

アスファルト舗装のわだち掘れ予測方法に関する研究

THE PREDICTING METHOD FOR PERMANENT DEFORMATION OF ASPHALT PAVEMENTS

牛 尾 俊 介*
By Shunsuke USHIO

1. ま え が き

交通量の増大と車両の大型化によってアスファルト舗装のわだち掘れが助長され、道路舗装にとって大きな問題となっている。わだち掘れは自動車の繰り返し走行によって路面に横断方向の凹凸が生ずる現象であるが、この現象は舗装の構造、道路幅員、交通の質と量、横断方向への軌跡分布、気象条件、材料の特性等が影響して起こるもので複雑である¹⁾。

本研究はアスファルト舗装に交通車両によって生ずるわだち掘れの量を予測する実用的な方法を提案し、わだち掘れ問題の解明と解決への適用を提案するものである。

アスファルト舗装のわだち掘れに関する研究には大別して2つの流れがある²⁾。その一つは繰り返し三軸による圧縮またはクリープ試験による材料特性と舗装体の弾性層構造解析を組み合わせたものであり、他の一つはクリープ試験による材料特性を粘弾性層構造解析と組み合わせたものである。前者はアスファルト舗装体を層構造弾性体と考へて応力・変位の解析を行い、その応力・変位のもとでの材料のクリープ特性から変形量を求めるもので、Morris, Monismith, Brown, Hills, Van de Loo^{3)~7)}によるものが挙げられる。特に Van de Loo による考え方は A.A.P.T. への発表時にきわめて高い評価が与えられた⁷⁾。後者はアスファルト舗装体を粘弾性層構造体とみなし、各層の材料のクリープ特性を繰り返し荷重に対する粘弾性応答のコンプライアンスで表わし、累積永久変形量を求めるもので、Barksdale, Elliott, Moavenzadeh^{8)~10)}によるものが挙げられるが、この方法によって求められた結果は Hofstra, Klomp¹¹⁾による結果とよく一致しなかったとされている²⁾。従来、わだち掘れ現象はアスファルト舗装の表層に起こるものと

思われがちで、表層に用いられているアスファルト混合物の問題として処理される傾向があるが、現在では層構造全体の問題としてとらえる考え方が提案されている。

Claessen¹²⁾ らは Hills, Van de Loo の考え方を発展させて、アスファルト舗装の厚み設計にわだち掘れ変形の要素を取り入れる手法を提案した。この手法の中で繰り返し交通量のわだち掘れに与える影響を累積荷重時間で表わしているが、この考え方は、菅原¹³⁾がアスファルト混合物の変形抵抗の研究でホイールトラッキング試験を用いて明らかにした交通量の累積荷重時間への換算手法を基本としている。すなわちアスファルト混合物のクリープ特性を累積荷重時間によるアスファルトおよびアスファルト混合物のすぢフネス (S_{bit} および S_{mix}) で表現して、アスファルト層の変形計算に用いるものである。これらの研究は、層構造解析を適用したわだち掘れの計算による予測の可能性への道を開いた意味で高く評価されるが、実用的にはまだ不明な点も多い。なかでも舗装体の温度変化、交通量と走行速度の影響等の要素をどのように扱うかについて定まった考え方がなく、実際の長期実測データとの比較についても十分な検討が加えられていない。本研究は静的クリープ、ホイールトラッキング、曲げクリープおよび曲げ破壊の各試験から得られたアスファルト混合物のクリープ特性 (S_{bit} - S_{mix} の関係) を用いてわだち掘れの計算を行い、実測データとの比較検討を行うものである。

著者は先にアスファルト混合物のクリープ特性がアスファルト舗装のわだち掘れに大きく影響する要素であることを発表した¹⁴⁾、クリープを扱う場合には温度条件が支配的な要素である。本論文においては、アスファルトに時間・温度換算則¹⁵⁾を適用してアスファルト舗装体の温度の要素をアスファルトの種類による換算係数で表わした。そしてアスファルトおよびアスファルト混合物のクリープ特性を車の走行速度の影響を考慮した時間・温度の関数となる変形係数 (S_{bit} および S_{mix}) で表わ

* 正会員 工修 シェル石油(株)技術研究部

した。また、交通量のわだち掘れに与える影響に関する他の要素として車の横断方向の軌跡分布の影響をも導入した。

本論文においては、東名高速道路の代表的な舗装構造について計算を行い、高速道路調査会による追跡調査結果^{(16),(17)}と照合し、その妥当性を確認した。本手法により、わだち掘れの予測を行うことによって舗装構造の検討、安定処理工法の評価と選択等に有用な指針を与えることができ、わだち掘れの観点から舗装構造の評価を行うことができるとの考えに基づいてまとめたものである。

2. アスファルト舗装のわだち掘れ予測の計算モデル

著者の提案するアスファルト舗装のわだち掘れ予測の計算モデルを図-1に示す。

計算は弾性理論による層構造解析（アスファルト層に生ずる応力・変位を計算する）とアスファルト混合物のクリープによる変形係数を求める課程の2つからなり、

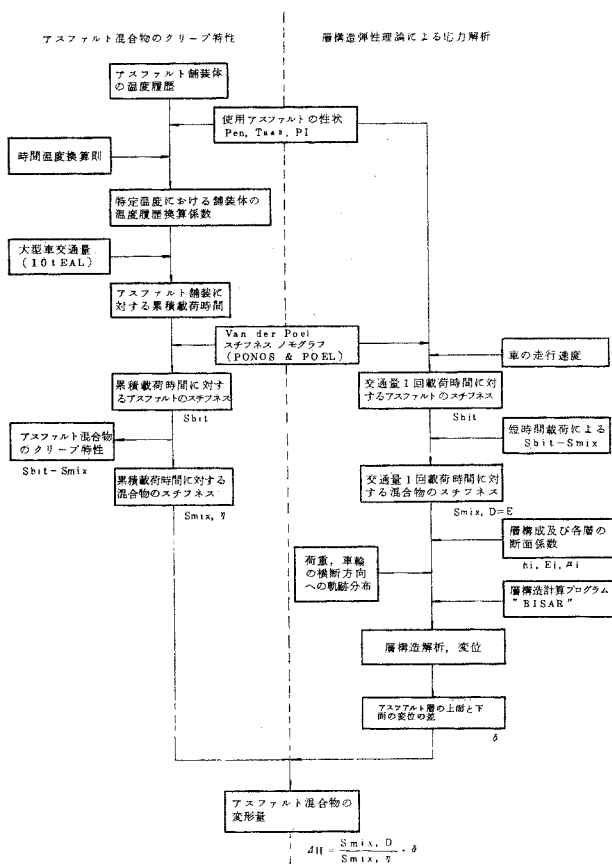


図-1 アスファルト舗装の変形モデル

最終的には舗装体のアスファルト混合物の変形量をおのの課程で求めた変位と変形係数より求める。この手法の特徴は、使用されるアスファルトの性状を計算に組み込むことができることであり、具体的にはアスファルトのスチフネスを弾性計算におけるアスファルト層の弾性係数 ($S_{mix, Dynamic} = S_{mix, D}$ で表わし、短時間载荷における回復ひずみを含む) とクリープ計算における混合物の変形係数 ($S_{mix, Viscoelastic} = S_{mix, \gamma}$ で表わし、長時間载荷における残留ひずみが支配的) として計算に直接用いることができる。これらの係数を求めるに際して温度条件、载荷条件の設定がきわめて重要である。著者は温度条件の設定に時間・温度換算則を用いて、舗装体が履歴する実際の時間・温度変化を特定の温度における時間に換算する手法をとり、時間の経過とともに舗装体の深さ方向で刻々変化する温度を代表する“特定温度の時間の長さ”に換算してアスファルトの種類に対応する換算係数で表わした。载荷条件の設定は、層構造解析で用いる $S_{mix, D}$ に対しては車の走行速度とタイヤの接地長から求まる車輪が1回通過する载荷時間（走行車輪の载荷時間）をとり、混合物のクリープ特性で用いる $S_{mix, \gamma}$

