. of 3rd Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements, London, 1972

(1972.8.28・受付)