に対しては繰り返し車輪通過回数 N 、走行車輪の载荷時間 t_w およびアスファルトの種類による重みつき係数 w より “ $N \times t_w \times w$ ” を求めて载荷時間とした。したがって $S_{mix, D}$ と $S_{mix, \gamma}$ は異なった値であり、 $S_{mix, D}$ は短時間载荷におけるアスファルト混合物のスチフネスで弾性的性質が支配的な領域（回復ひずみが支配的）の弾性係数として扱うことができ、 $S_{mix, \gamma}$ は長時間载荷におけるアスファルト混合物のスチフネスで粘性的性質が支配的な領域（残留ひずみが支配的）のクリープによる変形係数として扱うことができる。

また、実際には車輪の横断方向の軌跡分布がわだち掘れ量に大きな影響を及ぼすので軌跡分布をも含めて計算する方法をとった¹⁾。

以下、計算モデルの細部について説明する。

3. 計算に用いたコンピュータプログラムおよび調査資料

a) PONOS & POEL

アスファルトの物理性状である針入度 (Pen)、軟化点 ($T_{R\&B}$) および針入度指数 (PI) のいずれか2つの値が既知である場合に任意の温度と载荷時間におけるアスファルトのスチフネス (S_{bit}) を計算するプログラムで、Van der Poel のノモグラフを計算機にシミュレートさせたものである⁽⁸⁾。本計算において $S_{mix, D}$ および $S_{mix, \gamma}$ を

求めるのに必要な $S_{bit,D}$ および $S_{bit,7}$ を求める計算に用いた。

b) BISAR

シェルグループが開発した多層構造弾性体の計算プログラムで、既知の等分布円荷重と各層の厚みと弾性係数およびポアソン比のデータをインプットすることにより、任意点の応力、ひずみ、変位を求めることができる¹⁹⁾。荷重は9個まで、層の数は8層まで計算が可能で、層の境界面が滑らかな場合と粗い場合について、いずれも計算が可能である。BISAR は舗装の層構造解析に世界的に広く用いられており、わが国でも建設省、運輸省、東京都、北海道大学等の各研究機関で利用に供されている。本計算において、前述の $S_{mix,D}$ をアスファルト層の弾性係数として、車輪の横方向軌跡分布を仮定して層構造計算を行った。

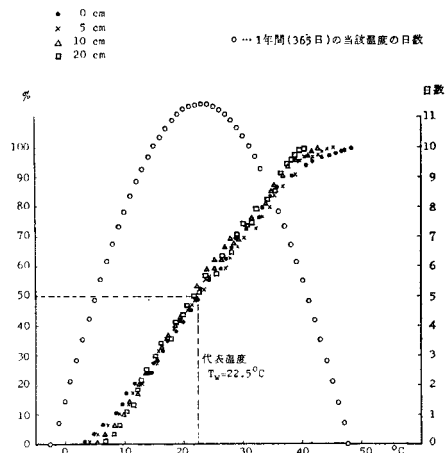
c) 調査資料

高速道路調査会は東名高速道路、中央高速道路における調査区間で日本道路公団が開通より10年間の長期にわたって追跡調査を行った資料に基づいてアスファルト舗装追跡調査解析結果報告書を発表した^{16),17)}。この資料は世界的にみてもあまり例のない貴重なものである。本論文では、この資料の中から路盤構造の異なる種類、すなわち、アスファルト安定処理とセメント安定処理を組み合わせたもの、セメント安定処理だけのもの、アスファルト安定処理だけのもの、そして粒調碎石路盤を有するもののタイプに分けた代表的な構造について表一に示すデータを按察して計算に用いた。

4. 舗装体の温度・時間換算係数の求め方

アスファルト混合物は温度により挙動が大きく異なることが特徴であり、特にアスファルトの温度・粘度特性が支配的な要因となる変形特性を論ずる場合には舗装体の温度分布をどのように取り扱うかが重要な要素である。アスファルト舗装は年間を通じて異なる温度を履歴しており、しかも大気温度と同一ではなく、時間帯と舗装体の深さ方向の位置によって刻々変化している。舗装体の温度に関する報文のおもなものとして、松野²⁰⁾、太田²¹⁾、近藤²²⁾らによるものがあるが、いずれも試験走路または実際の道路の試験区間に温度測定装置を埋め込んで長期(1~3年)にわたって舗装体の温度の観測を行い、大気、舗装表面の温度、深さ方向の温度分布について解析したものである。舗装体の表面は時間による温度変化の差が大きく、深くなるに従って差が小さくなる。またある深さの時間経過による温度の変化はかなり規則的であり、大気温度と相関がある。そして深さ方向の温度は舗装構成の違いによる影響をあまり受けていない

各深さにおける任意温度の累積頻度 (%)



図一 一年間の温度履歴累積時間(東京地区)

ことも大きな特徴である。いずれの測定結果においても最高大気温度 30℃ 前後に対し、舗装表面付近における舗装体の最高温度は 50℃ 前後で 20℃ も高い。しかしこのような高い温度は舗装体のごく表面に近い部分についてのみみられ、しかも一年間を通じて地域にもよるが数時間かあるいは数日間に過ぎない。近藤らは舗装体の任意時刻、任意深さの温度を月間平均気温から計算できる舗装体内温度の推定式を提案している²²⁾。著者はこの提案式に東京地区の月間平均気温²³⁾をあてはめて計算を行い、各深さにおける最低から最高までの1℃ごとの温度の累積時間を一年間に対する百分率で求め、図一2を得た。この結果は松野²⁰⁾による実測値ときわめてよく一致している。累積時間 0~10% および 90~100% の部分で深さにより累積時間と温度が多少異なるが、10~90%の部分では深さに関係なく各温度の累積時間はほぼ同じである。したがって最低または最高温度付近の深さによる若干の差異について平均値をとることにすると、各温度の累積時間を舗装体全体が各温度に保たれる時間の累積と考えることが可能である。図一2において各温度の年間頻度日数を1℃刻みで求め、重ねて示した。図一2の頻度日数によれば年間頻度日数が最も多い温度は累積温度の百分率が 50% となる点の温度であり、この温度を代表的な温度として他の温度の時間を代表温度の時間に換算して用いると計算はきわめて単純化できる。これは舗装体に用いられているアスファルト混合物のレオロジー特性に時間・温度換算則を用いれば可能となる。ここでは、“舗装体の温度履歴の累積時間が一年間の時間の長さに対する百分率で最大となる温度を舗装体の温度 T_w と定め、その温度に舗装体が保たれる時間の長さ(日)で一年間の時間の長さ(365日)を除いた値を温度履歴換算係数 w ”と定義することとする。

表一I 高速道路調査会調査資料(10,17)より抜粋して計算して用いたデータ

舗装の構造分類	アスファルト安定処理とセメント安定処理路盤												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
測点	T ₁	T ₂	T ₄	T ₁₃₋₁	T ₁₃₋₂	T ₁₃₋₅	T ₅	T ₉	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂	T ₁₅	
測点 No.	No.												
路床以上の層構造厚 (cm)	アスファルト表層	4			4		4	4	4	4	4	4	
	アスファルト基層	6			7		14	14	14	14	6	6	
	アスファルト安定処理	18			22						14	15	
	粒度調整砕石路盤						20		20				
	セメント安定処理		17		17			17					
切込み砕石路盤										17		15	
修正 CBR (%)	粒度調整砕石路盤材						98	125	154	140			
	セメント安定処理材	75	75	75	100	100	200	53					
ベンケルマンピームによる最大たわみ量 1/100 mm	切込み砕石路盤材								93	44	77	69	
	上層路床以下の平均 CBR	18.5	17.5	21.5	71.5	56.0	85.5	17.0	37.5	50.5	38.5	15.5	
交通量 (10t EAL)	68	37	53	23	33	27	51	67	48	60	47	90	
	415 456	434 168	189 125	488 809	475 589	421 073	488 809	475 589	421 073	421 073	192 263	266 028	
	775 421	871 795	545 292	903 365	880 187	790 190	903 365	880 187	790 190	790 190	550 288	500 777	
	1 092 704	1 308 347	887 133	1 333 951	1 289 252	1 155 213	1 333 951	1 289 252	1 155 213	1 155 213	901 920	1 228 411	
	2 100 652	2 514 789	1 896 991	2 519 333	2 457 105	2 227 980	2 519 333	2 457 105	2 227 980	2 227 980	1 933 870	1 388 907	
	4 511 056	5 209 474	3 863 575	4 942 827	5 641 567	5 206 310	4 942 827	5 641 567	5 206 310	5 206 310	3 953 890	2 681 104	
	5 605 502	6 456 136	5 821 409	7 131 012	7 752 407	7 245 729	7 131 012	7 752 407	7 245 729	7 245 729	5 953 036	4 004 661	
	3.17	3.17	4.00				5.83	4.00	5.17	4.33			4.67
	3.85	4.20	5.10	5.50	8.00	6.17	6.83	5.90	6.83	8.33	9.50	9.50	5.90
	4.20	4.90	5.65	6.40	8.65	6.50	8.25	7.15	7.80	9.20	9.80	9.80	7.55
6.33	6.83	7.50	9.17	11.00	8.50	13.33	10.67	10.67	12.67	12.67	12.67	7.67	
8.00	10.17	9.00	14.67	15.17	12.50	16.50	14.00	13.17	18.17	15.33	15.33	10.67	
10.00	13.50	10.17	19.50	12.67	10.67	23.50	18.50	18.50	16.17	19.33	19.33	15.00	
実測わだち押れ量 (mm)	10.00	13.50	10.17	19.50	12.67	10.67	23.50	18.50	18.50	16.17	19.33	15.00	
	3.17	3.17	4.00				5.83	4.00	5.17	4.33		4.67	
	3.85	4.20	5.10	5.50	8.00	6.17	6.83	5.90	6.83	8.33	9.50	9.50	
	4.20	4.90	5.65	6.40	8.65	6.50	8.25	7.15	7.80	9.20	9.80	9.80	
	6.33	6.83	7.50	9.17	11.00	8.50	13.33	10.67	10.67	12.67	12.67	12.67	
	8.00	10.17	9.00	14.67	15.17	12.50	16.50	14.00	13.17	18.17	15.33	15.33	

温度履歴換算係数を求めるためには、舗装体の各温度における履歴時間を温度 T_w における時間に換算しなければならない。時間・温度換算則はアスファルトの性状によって異なるアスファルト固有のシフトファクター a_T を用いて温度と時間の換算計算を行うもので、アスファルトおよびアスファルト混合物の研究によく用いられている²⁴⁾。

シフトファクター a_T に関しては、ある固有の温度 T_s について次式で表わされている。

$$\log a_T = \log \frac{\eta_T}{\eta_{T_s}} = \log \eta_T - \log \eta_{T_s}, \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

η_T : 任意温度 T における粘度, パスカル秒

η_{T_s} : アスファルト固有の温度 T_s における粘度, パスカル秒

式 (1) の T_s について、これまで定まった考え方がなく、アスファルトに対して式 (1) を有効に利用するうえで不便があったが、著者は先に、 T_s を等コンシステンシー温度と定め、 $T_{R\&B} - 8.5^\circ\text{C}$ の温度であることを明らかにして、 a_T の計算に関して次に示す実用式を提案した²⁵⁾。

$$\left. \begin{aligned} \log a_T &= \frac{-C_1(T - T_s)}{C_2 + (T - T_s)} \\ &= \frac{-C_1(T - T_{R\&B} + 8.5)}{C_2 + (T - T_{R\&B} + 8.5)} \\ C_1 &= -2.0836 \cdot PI + 24.7532 \quad (T < T_s) \\ C_1 &= -0.8527 \cdot PI + 8.2789 \quad (T > T_s) \\ C_2 &= C_1 \times (0.7609 \cdot PI + 10.9185) \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

ここで、

C_1, C_2 : 針入度指数 (PI) を変数とする定数

T : 任意温度 ($^\circ\text{C}$)

T_s : 等コンシステンシー温度 ($T_{R\&B} - 8.5^\circ\text{C}$)

すなわち、アスファルトの物理定数である針入度指数と軟化点が既知であれば任意の温度 T_i におけるシフトファクター a_{T_i} を式 (2) より容易に求めることができる。

いま、舗装体のある温度 T_i における履歴時間を DT_i とすると、舗装体が常に T_s の温度に保たれた場合の換算時間 t_{T_s} は次式で表わされる。

$$t_{T_s} = \sum \frac{DT_i}{a_{T_i}} \dots\dots\dots (3)$$

そして先に定義した温度 T_w における時間 t_{T_w} に次式を用いて換算する。

$$t_{T_w} = a_{T_w} \cdot t_{T_s} = a_{T_w} \cdot \sum \frac{DT_i}{a_{T_i}} \dots\dots\dots (4)$$

また一年間の時間の総和は日数で表わせれば 365 日であるから舗装体の温度履歴換算係数 w は定義に従い次式で計算する。

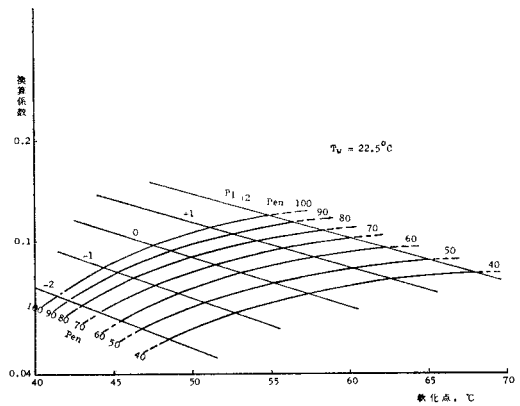


図-3 アスファルトによる舗装体の温度履歴換算係数 (東京地区……図-2 に示される舗装体の温度分布に対して)

$$w = \frac{365}{t_{T_w}} = \frac{365}{a_{T_w}} \cdot \frac{1}{\sum \frac{DT_i}{a_{T_i}}} \dots\dots\dots (5)$$

w は舗装体が常に T_w $^\circ\text{C}$ に保たれたと仮定したときの時間の長さが実際の時間の長さに対する割合を表わしており、交通荷重の累積載荷時間との積から T_w $^\circ\text{C}$ のときの累積載荷時間を求めることができる。これでわだち掘れに対する温度の複雑な影響をきわめて単純に表現することが可能となる。たとえば東京地区の月間平均気温のデータ²³⁾に対して各種アスファルトの w を求めた結果を図-3 に示す。このときの T_w は図-2 より 22.5°C である。

5. アスファルト混合物のクリープ特性

著者らは先に、各種アスファルト混合物について一軸圧縮クリープ試験、ホイールトラッキング試験、曲げクリープ試験、曲げ破壊試験からクリープ特性を求め、図-4 を得た¹⁴⁾。アスファルト混合物はアスファルトの種類、温度、載荷時間によって異なった性状を示すが、 S_{bit} と S_{mix} の関係で示すとアスファルトの種類、温度および時間の要素が消去されてほぼ一本の $S_{bit} - S_{mix}$ 曲線が得られる。図-4 からわかるように、この曲線は試験方法、混合物のタイプ、骨材の粒度などに起因するデータの違いを含むある幅をもったバンドとして示されるが、実質的には一本の線と考えて差し支えない。このことはアスファルト混合物の配合がある範囲内であれば、 S_{mix} は、 S_{bit} によってほぼ一義的に定まるものと解釈できることを示している。

Heukelom²¹⁾は各種アスファルト混合物について、 S_{bit} と S_{mix} の間に次の関係式が成立するとしている。

$$\frac{S_{mix}}{S_{bit}} = \left(1 + \frac{2.5}{n} \times \frac{C_v}{1 - C_v}\right)^n \dots\dots\dots (6)$$

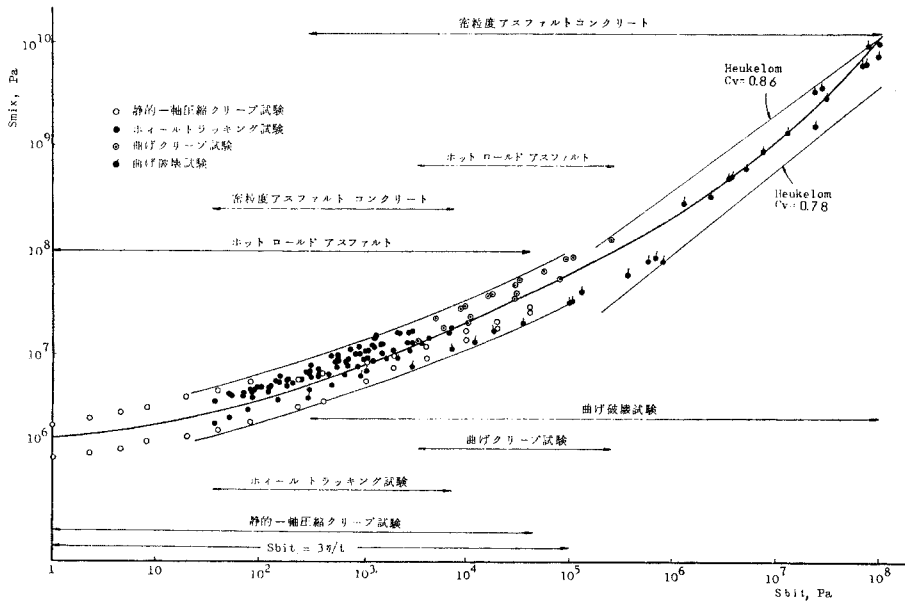


図-4 $S_{bit}-S_{mix}$ クリープ曲線

$$n = 0.83 \log \frac{4.08}{S_{bit}}$$

ここで、

S_{mix} : アスファルト混合物のスチフネス (Pa)

S_{bit} : アスファルトのスチフネス (Pa)

C_v : 混合物中の骨材の体積率 (%)

曲げ試験に用いた密粒度アスファルトコンクリートの C_v は 86%, 静的クリープ試験に用いたロードアスファルト混合物の C_v は 78% であるので式 (6) により計算すると 図-4 に示す 2本の直線が得られる。 $S_{bit} > 1 \times 10^5$ Pa において著者らによる $S_{bit}-S_{mix}$ 関係とよく一致するが $S_{bit} < 1 \times 10^5$ Pa においては式 (6) は成立していないことがわかる。したがって $S_{bit} = 1 \times 10^5$ Pa の近傍を境として $S_{bit}-S_{mix}$ の関係は異なった傾向を示し、 S_{bit} が 1×10^5 Pa 近傍以下においてはアスファルト混合物の種類よりもアスファルトのスチフネスあるいは粘度がクリープ特性を支配する領域であるといえる。 S_{bit} が 1×10^5 Pa 近傍以上においては 図-4 に示す実験結果と式 (6) による計算結果がよく一致することが確認されているが、この領域での実験データは密粒アスファルトコンクリートを用いた曲げ試験によるものであり、各種混合物 (異なる C_v をもつ混合物) を含んだ結論には至っていない。したがって S_{bit} が 1×10^5 Pa 近傍以下において S_{bit} が既知であれば 図-4 より S_{mix} を求めてアスファルト混合物の変形係数 $S_{mix,\eta}$ とすることができる。 S_{bit} は Van der Poel のノモグラフから得られるが、PONOS & POEL によって求めることもできる。また便宜的に次の方法で求めることも可能である。

等コンシステンシー温度 ($T_s = T_{R\&B} - 8.5^\circ\text{C}$) におけるアスファルトの粘度は 1×10^4 パスカル秒であることから次の式が成り立つ²⁵⁾。

$$S_{bitT_s} = \frac{3\eta T_s}{t} = 3.00 \times 10^4 \cdot \frac{1}{t} \text{ (Pa)} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

S_{bitT_s} : $T = T_s$ におけるアスファルトのスチフネス

ηT_s : $T = T_s$ における粘度 (1×10^4 パスカル秒)

t : 載荷時間

そして任意の温度 (T) における S_{bit} は式 (2) に示されるシフトファクター a_T を用いて次式より求まる。

$$S_{bit} = 3.00 \times 10^4 \cdot \frac{a_T}{t} \text{ (Pa)} \dots\dots\dots (8)$$

ただし式 (7) は S_{bit} の値が 1×10^5 Pa 近傍より低い値の領域で用いられる²⁵⁾。

図-4 に示される $S_{bit}-S_{mix}$ の関係はホイールトラッキング試験による繰り返し載荷条件によるものも含んでおり、遅延弾性、残留変形の影響を含めた変形係数を示しているものであり、自動車交通による繰り返し累積載荷時間に対して適用することができる。これでアスファルト混合物のクリープ特性を $S_{mix,\eta}$ なる一つの要素で表わすことが可能となった。この $S_{mix,\eta}$ にはアスファルトの種類、舗装体の温度履歴、交通量、車の走行速度の各種要素の影響をすべて含ませることができる。

6. 多層弾性論によるアスファルト層の変位の計算

著者はアスファルト舗装体を多層構造弾性体とみなし

て層構造解析を行う方法として BISAR コンピュータプログラムを用いた¹⁹⁾。計算は、車の車輪が舗装表面のある地点を1回通過するときの載荷時間 t_w に対する舗装構造の弾性応答を求めるもので、温度 T_w と載荷時間 t_w のときのアスファルトの S_{bit} から S_{mix} を求め、弾性係数 $S_{mix,D}$ として BISAR にインプットして用い、アスファルト層の変位量 δ (表面のたわみ) を求めるものである。計算にあたっては他の条件、たとえば路床、路盤の弾性係数、各材料のポアソン比を的確に定めることが重要である。以下に計算条件を詳述する。

(1) 輪荷重

交通量は対象とする道路の総交通量を 5 t 輪荷重に換算して表示する方法と 10 t 軸重に換算して表示する方法があるが、輪荷重で考えれば同じであり、輪荷重 $P=5$ t、タイヤ接地圧 (空気圧) $p=5.4 \times 10^5$ Pa、等分布円荷重の接地半径 a は通常用いられている次式で求められる。

$$a = (9.81 \times 10^7 \cdot P / \pi p)^{1/2} = \sqrt{\frac{9.81 \times 10^7 \times 5}{3.14 \times 5.4 \times 10^5}}$$

$$= 17.0 \text{ cm}$$

(2) 舗装体各層の弾性係数

舗装体各層材料の弾性係数に関する研究は多い。そのおもなものをまとめて示すと表-2 のようである^{26)~30)}。

著者は、表-1 に示す実際の舗装構造とベンケルマンビームによる最大たわみの実測値をもとに表-2 に示される考え方を比較検討した結果、舗装体各層の弾性係数を次のごとく設定した。

a) アスファルト混合物の弾性係数

時速 60 km/h 程度で走行する車輪が舗装体を通過する載荷時間は 0.02 秒程度とされており、非常に短時間

表-2 舗装体各材料の弾性係数

	アスファルト層	路床 (E_3)・路盤 (E_2)
Heukelom ²⁶⁾	$3.5 \times 10^9 \sim 6.5 \times 10^9$ Pa (10°C) $9.8 \times 10^9 \sim 1.5 \times 10^{10}$ Pa (5°C)	路盤材: $3.1 \times 10^9 \sim 2.0 \times 10^9$ Pa 路床材: 100 CBR $E_2/E_3 = 1.3 \sim 3.4$
Dormon ²⁷⁾	アス安定処理 $9.8 \times 10^9 \sim 2.0 \times 10^9$ Pa 表層・基層 9.8×10^9 Pa (5°C, 0.02 sec)	$E_2 = K_2 E_3$, $K_2 = 0.2 h_2$ $2 < K_2 < 4$ h_2 : 粒状路盤厚
Claessen ¹²⁾	$S_{mix,0.02sec} = E$	セメント安定処理 $4.9 \times 10^9 \sim 9.8 \times 10^9$ Pa
Bonnaure ²⁸⁾	ノモグラフ (アスファルト含有量, 骨材体積率)	—
久保 ²⁹⁾	$2.7 \times 10^9 \sim 2.9 \times 10^9$ Pa (10°C, 0.02 sec)	凍上性粘質土 2.1×10^7 Pa 細粒火山灰 8.1×10^7 Pa 切入砂利 $2.0 \times 10^9, 2.1 \times 10^9$ Pa 粒調碎石 2.6×10^9 Pa
植下 ³⁰⁾	多層弾性体変位の近似計算法	

載荷でアスファルト混合物のレオロジー特性を示すスチフネス $S_{mix,D}$ を弾性係数とみなす Claessen¹²⁾ らの考え方は妥当である。アスファルト混合物の短時間載荷における $S_{mix,D}$ の求め方は式 (6) によるもの、Bonnaure²⁸⁾ らによるノモグラフによるものなどがあるが本論文においては式 (6) を用いて $S_{mix,D}$ を計算により求めてアスファルト混合物の弾性係数とした。

b) 路床・路盤の弾性係数

表-2 に示される路盤の弾性係数と表-1 に示される路盤の CBR 値と比較すると、粒状路盤、セメント処理路盤のいずれに対しても、

$$\text{路盤の弾性係数} \approx 100 \times \text{路盤の CBR 値}$$

が適当である。

次に、路床の弾性係数を $n \cdot \text{CBR}$ として n を変化させ、BISAR プログラムによる計算たわみ量と表-1 に示されるベンケルマンビームによる実測たわみ量が等しくなる $n \cdot \text{CBR}$ を路床の弾性係数として実際の CBR 値と対応させて図-5 を得た。このとき、ベンケルマンビームの測定たわみ量は前後脚端を結んだ線上で、載荷の中心軸上のたわみ量 d_0 から中心より 3 m 離れた地点のたわみ量 $d_{3.0}$ と 5 m 離れた地点のたわみ量 $d_{5.0}$ を結ぶ線と中心軸が交わった点の直線の長さを差し引いたたわみ量 d_B として求められている [$d_B = d_0 - \{2.5(d_{3.0} - d_{5.0}) + d_{5.0}\}$]¹⁷⁾。したがって計算たわみ量も同じ計算を行って求めたものである。このとき、載荷速度は 0.16 秒 (4 km/h に相当) で計算した。

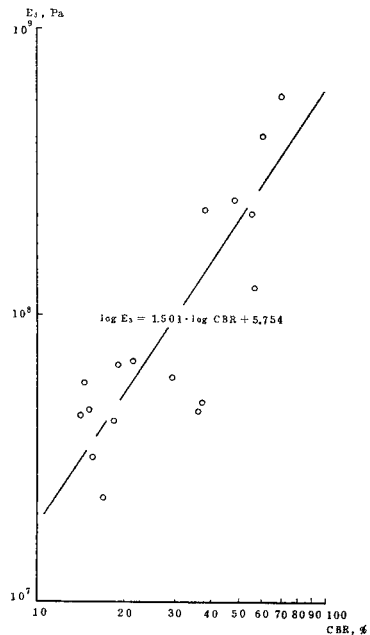


図-5 計算によるたわみ量と実測最大たわみが等しくなる路床の CBR 値と弾性係数

最終的に路床の弾性係数は 図-5 に示される関係式によって各構造の CBR 値に対応する弾性係数として求めた。

c) ポアソン比

本論文の計算においては各材料のポアソン比をいずれも 0.35 とした^{32), 33)}。

7. アスファルト層の変形量の計算

図-1 に示す計算モデルからわかるように、変形量の計算はアスファルト層のクリープ特性を求める計算と層構造の弾性計算とに分かれ、最終的に 2 つの計算結果を連結して変形量を求める。

アスファルト層の変形量の計算は混合物のクリープ特性を示す $S_{mix,\eta}$ と層中に生ずる鉛直応力の平均 σ_{av} を用いて行う。 $S_{mix,\eta}$ は応力・ひずみの関係から次式で表わされる。

$$S_{mix,\eta} = \frac{\sigma_{av}}{\epsilon_{mix}} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、

$S_{mix,\eta}$: アスファルト混合物の変形係数 (Pa)

σ_{av} : アスファルト層に生ずる鉛直応力の平均 (Pa)

ϵ_{mix} : アスファルト混合物のひずみ

また、アスファルト混合物のひずみ ϵ_{mix} は、

$$\epsilon_{mix} = \frac{\Delta H}{H} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、

ΔH : アスファルト層の垂直方向の変形量 (mm)

H : アスファルト層の厚さ (mm)

であるから、式 (9), (10) より

$$\Delta H = \frac{\sigma_{av} \cdot H}{S_{mix,\eta}} \dots\dots\dots (11)$$

となる。

式 (11) の σ_{av} に関し、Hills⁹⁾ らは次の式を提案している。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{av} &= Z \cdot \sigma_0 \\ Z &= \frac{\delta/H}{\sigma_0/E} \left(= \frac{E \cdot \delta/H}{\sigma_0} = \frac{\sigma_{av}}{\sigma_0} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、

Z : 接地応力 σ_0 においてアスファルト層に生ずる鉛直応力の平均 σ_{av} と σ_0 との比

H : アスファルト層厚 (mm)

E : アスファルト層の弾性係数 (Pa)

δ : アスファルト層の上面と下面の変位の差 (mm)

式 (11) の σ_{av} に式 (12) を代入して整理すると式 (13) が得られる。

$$\Delta H = \frac{E}{S_{mix,\eta}} \cdot \delta \dots\dots\dots (13)$$

式 (13) において $E = S_{mix,D}$ であり、アスファルト層が複数のときにも式 (13) は成立するから次の一般式を得る。

$$\Delta H_i = \frac{(S_{mix,D})_i}{(S_{mix,\eta})_i} \cdot \delta_i \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 i は i 番目のアスファルト層であることを示す。

したがってアスファルト層の総変形量は、 ΔH_i の総和として求められる。ここで計算される変形量はアスファルト層についてのみであり、路床、路盤の変形は取り扱わない。

8. 実際の道路におけるわだち掘れ深さと計算結果との比較

これまで舗装体のわだち掘れの計算方法について述べてきたが、以下に表-1 に示される実際の舗装構造および実測値に基づき計算例を示しながら検討を加える。舗装構造はアスファルト安定処理、セメント安定処理路盤を用いたもの 6 種類、粒状路盤を用いたもの 6 種類、計 12 種類を選んで計算を行った。

表-1 に示される調査区間に用いられたアスファルトの代表性状 (平均値) は次のごとくであった¹⁰⁾。

針入度 (1/10 mm)	93
軟化点 (°C)	47.0
針入度指数	-0.4

(1) 計算例

表-1 の No. 1 の構造を例にとって計算を進めることとする。

アスファルト表層・基層	10 cm
アスファルト安定処理路盤	18 cm
セメント安定処理路盤	17 cm
修正 CBR	75%
路床	平均 CBR 18.5%

a) アスファルト層の変形係数 $S_{mix,\eta}$ の計算

i) 舗装体の温度履歴係数 w

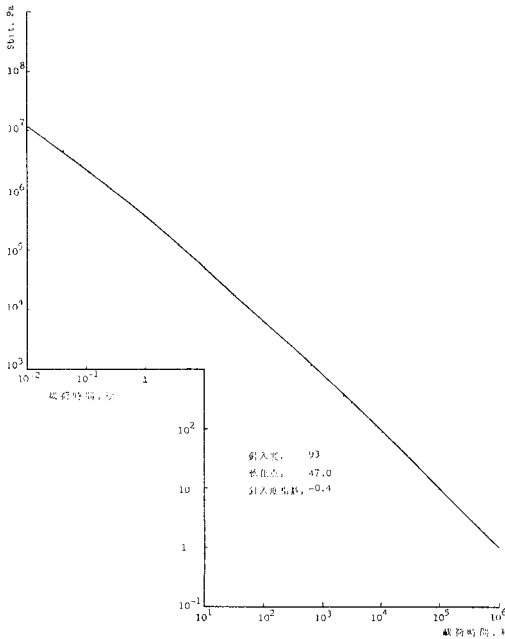
東京・名古屋間の温度の差は 1°C 内外であるので東京地区の月間平均気温を適用し、図-2、図-3 より、

$$T_w = 22.5^\circ\text{C}$$

$$w = 0.09$$

ii) 累積載荷時間 t

表-1 より、10 年間の 10 t 軸重換算交通量 N は 5 605 502 台である。車輪が 1 回通過するときの載荷時間 t_w を 0.02 sec とすれば、累積載荷時間 t は、



図—6 載荷時間と S_{bit} の関係 (PONOS & POEL より)

$$t = w \cdot N \cdot t_w = 0.09 \times 5605502 \times 0.02 = 1.01 \times 10^4 \text{ sec}$$

iii) S_{bit} および $S_{mix,\eta}$

アスファルトの性状から各種載荷時間におけるスチフネスは 図—6 のごとく得られ、 $t = 1.01 \times 10^4 \text{ sec}$ において、

$$S_{bit} = 8.46 \times 10 \text{ Pa}$$

図—4 より S_{bit} に対する S_{mix} を求めて、

$$S_{mix,\eta} = 3.85 \times 10^6 \text{ Pa}$$

となる。

b) 層構造解析による変位量 δ の計算

i) 路床・路盤の弾性係数 (E_{subg} および E_{base})

測定点 T_1 の路床、路盤の CBR 値および修正 CBR 値はおおの 18.5, 75 であるから、図—5 より路床の弾性係数は、

$$\log E_{subg} = 1.501 \log 18.5 + 5.754$$

$$\therefore E_{subg} = 4.57 \times 10^7 \text{ Pa}$$

路盤の弾性係数は、SI 単位に換算して

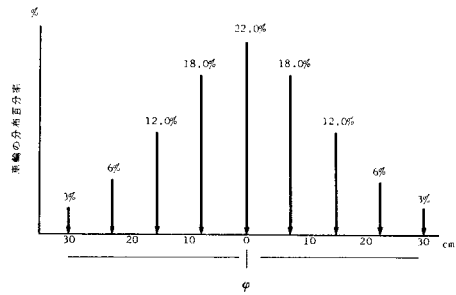
$$E_{base} = 100 \cdot \text{CBR} \times 9.807 \times 10^4 = 9.807 \times 10^6 \times 75 = 7.36 \times 10^8 \text{ Pa}$$

ii) S_{bit} および $S_{mix,D}$

$t_w = 0.02 \text{ sec}$ におけるアスファルトのスチフネスは 図—6 より、

$$S_{bit} = 7.39 \times 10^6 \text{ Pa}$$

調査区間に用いられているアスファルト混合物の C_v は、表層・基層用混合物で 0.845、アスファルト安定処理混合物で 0.865 であるから¹⁷⁾、式 (8) より、



図—7 車輪の横方向軌跡分布 (By S.F. Brown and C.A. Bell)

表層・基層の弾性係数

$$(S_{mix,D})_1 = 1.36 \times 10^9 \text{ Pa}$$

アスファルト安定処理層の弾性係数

$$(S_{mix,D})_2 = 2.05 \times 10^9 \text{ Pa}$$

iii) 荷重の横方向軌跡分布の影響

輪荷重は $5.4 \times 10^5 \text{ Pa}$ の接地圧で、接地半径 17 cm であるが、すべての車輪が同一地点を通過するわけではないので車輪の道路横断方向への分布状態を考慮に入れなければならない。わが国におけるこの種調査結果が見当たらないので、Browns⁹⁾ による累積載荷方法 (Cumulative Loading Procedure) を用いて 図—7 のごとき車輪の横方向軌跡分布があるものと仮定して BISAR プログラムの荷重項に 図—7 に示される横方向分布荷重を設定して計算を行った。

iv) アスファルト層の上面と下面の変位の差 δ の計算

BISAR プログラムにより計算されるアスファルト層の上面の変位を U_i 、下面の変位を U_{i+1} とすればアスファルト層の上面と下面の変位の差 δ_i は $U_i - U_{i+1}$ である。構造 No. 1 では、アスファルト層を表層・基層よりなる上層とアスファルト安定処理層を下層とした 2 層に分割して計算している。計算の結果、 $U_1 = 0.516$ 、 $U_2 = 0.504$ 、 $U_3 = 0.488$ が得られ、 δ_1 と δ_2 はおおの次のごとく得られた。

表層・基層の上面と下面の変位の差

$$\delta_1 = 0.516 - 0.504 = 0.012 \text{ mm}$$

アスファルト安定処理層の上面と下面の変位の差

$$\delta_2 = 0.504 - 0.488 = 0.016 \text{ mm}$$

c) 変形量 ΔH の計算

a), b) で得られた $S_{mix,\eta}$ 、 $S_{mix,D}$ および δ を用いて式 (14) により ΔH を計算する。

表層・基層の変形量

$$\Delta H_1 = \frac{1.36 \times 10^9}{3.85 \times 10^6} \times 0.012 = 4.24 \text{ mm}$$

アスファルト安定処理層の変形量

$$\Delta H_2 = \frac{2.05 \times 10^9}{3.85 \times 10^6} \times 0.016 = 8.55 \text{ mm}$$

アスファルト層の総変形量

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 = 12.79 \text{ mm}$$

以上の計算により、No. 1 における 10 年間の交通量

に対するわだち掘れ量の計算による予測は 12.79 mm である。これを表-1 に示す実測値 10.0 mm と比較するとほぼ一致していると考えられる。

(2) 計算結果と実測値との比較

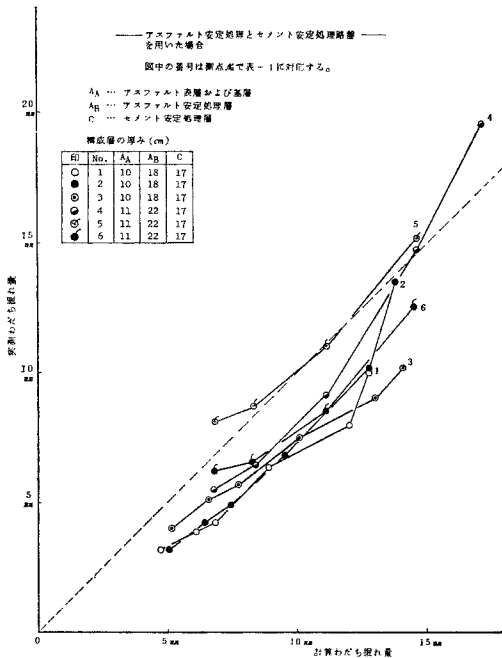
計算例と同様に表-1 に示す他の測定点すべてについて、交通開放後 5~10 年にわたる 1 年ごとのわだち掘れ量を計算して実測値との関連を調べ、図-8 (a), 図-8 (b) を得た。図-8 (a) は路盤にアスファルト安定処理とセメント安定処理を用いている構造についてのものである。図-8 (b) は路盤に粒度調整碎石と切込み碎石の組合せまたはいずれかをセメント安定処理と組み合わせたものと切込み碎石をアスファルト安定処理と組み合わせたもの、すなわち粒状路盤材を用いた構造についてのものである。この計算結果から以下のようなことが明らかになった。

i) 粒状路盤材を用いないでアスファルト安定処理路盤とセメント安定処理路盤を用いた構造では実測わだち掘れ量と計算わだち掘れ量はかなりよい一致を示している。

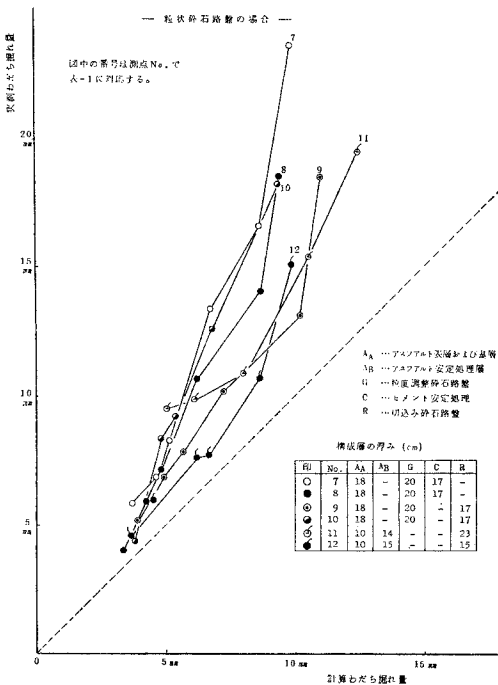
ii) 粒状路盤を用いたものは路盤構成の組合せのいかんにかかわらず、実測わだち掘れ量と計算わだち掘れ量はおよそ 1.5 : 1 の相関にあり、実測値の方が大きい。ここでは粒状路盤材の変形は扱っていないが、粒状材の変形量が実測値に含まれているものと思われる。Hicks, Monismith³⁴⁾ は粒状材の変位と応力にはレジリエンスの影響が現われるとしているが、粒状材の変形に関する研究例は少なく、明確な影響はわからない。今後、粒状路盤材の厚み、支持力、応力を要素とした変形に対する検討が必要である。

iii) No. 1~No. 3 の構造と No. 4~No. 6 の構造を比較すると、構成層は同じであるが後者の方がアスファルト層が 5 cm 厚くて路床、路盤の支持力 (CBR 値) が大きいにもかかわらずわだち掘れ量も大きくでている (図-8 (a) においてわだち掘れの量が大きい側にある)。このことは、重構造でアスファルト層が厚くなった場合アスファルト層の深い部分の変形も無視できないことを示しているのではなからうか。

これらの結果を総合すると、路床、路盤の強さ、アスファルト層の厚さがわだち掘れ量に影響を及ぼし、路盤構成材料 (アスファルト安定処理、セメント安定処理、粒状材) によっても影響を受けていることがわかる。特に路盤材のわだち掘れに及ぼす影響の解明は今後の大きな課題であらう。



(a)



(b)

図-8 実測わだち掘れ量と計算わだち掘れ量との比較 (経年)

9. アスファルト層の厚み、交通量、軌跡分布等がわだち掘れに及ぼす影響

(1) 各層の累積変形量

図-9 はアスファルト層の厚みとわだち掘れ量の関係である。アスファルト層が厚くなると変形量も増大し、累積交通量の増加とともに変形の割合も大きくなるのがわかる。

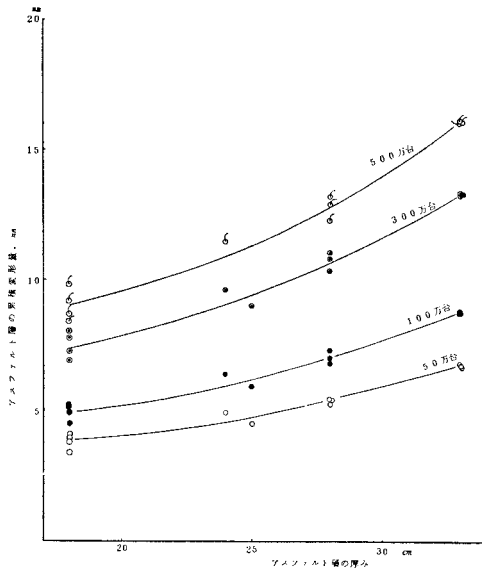


図-9 アスファルト層厚とアスファルト層の変形量

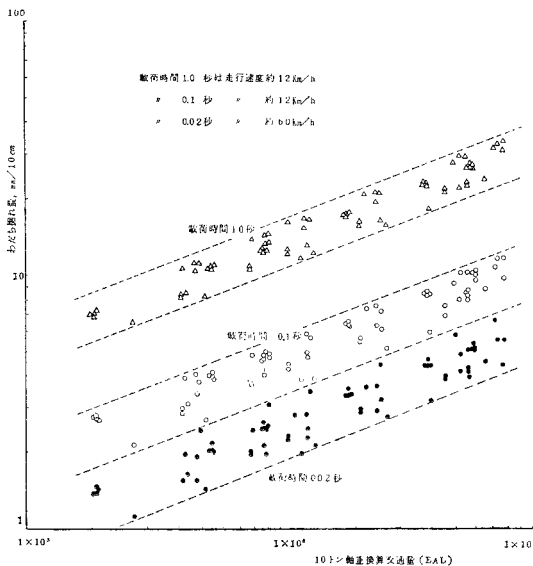


図-10 交通量とわだち掘れ量の割合 (アスファルト層 10cm 当たり)

(2) 交通量と走行速度の影響

交通の渋滞などで車のスピードが落ちた場合を考慮して、車速の違いによる検討を行った。図-10 は計算で得られた変形量をアスファルト層 10 cm 当たりの変形量に直して、車の走行速度の違いによる車輪の荷重時間 0.02 秒 (60 km/h), 0.1 秒 (12 km/h), 1.0 秒 (1.2 km/h) について、10 t 軸重換算交通量に対して求めたものである。アスファルト混合物の変形割合は、交通量の増大とよく相関しており、車の走行速度によっても大きく影響を受けることがわかる。たとえば、交通量 1×10^6 のとき、走行速度 60 km/h で変形割合が 2.5 mm/10 cm であるものは走行速度 1.2 km/h では 13 mm/10 cm となり 5 倍の影響があることがわかる。一般に交通渋滞の起こりやすい所はわだち掘れが大きいといわれているが、この結果からもうなずける現象である。

(3) 車輪の横方向軌跡分布の影響

図-11 は車輪の横方向の軌跡分布を考えた場合とすべての車輪が常に一点を通過すると考えた場合の計算によるわだち掘れ量の違いを示すものである。想定した軌跡分布を考慮に入れた場合、わだち掘れ量がおおよそ 50% 軽減されていることがわかる。軌跡分布は道路幅員によって大きく異なるものと思われ、軌跡分布とわだち掘れ

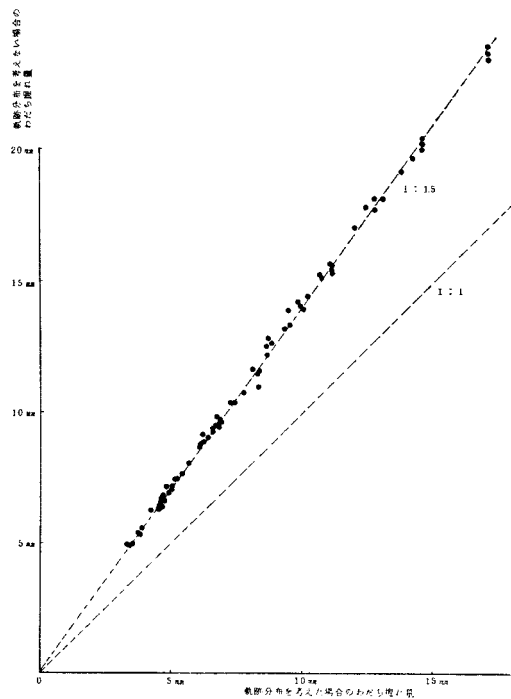


図-11 軌跡分布がある場合とない場合のわだち掘れ量の比較

の関係は今後さらに研究されなければならない課題である。

10. 結 論

以上、アスファルト混合物のクリープ特性と層構造解析理論を組み合わせて計算による舗装体のわだち掘れを予測する方法について述べたが、次のごとく結論を要約することができる。

(1) 舗装体が履歴する温度の取扱い方が重要である。方法として、時間・温度換算則を用いて代表的な温度に換算した履歴時間に置き換えると簡単に取り扱うことができる。

(2) アスファルトの種類(性状の違い)がわだち掘れに与える影響を温度履歴換算係数の導入によってわだち掘れの計算に反映させることができる。

(3) わだち掘れ量の計算値と実測値の比較により、路床・路盤の強度とアスファルト層の厚さがわだち掘れに大きな影響を及ぼすことが明白となった。

アスファルト層厚とわだち掘れ量は比例し、アスファルト層の厚みが大きくなるとわだち掘れ量も大きくなる。

(4) わだち掘れの量と交通量は対数で比例関係にあり、車輪通過の載荷時間(走行速度)によってわだち掘れ量は大きな影響を受ける。

(5) 車輪の横方向の軌跡分布はわだち掘れ量の大きさに大きな影響を及ぼす。すなわち軌跡分散は舗装のわだち掘れを軽減する効果があり、わだち掘れ量を少なくする点で有効である。安全率として 50% 程度を考えるとよいであろう。

11. あとがき

以上、わだち掘れの予測方法に関していくつかの示唆を得ることができたが、特に舗装体の温度履歴換算係数の採用によって実際の舗装体の温度分布を簡略な方法でわだち掘れ量の予測計算に反映できること、車輪通過載荷時間(走行速度)としてこれまで一般には 0.02 秒がとられているが、各種混合走行速度を有する一般道路における載荷時間のとり方が重要となること、軌跡分布のわだち掘れに与える影響から鑑みて、道路ごとの軌跡分布を知る必要があること等の各点に注目したい。

本論文では東名・中央の両高速道路の限定した構造と追跡調査資料を用いてわだち掘れ量の予測計算方法の検討を行ったが、今後わだち掘れに影響を及ぼす要因分析、材料の選択、あるいは構造設計等において参考になれば幸いである。

なお本論文をまとめるにあたって採用した実験および理論の解析は著者が英国のシェルソーントン研究所に在任中に携わったものが大部分で、Van de Loo らとの討議を交えたものであることを付記する。

最後に、本論文をまとめるにあたり一部資料の提供を含め、終始ご指導をいただいた北海道大学 菅原照雄教授、高橋 将技官、文献資料の使用を許可いただいた日本道路公団 川島義昭氏に対し深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 菅原照雄：アスファルト舗装の流動によるわだち掘れについて、道路建設，No. 395，pp. 44～50，1980年12月。
- 2) Monismith, C.L. : Rutting Prediction in Asphalt Concrete Pavements, Transportation Research Board, Transportation Research Record, No. 616, pp. 2～8, 1976.
- 3) Moris, J., R.C.G. Haas, P. Reilly and E.T. Hignell: Permanent Deformation in Asphalt Pavements can be predicted, Proc. of AAPT, Vol. 43, pp. 42～76, 1974.
- 4) Monismith, C.L. and D.B. Mclean : Estimation of Permanent Deformation in Asphalt Concrete Layers due to Repeated Traffic Loading, TRB, Transportation Research Record, No. 510, pp. 14～30.
- 5) Brown, S.F. and C.A. Bell : The Prediction of Permanent Deformation in Asphalt Pavements, Proc. of AAPT, Vol. 48, pp. 438～476, 1979.
- 6) Hills, J.F., D. Brian and P.J. Van de Loo : The Correlation of Rutting and Creep Tests on Asphalt Mixes, Institute of Petroleum, IP 74-001, January, 1974.
- 7) Van de Loo, P.J. : Creep Testing, a simple tool to judge Asphalt Mix stability, Proc. of AAPT, Vol. 43, p. 253, 1974.
- 8) Barksdale, R.D. and G.A. Leonards : Predicting Performance of Bituminous Surface Pavements : Proc., 2nd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Univ. of Michigan, pp. 321～340, 1967.
- 9) Elliott, J.F. and F. Moavenzadeh : Moving Load on Viscoelastic Layered System-Phase II. Department of Civil Engineering, MIT, Report R-69-64, 1969.
- 10) Moavenzadeh, F., J.F. Elliott and H. Findakly : Moving Load on Viscoelastic Layered Systems-Phase II : Addendum Department of Civil Engineering, MIT, Research Report. R 70-20, April, 1970.
- 11) Hofstra, A. and J.G. Klomp : Permanent Deformation of Flexible Pavements Under Simulated Road Traffic Conditions, Proc. of Asphalt Pavement, Univ. of Michigan, pp. 613～621, 1972.
- 12) Claessen, A.I.M., J.M. Edwards, P. Sommer and P. Uge : Asphalt Pavement Design, Proc. of the fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor, USA, Aug., 1977.
- 13) Sugawara, T. : Mechanical Response of Bituminous Mixture under various Loading Conditions, Proc. of the third International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, London, p. 343, 1972.
- 14) 牛尾俊介・菅原照雄：アスファルトの工学特性(第3報)、アスファルト混合物の変形特性、とくにクリープ特性に

- ついて、石油学会誌、第24巻、第4号、p. 209、1981年7月。
- 15) Williams, M.L., R.F. Lander and J.D. Ferry : The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Grass-Forming Higrad, J. Am. Chem. Soc., Vol. 77, 1955.
 - 16) 高速道路調査会 : アスファルト舗装追跡調査解析結果報告書、中間報告、1975年2月。
 - 17) 高速道路調査会 : アスファルト舗装追跡調査解析結果報告書、1976年2月。
 - 18) Bats, F.T. : Computer Simulation of Van der Poel's Nomograph, J. Appl. Chem., Vol. 4, p. 221, 1954.
 - 19) De Jong, D.L., M.G. Peutz and A.R. Korsmagen : Computer Program BISAR Layered Systems Under Normal and Tangential Surface Loads, Koninklijke/Shell Laboratorium, Amsterdam, External Report AMSR. 0006, 73, 1973.
 - 20) 松野三朗 : アスファルト舗装の温度について、土木技術資料、第5巻、第5号、pp. 28~30, 1963.
 - 21) 太田昌昭・久保 宏・熊谷茂樹・菅原竜蔵 : 舗装体の温度について、北海道開発局技術研究発表会資料、土木試験所、pp. 19~43, 1969年6月。
 - 22) 近藤佳宏・三浦裕二 : アスファルト舗装体内温度の推定に関する研究、土木学会論文報告集、No. 250, pp. 123~132, 1976年6月。
 - 23) 日本気象協会 : 気象庁年報、1980年1月。
 - 24) 菅原照雄・中島昭雄・笠原 篤 : アスファルト混合物の力学的性状の測定法(上)、舗装、第8巻、11号、1973年11月。
 - 25) 牛尾俊介 : アスファルトの工学特性(第2報)、広い温度領域に適用される粘度式について、石油学会誌、第23巻、第6号、pp. 376~384, 1980年11月。
 - 26) Heukelom, W. and A.J. G. Klomp : Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction, Proc. of the International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, USA, Aug., 1962.
 - 27) Dormon, G.M. : The Extension to Practice of a Fundamental Procedure for the Design of Flexible Pavements, Proc. of the International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Mich., USA, Aug., 1962.
 - 28) Bonnaure, F., G. Gest, A. Gravois and P. U'ge : A New Method of Predicting the Stiffness Modulus of Asphalt Paving Mixtures, Proc. of AAPT, Vol. 46, pp. 64~104, 1977.
 - 29) 久保 宏 : 寒冷地アスファルト舗装の設計に関する研究、学位論文、1980年。
 - 30) 植下 協 : 舗装の力学、舗装、pp. 31~34, 1973年6月。
 - 31) Heukelom, W. and A.J.G. Klomp : Road Design and Dynamic Loading, Proc. of AAPT, Vol. 33, p. 92, 1964.
 - 32) Nair, E. et al. : Applicability of a Linear Viscoelastic Characterization for Asphalt Concrete, Proc. of the Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement, Vol. 1, pp. 277~289, 1972.
 - 33) Bleyenberg, W.G. et al. : Fully Monitored Motorway Trials Corroborate Linear-Elastic Design Theory, Proc. of the fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement, Univ. of Michi., 1977.
 - 34) Hicks, R.G. and C.L. Monismith : Factors Influencing the Resilient Response of Granular Materials, HRB, pp. 15~31, 1971.

(1981.7.21・受付)